

УДК 004.51

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.6.14>

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛЕНОГО БРОКЕРУ TRINITY НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН

Твердохліб А. О. – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії
Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій
ORCID ID: 0000-0002-6591-2866

Антоненко А. В. – кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри стандартизації і сертифікації сільськогосподарської продукції
Національного університету біоресурсів і природокористування України
ORCID ID: 0000-0001-9397-1209

Останнім часом спостерігається поширене використання протоколів обміну повідомленнями у сучасних системах. Однією із моделей обміну повідомленнями, яка служить для обміну даними та водночас демонструє ефективність використання ресурсів, є модель «публікація-підписка». Проте, системи із такою моделлю мають певні недоліки через використання централізованої архітектури, в якій дані з усіх пристроїв в мережі передаються через центрального брокера. Подібна централізована архітектурна модель обміну повідомленнями схильна до центральної точки відмови. Крім того, організація, яка володіє брокером, матиме можливість підроблювати дані. Стаття покликана дослідити та описати роботу Trinity, що є розподіленим брокером публікації-підписки з незмінністю на основі блокчейну, а також представити реалізацію та отриману у ході дослідження оцінку структури Trinity. Принцип роботи Trinity полягає у поширенні даних, які були опубліковані одним з брокерів у мережі, серед усіх інших брокерів, наявних у мережі. Також розподілені дані зберігаються у незмінному реєстрі з використанням технології блокчейн. Крім того, Trinity виконує смарт-контракти для перевірки даних перед їх збереженням у блокчейні. Використовуючи мережу блокчейну, Trinity може гарантувати сталість, упорядкованість та незмінність за межами довіри. Отримані результати дослідження свідчать, що Trinity використовує мінімальну кількість ресурсів, а використання смарт-контрактів дозволяє зацікавленим сторонам автоматизувати процеси керування даними. На підставі проведеного дослідження можна стверджувати, що Trinity є першою платформою, яка поєднує компоненти технології блокчейну з моделлю обміну повідомленнями «публікація-підписка».

Ключові слова: блокчейн, брокер, багатостороння взаємодія, леджер, смарт-контракт.

Tverdokhlib A. O., Antonenko A. V. Features of trinity distributed broker based on blockchain technology

At a recent time there was a widespread use of messaging protocols in modern systems. One of the messaging models that serves to exchange data and demonstrate resource efficiency at the same time is the publish-subscribe model. However, systems with this model have certain disadvantages due to the use of a centralized architecture, in which data from all devices in the network is transmitted through a central broker. Such a centralized messaging architectural model is prone to a centralized point of failure. In addition, the organization that owns the broker will have the ability to falsify or manipulate the data. This article is intended to describe the work of Trinity, a distributed blockchain-based publish-subscribe broker, as well as present an implementation and evaluation of the Trinity platform based on tracking. The principle of the Trinity robot is based on extensive data published by one of the brokers at the border and all brokers present at the border. Subdivisions of data are also stored in an immutable registry using proprietary blockchain technology. In addition, Trinity is creating smart contracts to verify data before storing it on the blockchain. Based on blockchains, Trinity can guarantee stability, regularity, and immutability across trust boundaries. The results of the study show that Trinity uses a minimal amount of resources, and the use of smart contracts allows interested parties to automate data management processes. At the research stage, it can be confirmed that Trinity is the first platform that combines blockchain technology components with a publish-subscribe exchange model.

Key words: blockchain, broker, multi-stakeholder cooperation, ledger, smart contract.

Вступ. Сучасні програми зазвичай використовують моделі обміну повідомленнями «публікація-підписка» та «запит-відповідь» для обміну даними між кінцевими пристроями, периферійними пристроями та серверами. Модель обміну повідомленнями «запит-відповідь» добре протестована і стандартизована в контексті застосування у мережі Інтернет, але вона не ідеально підходить для систем з обмеженими ресурсами.

Постановка проблеми. CoAP є протоколом «запиту-відповіді», призначеним для систем з обмеженими ресурсами, який споживає обмежені ресурси, але йому не вистачає підтримки масштабованості та переносимості на широкий спектр платформ [1]. У зв'язку із цим, альтернативою виступає модель обміну повідомленнями «публікація-підписка» через її низькі витрати на зв'язок та ефективність використання ресурсів.

У моделі обміну повідомленнями «публікація-підписка» взаємодіють 3 елементи, а саме: публікатори та підписники, що взаємодіють через брокера. Брокер є централізованим програмним забезпеченням, яке організує зв'язок між публікаторами та підписниками. Така модель обміну повідомленнями широко використовується в системах через її ефективність використання ресурсів та масштабованості, але має певний недолік, який полягає у залежності від центрального брокера для передачі даних між публікаторами та підписниками. Саме централізована архітектура робить модель обміну повідомленнями «публікація-підписка» вразливою до центральних точок збою [2]. Крім того, це дозволяє публікатору та підписнику взаємодіяти через центральний сервер, що належить одній організації.

Мета дослідження. У даній статті для висвітлення роботи розподіленого брокера було обрано Trinity, що представляє собою розподілений брокер «публікації-підписки» з незмінністю на основі блокчейну, шляхом інтеграції брокерської системи зі структурою блокчейну. Разом із тим, важливо згадати і про те, що платформа Trinity реалізована з використанням платформи блокчейну MQTT та Tendermint [3]. Мета роботи проаналізувати, як переваги довіри, надані платформою Trinity, впливають на ресурсоефективність, зокрема в контексті зниження накладних витрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день існує багато джерел, які присвячені темі використання блокчейн. Останні дослідження та статті дають загальну картину того, як блокчейн допомагає вирішувати різні проблеми в промисловості та інших сферах. Значний внесок у вирішення фундаментальних питань у сфері блокчейну є дослідження вітчизняних та зарубіжних вчених [1–12].

Виклад основного матеріалу дослідження. Платформа Trinity поєднує в собі технологію блокчейна з моделлю обміну повідомленнями «публікація-підписка», яка є однією з моделей обміну повідомленнями, що широко використовуються, при розгортанні додатків.

Ключовими компонентами *технології блокчейна* є: *алгоритм консенсусу, розподілений реєстр та криптографія з відкритим ключем*. Ці компоненти взаємодіють між собою і координують свої дії у розподіленій мережі пристроїв, що належать кільком організаціям та обслуговуються ними.

Модель комунікації «публікація-підписка» зазвичай складається з трьох компонентів: брокер, публікатор та підписник. *Публікатори* в системі надсилають дані брокеру відповідно до концепції теми, а підписник який підписався на цю тему, отримує повідомлення від брокера. Тема, яка може мати кілька рівнів, зазвичай відноситься до метаданих, які описують інформацію про дані у рядковому форматі [4].

Платформа Trinity поєднує брокера «публікації-підписки» з компонентами технології блокчейна, такими як розподілений реєстр і алгоритм консенсусу. У свою чергу, три основні компоненти системи Trinity, що розподілені по мережі, включають: *блокчейн-мережу, брокера, публікаторів-підписників*.

Брокер Trinity забезпечує підтримку смарт-контрактів та незмінного реєстру у формі блокчейну. Сучасні брокери даних пересилають опубліковані дані всім підписникам без будь-якої перевірки, тоді як платформа Trinity перевіряє та записує транзакцію до реєстру перед відправкою інформації підписникам.

Так, блокчейн-мережа має вирішальне значення для реплікації стану та перевірки даних. Платформа Trinity надає набір API для взаємодії із мережею блокчейнів, а примірник брокера Trinity підключається до мережі блокчейна за допомогою API.

API DeliverTransaction відповідає за реплікацію стану, консенсус та процес створення блоків. Примірник брокера Trinity надсилає інформацію, що підлягає перевірці, за допомогою API DeliverTransaction разом з необхідними метаданими екземпляра, такими як ідентифікатори вузлів та системна інформація, до базової структури блокчейну. Мережа блокчейна реплікує дані між екземплярами Trinity, і кожен у мережі виконує смарт-контракт та алгоритм консенсусу перед введенням даних у блок [5].

Платформи блокчейну, у свою чергу, зазвичай складаються з протоколу консенсусу, логіки створення блоків, розподіленого реєстру та криптографії з відкритим ключем [6]. Платформа Trinity не залежить від конкретної структури або протоколів блокчейну, оскільки брокер взаємодіє зі структурою блокчейна через набір API-інтерфейсів для управління функціями, пов'язаними з блокчейном. Тим не менш, кожен екземпляр Trinity має API для запиту мережі блокчейну. API GetCurrentBlockHeight() дозволяє екземпляру Trinity отримувати поточну висоту блоку з мережі блокчейна. Аналогічно API GetBlock(BlockHeight) повертає весь блок на висоті, позначеній аргументом BlockHeight. Хоча екземпляри брокера Trinity ізольовані від функцій блокчейну, базова структура блокчейна повинна мати такі компоненти, щоб гарантувати незмінність.

Алгоритм консенсусу. Платформа Trinity працює у розподіленій мережі, що належить кільком організаціям. Усі авторизовані учасники повинні перевіряти повідомлення, отримані брокером Trinity. Цей процес перевірки ґрунтується на протоколі консенсусу. Стан системи, що сприймається одним брокером у мережі, має бути реплікований на інші екземпляри Trinity, а транзакція має бути схвалена більшістю пристроїв у мережі. Система Trinity може працювати з консенсусними протоколами, такими як Proof-of-Work, Proof-of-Stake або іншими протоколами з категорії візантійської стійкості до відмови (BFT), такими як Tendermint [7], і протоколами на основі лідерів, такими як Raft [8]. Також варто звернути увагу, що споживання ресурсів та здатність витримувати збої пристрою залежать саме від протоколу консенсусу.

Розподілений реєстр. Сучасна структура блокчейна записує транзакції в незмінний реєстр на усіх пристроях, що перебувають у процесі консенсусу. Щоб досягти ефективності у використанні ресурсів та низьких витрат на керування в рамках блокчейну використовується Дерево Меркла або хеш-дерево. Trinity потрібен механізм реєстру, такий як Дерево Меркла, для безпечного зберігання транзакцій [9].

Криптографія з відкритим ключем. Платформа блокчейна використовує криптографію з відкритим ключем для захисту транзакцій та участі у процесі перевірки [10]. Кожен учасник мережі створює пару ключів і передає свій відкритий ключ до мережі для участі у процесі створення блоку та консенсусу.

Варто також згадати про такі пристрої як валідатори, що уповноважені виконувати смарт-контракти, брати участь у процесі консенсусу та створювати блоки [11]. У разі дозволеного блокчейна тільки певний набір пристроїв може виступати як валідатор, у той час як будь-який здатний пристрій може виконувати перевірку у загальнодоступних блокчейнах, таких як Bitcoin та Ethereum [10]. Можна стверджувати, що платформа Trinity краще підходить для дозволених блокчейнів, оскільки сторони, які беруть участь у транзакціях, відомі системі, і кожен передплатник повинен буде зареєструвати свій інтерес перед отриманням даних.

Отже, платформа Trinity має завдання, які специфічні для блокчейну, і вони мають малу пряму залежність від конкретної діяльності брокера. При цьому взаємодія між брокером та блокчейн-мережею здійснюється за допомогою набору API. Цілком можливо, що ця архітектура матиме вплив на розробку додатків шляхом внесення змін у модель зв'язку «публікація-підписки» іншими протоколами для створення нових інфраструктур на основі блокчейну.

Реалізація Trinity. У дослідженні платформу Trinity реалізовано з використанням платформи Mosquitto (MQTT) Broker та Tendermint Blockchain.

Платформа блокчейну Tendermint складається з набору інструментів для досягнення консенсусу в розподіленій мережі, виконання смарт-контрактів та створення блоків. Крім того, платформа Tendermint ізолює функціональні можливості, які пов'язані з блокчейном, від функцій, що є специфічними для програми. Це означає, що на основі платформи Tendermint можна розробляти будь-які програми, починаючи від криптовалют і закінчуючи сервером розподіленого чату. Також для реалізації платформи Trinity використано ABCI для об'єднання програми MQTT з платформою блокчейну. Платформа Tendermint використовує консенсусний протокол Byzantine Fault Tolerance (BFT), за допомогою якої 2/3 пристроїв у мережі мають схвалювати транзакції [12]. Коли більшість пристроїв у мережі схвалюють транзакцію, платформа Tendermint додає транзакцію до блоку.

Налаштування оцінки. Платформа Trinity оцінювалася з використанням 20-вузлової мережі Raspberry Pi 3. Raspberry Pi (версія 3) оснащений чотириядерним процесором ARM Cortex-A53 та 1 ГБ оперативної пам'яті. Для оцінки було використано ОС Nupriot. Усі пристрої були підключені через локальну мережу. Кожна точка даних у результатах оцінки збиралася шляхом публікації 1000 повідомлень одному з брокерів MQTT у мережі. Після отримання повідомлення брокер міг або передати повідомлення підписникам, як у сучасних системах публікації-підписки, або доставити повідомлення у структуру блокчейна для перевірки.

Оцінка проводилася на 5, 10, 15 та 20 вузлах для порівняння продуктивності мережі та наскрізної затримки з масштабом. Разом із тим, використовувалась конфігурація платформи Tendermint за умовчанням.

Наскрізна затримка. На відміну від традиційних брокерів, брокер Trinity перевіряє опубліковане повідомлення за допомогою смарт-контракту в рамках блокчейну і записує транзакції до розподіленого незмінного реєстру. Це свідчить про те, що передплатники брокера Trinity отримують записані та перевірені транзакції. Процес перевірки додає затримку, оскільки валідатори Trinity мають виконати смарт-контракт, алгоритм консенсусу та протоколи створення блоків. Передплатник отримує опубліковані дані після затримки через накладні витрати на обробку протоколу консенсусу, виконання смарт-контракту та створення блоку. На рис. 1 і 2 показані тимчасові витрати платформи Trinity при публікації та підписці на одного брокера, а також публікації на одному брокері та підписці на одну і ту ж перевірену тему від іншого брокера відповідно.

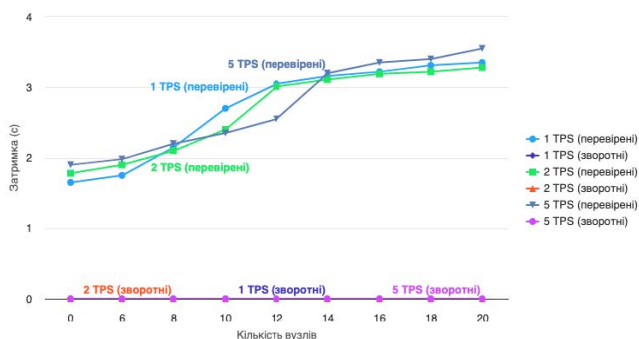


Рис. 1. Витрати при публікації та підписці на одного брокера

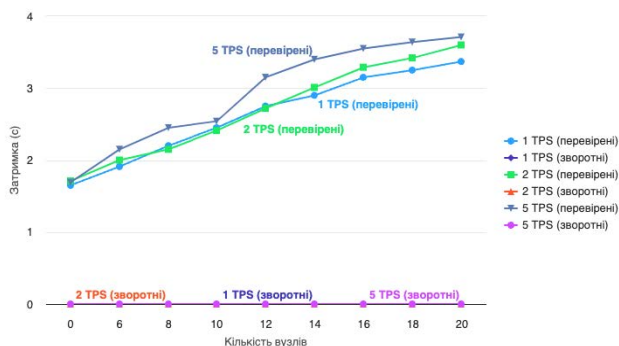


Рис. 2. Витрати при публікації та підписці на різних брокерів

Ми виміряли наскрізну затримку, коли публікатор відправляє дані кожні 0,2 с, 0,5 с і 1 с, що відповідає 5 транзакцій за секунду (TPS), 2 TPS та 1 TPS відповідно. Наскрізна затримка збільшується зі збільшенням кількості пристроїв у мережі через збільшення кількості валідаторів, які беруть участь у процесі консенсусу. Платформа Trinity поширює перевірени дані всім брокерам у мережі. Всі брокери будуть мати перевірени дані після додавання даних до незмінного реєстру. На рис. 1 показані тимчасові витрати при публікації та підписці на одного і того ж брокера. Максимальна затримка становить приблизно 3,5 с для 20 вузлів з 5 TPS, а затримка для транзакції зворотного зв'язку незначна (близько 90 мілісекунд). При підписці на перевірени дані з іншого брокера максимальна затримка збільшується з 3,5 с до 3,7 с. З рис. 1 і 2 видно, що незмінність та перевірка на основі блокчейна збільшують наскрізну затримку, але ми вважаємо, що ці витрати переважають переваги довіри та безпеки [13–16].

Накладні витрати мережі. Платформа Trinity використовує структуру блокчейна для реплікації стану, виконання протоколу консенсусу та створення блоків. Всі ці дії досягаються за рахунок координації та співпраці всіх пристроїв у мережі Trinity. Також даний процес генерує мережевий трафік. На рис. 3 показані мережеві витрати платформи Trinity. Слід звернути увагу на те, що реалізація Trinity здійснювалася поверх фреймворку Tendermint. Мережеві результати, представлені рис. 3, відбивають накладні витрати платформи Tendermint.

Мережеві витрати платформи Trinity збільшуються разом із кількістю пристроїв у мережі. Можна зауважити, що чим меншим є обсяг транзакцій в секунду, тим вищими є накладні витрати мережі, що пов'язано зі створенням великої кількості блоків. Вищий TPS зазвичай призводить до запису декількох транзакцій в одному блоці, тоді як нижчий TPS призводить до запису одного блоку на транзакцію [17–19].

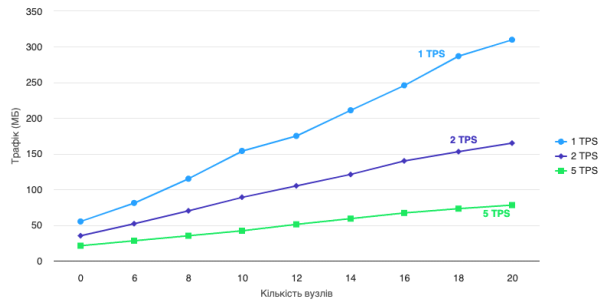


Рис. 3. Загальні мережеві витрати платформи

У підсумку, максимальні мережеві витрати, що становлять приблизно 300 МБ/1000 секунд для 20 пристроїв з одним TPS, незначні порівняно з перевагами, що пропонуються інфраструктурою Trinity. Агрегування кількох транзакцій може знизити мережні витрати, але це може статися за рахунок високої наскрізної затримки [20, 21].

Використання ЦП та ОЗУ. На рис. 4, 5 показано використання ЦП платформи Trinity.

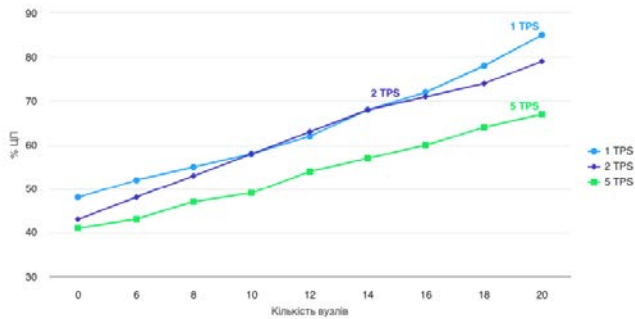


Рис. 4. Використання ЦП для консенсусу та створення блоку

На платформі Raspberry Pi 3 фреймворк Trinity використовує приблизно 85% ресурсів ЦП при публікації 1000 транзакцій зі швидкістю 1 TPS у мережі з 20 вузлів, оскільки фреймворк кожену секунду виконує смарт-контракт, алгоритм консенсусу та протокол створення блоків.

Аналогічно, максимальне використання оперативної пам'яті вимірюється в мережі з 20 вузлів під час публікації 1000 транзакцій зі швидкістю 1 TPS за 15-хвилинний інтервал часу. Витрати ресурсів платформи Trinity збільшуються разом із кількістю блоків, а тому, додаючи кілька транзакцій в один блок, можна мінімізувати навантаження на процесор та пам'ять.

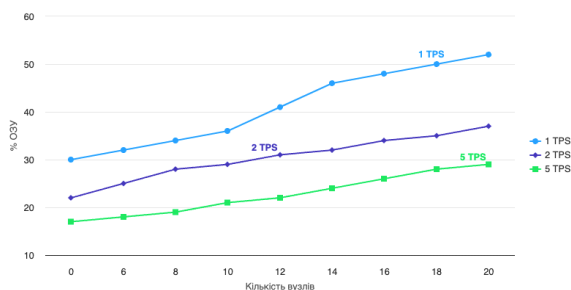


Рис. 5. Використання ОЗУ для консенсусу та створення блоку

Висновки. Технологія блокчейн суттєво вплинула на світ криптовалют. Будівельні блоки технології блокчейн, такі як протокол консенсусу та розподілений реєстр, є перспективними для додатків, що виходять за рамки криптовалют. У даному дослідженні було приділено особливу увагу Trinity, брокеру публікації та підписки з незмінюваністю на основі блокчейну. Платформа Trinity підвищує довіру при виконанні транзакцій у додатках за участю кількох зацікавлених сторін, таких як моніторинг ланцюжка постачання продуктів харчування та розумні міста. Платформа Trinity відокремила завдання, специфічні для блокчейна, від функцій, специфічних для брокера, тим самим дозволяючи розробникам додатків підключати своїх брокерів до будь-яких платформ блокчейну. Функція смарт-контрактів Trinity автоматизує процес перевірки даних під час виконання конфіденційних транзакцій в інфраструктурі, що належить кільком організаціям. Реалізація та оцінка платформи Trinity з використанням MQTT та Tendermint показують, що цю структуру можна практично реалізувати на сучасному брокері та платформах блокчейну. Нарешті, результати оцінки тестової мережі Raspberry Pi 3 з 20 вузлами показують, що платформа Trinity збільшує наскрізну затримку приблизно на 3 секунди, споживаючи смугу пропускання і обчислювальні ресурси. У підсумку можна стверджувати, що переваги довіри від платформи Trinity переважають накладні витрати.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Gerardus Blokdyk. Constrained Application Protocol Complete Self-Assessment Guide, 2022.
2. Cheng Sheng and Jie Bai. Software-Defined Wide Area Network Architectures and Technologies, 2021.
3. Michael Juntao Yuan. Building Blockchain Apps, 2019.
4. Sasu Tarkoma, Publish / Subscribe Systems: Design and Principles, 2012.
5. Шахід Шейх. Створення децентралізованих блокчейн програм: дізнайтеся, як використовувати блокчейн як основу для програм нового покоління, 2021.
6. Brenn Hill. Blockchain Quick Reference: A guide to exploring decentralized blockchain application development, 2018.
7. E. Buchman. Tendermint: Byzantine fault tolerance in the age of blockchains”, Ph.D. dissertation, 2016.
8. Meherban Singh. Consensus Algorithms in Distributed Systems”, 2023.
9. Azaria A, Ekblaw A, Vieira T, et al. MedRec: Using Blockchain for Medical Data Access and Permission Management [C]. International Conference on Open and Big Data. IEEE. 2016, 25-30.

10. Шахід Шейх. Створення децентралізованих блокчейн-програм: дізнайтеся, як використовувати блокчейн як основу для програм нового покоління, 2021, 227 с.
11. Створення Ethereum DApps: децентралізовані програми на блокчейні Ethereum. Роберто Інфанте, 2019, 509 с.
12. Private blockchain is just a confusing name for a shared database. URL: <https://freedom-to-tinker.com/2015/09/18/private-blockchain-is-just-a-confusing-name-for-a-shared-database> (дата звернення: 16.11.2022).
13. Blockchains vs centralized databases. URL: <https://www.multichain.com/blog/2016/03/blockchains-vs-centralized-databases> (дата звернення: 16.04.2024).
14. EU Government Pegs BLockchain. URL: <https://www.coindesk.com/eu-government-pegs-blockchain-beneficiary-e30-billion-research-fund> (дата звернення: 16.04.2024).
15. Зайцев Є.О. Smart засоби визначення аварійних станів у розподільних електричних мережах міст. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 2022, (5).
16. Новіченко Є.О. Актуальні засади створення алгоритмів обробки інформації для логістичних центрів. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 2023, (1).
17. Коротін Д.С. Ефективність функціонування комп'ютерних систем при використанні технології блокчейн і баз даних. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 2022, (6).
18. Singh Garewal. Practical Blockchains and Cryptocurrencies: Speed Up Your Application Development Process and Develop Distributed Applications with Confidence, 2020.
19. Роберто Інфанте. Створення Ethereum DApps: децентралізовані програми на блокчейні Ethereum, 2019.
20. Kevin Solorio and Randall Kanna. Hands-On Smart Contract Development with Solidity and Ethereum: From Fundamentals to Deployment, 2019.
21. Dhairya Parikh. Raspberry Pi and MQTT Essentials: A complete guide to helping you build innovative full-scale prototype projects using Raspberry Pi and MQTT protocol, 2022.

REFERENCES:

1. Gerardus Blokdyk. (2022). Constrained Application Protocol Complete Self-Assessment Guide.
2. Cheng Sheng and Jie Bai (2021). Software-Defined Wide Area Network Architectures and Technologies.
3. Michael Juntao Yuan. (2022). Building Blockchain Apps.
4. Sasu Tarkoma. (2012). Publish / Subscribe Systems: Design and Principles.
5. Shahid Sheikh. (2021). Building Decentralized Blockchain Applications: Learn how to use blockchain as the foundation for the next generation of applications.
6. Brenn Hill. (2018). Blockchain Quick Reference: A guide to exploring decentralized blockchain application development.
7. E. Buchman. (2016). Tendermint: Byzantine fault tolerance in the age of blockchains”, Ph.D. dissertation.
8. Meherban Singh. (2023). Consensus Algorithms in Distributed Systems.
9. Azaria A, Ekblaw A, Vieira T, et al. (2016). MedRec: Using Blockchain for Medical Data Access and Permission Management[C]. International Conference on Open and Big Data. IEEE, 25-30.
10. Shahid Sheikh. (2021). Building Decentralized Blockchain Applications: Learn how to use blockchain as the foundation for the next generation of applications, 227.
11. Roberto Infante. (2019). Creation of Ethereum DApps: decentralized applications on the Ethereum blockchain, 509.
12. Private blockchain is just a confusing name for a shared database. URL: <https://freedom-to-tinker.com/2015/09/18/private-blockchain-is-just-a-confusing-name-for-a-shared-database> (access date: 16.04.2024).

13. Blockchains vs centralized databases. URL: <https://www.multichain.com/blog/2016/03/blockchains-vs-centralized-databases> (access date: 16.04.2024).
 14. EU Government Pegs Blockchain. URL: <https://www.coindesk.com/eu-government-pegs-blockchain-beneficiary-e30-billion-research-fund> (access date: 16.04.2024).
 15. Zaitsev Ye.O. (2022). Smart zasoby vyznachennia avariinykh staniv u rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh mist. Tavriskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky, (5).
 16. Novichenko Ye.O. (2023). Aktualni zasady stvorennia alhorytmiv obrobky informatsii dlia lohistrychnykh tsentriv. Tavriskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky, (1).
 17. Korotin D.S. Efektyvnist funktsionuvannia kompiuternykh system pry vykorystanni tekhnolohii blokchein i baz dannykh. Tavriskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky, 2022, (6)
 18. Singh Garewal. (2020). Practical Blockchains and Cryptocurrencies: Speed Up Your Application Development Process and Develop Distributed Applications with Confidence.
 19. Roberto Infante. (2019). Creation of Ethereum DApps: decentralized applications on the Ethereum blockchain.
 20. Kevin Solorio and Randall Kanna. (2019). Hands-On Smart Contract Development with Solidity and Ethereum: From Fundamentals to Deployment.
 21. Dhairya Parikh. (2020). Raspberry Pi and MQTT Essentials: A complete guide to helping you build innovative full-scale prototype projects using Raspberry Pi and MQTT protocol.
-