

А. А. Коваленко, І. А. Замрій, В. Д. Попов, Д. А. Жаріков

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛЕНОГО РЕЄСТРУ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

**Анотація. Актуальність.** Основною проблемою при формуванні реєстру у розподілених системах є визначення залежності між параметрами потоку запитів, швидкістю обслуговування транзакцій та загальними характеристиками продуктивності системи. **Мета дослідження:** побудова аналітичної моделі розподіленого реєстру, що дозволяє описати процес обробки транзакцій у термінах теорії масового обслуговування та визначити ключові показники ефективності системи. **Результати.** У статті запропоновано аналітичну модель розподіленого реєстру, побудовану на основі теорії масового обслуговування. Модель описує процеси запису, верифікації та підтвердження транзакцій у децентралізованому середовищі з урахуванням обмежень пропускну здатності вузлів та інтенсивності надходження запитів. Використання апарату масового обслуговування дозволяє формалізувати часові характеристики системи, оцінити середній час очікування обробки транзакцій, коефіцієнт завантаження вузлів та ймовірність затримки. Проведено аналітичне дослідження впливу параметрів мережі на продуктивність реєстру та визначено умови стійкості системи. Запропонований підхід може бути використаний для оптимізації архітектури розподілених систем з підвищеними вимогами до швидкодії та надійності обробки даних.

**Ключові слова:** розподілений реєстр, масове обслуговування, аналітична модель, транзакція, продуктивність системи, стійкість.

### Вступ

Сучасні інформаційні системи все частіше базуються на розподілених архітектурах, що забезпечують підвищену відмовостійкість, безпеку та прозорість обробки даних. Одним із ключових компонентів таких систем є розподілений реєстр, який дозволяє зберігати транзакції між вузлами без централізованого контролю. Проте зі зростанням обсягів даних і кількості учасників мережі постає проблема оцінювання продуктивності та стабільності таких систем у динамічних умовах.

Традиційні методи аналізу розподілених систем не завжди враховують стохастичний характер надходження запитів, черговість обробки транзакцій і вплив затримок зв'язку між вузлами [1–3]. У цьому контексті доцільним є застосування теорії масового обслуговування, яка дозволяє побудувати математичну модель процесів обробки транзакцій, описати їх у термінах інтенсивностей потоків заявок і обслуговування, а також оцінити ефективність роботи системи [4]. В [5] розглянуто початкові ідеї сучасних розподілених реєстрів, що слід пов'язувати з практичною появою блокчейну в роботі Накамото, де показано, як побудувати стійку розподілену систему для ведення ланцюга транзакцій без централізованого керування. Класичні роботи і подальші масштабувальні оптимізації (ролі делегування, шардінг) детально аналізують в [6] при умові детермінованого часу підтвердження та ліміту на кількість вузлів, проте вартість комунікації зростає з кількістю учасників приблизно як  $O(N^2)$ . Розповсюдження блоків/транзакцій у P2P-мережі (propagation) – ключовий чинник затримок і, отже, продуктивності. У працях [7–9] показано, що мережеві латентності і топологія суттєво змінюють час підтвердження.

### 1. Постановка задачі

У розподілених реєстрах процес обробки транзакцій включає кілька етапів: формування запиту

користувачем, передача його до вузлів мережі, перевірка коректності даних, включення до черги на обробку та підтвердження результату. Кожен вузол мережі виконує функції обслуговування заявок, що надходять у випадкові моменти часу, утворюючи систему черг.

Основною проблемою є визначення залежності між параметрами потоку запитів, швидкістю обслуговування транзакцій та загальними характеристиками продуктивності системи. Зокрема, необхідно оцінити:

- середній час очікування транзакції в черзі;
- середній час обслуговування запиту вузлом;
- ймовірність переповнення черги (затримки або відмови в обслуговуванні);
- коефіцієнт завантаження вузлів;
- умови стійкості системи при зміні інтенсивності надходження заявок.

Таким чином, **метою роботи** є побудова аналітичної моделі розподіленого реєстру, що дозволяє описати процес обробки транзакцій у термінах теорії масового обслуговування та визначити ключові показники ефективності системи.

У даній роботі розроблено аналітичну модель розподіленого реєстру, що ґрунтується на концепції масового обслуговування. Модель дозволяє провести кількісну оцінку параметрів системи, таких як середній час підтвердження транзакцій, рівень завантаженості вузлів та ймовірність відмови у обслуговуванні. Отримані результати можуть бути використані для подальшої оптимізації механізмів синхронізації вузлів та підвищення ефективності роботи розподілених мереж.

### 2. Математична модель розподіленого реєстру

Архітектура класичних розподілених реєстрів з ланцюговою структурою, як правило, не передбачає прямої взаємодії кінцевих користувачів із записами реєстру; доступ здійснюється опосередковано через протоколи мережі. Коли користувач хоче додати

транзакцію до реєстру, йому доводиться віддавати доручення виробникам верифікованих записів реєстру (записи блоками), тобто посередникам, що стоять між користувачами та розподіленим реєстром. Вони також є фактором, через який виникають проблеми масштабування. Саме виробники вирішують, яку транзакцію додати до наступного блоку, а яку – ні, мають ексклюзивний доступ до блоків і право вирішувати, чию транзакцію прийняти для додавання до реєстру з урахуванням застосовуваного алгоритму консенсусу. Для вирішення проблеми масштабованості радикально змінено архітектуру класичного реєстру на основі відмови від блоків та блок-продюсерів. І замість того, щоб вибудовувати ланцюжок блоків, повинні з'єднуватися самі транзакції шляхом включення до кожної транзакції хешів кількох попередніх. В результаті виходить структура, відома в математиці, як спрямований ациклічний граф.

Для аналізу технологій розподіленого реєстру розглянемо їх як системи масового обслуговування. Як критерії для зіставлення обрані такі показники:

- тривалість обробки одиної операції;
- пропускна спроможність системи;
- число обчислювальних вузлів у мережі;
- коефіцієнт завантаженості системи.

Дані параметри необхідно розрахувати на основі таких вхідних параметрів:

- кількість пристроїв мережі,
- інтенсивність надходження транзакцій,
- час обробки транзакції одним пристроєм.

Для розрахунку параметрів порівняння розподіленої мережі, побудованої на основі класичного розподіленого реєстру, можна уявити систему обробки транзакцій та створення нового блоку як систему масового обслуговування (СМО). Заявки надходять у випадкові моменти часу та обслуговуються наявними в системі каналами обслуговування.

Запропонована математична модель може бути застосована для опису систем розподілених реєстрів. У її рамках операціям, що проходять через систему, відповідають заявки, а обчислювальним вузлам, які здійснюють їхню обробку, – канали обслуговування. Класичний розподілений реєстр або блокчейн пропонується розглядати як систему класу одноканальних СМО з необмеженою чергою. Розглянемо спрощений випадок, нехай всі пристрої мережі мають однакову швидкість обробки транзакції  $\mu$  (пропускну здатність), яку можна знайти за формулою:

$$\mu = \frac{1}{t_{obr}}, \quad (1)$$

де  $t_{obr}$  – час обробки транзакції.

Значення даного параметра визначається сукупністю факторів, до основних з яких відносяться:

- обчислювальна потужність вузла,
- завантаженість вузла сторонніми завданнями,
- характеристики каналу зв'язку, зокрема його пропускна здатність.

Вхідний потік транзакцій є випадковим. Інтервали часу між послідовними надходженнями операцій є незалежними, однаково розподіленими випадковими величинами з математичним сподіванням, рівним  $M(x)$ . Тоді для даної СМО інтенсивність надходження заявок  $\lambda = M(x)$ . Відмінною особливістю СМО з необмеженою чергою є наявність нескінченної множини можливих станів системи. На рис. 1 представлений граф станів системи обробки транзакцій (одноканальний). У вказаній моделі визначено такі стани системи:  $S_0$  – система вільна;  $S_1$  – система зайнята, одна операція знаходиться в процесі обробки, черга очікування відсутня;  $S_2$  – система зайнята, в черзі на обробку знаходиться одна операція;  $S_3$  – система зайнята, у черзі на обробку перебувають дві операції тощо [10].

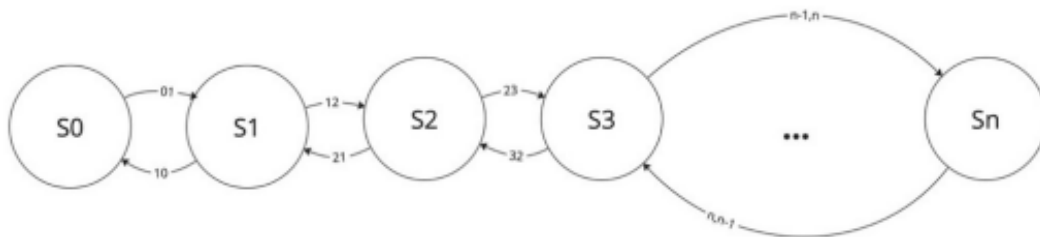


Рис. 1. Граф станів системи обробки транзакцій

Коефіцієнт завантаженості системи визначається як ймовірність того, що система знаходиться в будь-якому стані, відмінному від стану простою  $S_0$ . Іншими словами, даний показник дорівнює сумі ймовірностей усіх станів, за яких зайнятий хоча б один канал обслуговування. Позначимо величину ймовірності знаходження системи в стані  $S_0$  як  $p_0$ . Тоді для стаціонарних систем буде справедлива рівність:

$$\lambda_{01} \cdot p_0 = \lambda_{10} \cdot p_1, \quad (2)$$

де  $\lambda_{10}$  – інтенсивність переходу системи зі стану, де СМО система зайнята, обробляється транзакція та транзакцій у черзі немає, у стан, де система вільна від обробки та очікує надходження транзакцій, а  $\lambda_{01}$  – навпаки, інтенсивність переходу СМО зі стану свободи

до стану обробки однієї транзакції та порожньою черги. Для  $p_1$  справедливий вираз:

$$\lambda_{12} \cdot p_1 = \lambda_{21} \cdot p_2. \quad (3)$$

Аналогічно дане співвідношення є вірним для будь-якого  $p_k$ , тобто цю загальную випадку узагальнена формула (2) матиме такий вигляд:

$$\lambda_{k,k+1} \cdot p_k = \lambda_{k+1,k} \cdot p_{k+1}. \quad (4)$$

У результаті отримано систему рівнянь:

$$\begin{cases} \lambda_{01} \cdot p_0 = \lambda_{10} \cdot p_1, \\ \lambda_{12} \cdot p_1 = \lambda_{21} \cdot p_2, \\ \dots \\ \lambda_{k,k+1} \cdot p_k = \lambda_{k+1,k} \cdot p_{k+1}. \end{cases} \quad (5)$$

Для розв'язання висловимо всі значення через  $p_0$ . Наприклад, для  $p_1$  справедливо:

$$p_1 = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{10}} \cdot p_0 = \frac{\lambda}{\mu}, \quad (6)$$

Для  $p_2$ :

$$p_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{21}} \cdot p_1 = \frac{\lambda_{12} \cdot \lambda_{01}}{\lambda_{21} \cdot \lambda_{10}} \cdot p_0 = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \cdot p_0. \quad (7)$$

Необхідно відзначити, що чисельник у виразі (7) сформований добутком інтенсивностей переходів, що відповідають надходженню нових заявок до системи, тобто інтенсивностей, що йдуть зліва направо. Узагальнюючи, отримуємо вираз:

$$p_k = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k \cdot p_0. \quad (8)$$

Але імовірність всіх можливих станів дорівнює 1, отже є вірною така рівність:

$$\sum_{i=0}^n p_i = 1, \quad (9)$$

отже

$$p_0 + \frac{\lambda}{\mu} \cdot p_0 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \cdot p_0 + \dots + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^m \cdot p_0 = 1, \quad (10)$$

звідси  $p_0$  можна знайти за такою формулою:

$$p_0 = 1 / \sum_{i=0}^n \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i, \quad (11)$$

де у знаменнику отримано ряд геометричної прогресії, який для нескінченної суми для необмеженої черги розраховується таким чином:

$$\sum_{i=0}^n \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i = \frac{1}{1 - \lambda/\mu}, \quad \text{при умові } \frac{\lambda}{\mu} < 1. \quad (12)$$

Коли виконується ця умова, то система обробки транзакцій, яка представляє собою СМО, перебуває у стаціонарному стані. Досягнення стаціонарного режиму роботи системи означає, що довжина черги стабілізується. Ця умова дає можливість провести розрахунок усереднених характеристик, зокрема середнього часу перебування транзакцій у системі. Позначимо величину  $\lambda/\mu$  як коефіцієнт завантаження системи  $\rho$ . Розрахунок середнього часу обробки транзакцій передбачає попереднє визначення середньої кількості обчислювальних вузлів, одночасно зайнятих у системі у довільний час. Для одноканальної СМО з необмеженою чергою це значення можна знайти за формулою:

$$L_{\text{sys}} = \frac{\rho}{1 - \rho}, \quad (13)$$

За формулою Літла знайдемо середній час обробки транзакції:

$$T_{\text{obr}} = \frac{L_{\text{sys}}}{\lambda} = \frac{\rho}{\lambda \cdot (1 - \rho)}. \quad (14)$$

З виразу (14) можна зробити висновок, що для того, щоб підтримувати систему в стаціонарному стані, доведеться обмежити кількість вхідних транзакцій, а значить необхідно обмежити кількість пристроїв у розподіленому реєстрі, так як більша кількість пристроїв буде відправляти в систему більшу кількість транзакцій на обробку (проявляється взаємна  $\lambda$ ), тобто при  $n \rightarrow \infty$ ,  $\lambda \rightarrow \infty$ , а значить і  $T_{\text{obr}} \rightarrow \infty$ . Отже для того, щоб розвивати систему шляхом збільшення кількості пристроїв, необхідно пожертвувати часом обробки транзакцій. Це і є фундаментальною проблемою масштабованості.

### 3. Модель СМО на основі спрямованого ациклічного графа

Використання архітектури на основі спрямованого ациклічного графа (directed acyclic graph, DAG) дозволяє усунути обмеження на інтенсивність вхідного потоку заявок, характерне для розподілених систем з різною топологією. Це окремий випадок розподіленого реєстру, де транзакції структуровані як вузли у графі, а не в блоках. Транзакції, що виходять із пристроїв, становлять набір вузлів DAG.

Процес формування множини ребер графа полягає в наступному: кожна нова операція, що додається в систему, повинна підтвердити  $k$  (де  $k \geq 2$ ) раніше створених операцій. Зазначені підтвердження є спрямованими ребрами, що зв'язують нову транзакцію з підтвердженими. Коли вузол створює нову транзакцію, він вибирає кілька раніше відомих йому транзакцій і включає їх посилання на своє повідомлення. Тим самим він висловлює свою згоду зі своїм змістом і визнає їх як частину консенсусної історії. Описаний алгоритмічний механізм виконує функцію децентралізованого протоколу досягнення консенсусу, забезпечуючи когерентність даних між усіма вузлами розподіленої мережі без єдиної координуючої інстанції. Число  $k$  має бути більшим або рівним 2 з ряду причин, наведених нижче.

#### 1. Забезпечення достатньої пов'язаності графа.

Якщо кожна транзакція підтверджує хоча б дві попередні, це мінімізує можливість ізольованих гілок у графі. Це гарантує зв'язність всієї структури спрямованого ациклічного графа, що важливо для підтримки цілісності і консистентності системи.

2. При  $k = 1$  нова транзакція підтверджує лише одну попередню. Це створює загрозу, коли створюється ймовірність створення ізольованого ланцюжка, порушення загальної консистентності мережі. При  $k \geq 2$  ймовірність успішного створення такого ланцюжка значно знижується, оскільки знадобиться підтвердження кількох транзакцій із різних частин ациклічного спрямованого графа.

3. Підвищення стійкості до відмов, оскільки система з  $k \geq 2$  має надлишкові зв'язки, що підвищує її стійкість до збоїв. Якщо будь-який вузол графа виявляється недоступним, наявність як мінімум двох зв'язків дозволяє новим транзакціям продовжувати роботу, оминаючи несправний вузол.

4. Мінімальне значення  $k = 2$  прискорює процес підтвердження транзакцій, оскільки кожна нова транзакція зміцнює граф додатковими ребрами,

підвищуючи можливість підтвердження попередніх транзакцій. Це особливо важливо за умов високого навантаження на систему.

Якщо вузол, що згенерував транзакцію (умовно іменовану «батьківською» по відношенню до наступних транзакцій, що її підтверджують), припиняє свою активність після того, як ця транзакція була успішно передана частини мережі, сама по собі вона залишається автономною структурою даних. Її коректність у межах спрямованого ациклічного графа визначається не наявністю вихідного вузла у мережі, а дотриманням протокольних правил і наявністю достатньої кількості наступних посилань неї з боку інших транзакцій. Активні вузли, що прийняли цю транзакцію і визнали її допустимою на підставі аналізу відповідності протоколу та узгодженості з їх поточним уявленням про стан графа, можуть вибрати її як одну з попередніх транзакцій при формуванні нових записів. Таким чином, транзакція отримує додаткове підтвердження через включення нових вершин графа. Згодом граф транзакцій розширюється за рахунок додавання нових елементів, які неявно схвалюють елементи, існуючі раніше. Гілки графа, які не отримують подальшого розвитку та не стають об'єктами посилань нових транзакцій, поступово виключаються з активного шляху консенсусу та залишаються на периферії структури як незатребувані фрагменти. Обов'язковою умовою для створення нової транзакції є попередня участь обчислювального вузла у підтримці працездатності мережі. Ця участь полягає у необхідності підтвердження певної кількості раніше створених транзакцій. На рис. 2 наведено схематичну ілюстрацію топології системи, організованої у вигляді спрямованого ациклічного графа.

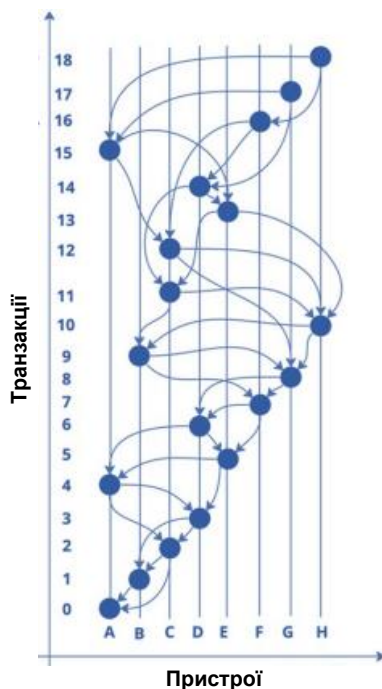


Рис. 2. Приклад ациклічного направлено графа

Вершини графа – це транзакції, спрямовані дуги показують, які підтверджуються іншими транзакціями. А, В, С, D, E, F, G, H – це позначення набору

пристроїв розподіленого реєстру. На представленій діаграмі вертикальні відрізки ілюструють часові інтервали обробки конкретних операцій відповідними обчислювальними вузлами мережі. По осі ординат позначені номери транзакцій у порядку додавання до ациклічного направлено графа. Транзакції під номерами 16-18 самі поки що не підтверджені.

Основна перевага систем, заснованих на застосуванні спрямованого ациклічного графа, у порівнянні з класичними розподіленими реєстрами, що мають ланцюгову структуру, полягає у можливості здійснення багатопоточної та різночасової обробки операцій. Ця особливість означає, що кілька обчислювальних вузлів мережі можуть обробляти різні операції паралельно, при цьому моменти початку та завершення обробки для кожної окремої операції не є синхронізованими. На рис. 3 червоним кольором, як приклад, відзначені нові транзакції, які надійшли до системи одночасно. Транзакції, що надходять, обробляються паралельно і асинхронно, що означає можливість їх одночасного обслуговування на різних вузлах мережі без синхронізації моментів завершення.

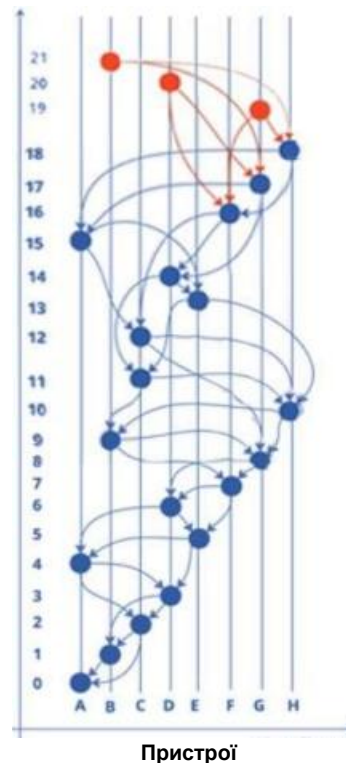


Рис. 3. Одночасне формування нових вузлів

Відповідно до положень теорії масового обслуговування, система класифікується як багатоканальна СМО з необмеженим розміром черги на обслуговування. Кількість каналів  $n$  у цій системі дорівнюватиме кількості пристроїв, що відправляють транзакціями.

Проаналізуємо залежність завантаженості системи від середнього часу обробки транзакції одним пристроєм (рис. 4). Отриманий графік показує, що з урахуванням ациклічного спрямованого графа збільшення кількості обчислювальних вузлів сприяє підвищенню її стійкості до зростання навантаження



Рис. 4. Залежність завантаженості системи від середнього часу обробки транзакцій для розподіленого реєстру та ациклічного спрямованого графа з різною кількістю підключених пристроїв

При побудові моделі було взято до уваги такі ключові параметри системи:

- тривалість обробки однієї транзакції обчислювальним вузлом;
- інтенсивність потоку вхідних транзакцій;
- загальне число обчислювальних вузлів у мережі.

В рамках створюваної моделі допускається знехтувати кінцевою пропускну здатністю каналів зв'язку. Дане припущення є правомірним, оскільки обсяг даних, що передаються при підтвердженні транзакцій, незначний. Разом з тим, необхідно враховувати такий фактор, як час відгуку кінцевих пристроїв, навіть якщо його вплив вважається незначним. Необхідно відзначити, що в умовах практичного застосування мережеві архітектури, що базуються на використанні ациклічних спрямованих графів, демонструють значно більшу пропускну здатність та швидкість обробки транзакцій у порівнянні з класичними системами розподіленого реєстру. Завдяки високій масштабованості, даний граф можна застосовувати в розподілених мережах з великою кількістю пристроїв міжмашинної взаємодії та не боятися втрати швидкості обробки. Розроблена система з урахуванням ациклічного спрямованого графа моделюється як багатоканальна система масового обслуговування з необмеженою чергою  $M/M/n/\infty$ .

Перша  $M$  (Markovian) означає, що вхідний потік транзакцій є найпростішим (або марковським), тому:

- 1) транзакції надходять у систему незалежно друг від друга;
- 2) імовірність надходження нової транзакції в малий проміжок часу  $\Delta t$  пропорційна  $\Delta t$  і не залежить від того, скільки транзакцій вже надійшло та коли вони надійшли (властивість відсутності післядії);
- 3) інтервали часу між надходженнями транзакцій мають експонентний розподіл;
- 4) у реальних системах M2M, де безліч пристроїв генерують дані незалежно один від одного,

потік транзакцій може бути близьким до найпростішого, особливо якщо усереднити його за кількістю пристроїв.

Друга  $M$  означає, що час обслуговування транзакції одним вузлом також має експоненційний розподіл. Насправді час обробки може залежати від складності транзакції, обчислювальної потужності вузла та інших факторів. Проте, для базової моделі, експоненційний розподіл – це стандартне припущення, що дозволяє отримати аналітичні результати.

Також  $n$  означає, що у системі  $n$  каналів обслуговування (активних вузлів, які обробляють транзакції). Реальна система, особливо з урахуванням гетерогенності пристроїв та складного алгоритму консенсусу, відрізнятиметься від цієї моделі. Однак,  $M/M/n/\infty$  – це стандартна базова модель, яка дозволяє отримати аналітичні результати та якісно оцінити поведінку системи при таких умовах:

- 1) система знаходиться в стаціонарному стані;
- 2) система перебуває у стаціонарному стані;
- 3) середня кількість заявок зростає, коли надходить нова заявка;
- 4) середня кількість заявок зменшується, коли закінчується обслуговування заявки;
- 5) інтенсивність приходу заявок менша, ніж інтенсивність обслуговування заявок;
- 6) коефіцієнт завантаження повинен бути меншим одиниці.

У таких умовах класична модель системи масового обслуговування була б адекватною опису поведінки системи, оскільки передбачає відсутність зворотних зв'язків чи повторних проходження заявок через одні й самі вузли без явного управління цим процесом.

## Висновки

У статті запропоновано аналітичну модель розподіленого реєстру, побудовану на основі теорії масового обслуговування. Модель описує процеси запису, верифікації та підтвердження транзакцій у децентралізованому середовищі з урахуванням обмежень пропускну здатності вузлів та інтенсивності надходження запитів.

Використання апарату масового обслуговування дозволяє формалізувати часові характеристики системи, оцінити середній час очікування обробки транзакцій, коефіцієнт завантаження вузлів та ймовірність затримки.

Проведено аналітичне дослідження впливу параметрів мережі на продуктивність реєстру та визначено умови стійкості системи. Результати показують, що з високої інтенсивності навантаження DAG обробляє транзакції значно швидше, ніж традиційні розподілені реєстри.

Порівняльні дані демонструють, що зі збільшенням інтенсивності навантаження ациклічний спрямований граф обробляє транзакції у суттєво швидше, ніж класичний реєстр.

Запропонований підхід може бути використаний для оптимізації архітектури розподілених систем з підвищеними вимогами до швидкодії та надійності обробки даних.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chalapathi, G.S.S., Chamola, V., Vaish, A. and Buyya, R. (2022), "Industrial internet of things (Iiot) applications of edge and fog computing: A review and future directions", *Advances in Information Security*, vol. 83, pp. 293–325, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57328-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57328-7_12)
2. Dotsenko, N., Chumachenko, I., Galkin, A., Kuchuk, H. and Chumachenko, D. (2023), "Modeling the Transformation of Configuration Management Processes in a Multi-Project Environment", *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 15(19), 14308, doi: <https://doi.org/10.3390/su151914308>
3. Zuev, A., Karaman, D. and Olshevskiy, A. (2023), "Wireless sensor synchronization method for monitoring short-term events", *Advanced Information Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 33–40, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.4.04>
4. Hunko, M., Tkachov, V., Kuchuk, H. and Kovalenko, A. (2023), Advantages of Fog Computing: A Comparative Analysis with Cloud Computing for Enhanced Edge Computing Capabilities, *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2023 – Conf. Proc.*, 02-06 October 2023, Code 194480, doi: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312948>
5. Bayer, D., Haber, S. and Stornetta, W.S. (1993), "Improving the efficiency and reliability of digital time-stamping", *Sequences Methods in Communication, Security and Computer Science*, pp. 329–334, available at: [https://www.math.columbia.edu/~bayer/papers/Timestamp\\_BHS93.pdf](https://www.math.columbia.edu/~bayer/papers/Timestamp_BHS93.pdf)
6. Gramoli, V. (2020), "From blockchain consensus back to Byzantine consensus", *Future Generation Computer Systems*, vol. 107, pp.760–769, doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.09.023>
7. Kovalenko, A. and Kuchuk, H. (2022), "Methods to Manage Data in Self-healing Systems", *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 425, pp. 113–171, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96546-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96546-4_3)
8. Kuchuk, N., Kovalenko, A., Ruban, I., Shyshatskiy, A., Zakovorotnyi, O. and Sheviakov, I. (2023), "Traffic Modeling for the Industrial Internet of NanoThings", *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2023 - Conference Proceedings*, 2023, doi: 194480. <http://dx.doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312856>
9. Kuchuk, H. and Malokhvii, E. (2024), "Integration of IOT with Cloud, Fog, and Edge Computing: A Review", *Advanced Information Systems*, vol. 8(2), pp. 65–78, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.08>
10. Decker, C. and Wattenhofer, R. (2014), "Bitcoin transaction malleability and MtGox", *European symposium on research in computer security*, 370, pp. 313–326, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-11212-1\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11212-1_18)

Received (Надійшла) 25.07.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.10.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Коваленко Андрій Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Andriy Kovalenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [andriy.kovalenko@nure.ua](mailto:andriy.kovalenko@nure.ua); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2817-9036>;

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56423229200>.

**Замрій Іван** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Ivan Zamrii** – student at the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine;

e-mail: [ivan.zamrii@nure.ua](mailto:ivan.zamrii@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-0939-3125>.

**Попов Володимир** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Volodymyr Popov** – student at the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [volodymyr.popov@nure.ua](mailto:volodymyr.popov@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-7826-030X>.

**Жаріков Дмитро** – студент кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

**Dmytro Zharikov** – student at the Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: [dmytro.zharikov@nure.ua](mailto:dmytro.zharikov@nure.ua); ORCID Author ID: <http://orcid.org/0000-0002-7826-030X>.

**Analytical model of a distributed registry based on the concept of crowding**

Andriy Kovalenko, Ivan Zamrii, Volodymyr Popov, Dmytro Zharikov

**Abstract. Relevance.** The main problem in the formation of a registry in distributed systems is to determine the dependence between the parameters of the request flow, the speed of transaction service and the general characteristics of the system performance. The purpose of the study: to build an analytical model of a distributed registry, which allows describing the transaction processing process in terms of the theory of queueing and determining the key indicators of the system's efficiency. **Results.** The article proposes an analytical model of a distributed registry, built on the basis of the theory of queueing. The model describes the processes of recording, verification and confirmation of transactions in a decentralized environment, taking into account the limitations of the node's bandwidth and the intensity of incoming requests. The use of a queueing apparatus allows us to formalize the time characteristics of the system, estimate the average waiting time for transaction processing, the load factor of nodes, and the probability of delay. An analytical study of the influence of network parameters on the productivity of the registry has been conducted and the conditions for system stability have been determined. The proposed approach can be used to optimize the architecture of distributed systems with increased requirements for speed and reliability of data processing.

**Keywords:** distributed registry, queueing, analytical model, transaction, system productivity, stability.