

АНАЛІЗ АРХІТЕКТУРНИХ ПІДХОДІВ ДО ОБРОБКИ ДАНИХ У ВУЗЛАХ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ НА БАЗІ ЧАСТОТНИХ ДАВАЧІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі проведено аналіз двох ключових архітектурних підходів до обробки інформативних сигналів у вузлах безпроводних сенсорних мереж (БСМ), що використовують давачі фізичних величин із частотним вихідним сигналом: архітектури з централізованою та децентралізованою (периферійною) обробкою даних. Проведено порівняльний аналіз цих підходів за ключовими параметрами, такими як енергоефективність, обсяг переданого трафіку, вимоги до обчислювальних ресурсів вузла та затримка в передачі даних. Визначено переваги та недоліки кожного підходу та сформульовано рекомендації щодо їх застосування залежно від специфіки задач моніторингу.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа, частотний сенсор, вузол сенсорної мережі, Інтернет речей, обробка даних, енергоефективність, периферійні обчислення.

Abstract

The study analyzes two key architectural approaches to processing informative signals in wireless sensor network (WSN) nodes that use physical quantity sensors with frequency output signals: architectures with centralized and decentralized (peripheral) data processing. A comparative analysis of these approaches is carried out according to key parameters such as energy efficiency, traffic volume, node computing resource requirements, and data transmission delay. The advantages and disadvantages of each approach are identified, and recommendations for their application are formulated depending on the specifics of the monitoring tasks.

Keywords: wireless sensor network, frequency sensor, sensor network node, Internet of Things, data processing, energy efficiency, edge computing.

Вступ

Сучасний розвиток Інтернету речей (IoT) та безпроводних сенсорних мереж (БСМ) відкриває широкі можливості для моніторингу різноманітних об'єктів та середовищ. Особливе місце серед сенсорних елементів займають давачі з частотним вихідним сигналом, перевагами яких є висока завадостійкість, простота перетворення сигналу в цифровий код та висока точність. Проте, ефективна інтеграція таких давачів у БСМ, особливо в автономні вузли з живленням від батарей, вимагає ретельного вибору архітектури обробки та передачі даних для досягнення балансу між точністю, швидкістю та енергоспоживанням.

Метою роботи є проведення системного аналізу та порівняння централізованого та децентралізованого (периферійного) архітектурних підходів до обробки даних, отриманих з частотних давачів. Аналіз проводиться за комплексом ключових технічних показників: енергоефективність, обсяг мережевого трафіку, вимоги до обчислювальних ресурсів вузла та загальна затримка в отриманні даних. Це дозволить сформулювати обґрунтовані рекомендації щодо вибору архітектури залежно від специфіки та вимог конкретної задачі моніторингу.

Архітектурні підходи до обробки даних частотних давачів

Залежно від того, де відбувається основна обробка інформації (перетворення частоти у фізичну величину, калібрування, фільтрація), можна виділити два основні підходи: централізований та децентралізований. [1]

У архітектурі з централізованою обробкою (Cloud-Centric) сенсорний вузол виконує мінімальний набір операцій: вимірює частоту або період вхідного сигналу і передає отримане

"сире" значення (raw data) на шлюз або у хмарну платформу. Вся подальша обробка, включаючи перерахунок за калібрувальними коефіцієнтами, аналіз динаміки та прийняття рішень, виконується на боці сервера.

Характеристики централізованої моделі:

- Обробка на рівні мережі (Network-based): Дані давачів надходять у центральну локацію обробки (базову станцію, мережевий сервер або хмару), що дозволяє додатку мати глобальне уявлення про розподіл даних у мережі. [2]
- Енергетичні виклики: У традиційних БСМ з багаторівневою (централізованою) обробкою вузли, розташовані ближче до колектора (шлюзу), часто стають ретрансляційними вузлами. Це призводить до значно швидшої втрати енергії цими вузлами порівняно з тими, що розташовані далі. [3]

Архітектура з децентралізованою (периферійною) обробкою (Edge Computing) передбачає, що сенсорний вузол є "розумним" пристроєм. Він не лише вимірює частоту, але й самостійно виконує всі необхідні обчислення, перетворюючи її в кінцеве значення фізичної величини (наприклад, у °C або %). В мережу відправляються вже повністю оброблені, інформативні дані.

Периферійна обробка (Edge Computing) — це нова обчислювальна модель, яка уніфікує ресурси, що знаходяться близько до користувача (за географічною чи мережевою відстанню), для надання обчислювальних, мережевих послуг та послуг зберігання. [4] Перенесення обробки та зберігання даних з централізованих центрів на периферію мережі дозволяє створювати нові або вдосконалювати існуючі додатки. [5]

Оскільки ресурсів одного вузла може бути недостатньо для складного аналізу, часто використовується розширення моделі, відоме як Туманні Обчислення (Fog Computing). Це розумне розширення хмарних обчислень, яке поєднує IoT-пристрої, периферійні вузли та хмару. Туманні обчислення є тривірневою структурою, яка забезпечує мінімізацію затримок (Latency) та максимізацію пропускну здатності, що сприяє енергозбереженню.

Переваги та недоліки архітектур наведені у таблиці 1. [6]

Таблиця 1 – Переваги і недоліки різних архітектур

Параметр	Централізована обробка	Децентралізована обробка
Енергоспоживання	Низьке (короткі обчислення)	Середнє (тривалі обчислення)
Обсяг трафіку	Високий	Низький
Ресурси вузла	Мінімальні	Підвищені
Затримка даних	Висока	Низька
Автономність вузла	Низька	Висока

Висновки

Проведений аналіз показав, що не існує універсального рішення для всіх задач. Архітектура з централізованою обробкою є оптимальною для систем некритичного моніторингу з великим терміном автономної роботи, де пріоритетом є максимальна економія заряду батареї. Натомість, децентралізований підхід є доцільним у системах, що вимагають мінімальної затримки, обробки даних у реальному часі та здатності до автономної роботи, навіть якщо це призводить до незначного збільшення енергоспоживання вузла. Результати аналізу можуть бути використані при проектуванні енергоефективних та надійних безпроводних сенсорних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Stankovic J. A. Research Directions for the Internet of Things. IEEE Internet of Things Journal. 2014. Т. 1, № 1. С. 3–9. URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2014.2312291> (дата звернення: 30.10.2025).
2. Data Processing Techniques in Wireless Multimedia Sensor Networks / Y. Liu та ін. International Journal of Distributed Sensor Networks. 2015. Т. 11, № 7. С. 260384. URL: <https://doi.org/10.1155/2015/260384> (дата звернення: 30.10.2025).

3. Третяк А. В. Застосування літальних сенсорних мереж для побудови Інтернету речей : дипломна робота. Київ, 2023. 63 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/927a0e36-092d-486c-8b91-2faf1fdc4415/content> (дата звернення: 30.10.2025).
4. Edge Computing Revolution: A 2021 Guide. viso.ai. URL: <https://viso.ai/edge-ai/edge-computing-a-practical-overview/> (дата звернення: 30.10.2025).
5. Edge computing vs centralized cloud: Impact of communication latency on the energy consumption of LTE terminal nodes / С. Caiazza та ін. Computer Communications. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2022.07.026> (дата звернення: 30.10.2025).
6. Edge Computing vs Centralized Cloud: Impact of Communication Latency on the Energy Consumption of LTE Terminal Nodes. *arXiv.org*. URL: <https://arxiv.org/abs/2111.10076> (дата звернення: 30.10.2025).

Завальнюк Максим Євгенович — аспірант кафедри Інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: mezgoodle@gmail.com.

Науковий керівник: **Осадчук Олександр Володимирович** — д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: osadchuk.o.v@vntu.edu.ua

Zavalniuk Maksym Yev. — postgraduate student at the department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mezgoodle@gmail.com.

Supervisor: **Osadchuk Oleksandr Volodymyrovych** — doctor of technical sciences, professor, head of the department of information radioelectronic technologies and systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: osadchuk.o.v@vntu.edu.ua