

Г. К. Кожевніков¹, А. О. Кравченко¹, А. О. Стадник², Д. В. Гриньов¹

¹ Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

² Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

ФОРМУВАННЯ СТІЙКОГО МОБІЛЬНОГО КЛАСТЕРУ ТУМАННОГО ШАРУ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Анотація. Актуальність. Туманні обчислення забезпечують виконання оперативних транзакцій, мінімізуючи затримки передачі даних. Також туманні вузли можна реалізовувати, задіяючи мобільні пристрої IoT. Але при наявності в кластері мобільних вузлів його структура може порушитися внаслідок виходу якогось мобільного вузла за межі досяжності центрального вузла. Отже, для мереж IoT речей з високою щільністю при формуванні кластерів з мобільними вузлами треба враховувати стійкість структури. **Мета статті** – підвищення стійкості системи Інтернету речей з високою щільністю шляхом формування стійких мобільних кластерів туманного шару. **Результати дослідження.** Запропонована архітектура туманного шару з мобільними компонентами. Проведена оцінка трафіку туманних обчислень в мережі підтримки Інтернету речей. Розроблена модель мережі мобільних туманних обчислень. Сформований стійкий кластер мобільного туманного шару. **Висновок.** Запропонований підхід до забезпечення стійкості кластера мобільного туманного шару дозволяє використовувати у якості туманних вузлів мобільні пристрої. Мобільний кластер формується із найбільш стійких мобільних вузлів IoT, що суттєво зменшує можливість руйнування архітектури кластера.

Ключові слова: Інтернет речей, туманні обчислення, хмарна система, стійкий кластер, мобільна компонента.

Вступ

Останнім часом стрімко розвивається концепція Інтернету речей (IoT) [1–3]. IoT базується на хмарній платформі, доступ до центрів обробки даних (ЦОД) якої пристрої Інтернету речей отримують за допомогою мережі Інтернет [4]. Але при прямому зв'язку пристроїв та шлюзів IoT із ЦОД хмарної платформи при потребі виконання оперативних транзакцій виникають неприємними часові затримки при передачі даних, що провокує недотримання вимог QoS [5]. Тому інфраструктура системи підтримки IoT була розширена додатковими периферійними шарами: туманним та граничним [6].

Туманні обчислення забезпечують виконання оперативних транзакцій, мінімізуючи затримки передачі даних [7]. Також туманні вузли можна реалізовувати, задіяючи мобільні пристрої IoT. Доволі часто траєкторія руху мобільних пристроїв є випадковою величиною, отже такі мобільні туманні вузли можуть вийти за границі досяжності у мережі [8]. У мережах IoT з високою щільністю або з ультрамалими затримками, зазвичай, туманні вузли об'єднуються у кластери, доволі часто критерієм кластеризації є територіальна близькість туманних вузлів кластера [9, 10]. Але при наявності в кластері мобільних вузлів його структура може порушитися внаслідок виходу якогось мобільного вузла за межі досяжності центрального вузла кластера [11]. Отже, для мереж Інтернету речей з високою щільністю при формуванні кластерів з мобільними вузлами треба враховувати стійкість структури кластера.

Метою дослідження є підвищення стійкості системи Інтернету речей з високою щільністю шляхом формування стійких мобільних кластерів туманного шару.

1. Архітектура туманних обчислень

Принципи побудови хмарних обчислень збереглися і при формуванні концепції туманних обчислень. Але побудова архітектури туману є більш складною задачею, тому що цей шар децентралізований,

має суттєво обмежені обчислювальні та мережеві ресурси, і крім того, допускається рухливість вузлів.

Розгортання вузлів у туманному шарі зазвичай відбувається за такими моделями [12]:

1) приватний вузол туманних обчислень, що є вузлом індивідуального використання організацією;

2) вузол туманних обчислень спільноти ексклюзивно використовується певною спільнотою споживачів, котрі мають якісь спільні інтереси;

3) громадський вузол туманних обчислень зазвичай призначається для використання провайдером туманних обчислень;

4) гібридний вузол туманних обчислень є композицією декількох туманних вузлів, пов'язаних між собою технологією, котра повинна забезпечувати переносимість застосунків і даних.

Узагальнена схема архітектури туманних обчислень представлений на рис. 1.

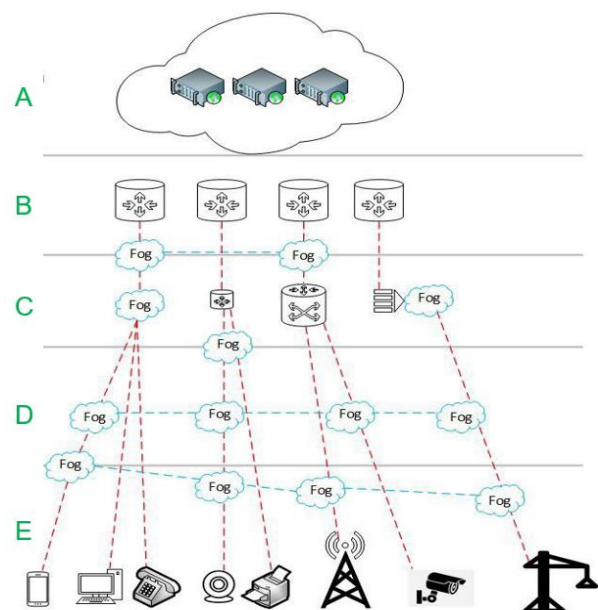


Рис. 1. Архітектура туманних обчислень

На рис. 1 позначені такі рівні архітектури: А – хмара, В – децентралізоване ядро туману, С – пристрої доступу, D – шлюзи, Е – пристрої IoT. У туманному шарі всі пристрої об'єднуються в єдину мережу доступу з вузлами, котрі мають вільний обчислювальний потенціал.

2. Оцінка трафіку туманних обчислень

Модель мережі підтримки IoT, котра використовує шар туманних обчислень схематично представлена на рис. 2.

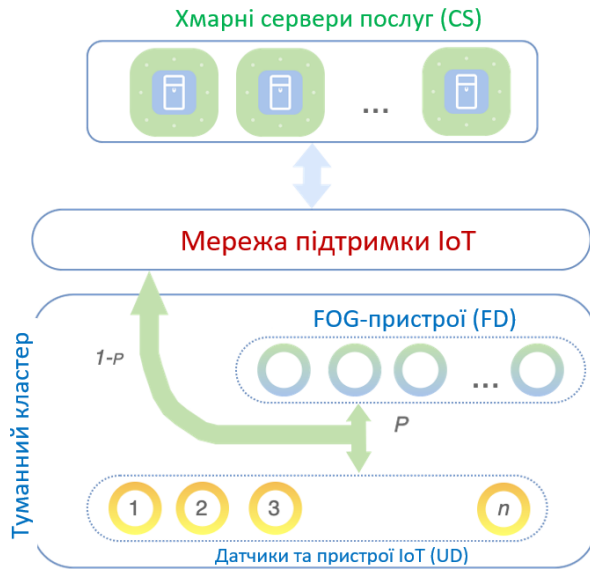


Рис. 2. Модель мережі підтримки IoT

Послугу надає один із центральних серверів CS, використовуючи канал передачі даних між пристроєм користувача UD і сервером, в результаті взаємодії в обидві сторони передається деякий обсяг даних [13].

Нехай пристрої туманних обчислень обслуговують n_u користувачів туманного кластера, крім того, частка трафіку, що оброблена в межах туманного кластера, буде пропорційна частці послуг, які мігрують в пристроях туманних обчислень. Нехай a_{i0} – трафік IoT для i -ої послуги. Розрахуємо загальний трафік, вироблений n датчиками та пристроями IoT туманного кластера, який надає m послуг:

$$a_{\Sigma} = n \cdot \sum_{i=1}^m a_{i0}. \quad (1)$$

Визначимо змінну p_i як ймовірність такої події, при котрій i -та послуга реалізується пристроями туманного кластера. Тоді інтенсивність трафіку, що функціонує в межах розглядаємого кластера буде такою:

$$a_{int} = n \cdot \sum_{i=1}^m p_i \cdot a_{i0}. \quad (2)$$

Отже інтенсивність зовнішнього трафіку є такою:

$$a_{ext} = n \cdot \sum_{i=1}^m (1 - p_i) \cdot a_{i0}. \quad (3)$$

Частка трафіку γ , яка оброблена у туманному кластері, є випадковою величиною. Вона залежить від

низки факторів та специфіки транзакцій IoT, можливостей пристроїв туманних обчислень кластера та інших. Її значення наближається до такої величини:

$$\gamma = \frac{a_{int}}{a_{int} + a_{ext}}. \quad (4)$$

Використання туманних обчислень дозволяє розвантажити хмарне ядро мережі підтримки IoT та скоротити цифровий розрив.

3. Модель мережі мобільних туманних обчислень

Пропонуємо модель описує функціонування мережі підтримки IoT при русі туманних пристроїв. В більшості випадків при моделювання оперують групами пристроїв – роями, в яких мобільні пристрої прагнуть зберегти загальні параметри руху. Формуючи динамічні туманні кластери систем Інтернету речей великої щільності розглядають групи мобільних щільно розміщених пристроїв. Такі пристрої намагаються зберегти своє положення щодо інших членів групи.

Для опису взаємного положення елементів мережі динамічних туманних обчислень підтримки Інтернету речей пропонується використовувати модель точкового процесу (рис. 3).

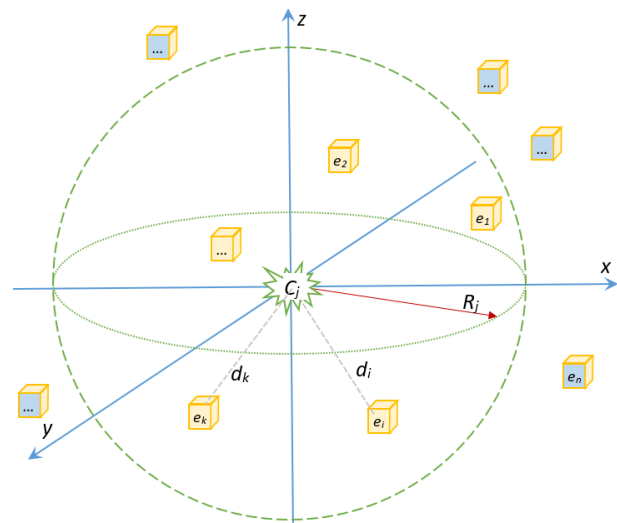


Рис. 3. Розташування пристроїв IoT у тривимірному просторі

На рис. 3 окремі динамічні пристрої IoT $e_1, \dots, e_k$, та інші входять до кластера K_j та розташовані в поточних позиціях, котрі формуються правилами організації для пристроїв IoT та в конкретний момент часу фіксовані щодо центру кластера C – головного вузла даного кластера. Всі елементи кластера, як і головний вузол, переміщуються з приблизно рівними швидкостями не міняючи напрямку, тобто елементи кластера є приблизно нерухомими відносно його центру.

Отже, відстань між мобільним пристроєм IoT і центром кластера K_j в тривимірному просторі можна визначати за таким виразом:

$$d_{ji0} = \sqrt{(x_{ji} - x_{jc})^2 + (y_{ji} - y_{jc})^2 + (z_{ji} - z_{jc})^2}, \quad (5)$$

де $x_{ji}, x_{jc}, y_{ji}, y_{jc}, z_{ji}, z_{jc}$ – поточні координати мобільних пристроїв туманного шару та відповідно координата центру кластера K_j – точки C_j .

В процесі реального руху як швидкості, так і напрямки руху деяких динамічних елементів можуть відрізнятися від заданих, тому вони відхиляються від плануємих позицій в кластері, тобто координати – $x_{ji}, x_{jc}, y_{ji}, y_{jc}, z_{ji}, z_{jc}$ – це зазвичай випадкові величини, хоч і мобільні пристрої туманного шару все ж таки у більшості випадків зберігають положення щодо інших членів кластера. Якщо випадкові координати мобільних пристроїв туманного шару мають нормальний розподіл, у системі координат кластера K_j початкове положення i -го пристрою задається точкою A_{ji0} ($x_{ji0}, y_{ji0}, z_{ji0}$), а поточне положення є точкою A_{ji} (x_{ji}, y_{ji}, z_{ji}), то відхилення пристрою від початкового положення розраховується таким чином:

$$\xi_{ji} = \sqrt{(x_{ji} - x_{ji0})^2 + (y_{ji} - y_{ji0})^2 + (z_{ji} - z_{ji0})^2}, \quad (6)$$

де ξ_{ji} не залежить від системи координат, отже $\xi_{ji} = \xi_i$ $\forall i$ та розподілена за нормальним законом із функцією щільності ймовірності

$$f(\xi_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}(\xi_i / \sigma_i)^2\right), \quad (7)$$

де σ_i – середньоквадратичне відхилення ξ_i від початкового положення i -го мобільного пристрою.

Нехай пристрій IoT e_i , належить кластеру K_j з радіусом зони досяжності R_j , а d_{ji0} – відстань між початковим положенням e_i та центром кластера K_j . Рухаючись, пристрій e_i може відхилитися від початкового положення не більше, ніж на $3\sigma_i$, тобто всі поточні положення пристрою не вийдуть за межі сфери радіусом R_j з центром у точці K_j , тобто ймовірність знаходження пристрою IoT e_i буде у зоні досяжності кластера K_j є такою:

$$P_{ji}^+ \rightarrow P_{ji}^{(theor+)} = \begin{cases} 1, & \text{else } 3\sigma_i + d_{ji0} \leq R_j; \\ 0.5 + \Phi(3\sigma_i + d_{ji0} - R_j), & \\ \text{else } 3\sigma_i + d_{ji0} > R_j, \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{де } \Phi(\xi_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\xi_i} \exp(-t^2/2) dt.$$

Тоді ймовірність руйнування структури кластера K_j з k_j мобільними елементами буде такою:

$$P_j^- = 1 - \sum_{i=1}^{k_j} P_{ji}^+. \quad (9)$$

В якості критерію формування кластера застосуємо його максимальну стійкість, тобто ймовірність збереження його структури.

Тоді цільовою функцією при формуванні кластера буде такий вираз:

$$\max_j \left(\min_{pos(C_j)} \left(1 - \sum_{i=1}^{k_j} P_{ji}^+ \right) \right), \quad pos(C_j) \in D, \quad (10)$$

де D – зона обслуговування; $pos(C_j)$ – позиція центру кластера в тривимірному просторі; n – розмір групи.

4. Забезпечення стійкості кластера мобільного туманного шару

При формуванні кластера як критерій використовуємо мінімізацію величини сумарної відстані від центра до елементів кластера. Мінімізація проводиться за рахунок вибору центрів кластерів, котрі визначаються як координати центру мас із врахуванням вагових коефіцієнтів w_i , котрі пов'язані з умовною масою відповідного елемента. Якщо ваговий коефіцієнт якогось елемента набагато більший ніж вагові коефіцієнти інших елементів, то центр кластера зміщується до цього елемента (рис. 4).

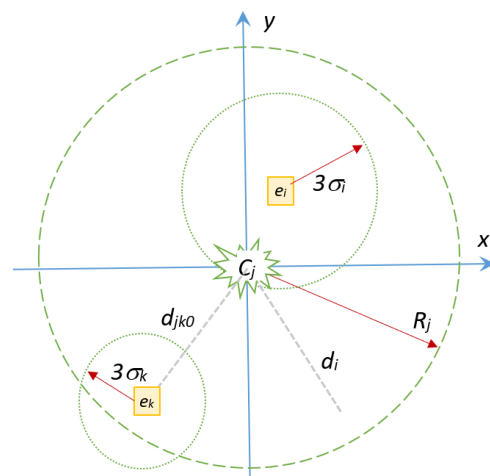


Рис. 4. Проекція кластера туманних обчислень

Вибір позиції координатора базується на центроїдному алгоритмі кластеризації FOREL. Модифікація алгоритму полягає в тому, що до поточного кластеру відбираються тільки ті об'єкти IoT, для яких ймовірність виходу об'єкту із кластера мінімальна.

Висновки

У статті запропонований підхід до формування стійкого мобільного кластера туманного шару підтримки IoT. Наведена архітектура туманного шару з мобільними компонентами. Проведена оцінка трафіку туманних обчислень в мережі підтримки Інтернету речей. Розроблена модель мережі мобільних туманних обчислень. Сформований стійкий кластер мобільного туманного шару. Запропонований підхід дозволяє використовувати у якості туманних вузлів мобільні пристрої. Мобільний кластер формується із найбільш стійких мобільних вузлів IoT, це зменшує можливість руйнування архітектури кластера.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Chalapathi, G.S.S., Chamola, V., Vaish, A., Buyya, R. (2022). [Industrial internet of things applications of edge and fog computing: A review and future directions](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57328-7_12). *Advances in Information Security*, 83, 293–325. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57328-7_12
- Petrovska, I., Kuchuk, H. (2023). Adaptive resource allocation method for data processing and security in cloud environment. *Advanced Information Systems*, 7(3), 67–73. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.10>

3. Schulz, A.S. (2023). User Interactions with Internet of Things (IoT) Devices in Shared Domestic Spaces. *ACM International Conference Proceeding Series*, 577–579. doi: <https://doi.org/10.1145/3626705.3632615>
4. Pardo, C., Wei, R., Ivens, B.S. (2022). Integrating the business networks and internet of things perspectives: A system of systems (SoS) approach for industrial markets. *IMM*, 104, 258–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2022.04.012>
5. Zakharchenko, A., Stepanets, O. (2023). Digital twin value in intelligent building development. *Advanced Information Systems*, 7(2), 75–86. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.2.11>
6. Qayyum, T., Trabelsi, Z., Waqar Malik, A., Hayawi, K. (2022). Mobility-aware hierarchical fog computing framework for Industrial Internet of Things. *Journal of Cloud Computing*, 11(1), 72. doi: <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00345-y>
7. Li, G., Liu, Y., Wu, J., Lin, D., Zhao, Sh. (2019). Methods of Resource Scheduling Based on Optimized Fuzzy Clustering in Fog Computing. *Sensors*, MDPI, 19(9). doi: <https://doi.org/10.3390/s19092122>
8. Кожевніков Г. К., Черниш Д. С., Матяш О. Ю. Онтологічний підхід до перерозподілу навантаження Інтернету речей. Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. Вип. 2(76). С. 91–94. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.92>
9. Заковоротний О., Орлова Т. Порівняльний аналіз хмарних та туманних середовищ Інтернету речей. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. Полтава: ПНТУ, 2023. Вип. 3(73). С. 152–154. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.152>
10. 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>
11. Zuev, A., Karaman, D., Olshevskiy, A. (2023). Wireless sensor synchronization method for monitoring short-term events. *Advanced Information Systems*, 7(4), 33–40. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.4.04>
12. Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НІУ, 2007. – Вип. 2. – С. 18–27.
13. Gomathi, B., Saravana Balaji, B., Krishna Kumar, V., Abouhawwash, M., Aljahdali, S., Masud, M. and Kuchuk, N. (2022), “Multi-Objective Optimization of Energy Aware Virtual Machine Placement in Cloud Data Center”, *Intelligent Automation and Soft Computing*, Vol. 33(3), pp. 1771–1785, doi: <http://dx.doi.org/10.32604/iasc.2022.024052>

Received (Надійшла) 20.02.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 24.04.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Кожевніков Георгій Костянтинович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри мультимедійних та Інтернет технологій і систем, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;

Georgii Kozhevnikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Multimedia and Internet Technologies and Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: heorhii.kozhevnikov@khp.edu.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-6586-6767>;

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701803684>.

Кравченко Антон Олександрович – магістрант кафедри мультимедійних та Інтернет технологій і систем, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;

Anton Kravchenko – master's student of Multimedia and Internet Technologies and Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: anton.kravchenko@khp.edu.ua; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0797-3588>.

Стадник Анастасія Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Національний аерокосмічний університет “Харківський авіаційний інститут”, Харків, Україна;

Anastasia Stadnik – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: a.stadnyk@csn.khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7717-4346>;

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?origin=resultslist&authorId=56332781400>.

Гриньов Деніс Валеріович – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;

Denys Grynov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of computer engineering and programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: dgrynov@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0007-3092-9397>;

Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55822619300>.

Formation of a sustainable mobile fog layer cluster of the Internet of Things support system

Georgii Kozhevnikov, Anton Kravchenko, Anastasia Stadnik, Denys Grynov

Abstract. Topicality. Fog computing ensures the execution of operational transactions, minimizing data transmission delays. Fog nodes can also be implemented using mobile IoT devices. But if there are mobile nodes in the cluster, its structure may be disrupted due to the fact that some mobile node goes beyond the reach of the central node. Therefore, for high-density IoT networks, when forming clusters with mobile nodes, it is necessary to take into account the stability of the structure. **The purpose of the article** is to increase the stability of the high-density Internet of Things system by forming stable mobile fog layer clusters. **Research results.** A fog layer architecture with mobile components is proposed. An assessment of fog computing traffic in the Internet of Things support network is carried out. A model of a mobile fog computing network is developed. A stable mobile fog layer cluster is formed. **Conclusion.** The proposed approach to ensuring the stability of a mobile fog layer cluster allows using mobile devices as fog nodes. The mobile cluster is formed from the most stable mobile IoT nodes, which significantly reduces the possibility of destruction of the cluster architecture.

Keywords: Internet of Things, fog computing, cloud system, stable cluster, mobile component.