

С. І. Клівець<sup>1</sup>, О. В. Кулешов<sup>1</sup>, Р. В. Зубко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

<sup>2</sup> Національний університет оборони України, Київ, Україна

## МЕТОД ФОРМУВАННЯ ПІДСИСТЕМИ ОБРОБКИ ОПЕРАТИВНИХ ТРАНЗАКЦІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

**Анотація.** **Актуальність.** Транзакції Інтернету речей зазвичай оброблюються у хмарних центрах обробки даних. Але при необхідності обробляти оперативні транзакції виникають часові затримки, що пов'язані з передачею даних у хмарне середовище. Дану проблему можна вирішити за рахунок перенесення обчислень до шарів, що наближені до датчиків IoT. **Мета статті** – розробити метод формування підсистеми обробки оперативних транзакцій Інтернету речей, орієнтований на граничний та туманний шари хмарного середовища. **Результати дослідження.** Запропонована математична модель процесу обробки оперативних транзакцій. На основі моделі розроблений метод, котрий дозволяє врахувати специфічні особливості нижніх шарів хмарного середовища підтримки Інтернету речей та обрати найбільш прийнятний варіант побудови підсистеми обробки оперативних транзакцій Інтернету речей. **Висновок.** Розроблений метод дозволяє виконати вимоги QoS для оперативних транзакцій Інтернету речей.

**Ключові слова:** Інтернет речей, оперативна транзакція, туманний шар, мережний вузол.

### Вступ

На сьогодні парадигма Інтернету речей набула бурхливого розвитку у багатьох галузях [1–4]. Відповідно розвивається і оточуюча інфраструктура Інтернету речей [5, 6]. Зокрема, тепер пристрої граничного та туманного шарів інфраструктури можуть проводити обробку інформаційних потоків. Це надало змогу перенести обробку транзакцій Інтернету речей, які потребують швидкої відповіді, тобто оперативних транзакцій [7]. Але при цьому для виконання часових вимог QoS потрібно врахувати особливості таких мережних вузлів, які мають обмежені обчислювальні ресурси та орієнтовані на розподілену обробку [8]. **Мета роботи** – розробити метод формування підсистеми обробки оперативних транзакцій Інтернету речей, орієнтований на граничний та туманний шари хмарного середовища.

### Результати досліджень

Для визначення ефективності виконання оперативних транзакцій Інтернету речей (IoT) у розподіленому туманному шарі хмарного середовища (XC) застосовують такі технічні критерії:

показники завадостійкості (відношення сигнал/шум, імовірність помилкового прийому та ін.), пропускна здатність, надійність, комбінації різних технічних параметрів.

Вони характеризують якість системи, її технічний рівень. Однак, використовуючи тільки технічні показники, ми тільки локально оцінюємо ефективність процесу проходження транзакції, не враховуючи особливості мережних вузлів як граничного, так і туманного шарів, які, зазвичай, мають досить обмежені обчислювальні ресурси. Тому при формуванні підсистеми обробки оперативних транзакцій варто врахувати й наявні ресурси мережних вузлів нижніх шарів.

Виходячи з цього, сформулюємо принципи мінімуму ресурсних витрат і максимуму ефекту, на основі яких можуть формуватися критерії ефективності

виконання оперативних транзакцій IoT [9]. Принцип мінімуму витрат використовують у тих випадках, коли при заданому ефекті потрібно визначити варіант  $z \in Z$ , при якому забезпечуються мінімально можливі ресурсні витрати. Якщо необхідно досягти цілі при виконанні існуючих обмежень на ресурсні витрати обчислювальних вузлів, є прийнятним другий принцип. Висока швидкість обробки інформації досягається за рахунок застосування розподілених обчислень, що є характерним для нижніх шарів хмарного середовища підтримки IoT. Використання в такому випадку тільки першої вирішальної схеми пов'язано із значними ресурсними витратами, необхідними для забезпечення необхідного значення обраних показників завадостійкості. Тому цю задачу краще вирішити, застосувавши другу вирішальну схему, що гарантує необхідні показники якості при виконанні низки обмежень [10].

Методологічною основою рішення задач оптимізації підсистеми обробки оперативних транзакцій (ПООТ) є теорія дослідження операції. Опишемо ПООТ і представимо задачу її оптимізації в узагальненому вигляді [11]:

$$\text{extr } v(X) = (x_1, x_2, \dots, x_n); \quad (1)$$

$$\phi_{x_k}(X) = 0, \phi_{x_l}(X) \leq 0; \quad (2)$$

$$\phi_{y_k}(X) = 0, \phi_{y_i}(X) \leq 0; \quad (3)$$

Сформулюємо задачу: знайти вектор внутрішніх параметрів  $X_{opt}$ , що задовольняє рівностям і нерівностям (2), (3) і доставляючим мінімум цільової функції  $v(X)$ .

Якщо на змінні накладені обмеження типу функціональних нерівностей, точку екстремального значення функції знаходимо методом їхнього вилучення або методом множників Лангранжа, коли перемінні неможливо або важко представити в вигляді

$$\text{extr } v(X), X = (x_1, x_2, \dots, x_n); \quad (4)$$

$$\phi_i(X) = 0, i = 1, 2, \dots, m; m < n. \quad (5)$$

При виборі параметрів для оцінки ефективності ПООТ відповідно до системного підходу в загальному випадку варто було б враховувати усі види витрат, що мають місце при обробці інформації. Так як проектується оптимальна підсистема, що забезпечує потрібний час та необхідну завадостійкість  $P_e^{nomp}$  при мінімальних витратах  $C_{nomp}$ , показником порівняльної ефективності всіх допустимих підсистем буде час отримання відповіді на транзакцію  $T1$ . Очевидно, у цільову функцію повинен входити тільки цей параметр, оскільки у будь-якому разі для оперативної транзакції бажано його зменшувати. У результаті маємо таке завдання вибору оптимальної підсистеми в математичному вигляді:

задані множини векторів внутрішніх і зовнішніх параметрів плануємої підсистеми:

$$X = (x_1, x_2); Y = (y_1, y_2),$$

компоненти яких  $x_1 = m$ , де  $m$  – кількість незадіяних обчислювальних вузлів при розпаралелюванні завдання;  $m = 2, 3, 4, \dots, M$ ;  $x_2$  – ймовірнісний параметр;  $y_1$  – ресурсний параметр,  $y_2$  – параметр, що характеризує завадостійкість підсистеми.

Сформуємо компоненти за допомогою системи таких обмежень:

$$\Phi_x \rightarrow \begin{cases} 2 < x_1 < M; \\ 0 < x_2 < 1; \end{cases}$$

$$\Phi_y \rightarrow \begin{cases} y_1 \leq C_{nomp}; \\ y_2 \leq P_e^{nomp}, \end{cases}$$

де  $M$  – максимально можлива кількість мережних вузлів нижніх шарів хмарного середовища підтримки IoT, які можуть бути задіяні для функціонування підсистеми обробки оперативних транзакцій.

Розглянемо рівняння зв'язку зовнішніх і внутрішніх параметрів:

$$y_1 = A_1 (\bar{h}_i)^\alpha + A_2 \gamma_j(m); i = 1, 2; j = 1, 2, 3; \quad (6)$$

$$y_2 = \beta_k(m) P_0^m; k = 1, 2; \quad (7)$$

$$C_1 = A_1 (\bar{h}_i)^\alpha = d P^\alpha = D \left( \frac{(4\pi R)^2}{G_1 G_2 \lambda^2 F^2} h_i P_{mp} \right)^\alpha, \quad (8)$$

де  $d$ ,  $\alpha$  – постійні коефіцієнти, що характеризують тип мережних вузлів,  $P_{mp}$  – узагальнена характеристика оперативної транзакції,  $\bar{h}_i$  – середнє значення відношення сигнал-перешкода [12].

У загальному вигляді визначимо завадостійкість ПООТ, використовувачи формулу для середньої ймовірності помилки при  $n$ -кратному розпаралелюванні завдання [12]:

$$P_0(\bar{h})_n = \left( n! / 2(1 + \bar{h}/2)(2 + \bar{h}/2) \dots (n + \bar{h}/2) \right).$$

При  $n = 1$ , тобто при задіянні тільки двох вузлів ПООТ отримаємо:

$$P_0 = 1/(\bar{h} + 2); \bar{h}_1 \cong 1/P_0;$$

при  $n = 2$ ;

$$P_0 = 1/(1 + \bar{h}/2)(2 + \bar{h}/2); h_2 \cong 2/\sqrt{P_0}.$$

Підставивши у вираз (8) значення для  $\bar{h}_i$  отримаємо при  $\alpha = 1$  такі значення:

$$C_1 = A_1 (1/P_0)^\alpha;$$

$$C_1' = A_1 (2\sqrt{P_0})^\alpha.$$

У той же час

$$C_2 = A_2 \gamma_j(m),$$

де  $A_1, A_2$  – нормовані коефіцієнти, а  $\gamma_j(m)$  – функція, що визначає складність другої вирішальної схеми,

$$\gamma_1(m) = 2(m - 1);$$

$$\gamma_2(m) = \log_2(m + 1);$$

$$\gamma_3(m) = 2 + \log_2(m + 1);$$

$$\beta_1(m) = c \frac{m}{2^{m-1}} \geq$$

$$\geq 1/2\sqrt{2} \left( m^{-m-0,5} (1/2m-1)^{-m} \times \right. \\ \left. \times ((m-1)/(2m-1))^{-m+0,5} \right);$$

$$\beta_2(m) = 3^{m-2} + 1.$$

Введемо дані рівняння в цільову функцію й обмеження і запишемо задачу оптимального математичного програмування з нелінійним функціоналом, одним нелінійним обмеженням у виді рівності і двома обмеженнями у виді нерівностей:

$$y_1 = A_1 (\bar{h}_i)^\alpha + A_2 \gamma_j(m) \rightarrow \min; \quad (9)$$

$$\beta_k(M) P_0^m \leq P_e^{nomp}; \quad (10)$$

$$2 \leq m \leq M; \quad (11)$$

$$0 < P_0 < 1. \quad (12)$$

Таким чином, розглянута задача зводиться до знаходження значень змінних  $m$  і  $P_0$ , що задовольняють рівнянням (10) – (12) і мінімізують функціонал (9).

Пропонується вирішення задачі класичним методом множників Лагранжа.

Підставляємо функцію

$$\varphi(X) = \left( \beta_k(m) P_0^m - P_e^{nomp} = 0 \right)$$

з невідомим множником  $\lambda$  у цільову функцію трьох змінних  $x_1, x_2, \lambda$ :

$$v(X, \lambda) = v(X) + \lambda \varphi(X)$$

одержуємо задачу оптимального математичного програмування без обмежень

$$\begin{aligned} & \min_{X, \lambda} v(X, \lambda) = \\ & = \min_{X, \lambda} [A_1 \bar{h}_i + A_2 \gamma_j(m) + \lambda \varphi(X)], \end{aligned} \quad (13)$$

Варіанти рішення цієї системи для різних значень  $\bar{h}_i, \gamma_j(m), \beta_k(m)$  зведені в табл. 1, де

$$\Psi(m) = \frac{m^2 - m + 0,5}{m(m-1)(2m-1)};$$

звідки оптимальні значення незалежних перемінних знаходимо рішенням системи з трьох рівнянь:

$$\frac{\partial [v(X, \lambda)]}{\partial x_1} = 0;$$

$$\frac{\partial [v(X, \lambda)]}{\partial x_2} = 0;$$

$$\varphi(X) = 0.$$

$$K(m) = \frac{3^{m-2} \ln 3}{3^{m-2} + 1}.$$

Шукане оптимальне рішення  $X_{opt}$  одержуємо шляхом ітераційного процесу. Підставляючи у формулу (7) значення  $m_{opt-i}, P_{o.opt-i}$ , знаходимо мінімальне значення цільової функції.

На рис. 1 показана залежність цільової функції від  $P_0$  при значеннях  $m$ , що задовольняють умові (7).

Таблиця 1 – Варіанти рішень оптимізаційної задачі (9) – (12)

$\bar{h}_i$	$\gamma_j$	$\beta_k(m)$	Система рівнянь для $X_{opt}$
1/P <sub>0</sub>	2(m-1)	C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup>	ln P <sub>0</sub> = -[Ψ(m) + (2A <sub>2</sub> mP <sub>0</sub> )/A <sub>1</sub> ]; C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup> P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>
	log <sub>2</sub> (m+1)	C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup>	ln P <sub>0</sub> = -[Ψ(m) + (A <sub>2</sub> mP <sub>0</sub> )/A <sub>1</sub> (m+1)ln 2]; C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup> P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>
	2 + log <sub>2</sub> (m+1)	3 <sup>m-2</sup> + 1	ln P <sub>0</sub> = -[K(m) + (A <sub>2</sub> mP <sub>0</sub> )/A <sub>1</sub> (m+1)ln 2]; (3 <sup>m-2</sup> + 1)P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>
2/√P <sub>0</sub>	2(m-1)	C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup>	ln P <sub>0</sub> = -[Ψ(m) + (2A <sub>2</sub> mP <sub>0</sub> <sup>1/2</sup> )/A <sub>1</sub> ]; C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup> P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>
	log <sub>2</sub> (m+1)	C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup>	ln P <sub>0</sub> = -[Ψ(m) + (A <sub>2</sub> mP <sub>0</sub> <sup>1/2</sup> )/A <sub>1</sub> (m+1)ln 2]; C <sub>2m-1</sub> <sup>m</sup> P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>
	2 + log <sub>2</sub> (m+1)	3 <sup>m-2</sup> + 1	ln P <sub>0</sub> = -[K(m) + (A <sub>2</sub> mP <sub>0</sub> <sup>1/2</sup> )/A <sub>1</sub> (m+1)ln 2]; (3 <sup>m-2</sup> + 1)P <sub>0</sub> <sup>m</sup> = 10 <sup>-10</sup>

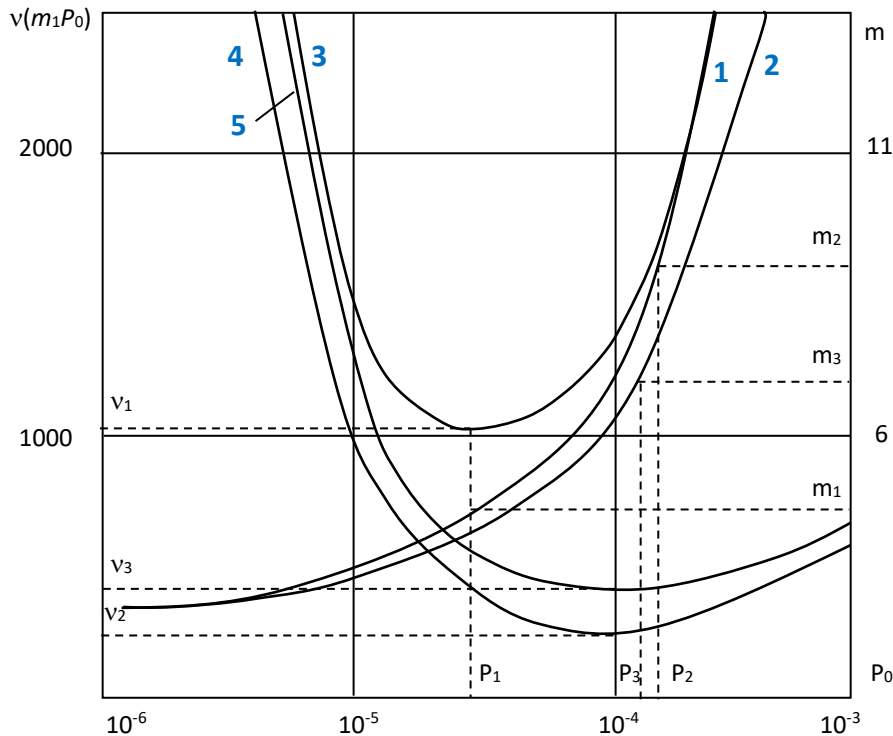


Рис. 1. Залежність цільової функції від P<sub>0</sub> при різних значеннях m

Аналітичні записи побудованих кривих зведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Аналітичні записи кривих на рис. 1

Функція	Аналітичний запис	№ кривої
$Y_2$	$C_{2m-1}^m P_o^m = 10^{-10}$	1
$Y_2$	$(3^{m-2} + 1) P_o^m = 10^{-10}$	2
$Y_1$	$A_1(1/P_0)^\alpha + A_2 2(m-1)$	3
$Y_1$	$A_1(1/P_0)^\alpha + A_2 \log_2(m+1)$	4
$Y_1$	$A_1(1/P_0)^\alpha + A_2[2 + \log_2(m+1)]$	5

Відхилення значень параметрів від оптимальних приводить до помітного збільшення обсягу потрібного обчислювального ресурсу мережних вузлів граничного і туманного шарів.

У той же час застосування в другій вирішальній схемі розподіленої схеми підвищує ефективність ПООТ (рис. 1, криві 4, 5), що працює на обмежених ресурсах мережних вузлів та каналах низької якості. У результаті порівняльного аналізу можливих варіантів розподіленої схеми можна обрати найбільш зручний варіант формування ПООТ, зменшуючи час доведення інформації до одержувача.

### Висновки

У статті запропонована математична модель процесу обробки оперативних транзакцій.

На основі моделі розроблений метод, котрий дозволяє врахувати специфічні особливості нижніх шарів хмарного середовища підтримки Інтернету речей та обрати найбільш прийнятний варіант побудови підсистеми обробки оперативних транзакцій Інтернету речей.

Розроблений метод дозволяє виконати вимоги QoS для оперативних транзакцій Інтернету речей.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fabre, W., Haroun, K., Lorrain, V., Lepecq, M. and Sicard, G. (2024), "From Near-Sensor to In-Sensor: A State-of-the-Art Review of Embedded AI Vision Systems", *Sensors*, vol. 24(16), 5446, doi: <https://doi.org/10.3390/s24165446>
2. Zhang, Z. (2023), "A computing allocation strategy for Internet of things' resources based on edge computing", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 17(12), doi: <https://doi.org/10.1177/15501477211064800>
3. Sharma, A. and Singh, N. (2022), "Sensors, Embedded Systems, and IoT Components", *Mathematical Modeling for Intelligent Systems: Theory, Methods, and Simulation*, pp. 1–15, doi: 10.1201/9781003291916-1
4. Aburukba, R.O., Landolsi, T. and Omer, D. (2021), "A heuristic scheduling approach for fog-cloud computing environment with stationary IoT devices", *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 180, no. 102994, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.102994>
5. Li, W., Zhao, B., Zhu, L., Yixuan W., Zhong, Q. and Yu, S. (2024), "TCEC: Integrity Protection for Containers by Trusted Chip on IoT Edge Computing Nodes", *IEEE Sensors Journal*, doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3445576>
6. Nechausov A., Mamusuc I., Kuchuk N. Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures. *Сучасні інформаційні системи*. 2017. Т. 1, № 2. С. 21 – 26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>
7. Кучук Н. Г., Мерлак В. Ю., Скороделов В. В. Метод зменшення часу доступу до слабкоструктурованих даних. *Сучасні інформаційні системи*. 2020. Т. 4, № 1. С. 97-102. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.14>
8. 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)
9. Kuchuk, N., Kovalenko, A., Ruban, I., Shyshatskyi, 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>
10. Krishnan, S. and Ilmudeen, A. (2023), "Internet of Medical Things in Smart Healthcare: Post-COVID-19 Pandemic Scenario", *Imprint Apple Academic Press*, New York, doi: <http://dx.doi.org/10.1201/9781003369035>
11. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svyrydov A., Kharchenko V. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kacprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
12. 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>

Received (Надійшла) 25.10.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.12.2024

### Method for forming a subsystem for processing operative transactions of the IoT

Sergii Klivets, Alexander Kuleshov, Roman Zubko

**Abstract. Topicality.** Internet of Things transactions are usually processed in cloud data centers. However, when it is necessary to process operational transactions, there are time delays associated with data transfer to the cloud environment. This problem can be solved by transferring calculations to layers close to IoT sensors. The purpose of the article is to develop a method for forming a subsystem for processing operational transactions of the Internet of Things, focused on the boundary and fog layers of the cloud environment. Research results. A mathematical model of the process of processing operational transactions is proposed. Based on the model, a method has been developed that allows taking into account the specific features of the lower layers of the cloud environment supporting the Internet of Things and choosing the most appropriate option for building a subsystem for processing operational transactions of the Internet of Things. Conclusion. The developed method allows you to meet the QoS requirements for operational transactions of the Internet of Things.

**Keywords:** Internet of Things, operational transaction, fog layer, network node.