

І. С. ЧЕПУРНА

асистентка кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0009-0008-2442-6221

МОДЕЛЬ ЗБОРУ МЕТРИК ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ БЛОКЧЕЙН-ОРІЄНТОВАНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ У ХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

У статті розглянуто задачу формалізації процесу збору метрик обчислювальних ресурсів у блокчейн-орієнтованій інформаційній системі, компоненти якої розгорнуто у хмарному середовищі. Показано, що наявні підходи до моніторингу хмарних та мікросервісних систем зосереджені на інструментах збору телеметрії та моніторингу, однак не забезпечують узгодженого опису багаторівневої архітектури та гетерогенних потоків метрик. Метою роботи є розроблення узагальненої математичної моделі, яка відображає багаторівневу структуру системи та забезпечує уніфіковане подання метрик обчислювальних ресурсів для подальшого аналізу й оптимізації. У межах дослідження побудовано формальну модель ресурсів одного хмарного середовища, введено множини рівнів та вузлів блокчейн-орієнтованої інформаційної системи, а також визначено вектори метрик для окремих вузлів. На цій основі запропоновано тензорне подання процесу збору метрик, яке одночасно враховує рівень архітектури, конкретний вузол і набір базових показників. Такий підхід дозволяє розглядати телеметрію системи як єдиний структурований об'єкт, спростити вибір підмножин даних та побудову агрегованих індикаторів стану. Адекватність моделі перевірено за структурними та інформаційними критеріями, а її працездатність продемонстровано на імітаційному прикладі трирівневої архітектури. Порівняння з традиційним аналізом розрізаних часових рядів підтверджує зменшення трудомісткості локалізації «вузьких місць» та підготовки рішень щодо масштабування і перерозподілу ресурсів. Запропонована модель може бути інтегрована з поширеними стеком моніторингу і слугувати основою для подальших досліджень, пов'язаних із прогнозуванням навантаження, адаптивним резервуванням та побудовою політик керування конфігурацією в мультихмарних та гетерогенних середовищах.

Ключові слова: інформаційна система, блокчейн, хмара, модель, тензор, моніторинг.

I. S. CHEPURNA

Assistant at the Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0009-0008-2442-6221

MODEL OF COMPUTATIONAL RESOURCE METRIC COLLECTION FOR A BLOCKCHAIN-ORIENTED INFORMATION SYSTEM IN A CLOUD ENVIRONMENT

The paper addresses the problem of formalizing the process of collecting metrics of computational resources in a blockchain-oriented information system deployed in a cloud environment. It is shown that existing approaches to monitoring cloud and microservice systems focus on telemetry collection and SLA monitoring tools, but do not provide a consistent description of multi-level architectures and heterogeneous metric streams. The aim of the study is to develop a generalized mathematical model that represents the multi-level structure of the system and provides a unified representation of resource metrics for further analysis and optimisation. Within the proposed approach, a formal model of resources of a single cloud environment is constructed, sets of levels and nodes of the blockchain-oriented information system are introduced, and metric vectors for individual nodes are defined. On this basis, a tensor representation of the metric collection process is proposed, which simultaneously takes into account the architectural level, a particular node and the chosen set of basic indicators. This representation allows system telemetry to be treated as a single structured object, simplifies the selection of data subsets and the construction of aggregated state indicators. The adequacy of the model is verified using structural and informational criteria, and its applicability is demonstrated on a simulation example of a three-level architecture. A comparison with the traditional analysis of separate time series confirms a reduction in the effort required to localise bottlenecks and to prepare decisions on scaling and resource reallocation. The proposed model can be integrated with common monitoring stacks and used as a foundation for further research on workload prediction, adaptive resource reservation and configuration management policies in multi-cloud and heterogeneous environments.

Key words: information system, blockchain, cloud, model, tensor, monitoring.

Постановка проблеми

Сучасні блокчейн-орієнтовані інформаційні системи, що функціонують у хмарному середовищі, набули широкого поширення у фінансовій сфері, промисловому Інтернеті речей, логістиці, державному секторі та сферах електронного урядування. Їх поширеність зумовлена поєднанням гнучкості й масштабованості хмарної інфраструктури з властивостями блокчейн-технологій – децентралізованим керуванням, незмінністю журналів транзакцій, прозорим аудитом операцій та підвищеним рівнем довіри між учасниками інформаційного обміну [1–3]. На практиці такі системи реалізуються як багатокомпонентні рішення, у яких обчислювальні, мережні та ресурси зберігання даних розподілені між хмарними дата-центрами, периферійними вузлами та спеціалізованими блокчейн-нодами.

Інформаційні системи такого класу характеризуються високою динамікою навантаження, неоднорідністю обчислювальних ресурсів і багаторівневою структурою, яка включає фізичну інфраструктуру, віртуалізовані ресурси, мікросервіси, смарт-контракти та прикладні сервіси, орієнтованих на кінцевого користувача. Забезпечення заданих показників продуктивності вимагає безперервного моніторингу стану обчислювальних ресурсів на всіх рівнях цієї структури [4–5]. При цьому обсяги телеметрії (метрики завантаження процесора, використання оперативної пам'яті, інтенсивності дискових операцій, параметри мережної взаємодії, характеристики обробки транзакцій тощо) у великих хмарних середовищах можуть сягати значних величин, що ускладнює їх обробку, зберігання та інтеграцію для подальшого аналізу в реальному масштабі часу.

Додатковою проблемою є різномірність метрик, які збираються різними підсистемами моніторингу. Ці дані часто відрізняються форматом подання, часовою роздільною здатністю, контекстом інтерпретації та належать до різних рівнів архітектури інформаційної системи у хмарному середовищі. За відсутності узгодженої структури даних і єдиної моделі представлення метрик стає складно формувати цілісну картину стану системи, аналізувати вплив змін конфігурації на використання ресурсів і досліджувати траєкторію функціонування системи за умов змінного навантаження [4–7]. Це, у свою чергу, ускладнює синтез ефективних політик масштабування, адаптивного резервування обчислювальних ресурсів і своєчасного виявлення аномалій у роботі блокчейн-орієнтованих сервісів.

Останні дослідження демонструють потенціал використання блокчейн-технологій як базового механізму зберігання та верифікації транзакцій, зокрема як інструменту для прозорого обліку використання ресурсів, реєстрації подій порушення роботи інформаційної системи та підтримки децентралізованих механізмів керування ресурсами у хмарному середовищі [6–8]. Проте більшість наявних підходів фокусуються на окремих аспектах (розподіл задач, керування ресурсами, моніторинг тощо) і не пропонують узагальненої математичної моделі, яка б відображала багаторівневу структуру блокчейн-орієнтованої інформаційної системи у хмарному середовищі та забезпечувала уніфіковане подання множини метрик обчислювальних ресурсів для подальшого формального аналізу й оптимізації.

Отже, актуальною є задача побудови узагальненої моделі збору метрик обчислювальних ресурсів у блокчейн-орієнтованій інформаційній системі у хмарному середовищі, яка враховує її багаторівневу архітектуру, дозволяє структуровано представити метрики для різних компонентів інфраструктури та створює формальну основу для дослідження ефективності використання ресурсів, аналізу відмовостійкості й синтезу політик масштабування в умовах змінного та потенційно пікового навантаження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних дослідженнях, присвячених моніторингу обчислювальних ресурсів у хмарних та мікросервісних середовищах, основна увага приділяється забезпеченню безперервного контролю стану компонентів інфраструктури та підтримці заданих показників якості сервісу. Запропоновані підходи орієнтовані на збір метрик завантаження процесора, використання оперативної пам'яті, дискових підсистем, мережних інтерфейсів і характеристик обробки запитів для подальшої оптимізації розподілу ресурсів та запобігання деградації продуктивності [9–12]. Зокрема, у дослідженні [9] приведено систему проактивного керування ресурсами для хмар мікросервісів, яка поєднує моніторинг контейнерів і кластерів з прогнозуванням навантаження з метою своєчасного масштабування. У [10] запропоновано стек моніторингу для edge- та хмарних інфраструктур, що забезпечує збір та аналіз великих обсягів телеметрії в режимі, наближеному до реального часу. Дослідження [11, 12] демонструють, що використання стандартних стеків у Kubernetes-кластерах дозволяє скоротити час виявлення інцидентів.

Окремий напрям становлять роботи, де блокчейн використовується як інфраструктурний механізм для децентралізованого керування ресурсами в хмарних середовищах. У [13] наведено огляд підходів до розподілу ресурсів у хмарних обчисленнях із використанням блокчейн-технологій. Розглядаються моделі, у яких інформація про стан ресурсів і рішення щодо їхнього виділення фіксуються у розподіленому реєстрі, що підвищує прозорість і довіру між учасниками. У дослідженні [8] пропонується блокчейн-орієнтована архітектура системи керування хмарними ресурсами, у якій транзакції щодо змін конфігурації інфраструктури, виділення ресурсів та подій

порушення політик системи реєструються у блокчейн-журналі, що забезпечує відтворюваність рішень та аудит історії використання ресурсів. Разом із тим, у зазначених роботах основна увага зосереджена на архітектурних рішеннях і протоколах узгодження, тоді як структурне подання множини метрик обчислювальних ресурсів для багаторівневих блокчейн-орієнтованих інформаційних систем формалізується лише частково.

Значна кількість досліджень присвячена проблемам неоднорідності й попередньої обробки даних моніторингу. У дослідженні [14] виконано систематизацію типів моніторингових даних для хмарних систем та показано, що для задач виявлення аномалій і аналізу поведінки систем необхідні спеціалізовані процедури очищення, нормалізації та синхронізації часових рядів. У науковій праці [15] акцентовано увагу на інтеграції гетерогенних даних із різних джерел, підкреслюючи, що різні формати, частота вимірювань та семантика атрибутів істотно ускладнюють побудову узгоджених моделей для аналітики. У [16] представлено порівняльне дослідження інструментів очищення та контролю якості даних на великих реальних наборах, де показано, що якість подальшого аналізу суттєво залежить від обраних процедур підготовки первинних даних.

Проведений аналіз [8–16] дозволяє зробити висновок, що, попри значний прогрес у розвитку інструментів моніторингу, блокчейн-орієнтованих архітектур для керування ресурсами та методів обробки гетерогенних даних, недостатньо дослідженими залишаються питання формального опису процесу збору метрик обчислювальних ресурсів у багаторівневих блокчейн-орієнтованих інформаційних системах у хмарному середовищі. У більшості робіт метрики розглядаються як множина ізольованих часових рядів або логів для окремих компонентів, без уніфікованого математичного подання, яке б явно відображало багаторівневу структуру системи та забезпечувало цілісне структурування метрик для подальшого аналізу, прогнозування та оптимізації використання обчислювальних ресурсів.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає у розробленні узагальненої математичної моделі збору метрик обчислювальних ресурсів у блокчейн-орієнтованій інформаційній системі у хмарному середовищі, яка відображає її багаторівневу архітектуру та забезпечує уніфіковане структуроване подання гетерогенних метрик для подальшого аналізу, прогнозування та оптимізації використання обчислювальних ресурсів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Вихідні припущення та модель ресурсів одного хмарного середовища

У даному дослідженні розглядається блокчейн-орієнтована інформаційна система, компоненти якої розгорнуті в одному хмарному середовищі. Нехай в межах цього середовища функціонує множина вузлів

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}, \quad (1)$$

де N – кількість вузлів (віртуальних машин, контейнерів, сервісів тощо), що належать одному хмарному середовищу.

Нехай:

– R^c – сукупність обчислювальних ресурсів, доступних у хмарному середовищі у межах обраної моделі надання послуг;

– S^c – агреговані сервісні витрати (ресурси, що витрачаються на гіпервізори, системні служби, мережну інфраструктуру тощо).

Тоді умову стабільного та безперервного функціонування всієї сукупності вузлів (1) можна записати у вигляді балансового співвідношення:

$$\sum_{i=1}^N \bar{r}_i + S^c \leq R^c, \quad (2)$$

де \bar{r}_i – вектор ресурсів, необхідних для стабільного функціонування вузла v_i в межах хмарного середовища. Співвідношення (2) задає узагальнену умову припустимості конфігурації інфраструктури, коли сумарні витрати ресурсів на функціонування всіх вузлів та сервісної інфраструктури не повинні перевищувати наявний обсяг ресурсів хмарного середовища.

У межах моделі виділення обчислювальних ресурсів розглядається множина типів ресурсів:

$$\Xi = \{\xi_1, \dots, \xi_M\}. \quad (3)$$

У (3) ξ_i можуть бути, наприклад, ξ_1 – параметри процесорного часу, ξ_2 – параметри оперативної пам'яті, ξ_3 – параметри дискового простору, ξ_4 – параметри мережного інтерфейсу тощо. Для кожного вузла v_i вектор \bar{r}_i можна подати у вигляді:

$$\bar{r}_i = (r_{i,\xi_1}, r_{i,\xi_2}, \dots, r_{i,\xi_M}), \quad (4)$$

де r_{i,ξ_m} – обсяг ресурсу типу ξ_m , виділений вузлу v_i при номінальному або середньому навантаженні відповідно до обраної моделі надання послуг.

Багаторівнева структура блокчейн-орієнтованої інформаційної системи

Блокчейн-орієнтована інформаційна система розглядається як багаторівнева структура, де на кожному рівні функціонують вузли певного типу (інфраструктурні вузли, вузли віртуалізації, контейнерні платформи, мікросервіси, блокчейн-ноди, прикладні сервіси тощо).

Нехай множина рівнів задається наступним чином:

$$L = \{1, 3, \dots, L_{\max}\}, \tag{5}$$

де L_{\max} – кількість рівнів багаторівневої архітектури системи.

Для кожного рівня $\ell \in L$ вводиться множина вузлів, згідно з (1):

$$V_{\ell} = \{v_{\ell,1}, v_{\ell,2}, \dots, v_{\ell,N_{\ell}}\}, \tag{6}$$

де N_{ℓ} – кількість вузлів на рівні ℓ .

Тоді ресурсний вектор вузла $v_{\ell,j}$ можна записати з урахуванням (4) у вигляді:

$$\bar{r}_{\ell,j} = (r_{\ell,j,\xi_1}, r_{\ell,j,\xi_2}, \dots, r_{\ell,j,\xi_M}). \tag{7}$$

Баланс ресурсів на рівні хмарного середовища з урахуванням багаторівневої структури (7) має наступний вигляд:

$$\sum_{\ell=1}^{L_{\max}} \sum_{j=1}^{N_{\ell}} \bar{r}_{\ell,j} + S^c \leq R^c. \tag{8}$$

Формула (8) показує сумарне споживання ресурсів усіма вузлами на всіх рівнях архітектури.

Модель метрик обчислювальних ресурсів для вузла

Для аналізу стану інформаційної системи фактичне використання ресурсів на вузлах описується виділеними квотами $\bar{r}_{\ell,j}$ та множиною метрик, що характеризують набором функціональних дій кожного ресурсу у часі.

Нехай для вузла $v_{\ell,j}$ задано множину базових метрик, які вимірюються для кожного ресурсу типу ξ_m :

- завантаження процесора в середньому за інтервал;
- використання оперативної пам'яті;
- інтенсивність дискових операцій;
- пропускна здатність мережі;
- затримка обробки транзакцій тощо.

Тоді:

$$\bar{\mu}_{\ell,j}(t) = (\mu_{\ell,j,1}(t), \mu_{\ell,j,2}(t), \dots, \mu_{\ell,j,P}(t)) \tag{9}$$

є вектором метрик вузла $v_{\ell,j}$ в момент часу t .

У (9) P – кількість обраних базових метрик. При цьому кожен компонент $\mu_{\ell,j,p}(t)$ є функцією фактичного використання відповідних ресурсів:

$$\bar{\mu}_{\ell,j}(t) = F_{\ell,j}(\bar{r}_{\ell,j}(t)), \tag{10}$$

де $F_{\ell,j}(\cdot)$ – функція процесу збору та обчислення метрик для вузла $v_{\ell,j}$.

Тензорне подання процесу збору метрик у багаторівневій системі

Для тензорного подання процесу збору метрик у багаторівневій системі спочатку необхідно згрупувати метрики всіх вузлів на кожному рівні в матрицю:

$$M_{\ell}(t) = \begin{bmatrix} \bar{\mu}_{\ell,1}(t) \\ \bar{\mu}_{\ell,2}(t) \\ \vdots \\ \bar{\mu}_{\ell,N_{\ell}}(t) \end{bmatrix}, \quad \ell \in L. \tag{11}$$

Матриця $M_{\ell}(t)$ (11) має розмірність $N_{\ell} \times P$ і містить значення всіх базових метрик для вузлів рівня ℓ у момент часу t .

Для всієї блокчейн-орієнтованої інформаційної системи, яка функціонує в одному хмарному середовищі, стан метрик обчислювальних ресурсів у момент часу t можна подати у вигляді тензора:

$$\boxed{M(t)} = \{M_{\ell}(t)\}_{\ell=1}^{L_{\max}}. \tag{12}$$

Формула (12) відображає значення метрик для всіх вузлів на кожному рівні багаторівневої архітектури. У загальному випадку $\boxed{M(t)}$ можна розглядати як тривимірний масив розмірності $L_{\max} \times N_{\max} \times P$, в якому $N_{\max} = \max_{\ell} N_{\ell}$ – максимальна кількість вузлів на рівні, а відсутні вузли на окремих рівнях можуть позначатися нульовими або спеціальними значеннями.

Таке тензорне подання процесу збору метрик обчислювальних ресурсів (12) забезпечує:

- уніфіковану структуру даних для гетерогенних компонентів блокчейн-орієнтованої інформаційної системи у хмарному середовищі;
- можливість формального аналізу стану системи за рівнями, вузлами та типами метрик;
- основу для подальшого застосування методів агрегації, виявлення аномалій, прогнозування навантаження та синтезу політик масштабування й адаптивного резервування ресурсів.

Перевірка адекватності запропонованої моделі

Адекватність запропонованої моделі збору метрик обчислювальних ресурсів у блокчейн-орієнтованій інформаційній системі у хмарному середовищі перевіряється за двома групами критеріїв: структурними та інформаційними.

До структурних критеріїв належить відповідність багаторівневої схеми моделі реальній архітектурі системи: множина рівнів L повинна відображати виділені в інфраструктурі шари (фізичні сервери, віртуальні машини, контейнерні платформи, блокчейн-ноди, прикладні сервіси), а множини вузлів V_ℓ – конкретні екземпляри компонентів на кожному рівні. У рамках перевірки здійснюється відображення імітованої моделі конфігурації тестового стенду на множини L та V_ℓ , що дозволяє підтвердити, що кожному елементу інфраструктури відповідає єдиний вузол моделі, а агреговане співвідношення (8) коректно описує баланс використання ресурсів у хмарному середовищі.

Інформаційні критерії пов'язані з повнотою та узгодженістю метрик, що збираються. Вектор метрик $\bar{\mu}_{\ell,j}(t)$ для вузла $v_{\ell,j}$ розширюється до мінімально необхідного набору показників, які реально підтримуються системами моніторингу (наприклад, Prometheus-орієнтований стек, експортери метрик хмарної платформи, телеметрія блокчейн-нод). Перевірка адекватності полягає у демонстрації того, що всі фактично доступні метрики можуть бути однозначно віднесені до компонентів вектора $\bar{\mu}_{\ell,j}(t)$, а тензорне подання $\boxed{M(t)}$ дозволяє без втрати інформації відновити початкові часові ряди для окремих вузлів і рівнів.

Додатково перевіряється коректність інтерпретації моделі в типових експлуатаційних сценаріях: зростання навантаження на прикладному рівні відображається у $\boxed{M(t)}$ як узгоджена зміна відповідних метрик на рівнях мікросервісів, блокчейн-нод і інфраструктурних вузлів. Відмова вузла призводить до локальної зміни структури тензора (набуття нульового значення або маркування відповідних елементів), не порушуючи цілісності моделі в цілому. Така поведінка свідчить про адекватність запропонованої моделі з погляду відображення динаміки реальної інформаційної системи.

Експериментальна оцінка та порівняння з існуючими підходами

Експериментальна оцінка запропонованої моделі виконувалася в рамках імітаційного експерименту, що відтворює роботу блокчейн-орієнтованої інформаційної системи з багаторівневою архітектурою у хмарному середовищі. Розглядалося три рівні:

- рівень інфраструктури (L_1), до якого належать віртуальні машини;
- рівень блокчейн-нод (L_2), де здійснюється обробка й фіксація транзакцій;
- рівень мікросервісів (L_3), що реалізують прикладну логіку.

Для кожного рівня моделювалась множина вузлів, а протягом дискретного часу $t=0,1,\dots,119$ генерувалися часові ряди завантаження процесора, що відображають перехід від номінального режиму до режиму підвищеного навантаження. На основі цих даних формувалася тензор $\boxed{M(t)}$, який узгоджено описує стан обчислювальних ресурсів за рівнями, вузлами та часом.

На рис. 1 наведено динаміку завантаження процесорів вузлів на кожному з трьох рівнів. У початковому інтервалі часу спостерігається помірне коливання завантаження в межах 30-40 %, що відповідає номінальному режиму роботи інформаційної системи. В околі моменту $t \approx 40$ фіксується помітне зростання завантаження на всіх рівнях, яке відображає зміну режиму функціонування (збільшення інтенсивності запитів і транзакцій). Надалі криві демонструють хвилеподібну динаміку із збереженням підвищеного середнього рівня завантаження, причому для рівнів L_2 та L_3 характерні дещо вищі пікові значення, що відповідає концентрації навантаження на сервісних компонентах.

Рис. 2 ілюструє середнє завантаження процесорів для кожного рівня багаторівневої архітектури, обчислене на основі тензорного подання $\boxed{M(t)}$. Видно, що після переходу до режиму зростаючого навантаження середні значення для L_2 та L_3 стають вищими, ніж для L_1 , що відображає більшу чутливість цих рівнів до зміни інтенсивності транзакцій. Такий характер кривих відповідає очікуваній поведінці системи: першим реагує прикладний та блокчейн-рівень, тоді як інфраструктурний рівень демонструє більш згладжену динаміку.

Для демонстрації здатності моделі локалізувати «вузькі місця» побудовано карту розподілу завантаження процесора за рівнями та вузлами у піковий момент часу (рис. 3). По вертикальній осі відкладено рівні архітектури, по горизонтальній – вузли на кожному рівні. За інтенсивністю кольору можна виділити вузли з підвищеним завантаженням (зокрема, один із вузлів на рівні L_2 та кілька вузлів на рівні L_3) і вузли з відносно низьким

навантаженням, які потенційно можуть бути використані для перерозподілу обчислювальних ресурсів. Таким чином, тензорне подання $\overline{M}(t)$ дозволяє в єдиному форматі представити метрики для всієї системи та підтримує побудову узагальнених візуалізацій, що поєднують інформацію про рівень архітектури, окремі вузли та значення метрик.

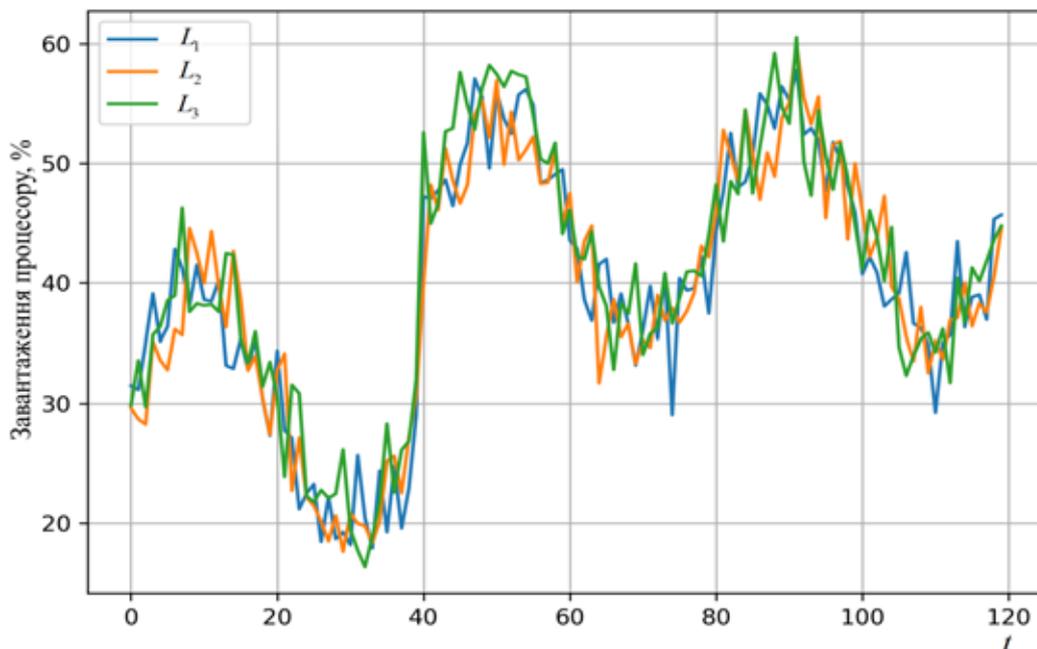


Рис. 1. Динаміка завантаження процесорів вузлів на кожному з трьох рівнів

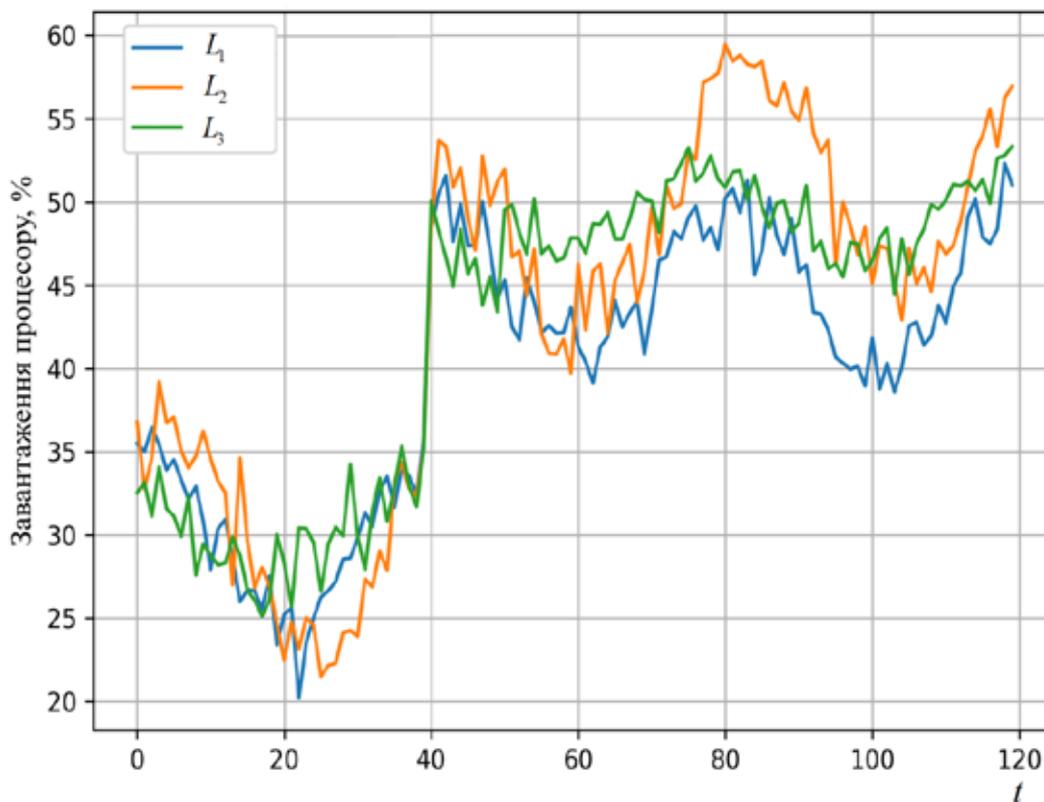


Рис. 2. Динаміка завантаження процесорів для кожного рівня багаторівневої архітектури

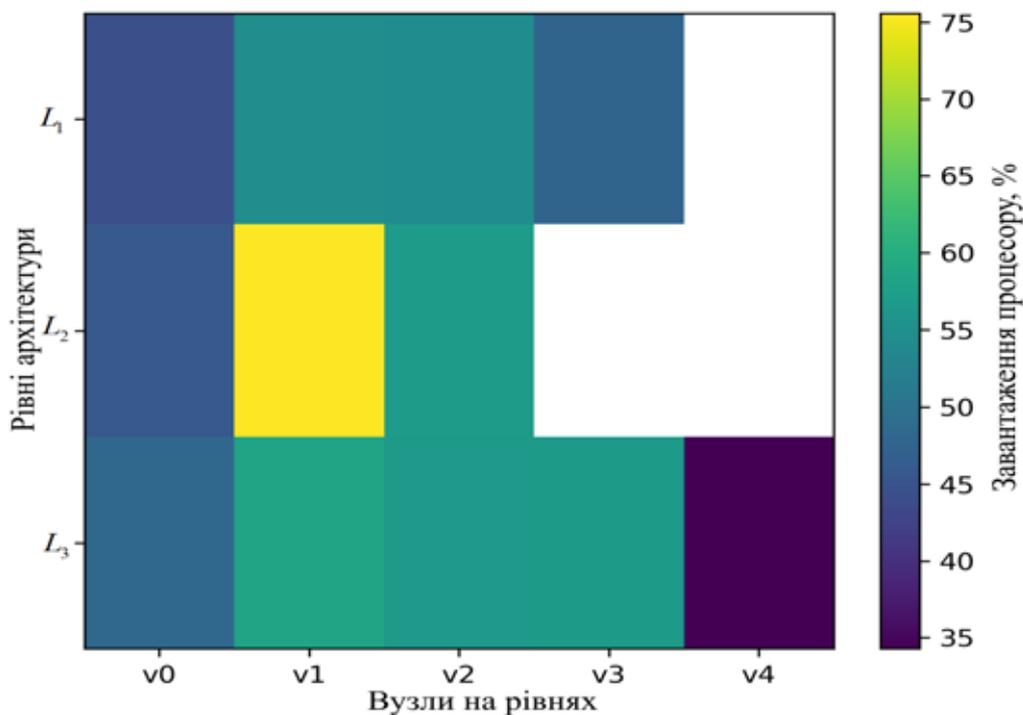


Рис. 3. Карту розподілу завантаження процесора за рівнями та вузлами у піковий момент часу

Порівняно з традиційним підходом, у якому аналіз моніторингових даних виконується на основі набору розрізнених структур агрегації даних для окремих компонентів, запропонована модель забезпечує формальний опис структури метрик для всієї інформаційної системи як єдиного об'єкта. Це спрощує вибір підмножин даних (за рівнем, вузлом, типом ресурсу), зменшує кількість кроків, необхідних для локалізації «вужьких місць», та створює передумови для подальшого застосування методів виявлення аномалій, прогнозування навантаження й синтезу політик масштабування та адаптивного резервування обчислювальних ресурсів у блокчейн-орієнтованих інформаційних системах у хмарному середовищі.

Висновки

У роботі розглянуто задачу формалізації процесу збору метрик обчислювальних ресурсів у блокчейн-орієнтованій інформаційній системі у хмарному середовищі. На основі аналізу сучасних підходів до моніторингу хмарних, мікросервісних та блокчейн-орієнтованих систем показано, що існуючі рішення здебільшого зосереджуються на інструментах збору телеметрії, SLA-моніторингу та механізмах розподілу ресурсів, але не пропонують узагальненої математичної моделі, яка б уніфіковано відображала багаторівневу структуру системи та множину гетерогенних метрик обчислювальних ресурсів.

Напрямок моделювання блокчейн-орієнтованих інформаційних систем у хмарному середовищі набув подальшого розвитку за рахунок запропонованих у цьому дослідженні засобів формалізації процесу збору метрик у вигляді тензорного подання $\mathbb{M}(t)$, яке одночасно враховує рівень архітектури, конкретний вузол та множину базових метрик. Це дозволило поєднати у єдиній моделі як ресурсні обмеження хмарного середовища, так і динаміку фактичного використання ресурсів на різних рівнях архітектури. Запропонований підхід забезпечує структуроване представлення гетерогенних даних моніторингу та створює формальну основу для їх подальшого аналізу.

Перевірка адекватності моделі за структурними та інформаційними критеріями показала, що множини рівнів, вузлів і метрик можуть бути узгоджено зіставлені з реальною конфігурацією блокчейн-орієнтованої системи у хмарному середовищі, а тензорне подання $\mathbb{M}(t)$ не призводить до втрати інформації щодо стану окремих компонентів. Імітаційний експеримент із тривірневою архітектурою продемонстрував, що модель придатна для локалізації «вужьких місць», побудови агрегованих показників стану за рівнями та аналізу реакції системи на зміну режиму навантаження. Порівняння з традиційним підходом, засвідчило перевагу запропонованого підходу з точки зору структурованості даних та зменшення трудомісткості аналітичних процедур.

Отримані результати мають як теоретичне, так і практичне значення. З теоретичної точки зору модель задає узагальнену схему опису метрик обчислювальних ресурсів для блокчейн-орієнтованих інформаційних систем у хмарному середовищі та може використовуватися як базис для побудови методів формального аналізу, оцінювання відмовостійкості та ефективності використання ресурсів. З практичної точки зору тензорне подання $\mathbb{M}(t)$

може бути інтегроване з існуючим стеком моніторингу (Prometheus, Grafana, системи логування), спрощуючи побудову багаторівневих візуалізацій, підтримку процедур локалізації проблемних вузлів і обґрунтування рішень щодо масштабування та перерозподілу ресурсів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення запропонованої у цьому дослідженні моделі для мультимарних сценаріїв побудови обчислювального середовища та сценаріїв з динамічним міграційним перерозподілом сервісів між провайдерами (вендорами хмарних послуг), а також на інтеграцію тензорного подання метрик із методами прогнозування навантаження, адаптивного резервування ресурсів [17] та побудови політик управління конфігурацією блокчейн-орієнтованих інформаційних систем в гетерогенних середовищах [18-19].

Список використаної літератури

1. Dorsala M. R., Sastry V. N., Chapram S. Blockchain-based solutions for cloud computing: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*. 2021. Vol. 196. 103246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103246>.
2. Ahmed W. Blockchain Integration in Modern Cloud Computing: A Comprehensive Survey of Security and Efficiency. *Premier Journal of Data Science*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.70389/pjds.100003>.
3. A Systematic Review of Blockchain, AI, and Cloud Integration for Secure Digital Ecosystems / J. Singh et al. *International Journal of Networked and Distributed Computing*. 2025. Vol. 13, no. 2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44227-025-00072-1>.
4. Kanthed, S. Monitoring of Cloud Computing Environments: Concepts, Solutions, Trends, and Future Directions. *International Journal on Science and Technology*. 2024. Vol. 15, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.71097/ijst.v15.i1.2836>.
5. Bliedy D., Khafagy M. H., Badry R. M. Resource Utilization Prediction Model for Cloud Datacentre: Survey. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2025. Vol. 16, no. 3. DOI: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2025.0160380>.
6. Baranwal G., Kumar D., Vidyarthi D. P. Blockchain based resource allocation in cloud and distributed edge computing: A survey. *Computer Communications*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.07.023>.
7. Гнатюк В. О., Зандер К. Ю. Методика формування структури центру збирання та оброблення даних під час моніторингу стану об'єктів критичної інфраструктури. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2025. Т. 1, № 09. С. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2025-01-09-01>.
8. Towards a Decentralized Blockchain-Based Resource Monitoring Solution For Distributed Environments / R. B. Dos Passos et al. *Journal of Internet Services and Applications*. 2024. Vol. 15, no. 1. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.5753/jisa.2024.3813>.
9. Kravchenko P., Skriabin B., Dubinina O. Blockchain And Decentralized Systems. *Blockchain and decentralized systems*, 2019. 446 p.
10. Real-time Monitoring and Analysis of Edge and Cloud Resources / I. Korontanis et al. *HPDC '23: The 32nd International Symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing*, Orlando FL USA. New York, NY, USA, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1145/3589010.3594892>.
11. Designing a Real-Time Monitoring System for the AWS Cloud: An Adaptive Dashboard-Based Approach with Prometheus and Grafana / A.W. Bello et al. *CITA 2025 – Emerging Technologies and Sustainable Agriculture, 26-28 June 2025, Cotonou, Benin*. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4036/Paper9.pdf>.
12. Monitoring tools for DevOps and microservices: A systematic grey literature review / L. Giamattei et al. *Journal of Systems and Software*. 2024. Vol. 208. P. 111906. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111906>.
13. Baranwal G., Kumar D., Vidyarthi D. P. Blockchain based resource allocation in cloud and distributed edge computing: A survey. *Computer Communications*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.07.023>.
14. Monitoring data for Anomaly Detection in Cloud-Based Systems: A Systematic Mapping Study / A. Hrusto et al. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1145/3744556>.
15. Putrama I. M., Martinek P. Heterogeneous data integration: Challenges and opportunities. *Data in Brief*. 2024. 110853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110853> (date of access: 23.11.2025).
16. Performance and Scalability of Data Cleaning and Preprocessing Tools: A Benchmark on Large Real-World Datasets / P. Martins et al. *Data*. 2025. Vol. 10, no. 5. P. 68. DOI: <https://doi.org/10.3390/data10050068>.
17. Kuchuk N., Tkachov V. Self-healing Systems Modelling. *Advances in Self-healing Systems Monitoring and Data Processing*. Cham, 2022. P. 57–111. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96546-4_2.
18. Фролов Д.Є. Ways of achieving fault tolerance of heterogeneous information systems under conditions of external influence. Проблеми інформатизації : тези доповідей дванадцятої міжнар. наук.-техн. конф., 21–22 листопада 2024 р. Том 2: секція 4. Баку–Харків–Бельсько-Бяла, 2024. С. 79.
19. Tokar L. O., Tsyliuryk V. Y., Solodilov V. V. Study of data replication process using Raft replication algorithm to maintain consistency in server cluster. *Radiotekhnika*. 2024. No. 217. P. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.30837/rt.2024.2.217.10>.

References

1. Dorsala, M. R., Sastry, V. N., & Chapram, S. (2021). Blockchain-based solutions for cloud computing: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 196, 103246. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103246>
2. Ahmed, W. (2025). Blockchain integration in modern cloud computing: A comprehensive survey of security and efficiency. *Premier Journal of Data Science*. <https://doi.org/10.70389/pjds.100003>
3. Singh, J., et al. (2025). A systematic review of blockchain, AI, and cloud integration for secure digital ecosystems. *International Journal of Networked and Distributed Computing*, 13(2). <https://doi.org/10.1007/s44227-025-00072-1>
4. Kanthed, S. (2024). Monitoring of cloud computing environments: Concepts, solutions, trends, and future directions. *International Journal on Science and Technology*, 15(1). <https://doi.org/10.71097/ijst.v15.i1.2836>
5. Bliedy, D., Khafagy, M. H., & Badry, R. M. (2025). Resource utilization prediction model for cloud datacentre: Survey. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 16(3). <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2025.0160380>
6. Baranwal, G., Kumar, D., & Vidyarthi, D. P. (2023). Blockchain based resource allocation in cloud and distributed edge computing: A survey. *Computer Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.07.023>
7. Hnatiuk, V. O., & Zander, K. Yu. (2025). Metodyka formuvannia struktury tsentru zbyrannia ta obroblennia danykh pid chas monitorynhu stanu ob'ektiv krytychnoi infrastruktury. *Infokomunikatsiini ta kompiuterni tekhnolohii*, 1(09), 9–17. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2025-01-09-01>
8. Dos Passos, R. B., et al. (2024). Towards a decentralized blockchain-based resource monitoring solution for distributed environments. *Journal of Internet Services and Applications*, 15(1), 1–13. <https://doi.org/10.5753/jisa.2024.3813>
9. Kravchenko, P., Skriabin, B., & Dubinina, O. (2019). Blockchain and decentralized systems. [Monograph, 446 pp.].
10. Korontanis, I., et al. (2023). Real-time monitoring and analysis of edge and cloud resources. In *Proceedings of the 32nd International Symposium on High-Performance Parallel and Distributed Computing (HPDC '23)*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3589010.3594892>
11. Bello, A. W., et al. (2025). Designing a real-time monitoring system for the AWS cloud: An adaptive dashboard-based approach with Prometheus and Grafana. In *CITA 2025 – Emerging Technologies and Sustainable Agriculture (26–28 June 2025, Cotonou, Benin)*. Retrieved from <https://ceur-ws.org/Vol-4036/Paper9.pdf>
12. Giamattei, L., et al. (2024). Monitoring tools for DevOps and microservices: A systematic grey literature review. *Journal of Systems and Software*, 208, 111906. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111906>
13. Baranwal, G., Kumar, D., & Vidyarthi, D. P. (2023). Blockchain based resource allocation in cloud and distributed edge computing: A survey. *Computer Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.07.023>
14. Hrusto, A., et al. (2025). Monitoring data for anomaly detection in cloud-based systems: A systematic mapping study. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. <https://doi.org/10.1145/3744556>
15. Putrama, I. M., & Martinek, P. (2024). Heterogeneous data integration: Challenges and opportunities. *Data in Brief*, 110853. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110853>
16. Martins, P., et al. (2025). Performance and scalability of data cleaning and preprocessing tools: A benchmark on large real-world datasets. *Data*, 10(5), 68. <https://doi.org/10.3390/data10050068>
17. Kuchuk, N., & Tkachov, V. (2022). Self-healing systems modelling. In *Advances in self-healing systems monitoring and data processing* (pp. 57–111). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96546-4_2
18. Frolov, D. Ye. (2024). Ways of achieving fault tolerance of heterogeneous information systems under conditions of external influence. In *Problemy informatyzatsii: tezy dopovidei dvanadtsiatoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, tom 2, sektsiia 4* (p. 79). Baku–Kharkiv–Bielsko-Biala.
19. Tokar, L. O., Tsyliuryk, V. Y., & Solodilov, V. V. (2024). Study of data replication process using Raft replication algorithm to maintain consistency in server cluster. *Radiotekhnika*, 217, 117–127. <https://doi.org/10.30837/rt.2024.2.217.10>

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025