



О. В. Палка

Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна

АНАЛІЗ ІНТЕГРОВАНОЇ АРХІТЕКТУРИ РОЗУМНОГО МІСТА З БЛОКЧЕЙНОМ ТА ІОТ

Зосереджено увагу на тому, що удосконалення інтернету речей став концепцією зростання та розвитку розумного міста, адже, надаючи різноманітні інтелектуальні додатки, такі як інтелектуальний транспорт, промисловість 4.0 і розумне фінансування, вони можуть покращити якість життя своїх мешканців. Розумні міста, засновані на сучасних інформаційних технологіях, є потребою сьогодні для вирішення проблем урбанізації та покращення загального добробуту громадян. Оскільки обмін даними має важливе значення для сприяння системній інтеграції міських секторів, насамперед розвитку розумних його складових, то існує потреба в децентралізації, прозорості та відкритості інтеграції міських секторів для ефективного розповсюдження даних між ними. Технологія блокчейн забезпечить вищий рівень безпеки, відстежуючи транзакції в незмінному, безпечному, децентралізованому і прозорому розподіленому реєстрі. При розробленні архітектури мережі розумного міста важливо враховувати підмережі. Прикладом є розумна структура міста, де давач під'єднаний до лінії освітлення, яка може бути частиною великої архітектурної програми. Розумна будівля може бути частиною мережі розумного міста. У зв'язку з цим потрібно враховувати той факт, що дані можна передавати не тільки локально, а й через велику мережу будівель і загалом у велику мережу міст. Розроблення нових мереж "розумного міста" необхідно для вирішення поточних обмежень щодо їхньої побудови. Встановлено, що побудова мережі "розумного міста" нового типу має важливе значення для оптимізації національної системи управління та її потенціалу. Це вимагає співпраці всіх секторів державного управління для формування позитивного механізму стимулювання процесу обміну інформацією. Охарактеризовано потенціал та внесок блокчейну у розумні міста шляхом вивчення та аналізу літератури наукових досліджень щодо концепції та основ створення блокчейну, в т.ч. його дещо найпрактичніші застосування. Розроблено проєкт гібридної мережі розумного міста на підставі блокчейну та ІоТ та конкретні деталі запропонованої моделі.

Ключові слова: розумне місто; інтернет речей; гібридна архітектура; великі дані; технологія блокчейн; майнінг.

Вступ / Introduction

Концепцію розумного міста можна розглядати як основу для реалізації бачення передової та сучасної урбанізації. Розумні міста контролюють технології та використовують наявні та заплановані інвестиції у інфраструктуру, щоб забезпечити вищу якість життя мешканців, створити сприятливий інвестиційний клімат для бізнесу та максимізувати використання ресурсів і прозорість діяльності урядів. Розумні міста можна розглядати як органічну інтеграцію систем, ІТ-інфраструктури, фізичної інфраструктури, соціальної та бізнес-інфраструктури. Ці системи працюють спільно з метою генерування розумної та придатної для вжитку інформації для осіб, що приймають рішення [16].

Блокчейн – це розподілений реєстр транзакцій або подій, записаних і збережених у блоках, з'єднаних за допомогою технології шифрування [24]. Ці записи спільно використовують та контролюються всіма вузлами мережі, а оновлюють їх тільки майнери – вузли з потужними обчислювальними ресурсами, які підтверджують нові транзакції та записують їх у реєстр. Він складається з блоків, що містять позначки часу транзакцій, де кожен блок пов'язаний з попереднім. У блокчейні один окремий точковий вузол не перешкоджає зви-

чайному функціонуванню завдяки розподіленню інформації по всій мережі. Він децентралізований, відстежуваний і захищений від втручання. Технологія блокчейн може усунути недоліки централізованих ринків даних, забезпечити безпеку системи, відстежуваність поведінки користувачів і процедури аудиту, а також гарантувати надійність для розумних міст.

Об'єкт дослідження – застосування блокчейн технологій та її алгоритмів.

Предмет дослідження – методи та засоби покращення безпеки обміну даними в розумних містах, що забезпечить швидко та безпечно подальше оброблення великих наборів даних для майбутнього їх аналітичного опрацювання.

Мета роботи – довести доцільність використання архітектури системи розумного міста у поєднанні з блокчейн та ІоТ.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- проаналізувати останні публікації на теми стосовно цього дослідження;
- розробити повну гібридну архітектуру розумного міста;
- пересвідчитись, що запропонована архітектура є продуктивною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У ро-

Інформація про автора:

Палка Олег Вікторович, аспірант, кафедра комп'ютерних наук. Email: poleg1997@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5607-279X>

Цитування за ДСТУ: Палка О. В. Аналіз інтегрованої архітектури розумного міста з блокчейном та ІоТ. Науковий вісник НЛТУ України. 2023, т. 33, № 6. С. 94–99.

Citation APA: Palka, O. V. (2023). Analysis of blockchain and IoT integrated smart city architecture. *Scientific Bulletin of UNFU*, 33(6), 94–99. <https://doi.org/10.36930/40330612>

зумних містах було запропоновано багато рішень для різних галузей. Zhang та співавтори запропонували модель мережі автотранспорту на підставі міжланцюжкового блокчейну Ethernet, IoT та алгоритмів обчислення репутації [23]. Zeng та ін. запропонували систему відстеження безпеки харчових продуктів на підставі Інтернету речей та блокчейну [22]. Wu та ін. запропонували застосування для відстеження сільськогосподарської продукції на підставі інтернету речей та блокчейну. Shen та ін. запропонували систему зберігання харчової безпеки на підставі блокчейну. Восек та співавтори запропонували систему відстеження ланцюга поставок медичних засобів [4]. Ferrag та ін. запропонували блокчейн-орієнтовану систему глибокого навчання, DeepCoin, для розвитку розумних мереж [6]. Hardjono та ін. запропонували автономну блокчейн-орієнтовану систему інтероперабельності [9]. Geneiatakis та ін. розгорнули службу перетинного блокчейн-орієнтованого електронного урядового товарного обслуговування [7]. Meng та ін. запропонували блокчейн-орієнтовану систему управління довірою в галузі охорони здоров'я для зменшення внутрішніх атак на інтернет речей цієї галузі та покращення виявлення зловмисної поведінки її користувачів [12].

Вчені також провели дослідження з метою покращення продуктивності блокчейн-систем. Xu та ін. запропонували схему оцінки кредитоспроможності, яка працює на підставі даних і використовує блокчейн з перехресною архітектурою для забезпечення більшої безпеки та інтелектуальності у системі ланцюга поставок [21]. Lao та ін. проаналізували архітектуру популярних систем блокчейну для інтернету речей та надали відповідну модель трафіку для таких систем [10].

Сучасні дослідження віддають перевагу використанню систем блокчейн для покращення можливостей відстеження та безпеки інформації про продукти. Менше уваги приділено загальному проектуванню розумних міст. Тому це дослідження спрямоване на інтеграцію наявних робіт для розроблення більш комплексної системи функціонування та управління розумними містами, що відповідає потребам різних учасників у містах та сприяє сталому міському управлінню.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Для досягнення ефективності у мережі IoT, Kim та ін. [19] ввели концепцію довірчого управління, яка широко поширена у всьому світі. Вони вважали, що інфраструктура для підтвердження автентичності та авторизації IoT буде централізована та поширена по всьому світу. Пропонується гібридна архітектура мережі розумного міста зі стратегіями блокчейну та стратегіями програмно-конфігурованої мережі SDN (англ. *Software-Defined Networking*) для подолання обмежень поточної інфраструктури мережі розумного міста.

Як складне завдання для запам'ятовування хешування паролів і інших програм, функція формування ключа Argon 2 [2, 8] була обрана переможцем конкурсу хешування паролів у липні 2015 року [1]. Biryukov та ін. [17] запропонували схему пам'яті на підставі доведення роботи з використанням хеш-дерева Меркла над серією хеш-систем Argon 2, адже вона містить параметри шифрування диска та посилення для криптовалютних програм. Для аналогічних членів схема доведення роботи

створює дерево Меркла, а псевдовипадково вибирає набір листів на підставі хеш-корінь дерева як доказ виконання обчислення. Запропоновано повну гібридну архітектуру розумної міської мережі (рис. 1).

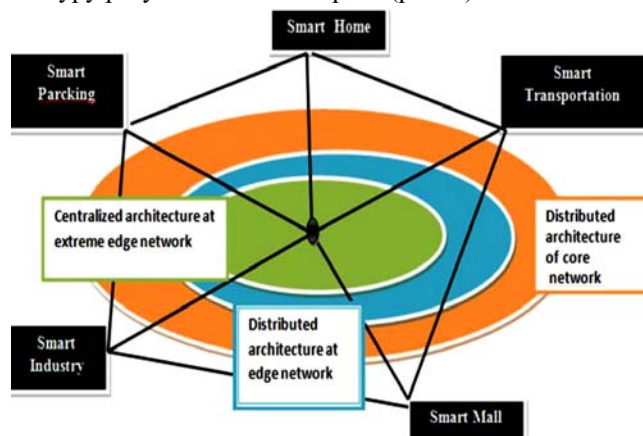


Рис. 1. Запропонована повна гібридна архітектура / Proposed full hybrid architecture [17]

У запропонованій моделі мережа розумного міста розділена на дві окремі групи – основну мережу та мережеву за допомогою процесу блокчейн. Основна мережа складається з вузлів з високим підрахунком і наскрізними ресурсами, тоді як граничний вузол має обмежену ємність зберігання та обчислювальну потужність. Вузли майнера відповідатимуть за будівельні блоки та перевірку підтвердження продуктивності. Кожен вузол живиться від контролера SDN, щоб досягти максимальної швидкості та безпеки, зменшити витрати на управління обладнанням та відчуті простоту розгортання в інфраструктурі розумної міської мережі. Тут використовують можливість безпеки моделі FS-Open Security SDN [5]. У запропонованій інфраструктурі кожен крайовий вузол діє як центральний сервер для певної загальнодоступної інфраструктури для надання основних послуг та локальної реалізації. Підтримує політику доступу та гарантії для своїх зареєстрованих організацій у сховищі та допомагає зменшити затримки та зменшити пропускну здатність мережі. Розподілений статус запропонованої моделі може зробити усю систему здатною витримати і обмежити вплив атаки в будь-який момент компромісу вузла. Іншими словами, якщо вузол на краю пошкоджений, отриманий ефект варто обмежити локальною зоною.

У розумному місті пристрої IoT виробляють великі обсяги даних і вимагають їх оброблення в режимі реального часу. У розробленій моделі граничні вузли пропонують продуктивність у реальному часі з низькою затримкою та використанням пропускну здатності мережі та розподілені по мережі. Прикордонний вузол має обмежену потужність комп'ютера і обробляє необроблені дані, які можна завантажити за допомогою пристроїв зберігання для фільтрації даних і отримання корисної інформації. Коли дані попередньо обробляються, граничний вузол передає зашифровані дані до головної розумної міської мережі, якщо це необхідно. Вузол майнінгу в базовій мережі продовжить аналізувати раніше оброблені дані, приймати рішення, перевіряти і створювати блоки. Для забезпечення цілісності даних, що зберігаються в основній мережі, використовується цифровий підпис і зберігаються хеші магазину в блокчейні. Ця швидкість в блокчейні незмінна, що слугує

доказом достовірності даних. Наведено робочий процес розробленої моделі, в якій реалізовано систему хешування на підставі функції формування ключа Argon 2 (рис. 2).

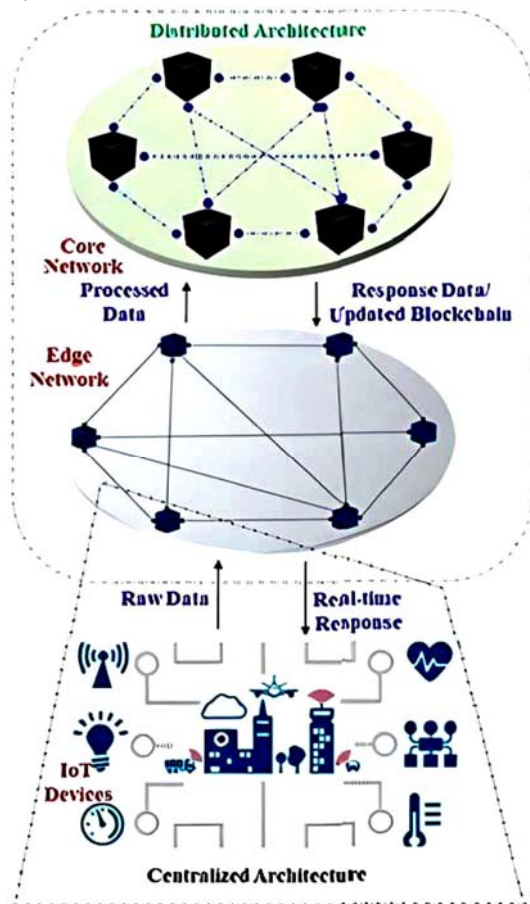


Рис. 2. Робочий процес розробленої моделі / Workflow of the considered model [5]

У сучасних криптовалютах і блокчейнах PoW (англ. *Proof-of-Work* – доказ виконання роботи) є ключовим компонентом. Вирішуючи складність вимірювання та керування надійністю за допомогою складних статистичних комп'ютерів, ці методи дають змогу публічно поширювати великі книги. Для розробленої моделі використовують складну схему PoW під назвою "Itsuku PoW", запроповану Coelho та ін. [1]. Система Itsuku PoW створена на підставі MTP-Argon 2 [3]. Вирішує такі проблеми, як ненавмисні атаки пошуку, зберігання пам'яті, випадковий хибний список, паралельний пошук та надійні атаки введення, додаючи нові функції та змінюючи параметри MTP-Argon 2, щоб покращити складність пам'яті. Схема передбачає завдання вставки te , складність d , а результат алгоритму пошуку такий $(N, \overline{AE}, b, \overline{AE})$, де T – кількість фіксованих об'єктів, L – довжина одного пошуку, HS – це змінна хеш-функція розміру, $\overline{AE}$ індикатори вибраних листків, b вибрані листки і $\overline{AE}$ комбіновані докази дерева Меркла обох вибраних листків і їх протипоказання, якщо такі є. Детальний опис та детальний аналіз програми Itsuku PoW наведено в [5].

Після отримання транзакції на головному вузлі від граничного вузла починається процес майнінгу. Через обмеженість ресурсів робимо процес майнінгу в основній мережі в розробленій моделі. Процес майнінгу містить такі етапи:

Крок 1: будь-коли граничний вузол отримує нову транзакційну програму з необхідними послугами від прис-

трою/користувача IoT, надсилає запит на транзакцію кожному майнеру в основній мережі.

Крок 2: Після отримання запиту на транзакцію вузол майнера перевіряє та чи була транзакція змінена чи ні, і чи є транзакція в блокчейні чи ні. Якщо дію не змінено і не заблоковано, вузол майнера переходить до кроку 3. Окрім цього, вузол майнера скасовує процес майнінгу і передає звіт до основної мережі.

Крок 3: на цьому кроці вузол майнера повертає попередній ідентифікатор блоку та запускає процес PoW. У випадку блоку генезису попередній ідентифікатор блоку дорівнює нулю. Блок генезису є першим блоком у блокчейні. У процесі PoW вузол майнера створює новий блок шляхом перекладу деталей, включаючи попередній ідентифікатор, згенерований ідентифікатор, позначку дати та часу, перевірені транзакції та цифровий підпис майнера за допомогою алгоритму Itsuku PoW, згаданого вище.

Крок 4: Після створення блоку, щоб забезпечити цілісність деталей усіх блоків у блокчейні, вузли перевіряють усі наявні блоки.

Крок 5: На останньому кроці вузол майнінгу надсилає оновлений блокчейн усім Edge-вузлам і надає запитувані послуги пристроям/користувачам IoT.

Алгоритм:

Вхідні дані: вхідне завдання (I), складність (d), незалежний сегмент (P) і довжина сегмента (l) Вихід: $(N, \overline{AE}, b, \overline{AE})$

Початок

Крок 1. Побудуйте залежну від виклику пам'ять $X_l[1 \dots T]$ як P незалежних сегментів довжини l

Крок 2. Обчисліть корінь ϕ хеш-дерева Меркла X

Крок 3. Виберіть випадковий N

Крок 4. Обчисліть $Y_0 = HS(N \parallel \phi \parallel l)$

Крок 5. Для $1 \leq j \leq L$ робимо: $ij-1 = Y_{j-1} \bmod T$; $Y_j = HS(Y_{j-1} \parallel X_{[ij-1]} \parallel l)$

Крок 6. Зворотній перегляд проміжних хешів у зворотному порядку $P = HS(Y_L \parallel \dots \parallel Y_{1-L} \bmod 2 \parallel l)$

Крок 7. Якщо P має d двійкових провідних нулів Тоді

Крок 8. Повернення $(N, \overline{AE}, b, \overline{AE})$

Крок 9. Перейдіть до кроку 3

Кінець

На цьому етапі змодельовано розроблену модель у приватній мережі блокчейнів Ethereum, щоб оцінити доцільність запропонованої архітектури. Проводиться набір результатів тестування та тестування на підставі різних показників параметрів. Усі тести проводять на процесорі Intel Core i5 з тактовою частотою 3,40 ГГц з 16 ГБ оперативної пам'яті під керуванням ОС Windows 10.

Використовувався go-Ethereum, щоб налаштувати власну приватну мережу блокчейнів і встановлювався браузер Mist, щоб увімкнути розподілену властивість мережевої архітектури. Було визначено свій власний блок генезису та використано техніку хешування Argon 2. Тестова мережа Ethereum використовувалась для налагодження та тестування моделі. Також використовувався Mininet на кожному краю та вузлах майнера для створення вузлів контролера з підтримкою SDN. Тут генерують випадкові дані як вихідні дані IoT і розглядаються їх хеші як транзакції блокчейна.

PoW є важливою формою технології блокчейн. Внутрішня робота на підставі PoW має бути складною для вирішення. Це часто зводиться до випадкового процесу спроби знайти рішення головоломки, наприклад, зіткнення хешування, адже спостерігаємо складність (рис. 3), швидкість хешування, кількість транзакцій в секунду для змінного розміру блоку в розробленій моделі та порівнюємо це з іншими системами.

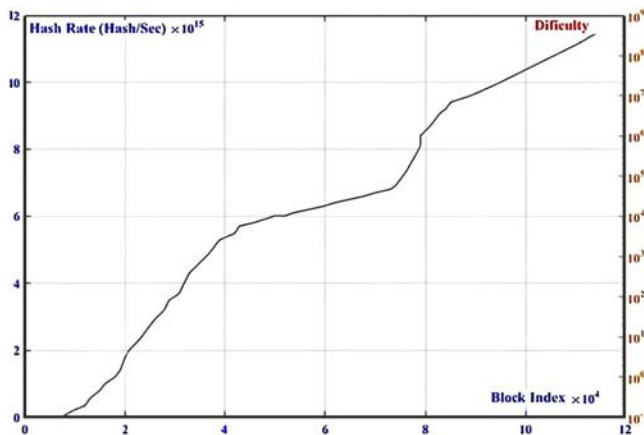


Рис. 3. Хешрейт порівняно з складністю / Hashrate compared with difficulty [3]

Бачимо те, що шкала хешування постійно коригується відповідно до рівня складності в системі. Пересвідчуємось, що розмір блоку впливає на кількість дій за секунду в даній моделі (рис. 4). Попарні дані базуються на фактичних продажах з компонента блокчейну Bitcoin [18].

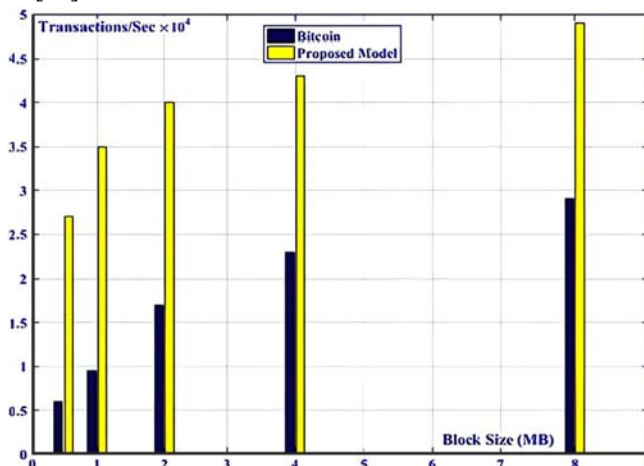


Рис. 4. Розмір блоку порівняно з транзакціями, с / Block size compared with transactions, sec [3]

Результат показує, що порівняно з іншими системами модель досягає кращої продуктивності. Також виявлено, що середня тривалість блоку має поведінку відносно часових рамок (рис. 5) і порівняно з бажаним продуктом (наприклад, 10 хв). На цьому рисунку наведено результати поведінки блоку часу за інтервалом ретаргетингу.

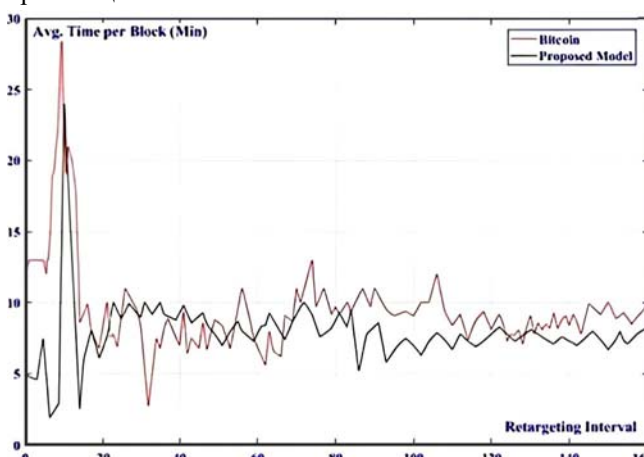


Рис. 5. Середній час на блок і публічний Ethereum BC / Average block time and public Ethereum BC [18]

Варто відзначити, що він також сильно змінюється, і все ж ця модель знову виглядає потужнішою від нормального часу блокування. Результати випробувань здійснювались для соло-майнінгу (рис. 6).

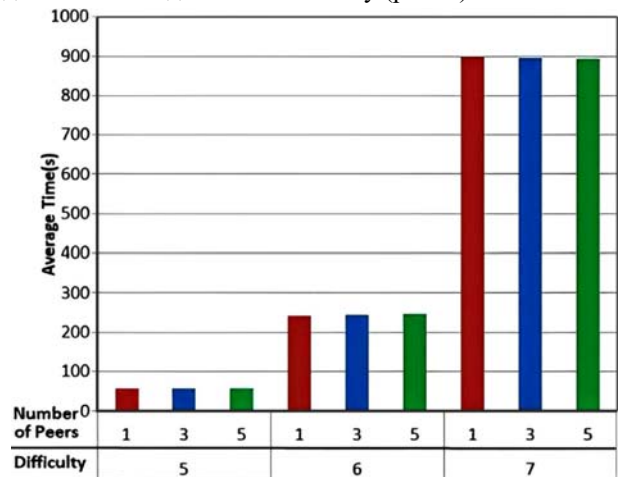


Рис. 6. Результати випробувань для соло-майнінгу / Test results for solo mining [18]

Тут рівень складності відноситься до мінімальної кількості послідовних елементів, необхідних на початку прийнятного хешу. Також результати випробувань здійснювались для паралельного майнінгу (рис. 7).

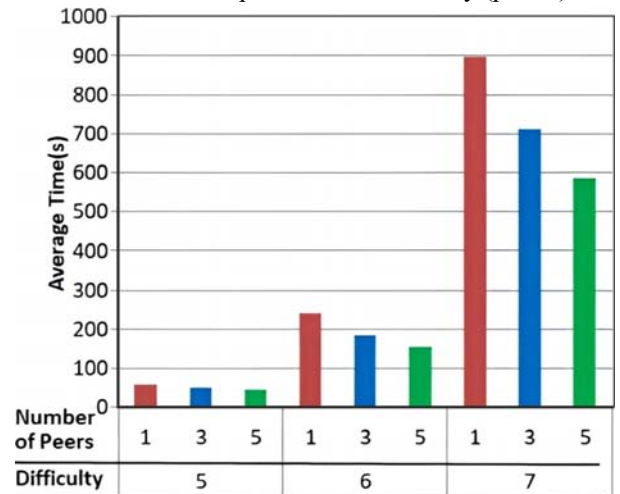


Рис. 7. Результати випробувань для паралельного майнінгу / Test results for parallel mining [18]

Обговорення результатів дослідження. Для розвитку розумних міст з підтримкою Інтернету речей блокчейн може відігравати вирішальну роль у вдосконаленні мереж Інтернету речей, досягненні відмовостійкості, оптимізації споживання ресурсів і підвищенні продуктивності оброблення даних [11]. Поєднання блокчейну та інтернету речей сприяє прозорості [13], безперешкодній інтеграції даних [20] та підвищенню їхньої безпеки [14]. Завдяки технології блокчейн IoT може забезпечити транзакції, що не потребують додаткової довіри, автоматизацію та безпечний міжмашинний зв'язок між пристроями IoT. Застосування технології блокчейн для розумного міста може створити надійне сховище великих даних, що приведе до покращення якості надання послуг розумного міста. Використовуючи дані блокчейну, особи, які приймають рішення, матимуть можливість ефективно планувати заходи що покращення надання послуг розумного міста, розширювати ресурси та приймати обґрунтовані рішення [15].

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вперше розроблено підхід до інтеграції технологій блокчейну та інтернету речей (IoT) для створення ефективної та безпечної інфраструктури міста, що забезпечує зв'язок між різними його пристроями та системами, збільшуючи в такий спосіб його функціональність, стійкість та спроможність у вирішенні складних проблем управління та підвищення якості життя мешканців.

Практична значущість результатів дослідження – розроблено підхід дає можливість здійснювати подальше впровадження інтегрованої архітектури розумного міста для українських міст за вже реалізованими елементами розумності, що водночас дасть змогу безпечно здійснювати програмне оброблення міських даних.

Висновок / Conclusions

Встановлено, що використання інтегрованої архітектури розумного міста у поєднанні з блокчейн та IoT забезпечує швидкий та безпечний обмін даними між дачачами і подальше оброблення великих наборів даних для майбутнього їх аналітичного опрацювання. Проаналізовано доцільність застосування даної гібридної архітектури розумного міста. Розроблено впровадження блокчейн-алгоритмів і проведено випробування майнінгу. З'ясовано, що створення нового типу "розумного міста" має велике значення для оптимізації національної системи управління та розкриття її потенціалу, адже технологія блокчейн може створити ефективні моделі економіки спільного використання в розумному місті та підвищити ефективність задоволення попиту на міські послуги.

За результатами виконаного дослідження можна зробити такі основні висновки:

1. Для рівнів складності 1, 2, 3 і 4 немає істотної різниці між одиночним і паралельним майнінгом.
2. Однак для рівнів складності 5, 6 і 7 спостерігається покращення паралельного видобутку і це покращення стає значним із збільшенням рівня складності та кількості майнерів.
3. У соло-майнінгу середній час залежить тільки від рівня складності, але при паралельному майнінгу середній час залежить як від рівня складності, так і від кількості майнерів. Якщо рівень складності зростає, середній необхідний час збільшується. Знову ж таки, якщо кількість майнерів збільшується, середній час зменшується, тому що майнери працюють паралельно, і жодні два майнери не виконують однакової роботи. Ще один важлива особливість, яку варто помітити, полягає в тому, що середній час, необхідний для одного однорангового пристрою для паралельного майнінгу, майже такий самий, як і для соло-майнінгу, незалежно від кількості однорангових пристроїв. Це пов'язано з тим, що, коли паралельно працює тільки один майнер, паралельна робота не відбувається.
4. Покращення досягає 34 % для п'яти майнерів порівняно з одним майнером. Варто зазначити, що результати можуть відрізнятися залежно від потужності оброблення, виділеної майнерам.

References

1. Biryukov, A., & Khovratovich, D. (2016). Egalitarian Computing. *USENIX Security Symposium*, 315–326. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.03588>

2. Biryukov, A., Dinu, D., & Khovratovich, D. (2015). Argon 2: the memory-hard function for password hashing and other applications. *Semantic Scholar*, 11 p. URL: <https://orilu.uni.lu/bitstream/10993/31652/1/Argon2ESP.pdf>
3. Bitcoin Historical Data. [Available online]. URL: <https://www.kaggle.com/mczielinski/bitcoin-historical-data>, Accessed date: 18 Oct 2023
4. Bocek, T. M., Rodrigues, B. B., Strasser, T., & Stiller, B. (2017). Blockchains everywhere – a use-case of blockchains in the pharma supply-chain. 2017 *IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM)*, 772–777. <https://doi.org/10.23919/INM.2017.7987376>
5. Coelho, F., Larroche, A., & Colin, B. (2017). Itsuku: a Memory-Hardened Proof-of-Work Scheme. *IACR Cryptology ePrint Archive*, 2017, 1168. URL: <https://eprint.iacr.org/2017/1168.pdf>
6. Ferrag, M. A., & Maglaras, L. (2020). DeepCoin: A Novel Deep Learning and Blockchain-Based Energy Exchange Framework for Smart Grids. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67, 1285–1297. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2922936>
7. Geneiatakis, D., Soupionis, Y., Steri, G., Kounelis, I., Neisse, R., & Nai-Fovino, I. (2020). Blockchain performance analysis for supporting cross-border E-Government services. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67(4), 1310–1322. <https://doi.org/10.1109/TEM.2020.2979325>
8. Gu, M., Berg, R., & Chen, C. (2017). Investigation of Practical Attacks on the Argon 2 i Memory-hard Hash Function 6. *Semantic Scholar*, 16 p. URL: <https://courses.csaail.mit.edu/6.857/2017/project/21.pdf>
9. Hardjono, T., Lipton, A., & Pentland, A. (2020). Toward an Interoperability Architecture for Blockchain Autonomous Systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67, 1298–1309. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2920154>
10. Lao, L., Li, Z., Hou, S., Xiao, B., Guo, S., & Yang, Y. (2020). A Survey of IoT Applications in Blockchain Systems. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 53, 1–32. <https://doi.org/10.1145/3372136>
11. Liu, Y., Wang, K., Qian, K., Du, M., & Guo, S. (2020). Tornado: Enabling Blockchain in Heterogeneous Internet of Things Through a Space-Structured Approach. *IEEE Internet of Things Journal*, 7, 1273–1286. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2954128>
12. Meng, W., Li, W., & Zhu, L. (2020). Enhancing Medical Smartphone Networks via Blockchain-Based Trust Management Against Insider Attacks. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67(4), 1377–1386. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2921736>
13. Mistry, I., Tanwar, S., Tyagi, S., & Kumar, N. (2020). Blockchain for 5G-enabled IoT for industrial automation: A systematic review, solutions, and challenges. *Mechanical Systems and Signal Processing*. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106382>
14. Rathore, M., Paul, A., Ahmad, A., Chilamkurti, N., Hong, W.-H., & Seo, H. (2018). Real-time secure communication for smart city in high-speed big data environment. *Future Generation Computer Systems*, 83(2), 638–652. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.08.006>
15. Rejeb, A., Rejeb, K., Simske, S. J., & Keogh, J. (2022). Blockchain technology in the smart city: a bibliometric review. *Qual Quant*, 56, 2875–2906. <https://doi.org/10.1007/s11135-021-01251-2>
16. Salha, R. A., El-Hallaq, M. A., & Alastal, A. I. (2019). Blockchain in Smart Cities: Exploring Possibilities in Terms of Opportunities and Challenges. *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 7, 118–139. <https://doi.org/10.4236/jdaip.2019.73008>
17. Sharma, P., Moon, S., & Park, J. (2017). Block-VN: A Distributed Blockchain Based Vehicular Network Architecture in Smart City. *Journal of Information Processing Systems*, 13(1), 184–195. <https://doi.org/10.3745/JIPS.03.0065>
18. Singh, Ch., Tripathi, R., Walia, R., Chauhand, D., & Asokane, A. (2021). Blockchain and IOT integrated Smart City Architecture. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 12(9), 62–69. URL: <https://turcomat.org/index.php/turkbilmat/article/view/2794>

19. Sung, Y., Sharma, P. K., Lopez, E. M., & Park, J. H. (2016). FS-OpenSecurity: A Taxonomic Modeling of Security Threats in SDN for Future Sustainable Computing. *Sustainability* (Switzerland), 8(9), 919–944. <https://doi.org/10.3390/su8090919>
20. Viriyasitavat, W., Anuphaptrirong, T., & Hoonsopon, D. (2019). When blockchain meets Internet of things: characteristics, challenges, and business opportunities. *Journal of Industrial Information Integration*, 15, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.05.002>
21. Xu, Z., Zhang, J., Song, Z., Liu, Y., Li, J., & Zhou, J. (2021). A scheme for intelligent blockchain-based manufacturing industry supply chain management. *Computing*, 103, 1771–1790. <https://doi.org/10.1007/s00607-020-00880-z>
22. Zeng, X., Peng, Y., & Wang, Q. (2018). Research on food safety traceability system based on IoT and blockchain technology. *Food Mach*, 34(9), 100–105. <https://doi.org/10.19026/ajfst.8.1479>
23. Zhang, X., & Li, X. (2018). Application and development path of blockchain in agricultural cold chain logistics. *Taiwan Agric Res*, 153(4), 70–73. <https://doi.org/10.1007/s12063-021-00180-5>
24. Zheng, W. (2022). A Blockchain-based Data Sharing Platform for Smart Cities. *CSIEDE 2022, ACSR* 103, 75–85. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-108-1_10

O. V. Palka

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

ANALYSIS OF BLOCKCHAIN AND IOT INTEGRATED SMART CITY ARCHITECTURE

The paper focuses attention to the issue of the development of the Internet of Things as a cornerstone for the growth and advancement of smart cities. By offering diverse intelligent applications such as smart transportation, Industry 4.0, and intelligent finance, they can enhance the quality of life for their residents. Smart cities that are rooted in contemporary technologies are essential in addressing urbanization challenges and enhancing citizens' overall experience. As the role of data exchange increasingly facilitates systemic integration among urban sectors for the advancement of smart cities, there is a growing need for decentralization, transparency, and openness in integrating these sectors to effectively disseminate data between them. Blockchain technology could provide a higher level of security by tracking transactions in an immutable, secure, decentralized, and transparent distributed ledger. Consideration of subnetworks becomes pivotal when designing a smart city network. A representative case is a sensor linked to a lighting line might be part of a larger architectural program in a smart structure. A smart building could be part of a network of smart cities. Consequently, it is crucial to note that data is not solely transmitted locally but also across a vast network of buildings, ultimately forming a comprehensive city-wide network. The development of new smart city networks is essential to address current constraints in network construction. Constructing this new type of smart city is established to be of significant importance in optimizing the national governance system and its potential. This necessitates collaboration across all sectors of governmental management to establish a positive information-sharing incentive mechanism. The potential and contribution of blockchain in smart cities have been characterized through the examination and review of scientific research literature concerning the concept and fundamentals of blockchain, encompassing its most practical applications. Therefore, the article delves into a hybrid blockchain-based network project for a smart city, providing specific details of the proposed model.

Keywords: smart city; Internet of Things; hybrid architecture; big data; blockchain technology; mining.