

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ВИКОНАННЯ ТРАНЗАКЦІЙ NFT З ВИКОРИСТАННЯМ БЛОКЧЕЙНУ ARTOS

Тамара Савчук

PhD, професор кафедри комп'ютерних наук,
Вінницький національний технічний університет,
вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, savchtam@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0061-6206

Олесь Гриценюк

студент кафедри комп'ютерних наук,
Вінницький національний технічний університет,
вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, ruboken@vntu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-3552-3218

У статті запропоновано удосконалений метод виконання транзакцій для генерації невзасмосамінного токена (NFT) завдяки інтеграції блокчейну Artos. Було проаналізовано галузь web 3.0, розглянуто особливості генерації NFT, визначено потенціал та слабкі сторони цього напрямку, серед яких особливої уваги заслуговує низька пропускна здатність блокчейну виконувати велику кількість транзакцій в одиницю часу, що впливає на швидкість генерації та стабільність процесу. Для розв'язання поставленого завдання було проаналізовано сучасні блокчейни Binance Smart Chain, Solana, Artos, що порівнювались за швидкістю виконання транзакцій, рівнем стабільності роботи, децентралізації та механізмом консенсусу. За результатами порівняння для вдосконалення методу генерації NFT було вибрано блокчейн Artos. Використання блокчейну Artos та вдосконалення методу генерації NFT дозволило усунути наявні слабкі сторони сучасного підходу до генерації NFT та виконання транзакцій. Завдяки запропонованому рішенням виріс рівень децентралізації та покращилось управління мережею через використання конвеєрної, модульної та паралельної обробки транзакцій. Основна роль модульної архітектури Artos у технології генерації NFT полягає у високорівневій децентралізації та масштабуванні мережі під час виконання транзакцій, що впливає на швидкість їх виконання. Проведено аналіз роботи паралельного алгоритму Block-STM у рамках інформаційної системи для генерації NFT. Як показали результати аналізу тестування, запропонований підхід дозволив підвищити рівень масштабування, збільшити пропускну здатність мережі, а також підвищити швидкість виконання транзакції до 160 тис. транзакцій за 1 секунду.

Ключові слова: валідатор, смарт-контракт, консенсус, токен, децентралізація.

Постановка проблеми. Процес генерації NFT залежить від блокчейну, в рамках якого відбувається. Сучасні рішення не дають можливості використовуватись напряму NFT у потрібних масштабах через наявні проблеми швидкості, стабільності роботи та інтеграції з іншими засобами, що визначає необхідність у пошуках та використанні нових блокчейнів, інтеграції в них процесу генерації NFT, при цьому слід враховувати зміни в архітектурі та алгоритмах виконання транзакцій. Таким чином, удосконалення методу генерації NFT є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині повністю реплікована база даних, іншими словами блокчейн, набула популярності у використанні, в тому числі з метою зберігання транзакцій для різних криптовалют. Проте технологія блокчейн може бути використана для будь-яких взаємопов'язаних інформаційних процесів. Прикладами використання блокчейну

є смарт-контракти, децентралізовані облікові можливості, NFT та інші децентралізовані рішення для вирішення задач у різних сферах [1].

Підтвердження унікальності та належності будь-якого цифрового активу є однією з важливих та необхідних функцій, що може бути забезпеченою завдяки генерації NFT. Технологія має великий потенціал у використанні, але має обмеження у потужностях використання, а тому не набула потенційного рівня популярності.

Незважаючи на існування багатьох блокчейнів сьогодні, широкого впровадження web3 ще не відбулося. Тоді як технології продовжують розвивати криптогалузь, наявні блокчейни є ще не готовими до масового використання, оскільки мають низку таких недоліків, як низький рівень надійності [2], високі ціни на комісії за транзакції для користувачів, низькі обмеження пропускної здатності, регулярна втрата активу через проблеми безпеки. Зазначені недоліки мають вплив

на швидкість генерації NFT. Це визначає актуальність задачі підвищення швидкодії у разі генерації NFT за рахунок зменшення загального часу на його створення, перекази та зберігання.

Важливою задачею у розробці децентралізованого додатка (DApp) [3] є вибір блокчейну, де фіксуватиметься підтвердження права власності на NFT. При цьому слід вибрати мережу, яка має високий рівень децентралізації та масштабування, завдяки чому забезпечується її стабільна робота, а швидкість виконання транзакцій буде не менше 65 тис. за секунду (що є на сьогодні максимально можливим значенням). Щоб вибрати блокчейн для генерації NFT порівняємо такі мережі, як Binance Smart Chain, Solana, Aptos.

Блокчейн мережа Binance Smart Chain (BSC) – створена для запуску програм на основі смарт-контрактів та BSC, що дозволяє користувачам отримати високу ємність транзакцій та функціональність смарт-контракту. Крім того, Binance Smart Chain також реалізує Ethereum Virtual Machine (EVM), що дозволяє запускати програми на основі Ethereum, такі як MetaMask [4]. Серед важливих особливостей є те, що цей блокчейн підтримує генерацію NFT у своїй мережі. Мета платформи – надати можливість розробникам створювати децентралізовані програми та допомогти користувачам керувати своїми цифровими активами з низькою затримкою та великою ємністю. Платформа працює на основі proof-of-stake, зокрема, proof-of-staked-authority. Власний токен Binance Coin може бути використаний для підвищення безпеки мережі та організації голосування за протоколи управління спільнотою. Проте потребує удосконалення в швидкості виконання транзакції та рівнях децентралізації [5].

Solana – це блокчейн третього покоління на Proof of Stake, який реалізовує унікальний спосіб створення надійної системи для визначення часу транзакції під назвою “Proof of History”. Набув популярності за рахунок масштабування та дешевих транзакцій. Максимальна кількість транзакцій за секунду в Solana – 65 тис. за секунду. Використовується для роботи з NFT, але харак-

теризується низькою стабільністю в роботі блокчейну [6].

Aptos – це блокчейн першого рівня, який заявляє, що його фокус спрямований на масштабованість та безпеку. Розробники використовують свою мову програмування Move. Серед його переваг є безпека пам'яті за рахунок запобігання помилок і витоків пам'яті. Безпечно зберігання важливої інформації (токени, смарт-контракти) [7] досягається за рахунок використання власного типу даних “resources”. Ресурси мають високий статус в архітектурі коду. Крім мови, високий рівень безпеки та стійкості блокчейну забезпечує модернізація консенсусу, де задіяні «оптимістичні» методи роботи з даними, а також використання AptosCore як технології для стабільної та надійної роботи валідаторів. Неактивні та схильні до злому/збою валідатори замінені на активні та безпечні. Крім безпеки, це вирішує проблему децентралізації процесу виконання транзакцій [8]. Важливою перевагою при цьому є підвищена швидкість обробки транзакцій – до 160 тис. транзакцій за секунду. Така пропускна здатність досягнута насамперед за рахунок модернізації механізму консенсусу. Протокол консенсусу є відокремленим від виконання транзакцій. Зазвичай протокол узгоджує транзакції, порядок їх виконання та результат. Aptos розділяє їх залежність один від одного, тим самим знижуючи навантаження. В основі цього консенсусу лежить технологія Block-STM, яка є механізмом паралельного виконання смарт-контрактів. BFT-протокол консенсусу здатний завершувати транзакції з точністю до секунди, а також визначати активні/неактивні валідатори. Блокчейн Aptos не має достатньої популярності, але його використання забезпечить високий рівень масштабування та децентралізації за пропускної спроможності 160 тис. транзакцій за секунду та за високого рівня стабільності роботи.

З таблиці 1, де наведено порівняльну характеристику різних блокчейнів для генерації NFT, видно, що Aptos є мережею блокчейн, яка відповідає всім необхідним значенням характеристик для ефективної роботи web-додатку, що генерує NFT.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика блокчейн для генерації NFT

	BSC	APTOS	SOLANA
Механізм консенсусу	PoA	PoS	PoH
Кількість транзакцій кл / сек	300 / сек	160 000 /сек	65,000/сек
Рівень децентралізації	мінімальний	високий	середній
Стабільність роботи	+	+	-
Популярність	висока	низька	висока

Ці значення включають понад 65 тис. транзакцій за секунду, високий рівень децентралізації та масштабування, а також стабільну роботу. Тому для реалізації інформаційної технології для генерації NFT доцільно використати блокчейн Aptos.

Виклад основного матеріалу. З метою усунення наявних слабких сторін сучасного підходу до генерації NFT та успішного виконання транзакцій пропонується до використання блокчейн Aptos, що, завдяки його архітектурі (конвеєрній, модульній та паралельній обробці транзакцій), дасть можливість по-новому задіяти методи обробки транзакцій NFT і підходи до децентралізації та управління мережею.

Важливим фактором є те, що обробка транзакцій буде розділеною і відбуватиметься окремими етапами, що забезпечуватиме підвищену пропускну здатність та можливість паралельної обробки даних. При цьому кожен етап є абсолютно незалежним та індивідуально розпаралеленим.

Модульний дизайн архітектури забезпечуватиме структурований шлях до масштабування валідаторів за межами однієї одиниці, надаючи доступ до додаткових обчислень, мережевих ресурсів і ресурсів зберігання [9].

На рисунку 1 показано життєвий цикл транзакції на різних етапах обробки даних. Модульна обробка сприятиме оптимізації швидкості виконання транзакцій у разі генерації NFT. Транзакції в такому випадку групуються в модулі кожним валідатором під час розповсюдження, а партії будуть об'єднуватись у блоки під час консенсусу [10]. Виконання, зберігання та етапи сертифікації

записів транзакцій зможуть працювати у групах, щоб забезпечити можливості для зміни порядку, скорочення операції (наприклад, повторне обчислення або перевірка підпису) і паралельне виконання, що, своєю чергою, вплине на швидкість виконання транзакцій у разі генерації нових NFT. Модульний підхід забезпечує визначення пріоритетів транзакцій, а також захист від атак відмови в обслуговуванні (DoS).

Досягти підвищення швидкості виконання транзакцій під час генерації NFT у мережі Aptos можна за рахунок використання паралельного алгоритму виконання транзакцій. Постійне розширення кількості транзакцій забезпечується тим, що валідатори постійно передають один одному модулі транзакцій, одночасно використовуючи всі доступні ресурси мережі. Кожна партія транзакцій, що розповсюджується валідатором, зберігається, а підпис у модульному дайджесті надсилається назад до валідатора. Відповідно до вимог консенсусу будь-які зважені підписи ($2f+1$) у модульному дайджесті є доказом виконання транзакції. Такий доказ гарантує, що «чесні» валідатори мають принаймні ($f+1$) зважених ставок зберігання модулю, а тому всі чесні валідатори зможуть отримати його перед виконанням [10].

Паралельне виконання транзакцій забезпечується тим, що після впорядкування метаданих консенсусного блоку транзакції можуть виконуватися будь-яким валідатором, повним вузлом або клієнтом. Цікавою особливістю механізму паралельного виконання Block-STM є виявлення та керування конфліктами для впорядкованого

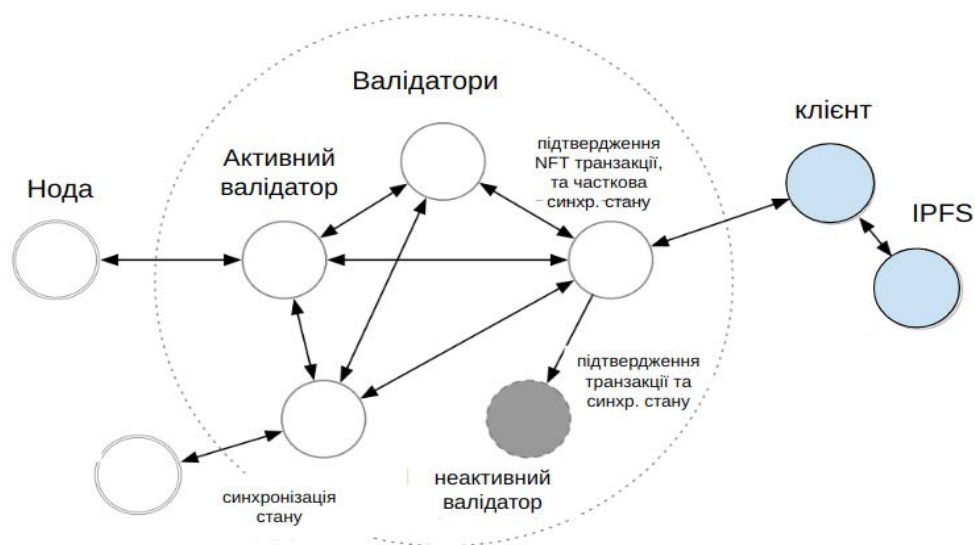


Рис. 1. Архітектура Aptos у разі генерації NFT

набору транзакцій разом із оптимістичним керуванням паралелізмом з метою забезпечення максимального результату. Модулі транзакцій перевіряються після виконання. Невдалі перевірки призводять до повторного виконання. Завдяки впровадженню цього підходу виконання транзакцій у технологію генерації NFT досягається підвищення швидкості їх виконання та стабільність виконання генерації під час можливих високих навантажень на мережу.

Під час процесу генерації NFT автор має можливість приватизувати певний цифровий ресурс і зберегти цей факт присвоєння у середині історії транзакцій децентралізованого блокчейну [11]. Важливим є те, щоб користувач міг це зробити без будь-яких ускладнень, без додаткових зусиль щодо організації процесу роботи мережі. Для цього реалізовується інтерфейс з формами та кнопками, з якими можна інтуїтивно працювати. Після підключення криптогаманця та успішного заповнення форм на генерацію NFT інформацію обробляє сервер, де відбувається запит до валідаторів мережі для підтвердження виконання транзакції. У разі успіху генерується хеш у протоколі децентралізованого зберігання даних (IPFS), на основі якого у смарт-контракті генерується уже потрібний NFT, що передається до сервера, який, своєю чергою, передає успішність операції на користувацьку частину, де результат стає доступним взаємодії. Після цього в мережі блокчейн до адреси криптогаманця буде доданий NFT-токен, який відображується у View модулі для подальшого його використання.

Отже, удосконалений метод генерації NFT включатиме такі основні етапи (рис. 2):

Крок 1. Підключення криптогаманця з підтримкою Aptos.

Крок 2. Підключення до мережі Aptos.

Крок 3. Внесення даних про NFT.

Крок 4. Завантаження зображення та формування запиту на сервер.

Крок 5. Запит на збереження NFT даних в IPFS.

Крок 6. Отримання IPFS хеш та збереження його за id криптогаманця.

Крок 7. Використання IPFS хеш для генерування NFT токена завдяки смарт-контракту.

Крок 8. Виконання транзакції в мережі Aptos та отримання результату генерування.

Крок 9. Використання публічного ключа криптогаманця для перевірки наявності у ньому нового NFT.

Реалізація запропонованого удосконаленого методу генерації NFT передбачає у струк-

турі відповідної інформаційної технології такі складники.

Введення вхідних даних, завантаження зображення, виведення результатів виконуватиметься модулем взаємодії із користувачем View.

Складник Actions забезпечує зв'язок з модулем для роботи зі смарт-контрактами, модулем для роботи зі сховищем IPFS, отриманням результатів і оновленням Store на основі отриманих даних.

Всі вхідні дані опрацьовуються в модулі роботи з вхідними даними і передаються у модуль для роботи зі сховищем IPFS.

У модулі для роботи зі сховищем IPFS відбувається підключення до API-сервісу з метою передачі та збереження даних.

Після цього відповідь із сервісу разом з IPFS хешем передається в модуль для роботи зі смарт-контрактами.

У модулі для роботи зі смарт-контрактами формуються NFT смарт-контракти, які виконуються в блокчейні Aptos, а також опрацьовуються результати транзакцій, їх передача в модуль для вхідних даних, за чим слідує оновлення Store. Оновлення Store супроводжується оновленням інтерфейсу користувача.

Сервіси вміщують у собі набір методів для роботи з мережею і NFT. А завдяки можливості підключати сервіси в компоненти їх методи можна використовувати в будь-якому потрібному місці.

Для управління потоком даних в інформаційній технології буде використовуватись фреймворк NgRx, який повністю наслідує архітектуру Flux, але при цьому працює на базі фреймворку Angular.

Стан програми відповідає за дані, необхідні для правильного відображення інтерфейсу користувача. Прикладами можуть бути: процес генерації NFT, стан активів на криптогаманці.

NgRx складається з чотирьох структурних частин:

- централізованого стану, що є глобальним об'єктом, який не є доступним до зчитування та змін;

- чистих функцій Reducer, що містять логіку для зміни та оновлення глобального стану, завдяки тому, що в результаті свого виконання повертають новий стан з усіма необхідними змінами;

- об'єкти Actions, які описують, як саме потрібно змінити стан. Вони можуть містити параметри для передачі, основна задача – запустити функцію для оновлення стану;

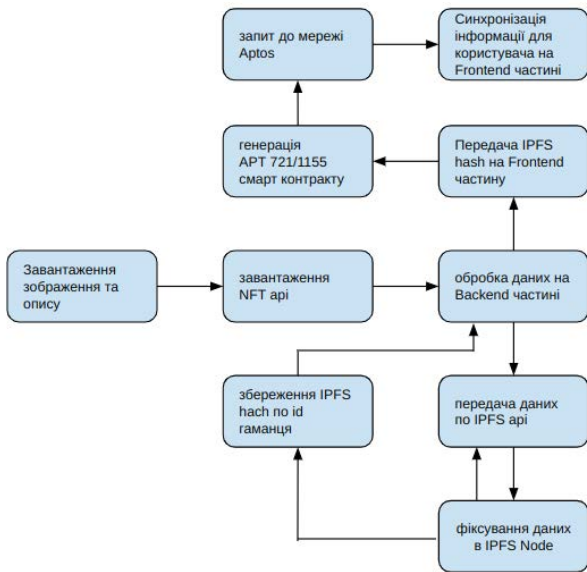


Рис. 2. Удосконалений метод генерації NFT

– підписки Subscriptions необхідні для доступу до значень, які зберігаються в глобальному стані. Вони використовуються всередині компонентів додатку, що відповідають за інтерфейс.

Життєвий цикл роботи NgRx включає:

- 1) генерацію об'єкта Action, який описує зміни стану додатка;
- 2) формування нового стану з урахуванням об'єкта Action. При цьому функція формування нового стану (reducer) зберігає алгоритм дій на кожен можливу подію, після виконання яких повертається новий стан додатка;
- 3) оновлення інтерфейсу на підставі змін глобального стану, що відслідковуються підписками subscriptions у компонентах.

Отже, структура інформаційної технології для генерації NFT з урахуванням запропонованих складників матиме вигляд, представлений на рисунку 3.

Таким чином, запропонована структура інформаційної технології для генерації NFT дозволить стабільно та ефективно отримувати дані користувача, опрацьовувати їх та повертати користувачу в зручному та зрозумілому вигляді за рахунок взаємодії таких модулів View, Store, модулю для роботи з IPFS, модулю роботи з вхідними та вихідними даними, модулю роботи зі смарт-контрактами.

Для оцінки потенціалу паралельного виконання транзакцій за алгоритмом Block-STM у блокчейні Aptos для можливих генерацій NFT було проведено експерименти з тривіальними одноранговими транзакціями [12] як ізольовані контрольні тести лише для виконання транзакцій з генерації NFT із бази даних у пам'яті. На рисунку 4 представлено результати виконання Block-STM.

Кожен блок містить 10 тис. транзакцій, а кількість облікових записів визначає рівень конфліктів і суперечок. У разі низької конкуренції Block-STM досягає 16-кратного прискорення порівняно з послідовним виконанням із 32 потоками, а в умовах високої конкуренції Block-STM досягає понад 8-кратного прискорення. Оптимізація для паралельного виконання транзакцій, а також додавання рандомізації забезпечують можливість зміни порядку, підвищують продуктивність роботи мережі, що сприяє зростанню швидкості виконання транзакцій у разі генерації NFT.

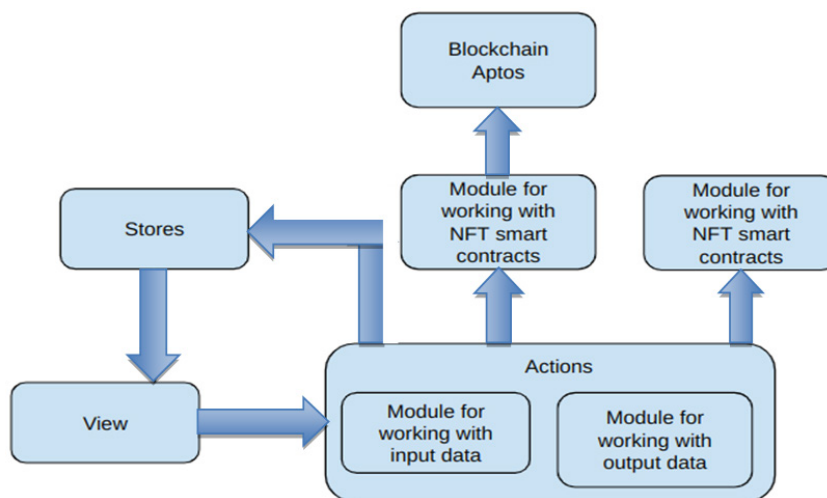


Рис. 3. Структура інформаційної технології для генерації NFT

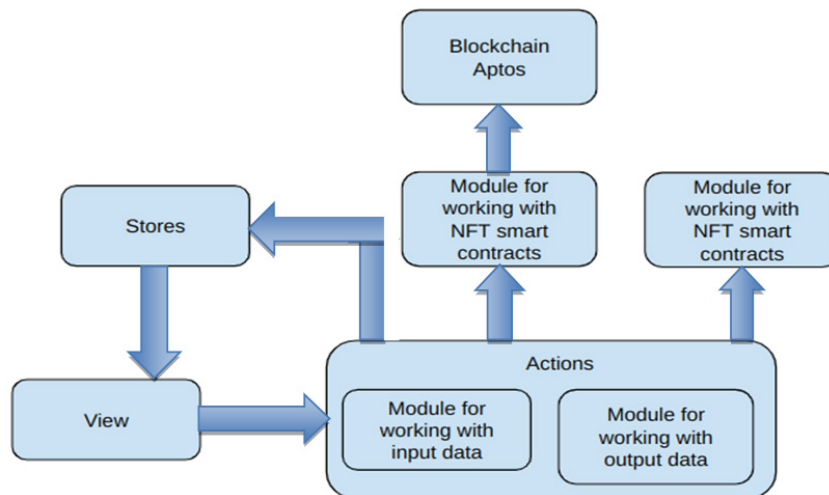


Рис. 4. Тест блокчейну Block-STM за максимального навантаження (одночасне виконання транзакцій)

Висновки. Порівнюючи результати роботи відомих методів для задачі генерації NFT, які використовують блокчейни Binance Smart Chain (BSC), Solana та інші, з результатами розробленого методу, можна побачити значне покращення в швидкості процесу генерації. За результатами тестування пропускна здатність розробленого методу здатна набувати до 160 тис. транзакцій за секунду порівняно з наявними рішеннями, що базуються на блокчейні Solana (65 тис. транзакцій за секунду) та BSC (100 транзакцій за секунду). Притому, що Solana має низку вразливостей у разі використання, результатами чого є повна зупинка роботи мережі. Отже, з метою збільшення швидкості генерації NFT у разі виконання транзакцій було вибрано блокчейн Aptos, що характеризується гнучкою та модульною архітектурою, а також паралельною обробкою транзакцій на основі механізму Block-STM та консенсусу PoAv за значних навантажень на мережу, не втрачаючи при цьому рівня безпеки та ефективності її роботи. Зазначені властивості особливого значення набувають під час генерації NFT у великих масштабах. На основі вибраного блокчейну було розроблено метод генерації NFT з використання фреймворку NgRx для забезпечення стабільного керування станом процесу генерації NFT. Запропоноване рішення характеризується підтримкою частих оновлень, швидким впровадженням останніх технологічних покращень і підтримкою для нових галузей застосування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kostyuchenko V., Kalenyuchenko A., Tsopa K. Prerequisites for non-fungible token accounting.

InterConf. 2022. No. 15(117) P.35–42. DOI: 10.51582/interconf.19-20.07.2022.004.

2. Zheng Xiaoying, Yongxin Zhu, Xueming Si. A Survey on Challenges and Progresses in Blockchain Technologies: A Performance and Security Perspective. *Applied Sciences* Vol. 9. No. 22. DOI: 10.3390/app9224731.

3. The Role of Transaction Finality and Speed in the NFT Minting Process : вебсайт. URL: <https://www.algorand.com/resources/blog/role-of-transaction-finality-speed-in-nft-minting> (дата звернення: 12.01.2023).

4. Таранюк Л.М., Гаврилова В.В., Шевельова Д.С. Потенціал розвитку технології Blockchain. Thesis. Сумський державний університет, 2017. С. 71–73.

5. Palm Emanuel. Implications and Impact of Blockchain Transaction Pruning. Thesis. Lulea, 2017. 36 p.

6. Solana basis : вебсайт. URL: <https://solana.com/ru/learn/blockchain-basics> (дата звернення: 22.12.2022).

7. Sitharama S. Iyengar, Sanjeev Kaushik Ramani, Buke Ao. Fusion of the Brooks – Iyengar Algorithm and Blockchain in Decentralization of the Data-Source. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2019 P. 35–42. DOI: 10.3390/jsan8010017.

8. Belose Rahul Dattaram, Yogesh Ramesh Mhadgut. Study on Non-Fungible Tokens (NFT). *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. Vol. 10, No. 7 2022. P. 558–61. DOI: 10.22214/ijraset.2022.45327.

9. Wu Yaqin, Pengxin Song, Fuxin Wang. Hybrid Consensus Algorithm Optimization: A Mathematical Method Based on POS and PBFT and Its Application in Blockchain. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. P. 1–13. DOI: 10.1155/2020/7270624.

10. Johar Sumaira, Naveed Ahmad, Warda Asher, Haitham Cruickshank, Amad Durrani. Research and Applied Perspective to Blockchain Technology: A Comprehensive Survey. *Applied Sciences*. Vol. 11, No. 14. DOI: 10.3390/app11146252.

11. Юхимчук М. Принцип ближньої дії в децентралізованих кіберфізичних системах із неперервними об'єктами. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук : КрНУ, 2022. Вип. 4. С. 69–74

12. The Aptos Blockchain Whitepaper : вебсайт. URL: <https://aptos.dev/assets/files/AptosWhitepaper47099b4b907b432f81fc0effd34f3b6a.pdf> (дата звернення: 25.12.2022).

IMPROVED NFT TRANSACTION METHOD ON THE APTOS BLOCKCHAIN

Tamara Savchuk

PhD, Professor of the Department of Computer Sciences,
Vinnytsia National Technical University, Khmelnytske Shosse, 95, Vinnytsia, 21021, savchtam@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0061-6206

Oles Hrytseniuk

Student of the Department of Computer Sciences,
Vinnytsia National Technical University, Khmelnytske Shosse, 95, Vinnytsia, 21021, ruboken@vntu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-3552-3218

This article proposes an improved transaction execution method for the generation of a non-fungible token (NFT) thanks to the integration of the Aptos blockchain. The web 3.0 industry was analyzed, the features of NFT generation were considered, the potential and weaknesses of this direction were determined, among which the low bandwidth of the blockchain to perform a large number of transactions per unit of time, which affects the generation speed and process stability, deserves special attention. To solve the problem, modern blockchains Binance Smart Chain, Solana, Aptos were analyzed and compared according to the speed of transactions, the level of stability of work, decentralization and the consensus mechanism. Based on the results of the comparison, the Aptos blockchain was chosen to improve the NFT generation method. Using the Aptos blockchain and improving the NFT generation method made it possible to eliminate the existing weaknesses of the current approach to NFT generation and transaction execution. Thanks to the proposed solution, the level of decentralization has increased and network management has improved through the use of pipelined, modular and parallel transaction processing. The main role of the Aptos modular architecture in the NFT generation technology is the high-level decentralization and scaling of the network during the execution of transactions, which affects the speed of their execution. The analysis of the work of the parallel Block-STM algorithm within the framework of the information system for the generation of NFT was carried out. As the results of the test analysis showed, the proposed approach made it possible to increase the level of scaling, increase the bandwidth of the network, and also increase the transaction speed up to 160 thousand transactions in 1 second.

Key words: validator, smart contract, consensus, token, decentralization.

REFERENCES

1. Kostyuchenko V., Kalenychenko A., Tsopa K. (2022). Prerequisites for non-fungible token accounting. *InterConf*, No. 15. P.35–42. DOI: 10.51582/interconf.19-20.07.2022.004.
2. Zheng Xiaoying, Yongxin Zhu, and Xueming Si. (2022). A Survey on Challenges and Progresses in Blockchain Technologies: A Performance and Security Perspective. *Applied Sciences*, 9, No. 22 4731. DOI: 10.3390/app9224731.
3. The Role of Transaction Finality and Speed in the NFT Minting Process. Retrieved from: <https://www.algorand.com/resources/blog/role-of-transaction-finality-speed-in-nft-minting>.
4. Taranyuk, L.M., Havrylova, V.V., Shevel'ova, D.S. (2017). *Potensial rozvytku tekhnolohiyi Blockchain*. Thesis, Sums'kyi derzhavnyi universytet. Retrieved from: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/64283> [in Ukrainian].
5. Palm, Emanuel. (2017). *Implications and Impact of Blockchain Transaction Pruning*. Thesis, Lulea tekniska universitet, Institutionen för system- och rymdteknik. Site of universitet. Retrieved from: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-64986>.
6. Solana basis. Site of crypto blockchain project Solana. Retrieved from: <https://solana.com/ru/learn/blockchain-basics>.
7. Sitharama S. Iyengar, Sanjeev Kaushik Ramani, Buke Ao. (2019). *Fusion of the Brooks – Iyengar Algorithm and Blockchain in Decentralization of the Data-Source*. Site of journal *Sensor and Actuator Networks*. Retrieved from: <https://www.mdpi.com/2224-2708/8/1/17/pdf?version=1551877023>.
8. Belose Rahul Dattaram, Yogesh Ramesh Mhadgut. (2022). *Study on Non-Fungible Tokens*. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, No. 7. DOI: 10.22214/ijraset.2022.45327.
9. Wu Yaqin, Pengxin Song, Fuxin Wang. (2020). *Hybrid Consensus Algorithm Optimization: A Mathematical Method Based on POS and PBFT and Its Application in Blockchain*. *Mathematical Problems in Engineering*, P. 1–13. DOI: 1155/2020/7270624.
10. Johar Sumaira, Naveed Ahmad, Warda Asher, Haitham Cruickshank, Amad Durrani. (2021). *Research*

and Applied Perspective to Blockchain Technology: A Comprehensive Survey. Applied Sciences, No. 14. DOI: 10.3390/app11146252.

11. Yukhymchuk, M. (2022). Prynysyp blyzhn'oyi diyi v detsentralizovanykh kiberfizychnykh systemakh iz neperervnymy ob'yektamy «Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhayla

Ostrohrads'koho». Kremenchuk: KrNU. Vypusk 4. Site of journal. Retrieved from: http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/statti/2022_4_9.pdf [in Ukrainian].

12. The Aptos Blockchain Whitepaper. Site of crypto blockchain project Aptos. Retrieved from: <https://aptos.dev/assets/files/Aptos-Whitepaper-47099b4b907b432f81fc0effd34f3b6a.pdf>.

Стаття надійшла 19.02.2023