

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В ІoT-МЕРЕЖАХ ДЛЯ ІНФРАСТРУКТУРИ «РОЗУМНОГО МІСТА»

Алексеев Святослав Ярославович

студент групи МПМ-І-25-І.4-д,

Київського столичного університету імені Бориса Грінченка,

науковий керівник – д.т.н., проф. Бушма О.В.

Розвиток концепції «розумного міста» супроводжується активним упровадженням мереж Інтернету речей (IoT), до складу яких входять численні сенсорні вузли, пристрої моніторингу, контролери та шлюзи. Такі системи застосовуються для моніторингу транспортної інфраструктури, якості повітря, освітлення, комунальних ресурсів та інших міських процесів. Значна частина IoT-вузлів функціонує від автономних джерел живлення, тому обмежений енергетичний ресурс безпосередньо впливає на тривалість роботи мережі та вартість її обслуговування [1; 2].

Метою роботи є підвищення енергоефективності IoT-мереж інфраструктури «розумного міста» шляхом комплексної оптимізації режимів роботи сенсорних вузлів, обсягу переданих даних та маршрутів їх передавання із збереженням необхідного рівня якості обслуговування.

Дослідження енергоефективності бездротових сенсорних мереж показують, що основними напрямками зменшення енергоспоживання є керування робочим циклом вузлів (duty cycling), скорочення обсягу даних, агрегація повідомлень та енергоорієнтована маршрутизація [1]. Сучасні дослідження IoT-мереж додатково розглядають кластеризацію, деревоподібну маршрутизацію, багатошляхові та QoS-орієнтовані методи, а також підходи з енергозбиранням [2]. Для LPWAN-мереж, зокрема LoRaWAN, важливим механізмом є адаптивне налаштування параметрів передавання, що дає змогу враховувати якість радіоканалу та енергетичні обмеження кінцевих пристроїв [3]. Сучасні підходи також використовують контекстно-орієнтовану маршрутизацію, яка враховує стан мережі та характеристики середовища для підвищення енергоефективності й тривалості її функціонування [4].

У ході дослідження запропоновано розглядати IoT-мережу «розумного міста» як систему, у якій рішення щодо передавання даних приймаються з урахуванням поточного енергетичного стану вузлів, інтенсивності формування даних, якості радіоканалу та вимог конкретного сервісу. Такий підхід дає змогу перейти від статичних параметрів роботи мережі до адаптивного керування.

Першим компонентом оптимізації є адаптивне керування активністю сенсорних вузлів. За низької інтенсивності зміни контрольованого параметра вузол може збільшувати тривалість режиму сну та активувати радіомодуль лише через визначені інтервали або за наявності події. За підвищення динаміки процесу частота вимірювань і передавання даних збільшується. Це дає можливість уникати постійної роботи радіомодуля без втрати інформації, критичної для міського сервісу [1].

Другим компонентом є зменшення надлишкового трафіку. Передавання може виконуватися не для кожного вимірювання, а за умови перевищення заданого порогу зміни, виникнення події або накопичення пакета даних. Для групи близько розташованих сенсорів доцільним є використання агрегації, коли декілька вимірювань об'єднуються в одне повідомлення. Зменшення кількості

переданих пакетів скорочує витрати енергії на комунікацію та зменшує навантаження на мережу [1; 2].

Третім компонентом є енергоорієнтована маршрутизація. Під час вибору наступного вузла маршруту доцільно враховувати не лише довжину шляху або якість каналу, а й залишковий заряд вузла та рівномірність розподілу навантаження. Це дає змогу уникати ситуацій, коли окремі вузли передчасно втрачають енергетичний ресурс через постійне ретранслювання пакетів. Енергія може використовуватися як один із ключових критеріїв маршрутизації поряд із затримкою, надійністю та пропускнуою здатністю [2; 4].

Запропонований підхід може бути представлений як багатокритеріальна оптимізаційна задача, у якій цільова функція враховує енергоспоживання мережі та додаткові характеристики її роботи. У загальному вигляді критерій оптимізації можна подати як мінімізацію сумарних енергетичних витрат за умови дотримання обмежень щодо затримки передавання, втрат пакетів, доступності сервісу та мінімального залишкового рівня енергії вузлів. Для подальшого моделювання доцільно порівняти базовий режим роботи з адаптивним алгоритмом за показниками середнього енергоспоживання, часу життя мережі, кількості переданих пакетів і якості обслуговування.

Практична реалізація може передбачати використання низькопотужних технологій зв'язку. Зокрема, для розподілених міських сенсорних систем можуть застосовуватися LPWAN-рішення, де адаптивне налаштування параметрів передачі дозволяє враховувати характеристики каналу та енергетичні обмеження кінцевих пристроїв [3]. Вибір конкретної технології має здійснюватися з урахуванням дальності зв'язку, обсягу даних, необхідної затримки, щільності вузлів та енергетичного бюджету.

Отримані результати свідчать про доцільність комплексної оптимізації енергоспоживання IoT-мереж шляхом одночасного керування режимами роботи сенсорних вузлів, обсягом трафіку та маршрутами передавання. Поєднання duty cycling, скорочення та агрегації даних, а також енергоорієнтованої маршрутизації створює основу для зменшення енергетичних витрат без відмови від вимог до якості обслуговування [1–4].

Результати дослідження можуть бути використані під час подальшого програмного моделювання IoT-мережі та кількісної оцінки ефекту від запропонованої оптимізації. Перспективним є експериментальне порівняння базового та адаптивного алгоритмів за критеріями енергоспоживання, часу життя мережі, кількості переданих пакетів і якості передавання даних.

ДЖЕРЕЛА

1. Rault T., Bouabdallah A., Challal Y. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey. *Computer Networks*. 2014. Vol. 67. P. 104–122. DOI: 10.1016/j.comnet.2014.03.027.
2. Holistic survey on energy aware routing techniques for IoT applications. *Journal of Network and Computer Applications*. 2023. Vol. 213. Art. 103584. DOI: 10.1016/j.jnca.2023.103584.
3. A Survey on Adaptive Data Rate Optimization in LoRaWAN: Recent Solutions and Major Challenges. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 18. Art. 5044. DOI: 10.3390/s20185044.
4. Khedr A. M., Alfawaz O., Raj P. P. V., Osamy W. Advancing IoT-driven WSNs with context-aware routing: A comprehensive review. *Computer Science Review*. 2025. Vol. 58. Art. 100803. DOI: 10.1016/j.cosrev.2025.100803.