

УДК 004.057:004.057.4, 004.454, 004.891.3 Д.
В. КРАЩЕНКО, аспірант;
А. Г. ЗАХАРЖЕВСЬКИЙ, канд. техн. наук,
Державний університет телекомунікацій, Київ

DOI: 10.31673/2412-9070.2022.012630

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В МЕРЕЖАХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (ІoT)

Останнє десятиліття стало свідком зростання кількості пристроїв із підтриманням інтернету. Інтернет речей (IoT) набуває дедалі більшого поширення в повсякденному житті, об'єднуючи невпинно зростаючу різноманітність фізичних об'єктів. Ключове бачення IoT полягає в тому, щоб забезпечити взаємодію величезної кількості розумних пристроїв разом, в інтегрованій та взаємопов'язаній гетерогенній мережі. Тому в межах статті зроблено короткий екскурс з історії та еволюції мережі «Інтернет». Також висвітлено технології, на яких базується IoT, та встановлено факт, що безпроводова сенсорна мережа (WSN) є одним із важливих елементів IoT, описано взаємозв'язок між WSN та Інтернетом речей. Загалом статтю присвячено дослідженню розроблення методів енергоефективності для WSN. Після виявлення джерел втрат енергії було розглянуто дослідження, в яких перевіряються найбільш актуальні методи мінімізації споживання енергії IoT і WSN. Також подано підсумок та рекомендації щодо широкого діапазону енергоефективних методів, які допоможуть у майбутніх дослідженнях.

Ключові слова: Інтернет речей (IoT); комунікації; споживання енергії; безпроводові сенсорні мережі (WSN); оптимізація енергії; гетерогенна мережа; шлюз; сенсор; кластеризація.

ВСТУП

Інтернет зазвичай визначають як глобальну систему підімкнених комп'ютерних мереж, які використовують протокол керування передаванням та Інтернет-протокол (TCP/IP) для надсилання та отримання даних через різні типи носіїв. Численні технології зробили свій внесок у розвиток мережі «Інтернет» в її сучасному вигляді. Це дало змогу об'єднати велику кількість пристроїв між собою та надало можливість цим пристроям обмінюватися даними в різних типах мереж.

Ця сукупність пристроїв та розумних об'єктів стає все більш і більш присутнішою в нашому повсякденному житті, і на певному етапі вони породжують нову концепцію мережі, яка називається Інтернет речей (IoT). Фразу «Інтернет речей» вперше ввів до обігу Кевін Ештон у 1999 році, коли він використовував радіочастотну ідентифікацію (RFID) у ланцюгу керування [1]. З того часу IoT використовувався для визначення парадигми будь-якого пристрою, який можна підімкнути до мережі та передати в інтернет або отримати з інтернету дані. Згідно з прогнозом провідних фахівців галузі до 2023 року у всьому світі буде розгорнуто 65 млрд під'єднаних пристроїв, що означає 6,41 підімкнених пристроїв на людину при кількості населення у світі 7,8 млрд у 2020 році [1; 2]. Інший прогноз зазначає, що кількість розумних об'єктів досягне 80 млрд у 2025 році з 9,8 підімкнених пристроїв на особу. На основі цих досліджень можна дійти висновку, що безпроводові сенсорні мережі (WSN) є важливою частиною технології IoT, оскільки вони допомагають в об'єднанні гетерогенних систем, їх даних і застосунків. У таких системах сенсорні вузли здатні виявляти потрібну інформацію, виконувати певне її оброблення та «спілкуватися» з

іншими під'єднаними вузлами, а отже, фактично є основним компонентом цих мереж. Однак термін служби цих вузлів часто обмежується живленням від батареї з невеликою ємністю (за рахунок мініатюрних розмірів самого пристрою), обмеженням здатності оброблення (процесорна швидкість), обсягом пам'яті та радіусом дії радіозв'язку [3; 4].

Енергоефективність є одним із найважливіших питань для WSN. Більшість енергії споживається для оброблення та передавання даних. Це означає, що не раціонально витрачати енергію на накладні витрати протоколу, передавання непотрібних даних або неоптимізоване передавання пакетів даних, особливо повторного передавання, через неефективні алгоритми планування та маршрутизації. Отже, було б розумно розробити та впровадити ефективні схеми балансування навантаження на вузли (у розрізі використання енергії), щоб максимізувати термін служби мереж, зорієнтованих на викладені раніше обмеження [5].

Мережі генерують велику кількість даних, зібраних за допомогою різноманітних сенсорів. Кожні два роки обсяг даних подвоюється. Очікується, що в 2025 році надійде 163 зеттабайти до мережі. Обсяг даних IoT збільшиться від 2% у 2013 році до 14% у 2023 році.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Мережі WSN

В основі парадигми IoT лежить безпроводова сенсорна мережа (WSN). Це одна з найбільш перспективних безпроводових технологій. WSN містить десятки тисяч підімкнених вузлів та дає змогу виконувати обмін даними між ними. Такі мережі мають наступні риси: низька вартість побудови, низький частотний діапазон, малопотужні

© Д. В. Кращенко, А. Г. Захаржевський 2022

електричні схеми та крихітні розміри сенсорних вузлів. Кожен вузол такої мережі має у своєму складі: блок сенсорів (чутливих елементів), блок оброблення даних, джерело живлення, модуль пам'яті, приймач і блок передавача (рисунок) [6].



Основні компоненти WSN

Архітектура зв'язку WSN

У великомасштабних мережах сенсорну мережу часто поділяють на підгрупи, кожна з яких має сенсорні вузли та один вузол — шлюз, який зазвичай називають головою кластера (*cluster-head, CH*). Така кластеризація має низку переваг для сенсорних мереж із погляду споживання енергії, величини затримки, швидкості мережного зв'язку тощо [7].

Сенсорні вузли встановлюють з'єднання один з одним безпроводовим способом і окремо збирають дані з навколишнього середовища, виконують прості обчислювальні процеси і потім пересилають інформацію до пов'язаного з ним вузла CH через один стрибок (*hop*) або проміжні вузли. Проміжний вузол слугує відправником даних і шляхом для інших вузлів кластера до вузла CH. Ці вузли приймають рішення щодо пересилання (тобто маршрутизацію) на основі їх знань про архітектуру мережі. Вузли CH можуть бути вибрані випадковим чином або ґрунтуючись на одному чи кількох критеріях, зокрема: кількості сусідніх вузлів, відстані передавання до кінцевого пункту призначення, залишковій енергії тощо. У такій ієрархії базова станція (BC) є головним вузлом, який збирає дані з усіх сенсорних вузлів і обробляє їх, а потім поширює ці дані за призначенням. Завдання вузла CH — зібрати інформацію від вузлів свого кластера, провести її компресію, а потім поширити на BC.

Більшість досліджень WSN пов'язані з пошуком належної кластеризації, оптимального шляху до BC та методів агрегації, що може звести до мінімуму споживання енергії та подовжити термін служби мережі [8].

Джерела втрат енергії

У WSN більшість енергії витрачається на оброблення, отримання або передавання даних для виконання вимог програми. Зрозуміло, що скоро-

чення обсягу переданих даних дасть можливість заощадити енергію батареї сенсорів. Що стосується самого обміну даними, то кілька досліджень виявили, що велика кількість енергії розсіюється різними шляхами, які не роблять корисного внеску в програму. Розглянемо деякі з них.

- **Колізії.** Коли два або більше пакетів досягають сенсорного вузла одночасно, відбувається «зіткнення пакетів». Отже, пакети або відкидаються, або повертаються до вихідного вузла. Це призводить до повторного відправлення пакета даних, що впливає на час затримки передавання та на споживання енергії.

- **Надмірне прослуховування ефіру.** Архітектурна особливість WSN призводить до значної втрати енергії, особливо якщо щільність вузлів і транспортне навантаження значні. Коли вузол надсилає пакет, усі сенсорні вузли в межах його діапазону передавання отримують пакет, навіть якщо ці вузли не є пунктом призначення.

- **Прослуховування в режимі очікування.** Кожен вузол WSN має прослуховувати ефір в очікуванні отримання пакета даних. Зазвичай це завдання вирішують переведенням сенсора у «сплячий» режим із «пробудженням» лише на час передавання даних.

- **Надлишкові дані.** Вузли WSN зазвичай розгортаються випадковим чином, що може означати існування деяких регіонів розгортання, які контролюються двома або більшою кількістю сенсорів одночасно. У результаті енергія витрачається на агрегування, оброблення та передавання зайвих даних. Споживання енергії можна звести до мінімуму, уникаючи розміщення непотрібного для виконання поставленої задачі вузла.

- **Відстань.** Відстань передавання між вузлами є дуже важливим аспектом енергоефективності. Оскільки споживання енергії на передавання пакета даних пропорційне до квадрата відстані, то потужність, потрібна для передавання, швидко зростає з відстанню, а отже, передавання даних в один стрибок максимізує споживання енергії в разі значного розміру мережі [9].

Методи підвищення енергоефективності WSN

У дослідженнях розглянуто багато методів, застосувавши які можна ефективно мінімізувати використання енергії і подовжити термін «тривалості життя» WSN та мереж IoT, зокрема протоколів маршрутизації, планування даних, ефективної агрегації даних тощо. Далі буде наведено стислий опис основних із них.

Протоколи маршрутизації. Однією з найбільш значущих дискусій щодо IoT на основі WSN є генерація безпрецедентної кількості даних і те, як вибрати оптимальні шляхи для передавання

такої величезної кількості даних до кінцевого пункту призначення. Енергоефективні алгоритми маршрутизації реалізовано для зменшення витрат енергії та подовження терміну служби сенсорних мереж. До більшості алгоритмів належать концепції використання кластеризації поля розгортання сенсорів, методи вибору вузлів-шлюзів (СН) вибору оптимального шляху від вихідного вузла до вузла призначення та зміною положення базової станції. Розглянемо алгоритм, який вибудовується в кілька кроків.

1. *Вибір вузла-шлюза (cluster-head, СН).* Для оптимізації процесу вибору СН застосовуються різні стратегії використання енергії. Найпоширенішими є три: низькоенергетична адаптивна ієрархія кластеризації (LEACH), гібридний, енергоефективний розподілений протокол (HEED) та енергоефективний збір у сенсорних інформаційних системах (PEGASIS).

• *Низькоенергетична адаптивна ієрархія кластеризації (LEACH)* — одна з найцікавіших стратегій, в якій вузол СН вибирається на основі ймовірнісного підходу та кількості енергії, що залишилася у СН. Такий вибір здійснюється на певний проміжок часу («раунд»), після закінчення якого система знову вибирає вузол шлюзу. Вузол, який уже був СН, не може бути вибраний знову в певній кількості наступних раундів. Вибраний вузол транслює в мережу свій статус та створює розклад передавання даних для кожного вузла у своєму кластері. Кожен вузол кластера підмикається до СН за допомогою одиночного переходу (стрибка) і вибирає випадкове число від 0 до 1, а потім порівнює це число з пороговим значенням. Вузол стає СН у кожному наступному раунді, якщо випадкове число менше наступного порогу.

Хоча LEACH та його похідні протоколи проклали шлях для впровадження енергоефективних протоколів маршрутизації, усі вони страждають від однієї фундаментальної проблеми. Вузол використовує маршрутизацію з одним переходом у кластерах, а отже, це неприйнятно для WSN, розташованих на великій території.

• *Гібридний енергоефективний розподілений протокол (HEED)* є іншим поширеним методом вибору вузла СН. Цей протокол долає недолік LEACH, досягаючи рівності та однорідності розподілу вузлів СН у зоні чутливості. При цьому підході вибір вузла СН засновано на залишковій енергії кожного вузла та близькості вузла через визначення середнього значення нижчих рівнів енергії (AMRP), потрібного для всіх сенсорів у діапазоні кластера, щоб досягти вузла СН.

• *Енергоефективний збір у сенсорних інформаційних системах (PEGASIS).* PEGASIS є ще одним методом вибору вузла СН. Цей підхід полягає у формуванні ланцюжків між вузлами сенсорів

для передавання даних. Кожен вузол отримує дані від одного сусіднього вузла і передає його іншому сусіду. Два вузли в кінці ланцюжка, який формує структуру маршрутизації, будуть пересилати інформацію інших вузлів до єдиного шлюзу (вузол СН), а потім СН відправлятиме ці дані до цільового пункту призначення. Вузол СН вибирається випадковим чином. PEGASIS спрямований мінімізувати відстані передавання між сенсорними вузлами в зоні сприйняття, а завдяки цьому споживання енергії кожного давача зведено до мінімуму. Проте лише один вузол вибирається як вузол СН за раунд. Це може стати вузьким місцем, яке спричиняє затримку передавання та повторне передавання деяких пакетів [10; 11].

Порівняльні характеристики протоколів маршрутизації наведено в таблиці.

Порівняння та класифікація деяких методів маршрутизації у WSN

Параметр	LEACH	HEED	PEGASIS
Тип протоколу	Ієрархічний	Ієрархічний	Ієрархічний
Модель передавання даних	Кластерна	Кластерна	Ланцюгова
Розподілення вузлів	Випадкове	Випадкове	Випадкове
Вузли	Фіксовані	Фіксовані	Фіксовані
Мультихоп	Ні	Так	Ні
Метод кластеризації	Розподілений	Розподілений	Централізований
Метод вибору СН	Порогове значення	Залишкова енергія	Порогове значення
Релейний вузол	СН	СН та вузли	Вузли
Агрегація даних	Так	Так	Ні
Масштабованість	Низька	Середня	Низька

2. *Вибір оптимального шляху передавання.* У кількох дослідженнях розглядався оптимальний вибір маршруту для покращення енергозбереження у WSN. Підхід до пошуку найкоротшого маршруту є широко використовуваним методом для побудови маршрутизації дерева в WSN у режимі «один до множини». Потенційні переваги найкоротшого шляху мають найменше споживання енергії та мінімальну затримку.

Нову техніку маршрутизації, яка може обчислити відстань між двома несусідніми вузлами в багатострибкових WSN наведено в [12]. Цей метод знаходить всі можливі маршрути між вихідним вузлом і кінцевим одержувачем з меншою кількістю стрибків. Це зумовлює мінімізацію споживання енергії та скорочення затримки мережі в цілому.

3. *Зміна розташування базової станції.* У кількох дослідженнях запропоновано маніпулювання розташуванням БС як засіб зменшення енергетичного навантаження. Було запропоновано ідею

мобільної БС, де вона рухається заданим шляхом, щоб зібрати інформацію в зоні кластера. За таких умов усі вузли незалежно від відстані встановлюють пряме з'єднання з БС. Тому загальна максимальна довжина зв'язку мережі значно збільшується через економію енергії, особливо завдяки вузлам, розташованим на межі мережі, споживаючи більше енергії, ніж інші вузли, розміщені близько до базової станції у стаціонарному варіанті.

Алгоритми планування. Сенсорні вузли навколо вузла СН, природно, створюють шаблон трафіку «множина до одного». Перевантаження найчастіше відбувається, коли навантаження на певний вузол перевищує доступну ємність буфера, що призводить до успішного доставляння лише деяких пакетів, а отже, стає потрібне повторне передавання пакетів. Повторне передавання даних зазвичай споживає додаткову енергію. Більшість попередніх досліджень не розглядають витрати енергії через повторне передавання пакетів. Тому під час упровадження методів планування вкрай потрібно брати до уваги споживання енергії такого виду, оскільки повторне передавання пакетів додає навантаження на мережу і скорочує термін її служби.

Щоб мінімізувати використання енергії та пам'яті, потрібні покращені протоколи планування, які зважатимуть на накладні витрати пакетів (завдяки протоколу передавання). Було досліджено кілька методів планування для використання в сенсорних мережах.

Наприклад, у деяких сучасних дослідженнях запропоновано новий алгоритм планування для протоколу IEEE 802.15.4e MAC, який сформовано на стрибкоподібному перемиканні каналів із синхронізацією часу (TSCH). Цей варіант підходить для мультіхоп WSN на основі віддаленого перетворювача з адресним шлюзом. Запропонована схема сприяє розвитку безпроводових сенсорних мереж завдяки створенню низької затримки передавання і короткого робочого циклу, що в сумі дає максимальну енергоефективність.

Зі збільшенням щільності вузлів плануються різні типи пакетів даних, зокрема дані з низьким або високим пріоритетом на вузлах СН. Наприклад, якщо черга не має пріоритету над іншими, то може статися відкидання пакетів і знадобиться повторне передавання. Ця проблема може бути серйозною для прикордонних (у розрізі кластера) вузлів, які мають доступ до багатьох сенсорів і використовують кілька переходів для досягнення потрібного цільового вузла. А отже, такі вузли споживають більше енергії, ніж інші вузли мережі, розташовані неподалік від пункту призначення. Тож планування на вузлах СН, яке надає пріоритет даним, котрі надходять з інших вузлів, має вирішальне значення для енергозбереження [13].

Методи агрегації. Інтеграція WSN та елементів IoT пов'язана з підключенням пристроїв до мережі «Інтернет», що робить їх більш зручними у використанні та максимізує їх ефективність. Така інтеграція може генерувати великий обсяг даних за допомогою цих розумних пристроїв. Є значна надмірність даних у таких мережах через щільне розгортання. Надлишкові дані потребують значної кількості енергії для їх оброблення та передавання. Оскільки кожен сенсор забезпечується лише обмеженою потужністю, то це призводить до того, що надмірність даних унеможливує покращення загального споживання енергії для мереж IoT.

Нещодавні дослідження підтвердили, що технологія хмарних обчислень пропонує низку переваг WSN та IoT щодо масштабованості, зберігання, обчислювальних завдань тощо за допомогою інтернету. Запропонована система збирає дані з різних пристроїв IoT і пересилає їх кінцевим користувачам через хмарну інфраструктуру. Завдяки цьому користувач може отримувати доступ до потрібної інформації або відстежувати стан системи, а також окремих сенсорів із будь-якого місця через вебсайт [14].

ВИСНОВКИ

Інтернет речей має великий вплив на цифровий світ і те, як ми з ним взаємодіємо. WSN є ключовою технологією, що забезпечує IoT. Сенсорні вузли, здатні виявляти потрібну інформацію, виконуючи деяке оброблення та встановлюючи зв'язок з іншими під'єднаними вузлами, є основним компонентом цих мереж. Однак «тривалість життя» цих вузлів часто обмежується живленням від батареї, яка, зі свого боку, має обмежену ємність. Енергоефективність є однією з найбільш важливих питань для WSN, оскільки не раціонально витрачати енергію на накладні витрати протоколу, передавання непотрібних даних або на неоптимізоване передавання пакетів даних. Особливо це стосується повторного передавання через неефективні алгоритми планування та маршрутизації. Отже, головною метою будь-якої енергоефективної стратегії є продовження терміну роботи сенсорних вузлів та збільшення терміну служби мережі в цілому. А отже, у цій статті було поставлено мету — репрезентувати тенденції дослідження та останні праці щодо використання технології IoT, продемонструвати різні джерела втрат енергії та висвітлити різні вирішення з мінімізації цих втрат. Уточнюючи мотиваційні фактори, було з'ясовано кілька завдань, які потрібно розв'язати, аби забезпечити теоретичну та практичну реалізацію WSN на основі мереж IoT.

Список використаної літератури

1. **IoT Reliability: A Review Leading to 5 Key Research Directions** / S. J. Moore, C. Nugent, S. Zhang, I. Cleland // *CCF Trans. Pervasive Comput. Interact.* 2020. №2. P. 147–163.
2. **Davis G.** 2020 *Life With 50 Billion Connected Devices* // *In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*. Las Vegas, NV, USA, 12–15 January 2018.
3. **Q.T.H.** *An Efficient Load Balancing Scheme of Energy Gauge* / M. Adil, R. Khan, M. A. Almaiah [et al.] // *Nodes to Maximize the Lifespan of Constraint Oriented Networks*. 2020. №8. H. 148510–148527.
4. **A Survey of Communication Protocols for Internet of Things and Related Challenges of Fog and Cloud Computing Integration** / J. Dizdareviunde-fined, F. Carpio, A. Jukan, X. Masip-Bruin // *ACM Comput. Surv.* 2019. №51. P. 1–29.
5. **MAC-AODV Based Mutual Authentication Scheme** / M. Adil, R. Khan, M. A. Almaiah [et al.] // *Constraint Oriented Networks*. 2020. №8. P. 44459–44469.
6. **Brohi A. M., Malkani Y. A., Chandio M. S.** *Data provenance in Wireless Sensor Networks (WSNs) // A review. In Proceedings of the 2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*. Sukkur, Pakistan, 3–4 March 2018. P. 1–5.
7. **Clustering Analysis in Wireless Sensor Networks** / A. Zeb, A. K. M. M. Islam, M. Zareei [et al.] // *The Ambit of Performance Metrics and Schemes Taxonomy. Int. J. Distrib. Sens. Netw.* 2016. №12. P. 4979142.

8. **Improving Energy Efficiency With Content-Based Adaptive and Dynamic Scheduling in WSN.** / M. N. Khan, H. U. Rahman, M. A. Almaiah [et al.] // *Constraint Oriented Networks*. 2020. №8. P. 176495–176520.

9. **Minet P.** *Energy Efficient Routing* // *Bentham Science: Sharjah, United Arab Emirates*. 2009. P. 49–60.

10. **Heinzelman W. B., Chandrakasan A. P., Balakrishnan H.** *An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks* // *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2002. №1. P. 660–670.

11. **Lindsey S., Raghavendra C., Sivalingam K. M.** *Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics* // *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 2002. №13. P. 924–935.

12. **Recursive Shortest Path Routing Algorithm with Application for Wireless Sensor Network Localization** / J. Cota-Ruiz, P. Rivas-Perea, E. Sifuentes, R. A. Gonzalez-Landaeta // *IEEE Sens. J.* 2016. №16. P. 4631–4637.

13. **On Optimal Scheduling in Duty-Cycled Industrial IoT Applications Using** / M. R. Palattella, N. Accettura, L. A. Grieco [et al.] // *IEEE802.15.4e TSCH. IEEE Sens. J.* 2013. №13. P. 3655–3666.

14. **Rachmad A. A., Daoguo Y.** *Online Monitoring & Controlling Industrial Arm Robot Using MQTT Protocol* // *In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics, Biomimetics, and Intelligent Computational Systems (Robionetics)*. Bandung, Indonesia, 8–10 August 2018. P. 12–16.

D. Krashchenko, A.H. Zakhazhevskiy

RESEARCH OF METHODS OF INCREASING ENERGY EFFICIENCY FOR THE INTERNET OF THINGS (IoT) NETWORKS

The last decade has seen an increase in the number of Internet-enabled devices. The Internet of Things (IoT) is becoming more common in everyday life, bringing together more and more diverse physical objects. The key vision of IoT is to enable the interaction of a huge number of smart devices, together, in an integrated and interconnected heterogeneous network.

The framework of the IoT is based on several enabling technologies including WSNs, cloud computing, machine learning, and peer-to-peer systems. WSN is the most crucial part of the communication process of the IoT networks. In WSNs, sensor nodes capable of detecting the required information, performing some processing and communicating with other connected nodes are the main component of these networks. However, the life of these nodes is often restricted by being powered by a battery with a limited life, constraining processing ability, memory, and radio communications. Energy efficiency is one of the most crucial issues for WSNs. Most of the energy is consumed in data processing and transmissions.

Therefore, in the article, the author makes a brief digression on the history and evolution of the Internet. Next, the article highlights the technologies on which IoT is based and establishes the fact that wireless sensor network (WSN) is one of the important elements of IoT, describes the relationship between WSN and the Internet of Things. In general, the article is devoted to the study of the development of energy efficiency methods for WSN. After identifying the sources of energy losses, this article discusses studies that test the most relevant methods of minimizing energy consumption IoT and WSN. The article also summarizes and recommends a wide range of energy efficient methods that will help in future research.

Keywords: Internet of Things (IoT); communications; energy consumption; wireless sensor networks (WSN); energy optimization; heterogeneous network; gate; sensor; clustering.