

Е. Е. Малохвій

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ НА КІНЦЕВИХ ПРИСТРОЯХ ПОТ

Анотація. **Актуальність.** У системах Промислового Інтернету речей (ПоТ) кінцеві пристрої функціонують в умовах обмежених обчислювальних, енергетичних і комунікаційних ресурсів, тоді як вхідні потоки даних мають гетерогенний, нестационарний і подієво-орієнтований характер. За таких умов передавання всіх необроблених даних до верхніх рівнів cloud-fog-edge архітектури призводить до зростання затримок, перевантаження каналів зв'язку та зниження загальної ефективності системи. **Об'єкт дослідження.** процес обробки інформації на кінцевих пристроях ПоТ у багаторівневу середовищі cloud-fog-edge. **Мета статті.** узагальнення теоретико-математичних засад побудови багатокритеріальної моделі локальної обробки даних та обчислювального розвантаження на кінцевих пристроях з урахуванням характеристик потоку подій, ресурсного стану вузла та вимог до збереження інформативності даних. **Результати дослідження.** Запропоновано узагальнену модель, у межах якої кінцевий пристрій розглядається як активний вузол прийняття рішень, що виконує попередню обробку, оцінювання інформативності, адаптивну фільтрацію, агрегацію, стиснення та формування ознак перед передаванням даних на верхні рівні. Модель поєднує подання вхідного потоку як сукупності класозалежних подій, локальну чергову обробку з обмеженим буфером, вектор ресурсного стану пристрою та багатокритеріальну схему вибору між локальним виконанням і обчислювальним розвантаженням. **Висновки.** Запропонований підхід формує методологічну основу для подальшого синтезу адаптивних стратегій обробки інформації на кінцевих пристроях ПоТ, орієнтованих на збалансування затримки, втрат, енергоспоживання, комунікаційного навантаження та збереження інформативності даних.

Ключові слова: Промисловий Інтернет речей; cloud-fog-edge архітектура; кінцевий пристрій; локальна обробка даних; адаптивна фільтрація; обчислювальне розвантаження; багатокритеріальна оптимізація.

Вступ

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток Промислового Інтернету речей (ПоТ) зумовив суттєву трансформацію підходів до збору, передавання та обробки даних у кіберфізичних виробничих системах. На відміну від традиційних систем автоматизації, сучасні ПоТ-інфраструктури характеризуються щільним розміщенням сенсорів, безперервною генерацією телеметрії, подієво-орієнтованою сигналізацією та використанням гетерогенних каналів зв'язку, що формують значні за обсягом і структурно неоднорідні потоки даних [1]. За таких умов ефективність функціонування системи дедалі більше залежить не лише від хмарної аналітики чи мережевої оркестрації, а й від здатності кінцевих пристроїв виконувати змістовну локальну обробку до передавання інформації на верхні обчислювальні рівні.

Інтеграція cloud-, fog- та edge-рівнів стала домінуючою архітектурною парадигмою для ПоТ, оскільки дає змогу розподіляти обчислювальні функції відповідно до вимог щодо затримки, доступності ресурсів і критичності прикладних задач [2]. При цьому саме кінцеві пристрої залишаються найбільш ресурсно обмеженими елементами такої багаторівневої системи, оскільки функціонують в умовах обмеженої обчислювальної потужності, скінченної пам'яті, нестабільної пропускної здатності каналів зв'язку та жорстких енергетичних обмежень. У практичному сенсі це означає, що кінцевий вузол не може ані виконувати повну локальну обробку для кожної вхідної події, ані передавати весь потік сирих даних на fog/cloud-рівні без ризику зростання затримок, переповнення буфера або зниження енергоефективності [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наявні дослідження переважно розглядають або

архітектурні аспекти cloud-fog-edge систем, або окремі механізми локального зменшення даних, зокрема фільтрацію, агрегацію, стиснення та обчислювальне розвантаження. Водночас у багатьох роботах кінцеві пристрої подаються як спрощені джерела трафіку зі сталими статистичними властивостями, що є недостатнім для синтезу адаптивних стратегій локальної обробки. У промислових середовищах вхідний потік має гетерогенну подієву природу і поєднує періодичну телеметрію, асинхронні тривожні сигнали, діагностичні повідомлення, службові пакети та події керування, які відрізняються часовими характеристиками, пріоритетами та інформативною цінністю [4].

Додатковою складністю є те, що обробка інформації на кінцевому пристрої ПоТ не може бути адекватно описана в межах одноцільової оптимізації. Агресивне зменшення трафіку за рахунок фільтрації та агрегації знижує навантаження на канал і енергоспоживання, проте може призвести до втрати діагностично важливих подій та спотворення динаміки процесу. Натомість максимальне збереження потоку підвищує спостережуваність системи, але супроводжується зростанням затримок, втрат і навантаження на локальні ресурси. Отже, **актуальною** є побудова цілісної математичної основи, яка одночасно враховувала б гетерогенність подій, локальну чергову динаміку, поточний ресурсний стан пристрою, адаптивні перетворення даних і багатокритеріальний характер прийняття рішень щодо локальної обробки або передавання на верхні рівні [5].

Мета статті. Метою статті є узагальнення теоретико-математичних засад побудови багатокритеріальної моделі локальної обробки даних та обчислювального розвантаження на кінцевих пристроях ПоТ у cloud-fog-edge середовищі з урахуванням гетерогенності подієвих потоків, ресурсних обмежень вузла та вимог до збереження інформативності даних.

Основний матеріал

У запропонованій постановці кінцевий пристрій PoT розглядається не як пасивне джерело телеметричних даних, а як активний вузол локальної обробки та прийняття рішень у межах cloud-fog-edge архітектури. Такий підхід дає змогу перенести частину функцій попередньої обробки інформації безпосередньо на рівень кінцевого пристрою, де формується первинний компроміс між локальним виконанням, відкладеним передаванням і обчислювальним розвантаженням на вищі рівні архітектури. У цій архітектурі cloud-рівень забезпечує довготривале зберігання, ресурсоємну аналітику та глобальну оптимізацію, fog-рівень виконує проміжну координацію й наближену до реального часу обробку, тоді як кінцевий пристрій забезпечує безпосередню взаємодію з фізичним процесом за умов жорстких ресурсних обмежень [6, 7].

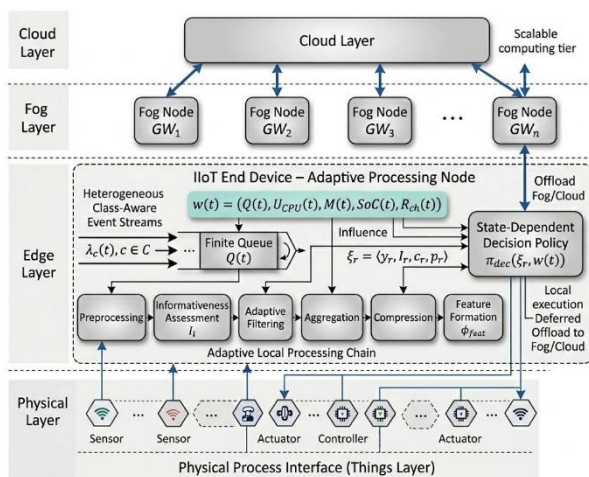


Рис. 1. Архітектура cloud-fog-edge для PoT з кінцевим пристроєм як активним вузлом прийняття рішень

Вхідні дані в такій системі доцільно описувати не як однорідний потік вимірювань, а як гетерогенний потік подій, сформований сенсорами, виконавчими механізмами, контролерами та сервісними програмними компонентами. На відміну від спрощених моделей, цей потік включає періодичні та асинхронні події з різними семантичними ролями, часовими характеристиками, пріоритетами й інформативною цінністю. У межах моделі окрема подія подається кортежем

$$x_i = \langle v_i, s_i, c_i, p_i \rangle,$$

де v_i – значення або вектор ознак події, s_i – часова мітка, c_i – клас події, p_i – її пріоритет. Тоді сумарний вхідний потік можна задати як суперпозицію класозалежних підпотоків

$$\lambda(t) = \sum_{c \in C} \lambda_c(t).$$

Таке подання є принципово важливим, оскільки дозволяє враховувати не лише загальну інтенсивність надходжень, а й структурний склад трафіку, що безпосередньо впливає на вибір локальної політики обробки [7].

У практичних PoT-сценаріях це означає, що локальна система керування даними повинна реагувати

не лише на зміну інтенсивності вхідного потоку, а й на зміну його функціональної структури. Якщо в потоці починають домінувати події аварійного або діагностичного характеру, механізми локальної обробки мають забезпечувати пріоритетне збереження саме таких повідомлень, навіть за умов зростання навантаження. Натомість для фонові телеметрії або допоміжного службового трафіку можуть застосовуватися жорсткіші механізми локального зменшення даних. Отже, подієве представлення потоку створює підґрунтя для семантично чутливого керування обробкою інформації на рівні кінцевого пристрою.

Локальна обробка на кінцевому пристрої моделюється як чергова система зі скінченною буферною ємністю. Навіть після початкового зменшення потоку події залишаються конкурентами за процесорний час, пам'ять, буфер та доступ до комунікаційного інтерфейсу. Узагальнену динаміку черги можна подати співвідношенням

$$Q(t + \Delta t) =$$

$$\min \{ Q_{\max}, \max[0, Q(t) + A(t, \Delta t) - S(t, \Delta t)] \},$$

де $Q(t)$ – поточна заповненість черги, $A(t, \Delta t)$ – обсяг допущених надходжень за інтервал Δt , $S(t, \Delta t)$ – обсяг локально оброблених подій, Q_{\max} – гранична місткість буфера. Таке подання відображає ключову для PoT логіку: якщо приплив подій перевищує ефективну швидкість локального обслуговування, то накопичення черги призводить до зростання затримки, імовірності втрат і функціонального старіння інформації. Отже, стан черги виступає не лише характеристикою поточного навантаження, а й важливим сигналом для подальшого керування режимом обробки [8].

Для врахування поточних обмежень функціонування вузла доцільно вводити динамічний вектор ресурсного стану

$$w(t) = (Q(t), U_{CPU}(t), M(t), SoC(t), R_{ch}(t)),$$

де $Q(t)$ характеризує заповненість черги, $U_{CPU}(t)$ – завантаження процесора, $M(t)$ – використання пам'яті, $SoC(t)$ – енергетичний стан, а $R_{ch}(t)$ – доступну пропускну здатність або якість каналу зв'язку. Введення такого вектора дає змогу формалізувати важливі положення: допустимість локальної обробки або доцільність обчислювального розвантаження визначаються не лише властивостями самої події, а й поточним ресурсним контекстом. Один і той самий клас подій може бути доцільним для локальної обробки за низького навантаження на процесор та обмеженої пропускну здатності каналу, тоді як за високого CPU навантаження і сприятливих умов зв'язку його доцільніше передавати на fog- або cloud-рівень [8, 9].

Такий підхід є особливо важливим для промислових систем із нерівномірним навантаженням і часово змінними режимами функціонування. У моменти пікової активності або погіршення характеристик каналу зв'язку навіть незначне збільшення обсягу локально оброблюваних даних може призвести до суттєвого зростання затримок і перевантаження буфера. Водночас за стабільного каналу та достатнього

енергетичного резерву доцільним може бути передавання частини обчислювальних задач на вищі рівні архітектури. Саме тому ресурсний контекст має розглядатися як невід'ємна складова процесу прийняття рішень щодо локальної обробки даних.

На змістовому рівні локальна обробка інтерпретується як послідовність взаємопов'язаних операторів: попередня обробка, оцінювання інформативності, адаптивна фільтрація, агрегація, стиснення та формування ознак. Попередня обробка усуває шум, похибки квантування, пропуски вимірювань, часову незгодженість і дрейф калібрування, тобто приводить сирі спостереження до форми, придатної для подальшого аналізу в умовах обмежених ресурсів. Після цього особливого значення набуває оцінювання інформативності, оскільки в промислових сценаріях далеко не всі елементи потоку є однаково важливими для моніторингу, діагностики чи керування. Саме тому фільтрація повинна бути не просто процедурою зменшення трафіку, а механізмом відбору подій із найвищою змістовною цінністю.

При цьому ефективність такого операторного ланцюга визначається не лише здатністю зменшувати обсяг переданих даних, а й тим, наскільки коректно він зберігає причинно значущі характеристики процесу, необхідні для подальшого моніторингу та діагностики. Для IoT-середовищ це особливо важливо, оскільки втрата окремих слабких або рідкісних подій може призвести до погіршення якості розпізнавання відхилень і зниження достовірності висновків, отриманих на вищих рівнях архітектури. У цьому контексті локальна обробка виступає не просто технікою скорочення трафіку, а засобом керованого перетворення інформаційного потоку з урахуванням його функціональної значущості.

Фільтрація, агрегація та стиснення в межах запропонованої моделі не мають розглядатися ізольовано, оскільки кожен із цих етапів одночасно впливає на обсяг переданих даних, навантаження на процесор, динаміку черги, енергетичні витрати та ступінь збереження інформативності. Посилення фільтрації або збільшення вікна агрегації може зменшити комунікаційне навантаження й стабілізувати локальний буфер, однак водночас підвищує ризик втрати слабких, але діагностично важливих подій. Натомість максимальне збереження потоку підтримує високу спостережуваність технологічного процесу, проте може перевищувати доступні обчислювальні та енергетичні можливості вузла. Отже, внутрішня структура локальної обробки має розглядатися як узгоджений адаптивний механізм керування інформаційною щільністю потоку [9, 10].

З теоретичної точки зору це означає, що локальна обробка на кінцевому пристрої повинна аналізуватися як багатofакторний процес, у якому взаємодіють характеристики потоку, ресурсні обмеження вузла, часові вимоги прикладної задачі та очікувана інформативна цінність результату. Саме таке трактування дозволяє перейти від ізольованого розгляду окремих технічних процедур до цілісної моделі керування потоком даних. У результаті обчислювальне розвантаження розглядається не як автономна операція

маршрутизації, а як один із елементів інтегрованої стратегії адаптивної обробки інформації в IoT.

Фінальним рівнем формалізації є багатокритеріальна постановка вибору між локальною обробкою та передаванням на fog/cloud-рівні:

$$\begin{aligned} \min_{\pi \in \Pi} F(\pi) &= \\ &= \min_{\pi \in \Pi} (f_T(\pi), f_L(\pi), f_E(\pi), f_R(\pi), -f_I(\pi)). \end{aligned}$$

де f_T характеризує затримку, f_L – втрати або пропущені дедлайни, f_E – енергоспоживання, f_R – комунікаційне навантаження, а f_I – рівень збереження інформативності даних. Така постановка відображає центральний конфлікт задачі: мінімізація трафіку та локальних витрат не повинна досягатися ціною втрати критично важливої інформації, тоді як максимальне збереження потоку не може порушувати вимоги до затримки, стійкості черги та енергоефективності. У підсумку запропонований підхід поєднує подієве представлення вхідного потоку, чергову модель локальної обробки, ресурсний вектор стану пристрою, операторний ланцюг адаптивного перетворення даних і багатокритеріальну основу для вибору стратегії локальної обробки або обчислювального розвантаження [10].

Висновки

У статті узагальнено теоретико-математичні засади побудови багатокритеріальної моделі локальної обробки даних та обчислювального розвантаження на кінцевих пристроях IoT у cloud-fog-edge середовищі. Запропонований підхід ґрунтується на поєднанні подієвого представлення гетерогенних вхідних даних, чергової моделі локального потоку обробки, вектора ресурсного стану пристрою та багатокритеріальної системи оцінювання ефективності, що одночасно враховує затримку, втрати, споживання ресурсів, комунікаційне навантаження та збереження інформативності даних.

Наукова цінність запропонованої формалізації полягає в тому, що локальна обробка інтерпретується не як ізольований набір технічних процедур, а як узгоджений операторний ланцюг, який включає попередню обробку, оцінювання інформативності, адаптивну фільтрацію, агрегацію, стиснення та формування ознак.

Такий підхід забезпечує формальний зв'язок між семантикою подій, ресурсними обмеженнями пристрою та подальшими рішеннями щодо локальної обробки або обчислювального розвантаження, формуючи цілісну методологічну основу для побудови адаптивних політик функціонування кінцевих вузлів IoT.

Практичне значення отриманого результату полягає у можливості використання цієї моделі як бази для подальшого синтезу прикладних методів керування локальною обробкою інформації в промислових сценаріях із різними вимогами до затримки, якості зв'язку, енергоспоживання та діагностичної точності. Наступним етапом дослідження має стати

побудова конкретних адаптивних стратегій і їх оцінювання в репрезентативних IIoT-середовищах.

Конфлікт інтересів. Автор декларує, що не має конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на

дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту
Автор підтверджує, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Alsadie, D. (2024). Advancements in heuristic task scheduling for IoT applications in fog-cloud computing: challenges and prospects. *PeerJ Computer Science*, 10, e2128. doi: <https://doi.org/10.7717/PEERJ-CS.2128>
2. Singh, S.P., Kumar, N., Kumar, G., Balusamy, B., Bashir, A.K., Al Dabel, M.M. (2025). Enhancing Quality of Service in IoT-WSN through Edge-Enabled Multi-Objective Optimization. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. doi: <https://doi.org/10.1109/TCE.2025.3526992>
3. Kuchuk, H., Malokhvii, E. (2024). Integration of iot with Cloud, Fog and Edge computing: a review. *Advanced Information Systems*. 8(2), 65-78. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.08>
4. 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>
5. Muñoz, L.A., Berná Martínez, J.V., Asensi, C.C., Pastor, D.S. (2025). Research Notes: Design of a Distributed and Highly Scalable Fog Architecture for Heterogeneous IoT Infrastructures. *Int. Journal of Software Engineering and Knowledge Eng.*, 35(2), 195-215. doi: <https://doi.org/10.1142/S0218194025430016>
6. Jamil, B. Shojafar, M., Ahmed, I., Ullah, A., Munir, K., Ijaz, H. (2020). A job scheduling algorithm for delay and performance optimization in fog computing. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 32(7). doi: <https://doi.org/10.1002/cpe.5581>
7. Malik, U.M., Javed, M.A., Frnda, J., Rozhon, J., Khan, W.U. (2022). Efficient Matching-Based Parallel Task Offloading in IoT Networks. *Sensors*, 22. doi: <https://doi.org/10.3390/s22186906>
8. Liu, L., Chen, H., Xu, Z. (2022). SPMOO: A Multi-Objective Offloading Algorithm for Dependent Tasks in IoT Cloud-Edge-End Collaboration. *Information*, 13, 75. doi: <https://doi.org/10.3390/info13020075>
9. Thomas, P., Jose, D.V. (2023). Towards Computation Offloading Approaches in IoT-Fog-Cloud Environment: Survey on Concepts, Architectures, Tools and Methodologies. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 613 LNNS, 37-52. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9379-4_4
10. Pardalos, P.M., Stepanovič, I., Žilinskas, A. (2012). Pareto set approximation by the method of adjustable weights and successive lexicographic goal programming. *Optimization Letters*, 6(4), 665-678. doi: <https://doi.org/10.1007/s11590-011-0291-5>

Received (Надійшла) 11.02.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2026

Publication date (Дата публікації) 22.05.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Малохвій Едуард Едуардович – аспірант, кафедра Комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна;

Eduard Malokhvii – PhD candidate, Department of Computer Engineering and Programming, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”;

e-mail: malokhvii.ee@gmail.com; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0008-0311-6400>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59179728600>.

Multi-Objective Model of Local Data Processing and Computation Offloading on IIoT End Devices

Eduard Malokhvii

Abstract. Relevance. In Industrial Internet of Things (IIoT) systems, end devices operate under limited computational, energy, and communication resources, while incoming data streams are heterogeneous, non-stationary, and event-driven. Under such conditions, transmitting all raw data to the upper layers of the cloud-fog-edge architecture leads to increased latency, communication channel overload, and a decline in overall system efficiency. **Object of research.** The process of information processing on IIoT end devices in a multi-level cloud-fog-edge environment. **Purpose of the article.** To generalize the theoretical and mathematical foundations for constructing a multi-objective model of local data processing and computation offloading on end devices, taking into account the characteristics of the event stream, the resource state of the node, and the requirements for preserving data informativeness. **Research results.** A generalized model is proposed in which the end device is considered an active decision-making node that performs preprocessing, informativeness assessment, adaptive filtering, aggregation, compression, and feature extraction before transmitting data to upper levels. The model combines the representation of the input stream as a set of class-dependent events, local queue-based processing with a limited buffer, the device resource-state vector, and a multi-objective scheme for choosing between local execution and computation offloading. **Conclusions.** The proposed approach forms a methodological basis for the further synthesis of adaptive information-processing strategies on IIoT end devices aimed at balancing latency, losses, energy consumption, communication load, and preservation of data informativeness.

Keywords: Industrial Internet of Things; cloud-fog-edge architecture; end device; local data processing; adaptive filtering; computation offloading; multi-objective optimization.