

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

До захисту допущено:

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Аналіз методів маршрутизації в сенсорних мережах із
самоорганізацією»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТЗ- 21

Власюк Назарій Анатолійович _____

Керівник:

Професор кафедри ТК НН ІТС, д.т.н., професор,

Лисенко О. І. _____

Рецензент:

Старший викладач кафедри ЕКІР НН ІТС, к.т.н.,

Новіков В.І. _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Власюку Назарію Анатолійовичу

1. Тема роботи «Аналіз методів маршрутизації в сенсорних мережах із самоорганізацією», керівник роботи Лисенко Олександр Іванович, професор, д.т.н., затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1912-с.

2. Термін подання студентом роботи 10 червня 20265 р.

3. Вихідні дані до роботи: особливості побудови та функціонування безпроводових сенсорних мереж, принципи самоорганізації сенсорних мереж, топології сенсорних мереж, методи маршрутизації, протоколи LEACH, PEGASIS, Directed Diffusion та AODV, показники енергоспоживання, затримки передавання даних, надійності, масштабованості та стійкості до зміни топології мережі.

4. Зміст роботи:

Особливості сенсорних мереж із самоорганізацією

- Методи маршрутизації в сенсорних мережах
- Протоколи маршрутизації LEACH, PEGASIS, Directed Diffusion та AODV

- Аналіз ефективності методів маршрутизації в сенсорних мережах
 - Практичний приклад організації маршрутизації в сенсорній мережі
 - Напрями вдосконалення методів маршрутизації
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо):
- 1) Зміст дипломної роботи
 - 2) Мета роботи
 - 3) Структура та топології сенсорних мереж із самоорганізацією
 - 4) Класифікація методів маршрутизації в сенсорних мережах
 - 5) Протоколи маршрутизації LEACH, PEGASIS, Directed Diffusion та AODV
 - 6) Порівняльний аналіз методів маршрутизації
 - 7) Практичний приклад організації маршрутизації в сенсорній мережі
 - 8) Висновки
6. Дата видачі завдання 21 жовтня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Особливості сенсорних мереж із самоорганізацією	21.10.2025–22.11.2025	виконано
2	Аналіз методів маршрутизації в сенсорних мережах	23.11.2025–28.02.2026	виконано
3	Дослідження протоколів LEACH, PEGASIS, Directed Diffusion та AODV	01.03.2026–31.03.2026	виконано
4	Аналіз ефективності методів маршрутизації в сенсорних мережах	01.04.2026–20.05.2026	виконано
5	Оформлення дипломної роботи та формування висновків	21.05.2026–10.06.2026	виконано

Студент

Назарій ВЛАСЮК

Керівник

Олександр ЛИСЕНКО

РЕФЕРАТ

Робота містить 68 сторінок, 24 ілюстрації, 2 додатки та 28 бібліографічних найменувань за переліком посилань.

Метою дипломної роботи є аналіз сучасних методів маршрутизації в сенсорних мережах із самоорганізацією, визначення їхніх переваг і недоліків, а також оцінка ефективності функціонування в різних умовах роботи мережі. Об'єктом дослідження є сенсорні мережі із самоорганізацією та процеси передавання даних у них.

У роботі розглянуто особливості побудови та функціонування безпроводових сенсорних мереж, структуру сенсорних вузлів, принципи самоорганізації, основні топології, переваги, недоліки та сфери застосування таких мереж. Проаналізовано методи маршрутизації, зокрема ієрархічні, географічні, енергозберігаючі та адаптивні підходи. Також розглянуто протоколи LEACH, PEGASIS, Directed Diffusion та AODV, визначено їхні особливості застосування у сенсорних мережах.

Під час виконання роботи використано методи аналізу науково-технічних джерел, порівняльного аналізу, класифікації, узагальнення та оцінювання ефективності методів маршрутизації за такими показниками, як енергоспоживання, затримка передавання даних, надійність, масштабованість і стійкість до зміни топології мережі.

У результаті дослідження встановлено, що ефективність функціонування сенсорної мережі значною мірою залежить від правильного вибору методу маршрутизації, структури мережі та раціонального використання енергетичних ресурсів сенсорних вузлів. Визначено, що адаптивні та енергозберігаючі методи маршрутизації є перспективними для мереж із самоорганізацією, оскільки вони дозволяють підвищити стабільність роботи системи, зменшити навантаження на вузли та забезпечити надійне передавання даних.

Результати дипломної роботи можуть бути використані під час проєктування, аналізу та вдосконалення безпроводових сенсорних мереж у

промисловості, транспорті, медицині, системах безпеки, екологічному моніторингу та автоматизованих системах керування. Впровадження, патенти або публікації за результатами роботи не зазначені.

Ключові слова: сенсорна мережа, безпроводова сенсорна мережа, самоорганізація, маршрутизація, сенсорний вузол, топологія, енергоспоживання, передавання даних, LEACH, PEGASIS, Directed Diffusion, AODV, адаптивна маршрутизація, енергоефективність, надійність, IoT.

ABSTRACT

The thesis contains 68 pages, 24 illustrations, 2 appendices and 28 bibliographic references.

The purpose of the bachelor thesis is to analyze modern routing methods in self-organizing sensor networks, determine their advantages and disadvantages, and evaluate their efficiency under different network operating conditions. The object of the research is self-organizing sensor networks and data transmission processes in them.

The thesis considers the features of the structure and operation of wireless sensor networks, the structure of sensor nodes, principles of self-organization, main topologies, advantages, disadvantages and areas of application of such networks. Routing methods are analyzed, in particular hierarchical, geographical, energy-saving and adaptive approaches. The LEACH, PEGASIS, Directed Diffusion and AODV protocols are also considered, and the features of their application in sensor networks are determined.

During the research, the methods of analysis of scientific and technical sources, comparative analysis, classification, generalization and evaluation of the efficiency of routing methods were used. The evaluation was carried out according to such indicators as energy consumption, data transmission delay, reliability, scalability and resistance to changes in the network topology.

As a result of the research, it was established that the efficiency of a sensor network largely depends on the correct choice of the routing method, the network structure and the rational use of the energy resources of sensor nodes. It was determined that adaptive and energy-saving routing methods are promising for self-organizing networks, as they make it possible to improve system stability, reduce the load on nodes and ensure reliable data transmission.

The results of the bachelor thesis can be used in the design, analysis and improvement of wireless sensor networks in industry, transport, medicine, security

systems, environmental monitoring and automated control systems. Implementation results, patents or publications based on the results of the work are not specified.

Keywords: sensor network, wireless sensor network, self-organization, routing, sensor node, topology, energy consumption, data transmission, LEACH, PEGASIS, Directed Diffusion, AODV, adaptive routing, energy efficiency, reliability, IoT.

ЗМІСТ

ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1	13
ОСОБЛИВОСТІ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ САМООРГАНІЗАЦІЄЮ.....	13
1.1 Поняття та структура сенсорних мереж	13
1.2 Основні характеристики сенсорних вузлів	16
1.3 Принципи самоорганізації сенсорних мереж.....	19
1.4 Топології сенсорних мереж.....	21
1.5 Переваги та недоліки сенсорних мереж	23
1.6 Сфери застосування сенсорних мереж	24
Висновки	27
РОЗДІЛ 2	28
МЕТОДИ МАРШРУТИЗАЦІЇ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ.....	28
2.1 Поняття маршрутизації та передавання даних	28
2.2 Основні вимоги до алгоритмів маршрутизації	30
2.3 Класифікація методів маршрутизації.....	32
2.3.1 Ієрархічна маршрутизація	32
2.3.2 Географічна маршрутизація.....	33
2.3.3 Енергозберігаюча маршрутизація	34
2.3.4 Адаптивна маршрутизація	35
2.4 Протоколи маршрутизації в сенсорних мережах	35
2.4.1 LEACH.....	36
2.4.2 PEGASIS.....	37
2.4.3 Directed Diffusion.....	37
2.4.4 AODV	38
2.5 Проблеми маршрутизації в сенсорних мережах	38
Висновки	41
РОЗДІЛ 3	42
АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ.....	42
3.1 Порівняння сучасних методів маршрутизації.....	42
3.2 Аналіз енергоспоживання сенсорних вузлів	44
3.3 Оцінка продуктивності протоколів маршрутизації	45
3.4 Вплив топології мережі на ефективність маршрутизації	47

3.5 Практичний приклад організації маршрутизації в сенсорній мережі	50
3.6 Напрями вдосконалення методів маршрутизації.....	56
Висновки	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64
ДОДАТКИ.....	68

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AODV	Ad hoc On-Demand Distance Vector – дистанційно-векторний протокол маршрутизації за потребою
WSN	Wireless Sensor Network – бездротова сенсорна мережа
IoT	Internet of Things – Інтернет речей
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy – енергоефективний ієрархічний кластерний протокол маршрутизації
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems – енергоефективний протокол послідовного передавання даних
GPS	Global Positioning System – глобальна система позиціонування
TDMA	Time Division Multiple Access – множинний доступ із часовим розподілом каналів
CDMA	Code Division Multiple Access – множинний доступ із кодовим розподілом каналів
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – множинний доступ із контролем несучої та уникненням колізій
ADV	Advertisement Message – службове повідомлення про оголошення вузла
RREQ	Route Request – запит маршруту
RREP	Route Reply – відповідь маршруту
RSSI	Received Signal Strength Indicator – індикатор рівня прийнятого сигналу
CH	Cluster Head – головний вузол кластера
Sink	Базова станція сенсорної мережі
AI	Artificial Intelligence – штучний інтелект
ML	Machine Learning – машинне навчання

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку інформаційно-комунікаційних технологій значного поширення набувають безпроводові сенсорні мережі, які є важливою складовою концепції Інтернету речей. Такі мережі забезпечують автоматичний збір, обробку та передавання даних про стан об'єктів або навколишнього середовища без необхідності постійного втручання людини. Їх використання є особливо актуальним у випадках, коли прокладання кабельної інфраструктури є технічно складним, економічно не вигідним або неможливим через умови експлуатації.

Актуальність теми дипломної роботи зумовлена тим, що ефективність функціонування сенсорних мереж значною мірою залежить від правильної організації маршрутизації даних. Сенсорні вузли зазвичай мають обмежені енергетичні, обчислювальні та комунікаційні ресурси, тому вибір методу передавання інформації безпосередньо впливає на тривалість автономної роботи мережі, надійність доставки пакетів, затримку передавання даних і стійкість до зміни топології. У самоорганізованих мережах ця проблема є ще більш важливою, оскільки вузли повинні самостійно формувати маршрути, підтримувати зв'язність мережі та адаптуватися до виходу окремих елементів з ладу.

Сучасний стан розвитку сенсорних мереж показує, що існує велика кількість методів маршрутизації, зокрема ієрархічні, географічні, енергозберігаючі та адаптивні підходи. Кожен із них має власні переваги та недоліки, а їх ефективність залежить від структури мережі, кількості вузлів, інтенсивності передавання даних, рівня енергоспоживання та умов функціонування. Тому виникає необхідність аналізу й порівняння сучасних методів маршрутизації з метою визначення найбільш доцільних рішень для сенсорних мереж із самоорганізацією.

Новизна роботи полягає в узагальненні та порівняльному аналізі сучасних методів маршрутизації в сенсорних мережах з урахуванням особливостей

самоорганізації, енергоефективності, масштабованості, надійності та адаптації до зміни топології. У роботі розглядаються особливості функціонування таких протоколів, як LEACH, PEGASIS, Directed Diffusion та AODV, а також визначаються умови, за яких їх застосування може бути найбільш ефективним.

Основними напрямками дослідження є аналіз структури та принципів роботи сенсорних мереж, визначення вимог до алгоритмів маршрутизації, класифікація методів маршрутизації, порівняння їхніх характеристик та оцінювання ефективності за основними показниками. До таких показників належать енергоспоживання, затримка передавання даних, надійність доставки інформації, масштабованість мережі та стійкість до зміни її структури. Такий підхід дозволяє комплексно оцінити можливості різних методів маршрутизації та визначити напрями їх подальшого вдосконалення.

Результати дипломної роботи можуть бути використані під час проєктування, аналізу та модернізації безпроводових сенсорних мереж у різних сферах діяльності. Зокрема, вони можуть застосовуватися у промисловості, транспортних системах, медицині, системах безпеки, сільському господарстві, екологічному моніторингу, автоматизованих системах керування та системах «розумного будинку». Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для підвищення надійності, енергоефективності та стабільності роботи сенсорних мереж із самоорганізацією.

РОЗДІЛ 1

ОСОБЛИВОСТІ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ІЗ САМООРГАНІЗАЦІЄЮ

1.1 Поняття та структура сенсорних мереж

Безпроводові сенсорні мережі займають важливе місце у розвитку сучасних телекомунікаційних технологій та є складовою концепції Інтернету речей. Їх широке використання пояснюється простотою розгортання, невисокою вартістю обладнання та можливістю роботи в умовах, де прокладання кабельних ліній зв'язку є складним або економічно не вигідним [1].

Для сенсорних мереж важливим завданням є забезпечення стабільного та ефективного обміну даними між вузлами мережі. Одним із ключових показників їх функціонування є зв'язність мережі, від якої залежить надійність передавання інформації. На сучасному етапі сенсорні мережі активно застосовуються в різних сферах діяльності, зокрема у промисловості, медицині, транспортних системах, охороні та моніторингу навколишнього середовища [2; 3].

Сенсорна мережа являє собою сукупність великої кількості автономних сенсорних вузлів, які взаємодіють між собою за допомогою безпроводові каналів зв'язку. Основним призначенням таких мереж є збір інформації про фізичні параметри середовища, їх обробка та передавання до центру керування або користувача. Сенсорні вузли можуть вимірювати температуру, вологість, тиск, рівень освітлення, вібрацію, рух та інші параметри навколишнього середовища [3].

Особливістю енсорних мереж є здатність працювати без постійного втручання людини. Сенсорні вузли самостійно формують мережу, підтримують обмін даними та можуть змінювати маршрути передавання інформації залежно від умов функціонування. Самоорганізація дозволяє мережі адаптуватися до виходу з ладу окремих вузлів або змін топології мережі.

Основними елементами сенсорної мережі є сенсорні вузли, шлюзи та

базові станції. Сенсорні вузли здійснюють збір та первинну обробку даних. Шлюзи забезпечують передавання інформації між локальною сенсорною мережею та зовнішніми інформаційними системами. Базова станція виконує функції централізованого зберігання та аналізу отриманих даних (рис.1.1.).

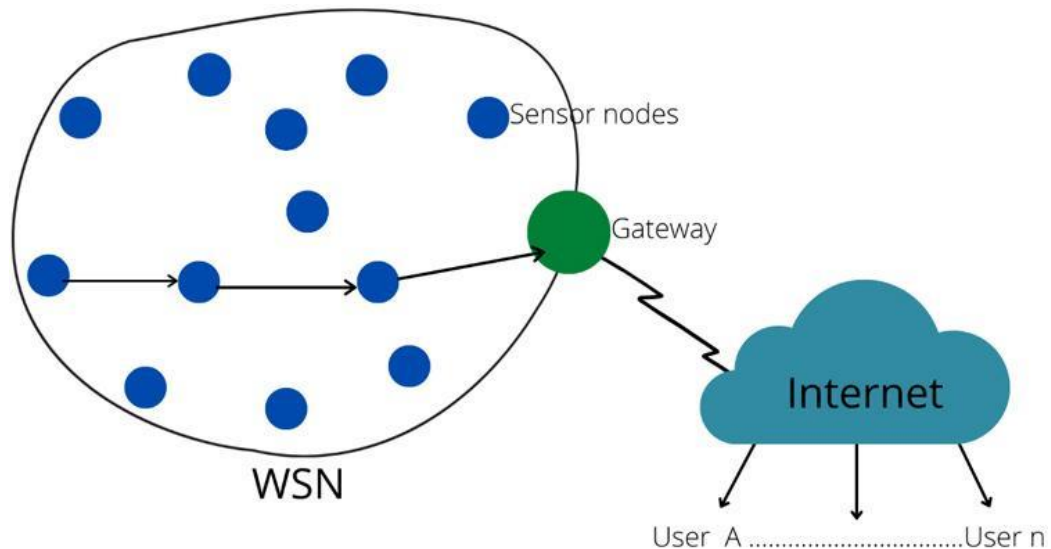


Рис. 1.1 Загальна структура безпроводові сенсорної мережі

Кожен сенсорний вузол має обмежені ресурси, тому під час проєктування мережі важливо враховувати енергоспоживання, обсяг пам'яті та обчислювальні можливості пристроїв. До складу сенсорного вузла зазвичай входять мікроконтролер, сенсорний модуль, джерело живлення, радіомодуль та блок пам'яті. Від ефективності використання цих компонентів залежить стабільність роботи всієї мережі.

Безпроводові сенсорні мережі можуть складатися з десятків, сотень або навіть тисяч вузлів. Велика кількість пристроїв дозволяє охоплювати значні території та забезпечувати детальний моніторинг об'єктів. Разом із цим збільшення кількості вузлів ускладнює процес маршрутизації та управління мережею [4].

Однією з головних переваг сенсорних мереж є можливість самоорганізації. У таких мережах вузли автоматично визначають сусідні пристрої, формують маршрути передавання даних та підтримують

працездатність системи навіть при часткових пошкодженнях мережі. Особливо важливо для використання сенсорних мереж у важкодоступних або небезпечних умовах.

Самоорганізовані сенсорні мережі активно застосовуються у військовій сфері, системах безпеки та моніторингу навколишнього середовища. Вони дозволяють здійснювати спостереження за територіями, виявляти небезпечні ситуації та оперативно передавати інформацію до центрів керування [5]. Такі мережі також використовуються для контролю стану будівель, мостів та промислового обладнання.

У медичній сфері сенсорні мережі використовуються для дистанційного моніторингу стану пацієнтів. Сенсорні пристрої можуть контролювати серцевий ритм, температуру тіла, рівень кисню в крові та інші показники. Отримані дані передаються медичному персоналу в режимі реального часу, що підвищує ефективність діагностики та лікування [6: 7].

Сенсорні мережі також широко застосовуються в транспортних системах. Вони забезпечують контроль дорожнього руху, моніторинг технічного стану транспортних засобів та оптимізацію транспортних потоків. Використання таких технологій сприяє підвищенню безпеки дорожнього руху та зменшенню витрат пального можна побачити на рис.1.2. [8].

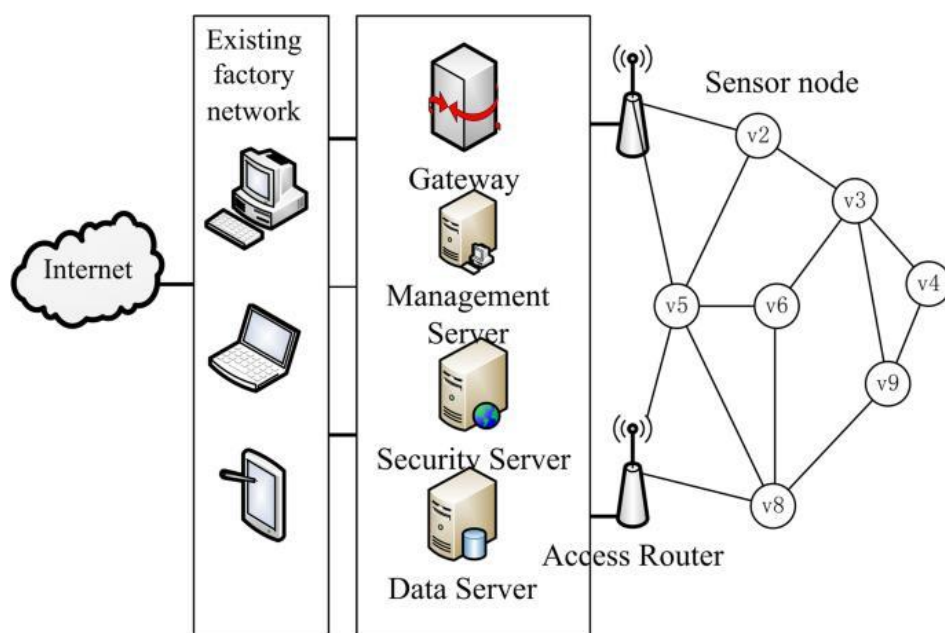


Рис.1.2 Сфери застосування безпроводові сенсорних мереж

Важливою характеристикою сенсорних мереж є масштабованість. Мережа повинна забезпечувати стабільну роботу навіть при значному збільшенні кількості вузлів. Для цього використовуються спеціальні алгоритми маршрутизації та механізми розподілу навантаження між пристроями [9].

Ще однією особливістю сенсорних мереж є енергоефективність. Оскільки більшість сенсорних вузлів працює від автономних джерел живлення, необхідно мінімізувати витрати енергії під час передавання та обробки даних. Саме тому в сучасних сенсорних мережах широко використовуються енергозберігаючі методи маршрутизації [10; 11].

Таким чином, сенсорні мережі є перспективним напрямом розвитку сучасних інформаційних технологій. Їх основними перевагами є автономність, самоорганізація, масштабованість та можливість роботи в різних умовах експлуатації. Завдяки цим особливостям сенсорні мережі активно впроваджуються у різних сферах діяльності та продовжують удосконалюватися.

1.2 Основні характеристики сенсорних вузлів

Сенсорний вузол є основним елементом сенсорної мережі. Його призначення полягає у зборі, обробці та передаванні інформації про стан навколишнього середовища. Вузли можуть працювати автономно та взаємодіяти між собою без використання централізованої системи керування. Ефективність функціонування всієї сенсорної мережі значною мірою залежить від характеристик окремих вузлів.

До складу сенсорного вузла входять сенсорний модуль, мікроконтролер, блок пам'яті, радіомодуль та джерело живлення. Сенсорний модуль забезпечує вимірювання фізичних параметрів середовища, таких як температура, вологість, тиск або освітленість. Мікроконтролер виконує обробку отриманих даних та керує роботою інших компонентів вузла. Радіомодуль відповідає за

бездротове передавання інформації між вузлами мережі (рис. 1.3.) [12].

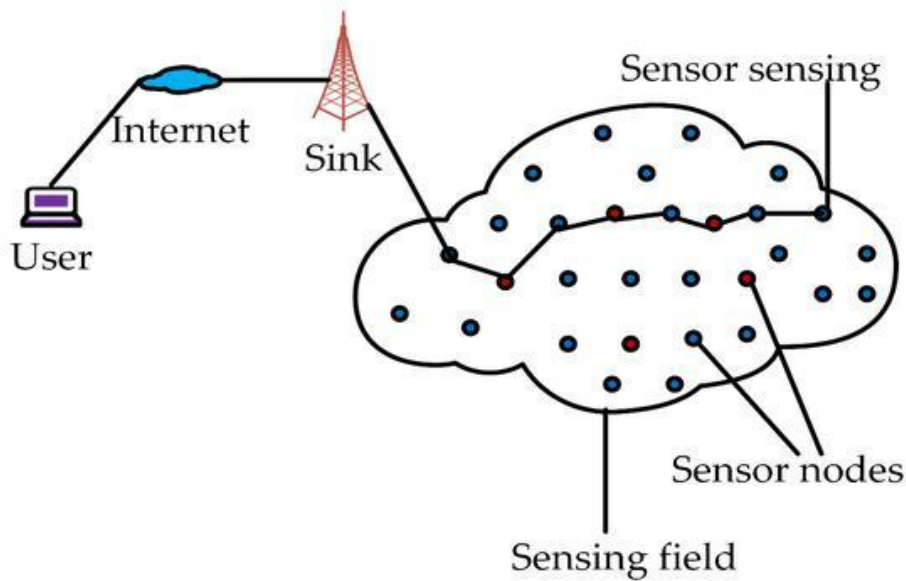


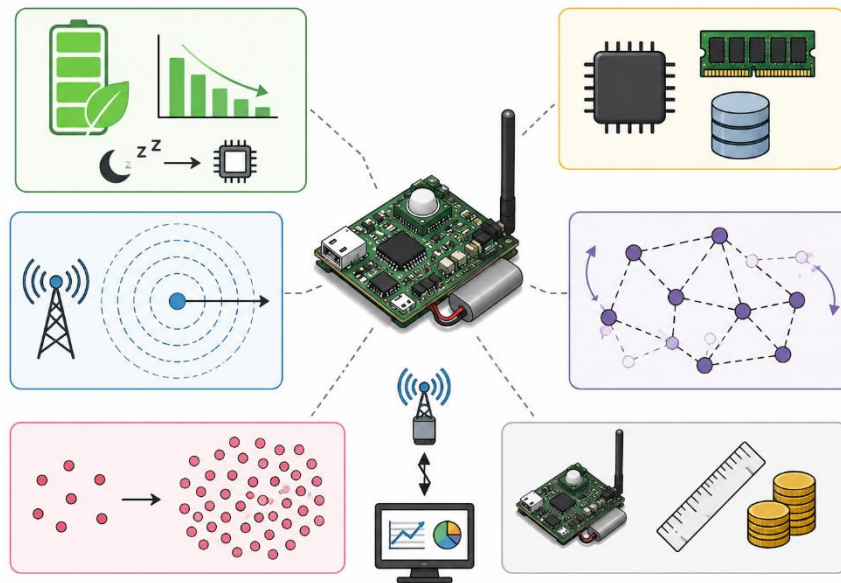
Рис. 1.3 Принцип організації сенсорної мережі

Однією з головних характеристик сенсорних вузлів є енергоспоживання. Більшість таких вузлів працює від автономних джерел живлення. Тому ефективне використання енергії є важливою умовою тривалої роботи мережі. Найбільше енергії витрачається на передавання даних через бездротовий канал зв'язку [12]. Для зменшення енергоспоживання застосовують режими сну, енергозберігаючі алгоритми маршрутизації та оптимізацію обміну даними.

Ще однією важливою характеристикою є обчислювальна потужність сенсорного вузла. Через обмежені апаратні ресурси такі пристрої мають невисоку продуктивність процесора та невеликий обсяг пам'яті. Саме тому програмне забезпечення сенсорних вузлів повинно бути оптимізованим і економним щодо використання ресурсів.

Важливим параметром є дальність передавання сигналу. Вона залежить від потужності радіомодуля, частоти сигналу та умов навколишнього середовища. У більшості сенсорних мереж зв'язок між вузлами підтримується на відстані від кількох метрів до сотень метрів. Для стабільної роботи мережі часто використовують багатострибкове передавання даних.

Сенсорні вузли також мають здатність до самоорганізації. Після розгортання вони автоматично визначають сусідні пристрої та формують структуру мережі. Якщо окремий вузол виходить з ладу, мережа може



самостійно перебудувати маршрути передавання інформації відображено на рис.1.4.)[13].

Рис. 1.4 Основні характеристики сенсорних вузлів

Ще однією важливою характеристикою є масштабованість мережі. Сенсорні вузли повинні забезпечувати стабільну роботу навіть при збільшенні

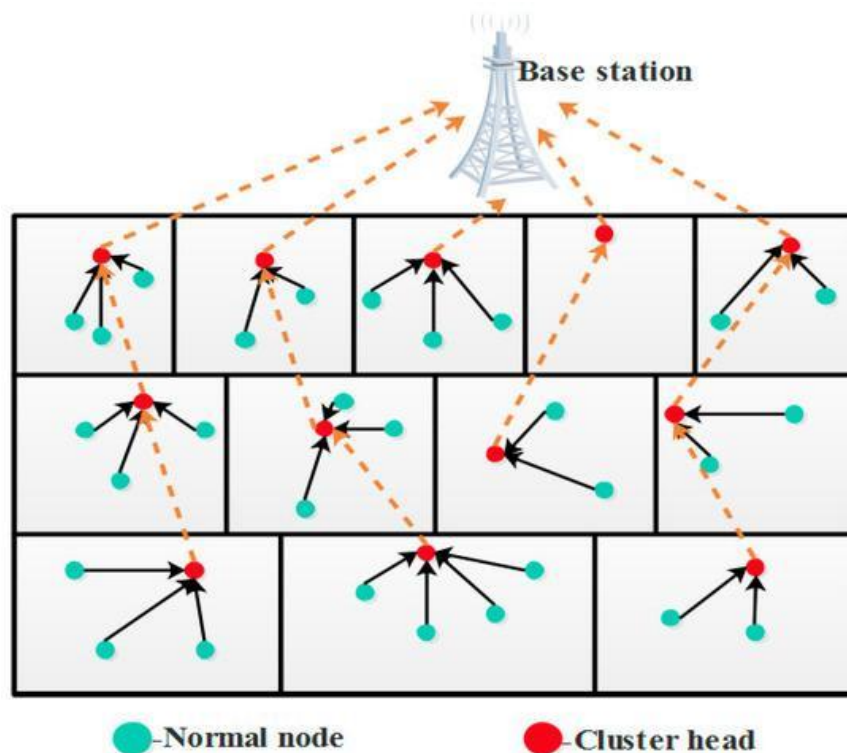
кількості пристроїв. У сучасних бездротових сенсорних мережах може використовуватися від десятків до тисяч вузлів.

1.3 Принципи самоорганізації сенсорних мереж

Однією з основних особливостей безпроводних сенсорних мереж є здатність до самоорганізації. Після розгортання сенсорні вузли автоматично встановлюють зв'язок між собою та формують мережеву структуру без використання централізованого керування. Самоорганізація дозволяє забезпечити стабільну роботу мережі навіть у випадку зміни топології або виходу окремих вузлів з ладу [14].

У сенсорних мережах процес самоорганізації починається з виявлення сусідніх вузлів. Кожен вузол передає службові сигнали, за допомогою яких визначаються доступні канали зв'язку та відстань до інших пристроїв. На основі отриманої інформації формується таблиця сусідів та встановлюються маршрути передавання даних.

Важливою особливістю самоорганізованих мереж є динамічна зміна топології. Під час роботи мережі окремі вузли можуть виходити з ладу через розрядження батареї або вплив зовнішніх факторів. У такому випадку інші вузли автоматично перебудовують маршрути передавання інформації, що дозволяє



підтримувати працездатність мережі без втручання оператора (рис.1.5.) [11].

Рис. 1.5. Самоорганізація безпроводної сенсорної мережі

Для забезпечення самоорганізації використовуються спеціальні алгоритми маршрутизації та обміну даними. Вони дозволяють сенсорним вузлам обирати оптимальні маршрути передавання інформації з урахуванням енергоспоживання, відстані між вузлами та навантаження мережі. Найбільш поширеними є кластерні, географічні та адаптивні методи маршрутизації.

Одним із принципів самоорганізації є децентралізоване керування мережею. Кожен сенсорний вузол самостійно аналізує інформацію про сусідні пристрої та стан каналів зв'язку. На основі отриманих даних вузли формують маршрути передавання інформації та підтримують взаємодію між елементами мережі [11].

У самоорганізованих сенсорних мережах важливе значення має енергоефективність. Оскільки вузли працюють від автономних джерел живлення, алгоритми самоорганізації повинні мінімізувати кількість передавань даних та забезпечувати рівномірний розподіл енергетичних витрат

між пристроями.

Ще одним принципом є масштабованість мережі. Самоорганізовані сенсорні мережі повинні підтримувати стабільну роботу при збільшенні кількості вузлів та зміні площі покриття. Для цього використовуються механізми автоматичного підключення нових вузлів та оновлення маршрутів передавання даних [13].

Отже, самоорганізація є важливою характеристикою безпроводних сенсорних мереж. Вона забезпечує автоматичне формування структури мережі, адаптацію до змін топології та підтримання працездатності системи без централізованого керування. Використання механізмів самоорганізації дозволяє підвищити ефективність, надійність та гнучкість сенсорних мереж.

1.4 Топології сенсорних мереж

У сучасних телекомунікаційних системах широкого поширення набувають сенсорні мережі з різними типами топологічної структури. Топологія мережі визначає спосіб взаємодії сенсорних вузлів, організацію передавання даних та особливості функціонування всієї системи. Використання безпроводних технологій ускладнює структуру мережі через динамічну зміну зв'язків між вузлами та необхідність підтримання стабільної маршрутизації даних.

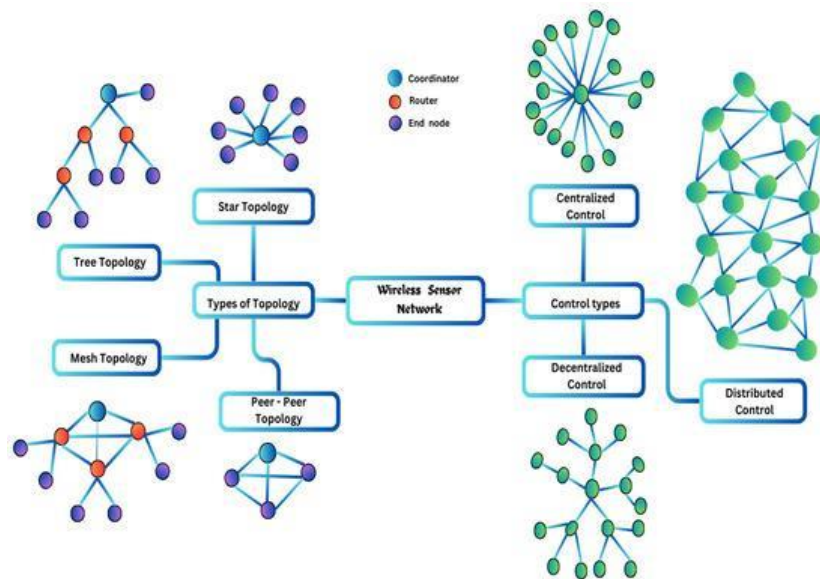
У сенсорних мережах тип топології впливає на енергоспоживання, швидкість передавання інформації, надійність зв'язку та ефективність функціонування мережі. Саме тому під час проєктування сенсорних систем велика увага приділяється вибору оптимальної топологічної структури [15].

Для підвищення ефективності функціонування мережевої структури використовуються системи інтелектуального управління (CIU). Їх застосування дозволяє аналізувати стан вузлів, контролювати процес передавання інформації та формувати оптимальні маршрути обміну даними. У процесі роботи CIU автоматично оцінюють параметри функціонування мережі та забезпечують адаптацію маршрутів відповідно до зміни умов передавання даних [15].

Основними топологіями безпроводних сенсорних мереж є зіркоподібна, деревоподібна, комірчаста та гібридна. Вибір структури залежить від кількості вузлів, умов роботи мережі та способу обміну інформацією. Тип топології впливає на стабільність зв'язку, рівень енергоспоживання та ефективність маршрутизації.

У зіркоподібній структурі всі вузли підключаються до центральної базової станції. Недоліком є залежність функціонування мережі від центрального вузла. Деревоподібна структура має багаторівневу побудову та використовується у великих мережах.

Комірчаста структура забезпечує зв'язок між кількома сусідніми вузлами одночасно. У разі пошкодження окремих елементів передавання даних може здійснюватися іншими маршрутами. У сучасних мережах також



використовуються гібридні структури, які поєднують різні типи топологій [15].

Рис. 1.6. Основні топології сенсорних мереж

Різні типи топологій мають власні особливості побудови та функціонування. Вибір структури мережі залежить від умов використання, кількості вузлів та вимог до передавання даних. Правильно обрана топологія дозволяє підвищити ефективність роботи сенсорної мережі та оптимізувати використання ресурсів.

1.5 Переваги та недоліки сенсорних мереж

Сенсорні мережі характеризуються високою гнучкістю та можливістю швидкого розгортання. Для створення мережі не потрібно використовувати кабельну інфраструктуру, що дозволяє застосовувати сенсорні вузли у важкодоступних районах, промислових об'єктах та мобільних системах. Середня дальність зв'язку між вузлами залежить від типу обладнання та може становити від 10 до 300 м.

Однією з основних переваг сенсорних мереж є самоорганізація. Після активації вузли автоматично формують структуру мережі та підтримують маршрути передавання даних. У сучасних системах кількість сенсорних вузлів може перевищувати декілька тисяч пристроїв, що забезпечує контроль великих територій та підвищує точність моніторингу [16].

Сенсорні вузли мають компактні розміри та невелику вартість. Більшість сучасних пристроїв оснащуються мікроконтролерами з тактовою частотою 8–120 МГц та обсягом оперативної пам'яті від кількох кілобайт до кількох мегабайт. Для передавання даних найчастіше використовуються стандарти ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth Low Energy та LoRaWAN [16].

Важливою перевагою є низьке енергоспоживання. У режимі сну сенсорні вузли можуть споживати менше 1 мВт енергії. Тривалість автономної роботи залежить від типу батареї, режиму передавання даних та інтенсивності

навантаження і може становити від кількох місяців до кількох років [18].

Основним недоліком сенсорних мереж є обмежений запас енергії. Передавання даних через безпроводний канал потребує значних енергетичних витрат, тому інтенсивний обмін інформацією скорочує термін роботи вузлів. Також на якість зв'язку впливають перешкоди сигналу, погодні умови та фізичні перешкоди між пристроями (рис.1.7.) [17].



Рис. 1.7 Переваги та недоліки сенсорних мереж

Ще однією проблемою є обмежені обчислювальні ресурси вузлів. Через невисоку продуктивність процесорів та невеликий обсяг пам'яті ускладнюється використання складних алгоритмів обробки даних та захисту інформації. Крім цього, у бездротових мережах існує ризик несанкціонованого доступу до каналів зв'язку та втрати даних.

1.6 Сфери застосування сенсорних мереж

Безпроводові сенсорні мережі використовуються у багатьох галузях завдяки можливості автоматичного збору, обробки та передавання інформації. Одним із найбільш поширених напрямів є промисловість, де сенсорні вузли застосовуються для контролю температури, тиску, рівня вібрації та стану

виробничого обладнання. Використання таких систем дозволяє зменшити кількість аварійних ситуацій, оптимізувати витрати ресурсів та підвищити ефективність виробничих процесів [17].

У транспортних системах сенсорні мережі застосовуються для аналізу інтенсивності дорожнього руху, контролю швидкості транспортних засобів та виявлення перевантажених ділянок доріг. Отримані дані використовуються для регулювання транспортних потоків і підвищення рівня безпеки дорожнього руху. Також сенсорні вузли можуть встановлюватися у транспортних засобах для контролю технічного стану окремих систем [18].

У медичній сфері безпроводовні технології використовуються для дистанційного моніторингу стану пацієнтів. Сенсорні пристрої забезпечують вимірювання серцевого ритму, температури тіла, артеріального тиску та рівня кисню в крові. Передавання даних у режимі реального часу дозволяє оперативно контролювати стан людини та своєчасно реагувати на зміни показників організму [18].

Системи безпеки також активно використовують сенсорні мережі для контролю доступу, виявлення руху та моніторингу стану об'єктів. Такі технології застосовуються на промислових підприємствах, у житлових комплексах, складських приміщеннях та стратегічних об'єктах. Використання сенсорних пристроїв дозволяє швидко виявляти небезпечні ситуації та передавати сигнали тривоги.

У сільському господарстві сенсорні вузли використовуються для контролю вологості ґрунту, температури повітря, рівня освітлення та стану рослин. Автоматизований збір інформації дозволяє оптимізувати процеси зрошення, зменшити витрати водних ресурсів та підвищити врожайність сільськогосподарських культур.

Для екологічного моніторингу сенсорні мережі використовуються для контролю якості повітря, рівня забруднення води та радіаційного фону. Такі системи можуть працювати у важкодоступних районах та забезпечувати постійний збір інформації. Сенсорні вузли дозволяють оперативно отримувати

дані про стан навколишнього середовища.

Основні сфери застосування безпроводних сенсорних мереж наведено на рисунку 1.8.

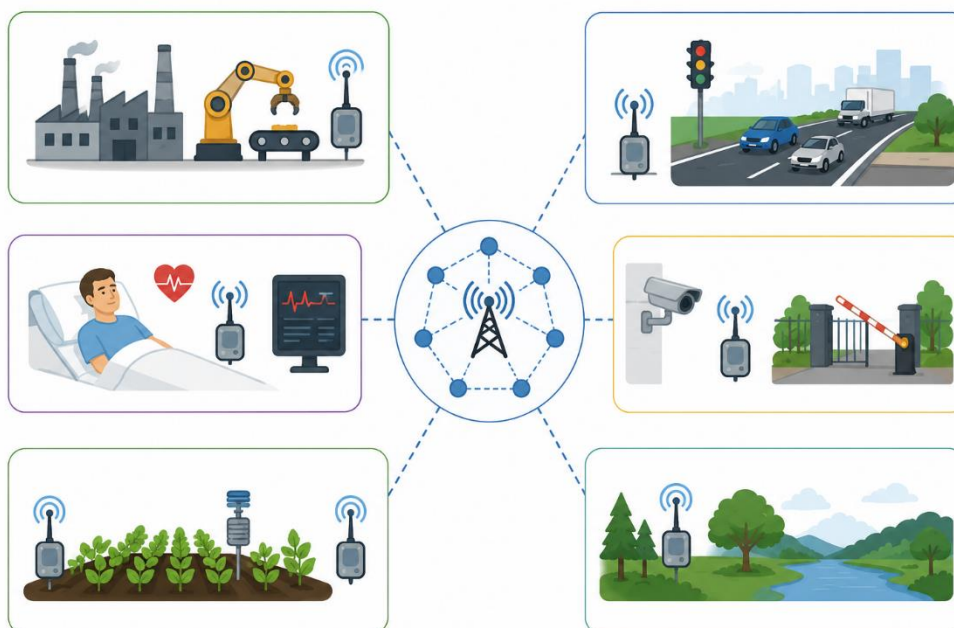


Рис. 1.8 Сфери застосування сенсорних мереж

Сенсорні мережі мають широкі можливості практичного використання. Їх застосування дозволяє автоматизувати процеси контролю, підвищити ефективність моніторингу та забезпечити оперативне отримання інформації в різних сферах діяльності людини.

У сучасних системах «розумного будинку» сенсорні мережі використовуються для автоматичного керування освітленням, вентиляцією, опаленням та системами енергозбереження. Сенсорні пристрої дозволяють контролювати параметри мікроклімату приміщення та регулювати роботу обладнання відповідно до поточних умов. Завдяки цьому зменшуються витрати електроенергії та підвищується комфорт користувачів.

У військовій сфері сенсорні мережі застосовуються для спостереження за територією, виявлення рухомих об'єктів та контролю стану техніки. Такі системи можуть функціонувати у складних умовах без постійного втручання

оператора. Використання бездротових технологій дозволяє оперативно передавати інформацію до центрів керування та підвищувати ефективність моніторингу.

Сенсорні технології також використовуються у системах контролю інженерних споруд. За допомогою спеціальних датчиків здійснюється спостереження за станом мостів, будівель, трубопроводів та енергетичних об'єктів. Постійний контроль параметрів конструкцій дозволяє своєчасно виявляти пошкодження та запобігати аварійним ситуаціям.

У сучасних логістичних системах сенсорні мережі забезпечують моніторинг місцезнаходження вантажів, температурних умов зберігання та стану транспортних контейнерів. Передавання інформації в режимі реального часу дозволяє контролювати процес транспортування продукції та підвищувати ефективність управління логістичними процесами.

Висновки

У першому розділі розглянуто основні особливості безпроводових сенсорних мереж та принципи їх функціонування. Визначено структуру сенсорних вузлів, їх основні характеристики та особливості самоорганізації мережі. Проаналізовано основні типи топологій, переваги та недоліки сенсорних мереж.

Також розглянуто основні сфери використання сенсорних систем у промисловості, транспорті, медицині, системах безпеки, сільському господарстві та екологічному моніторингу. Проведений аналіз показав, що сенсорні мережі є важливим напрямом розвитку сучасних інформаційно-комунікаційних технологій.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ МАРШРУТИЗАЦІЇ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Поняття маршрутизації та передавання даних

Маршрутизація – це процес вибору шляху передавання інформації між вузлами мережі. Її головне призначення полягає у забезпеченні швидкого обміну даними з мінімальними затримками та раціональним використанням ресурсів системи. У бездротових сенсорних мережах маршрутизація визначає напрям руху пакетів від джерела до вузла-приймача [19].

У мережевих структурах застосовують централізоване та розподілене керування маршрутами. При централізованому способі всі рішення щодо передавання даних приймає окремий керуючий вузол. У розподілених системах сенсорні вузли самостійно аналізують стан мережі та визначають подальший маршрут передавання інформації.

Для організації обміну даними використовуються таблиці маршрутів. У них зберігається інформація про доступні шляхи передавання пакетів. Вміст таблиць може змінюватися залежно від навантаження каналів зв'язку та стану вузлів мережі [19].

Одним із методів є лавинна маршрутизація, при якій пакет даних поширюється одразу кількома напрямками. Інший спосіб базується на використанні таблиць маршрутів, де для кожного вузла визначається найбільш доцільний шлях передавання інформації. У сучасних сенсорних системах також використовуються адаптивні алгоритми, які можуть змінювати маршрути відповідно до стану мережі [20; 21].

Під час вибору маршруту враховуються спеціальні параметри – метрики маршрутизації. До основних метрик належать довжина маршруту, затримка передавання даних, рівень навантаження каналів зв'язку, енергоспоживання

вузлів та надійність передавання інформації (рис. 2.1.).

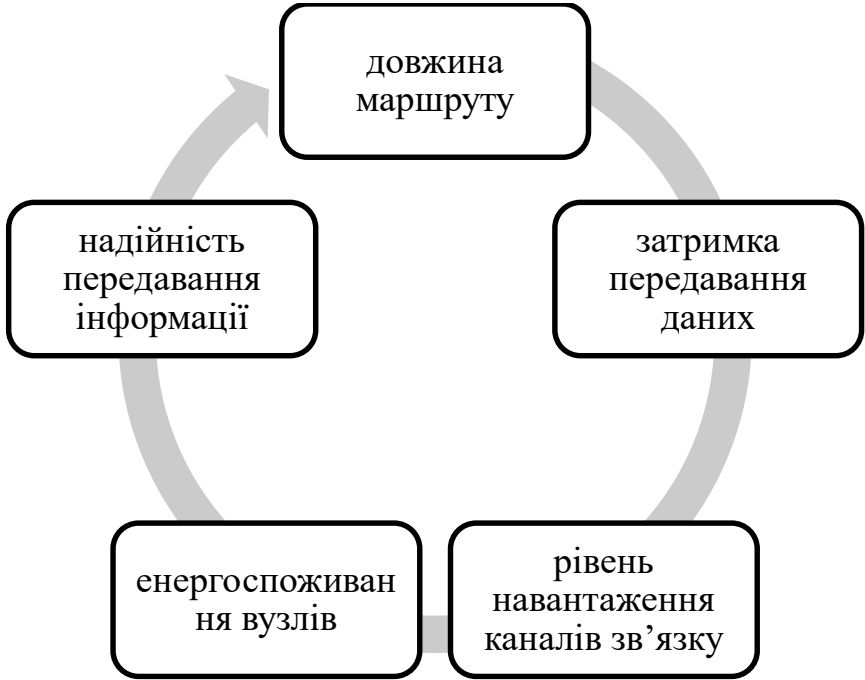


Рис. 2.1. Метрики маршрутизації в сенсорній мережі

Процес передавання даних у сенсорній мережі включає вибір маршруту, передавання пакетів між вузлами та доставку інформації до базової станції або вузла-приймача. Схему процесу маршрутизації наведено на рисунку 2.2.

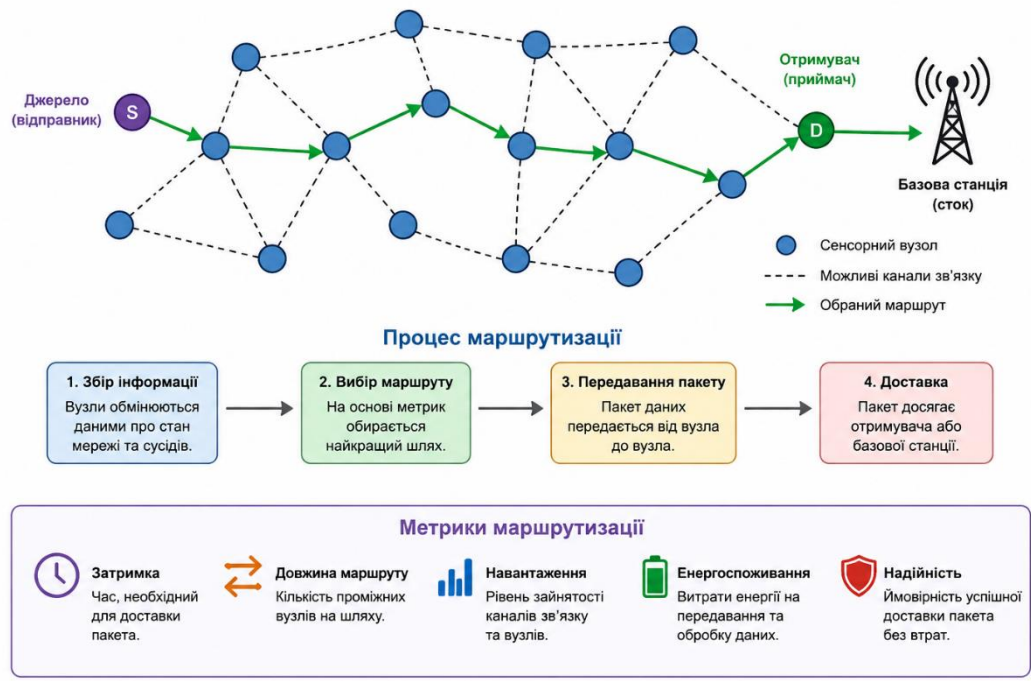


Рис. 2.2 Процес маршрутизації та передавання даних у сенсорній мережі

На основі отриманої інформації алгоритми маршрутизації визначають найбільш ефективний шлях обміну даними між вузлами мережі.

Можна зазначити, що маршрутизація є одним із ключових процесів функціонування бездротових сенсорних мереж. Від правильного вибору маршрутів залежить швидкість передавання даних, рівень енергоспоживання вузлів та стабільність роботи мережі.

2.2 Основні вимоги до алгоритмів маршрутизації

Під час створення алгоритмів маршрутизації необхідно враховувати умови функціонування мережі та характеристики сенсорних вузлів. Робота маршрутів повинна забезпечувати стабільний обмін інформацією між елементами системи без перевантаження каналів зв'язку. Від правильного вибору алгоритму залежить швидкість доставки пакетів, рівень втрат даних та загальна продуктивність мережі. У процесі функціонування мережі маршрути можуть змінюватися залежно від навантаження або зміни структури системи [19].

Однією з головних вимог є зниження енергетичних витрат під час передавання інформації. Найбільше навантаження на джерела живлення виникає під час роботи радіомодуля та обміну пакетами між вузлами. Через це алгоритми повинні зменшувати кількість зайвих передач і рівномірно розподіляти навантаження між пристроями. Рациональне використання енергії дозволяє збільшити час роботи мережі без заміни джерел живлення.

Підтримання працездатності мережі також належить до основних вимог маршрутизації. Під час роботи окремі вузли можуть припиняти функціонування через пошкодження або розрядження батареї. У таких ситуаціях система повинна автоматично знаходити нові маршрути для передавання пакетів. Наявність резервних шляхів зменшує ризик втрати інформації та підтримує безперервний обмін даними [15; 18].

Окрему увагу приділяють швидкості передавання інформації. Для систем

спостереження та керування затримка отримання даних повинна бути мінімальною. Надто довгий час доставки пакетів може впливати на точність контролю та своєчасність реагування системи. Через це маршрути формуються з урахуванням довжини шляху та навантаження каналів зв'язку.

Під час роботи мережі враховуються також обмеження апаратних ресурсів вузлів. Сенсорні пристрої мають невеликий обсяг пам'яті та невисоку продуктивність процесорів. Використання складних методів обробки інформації може спричиняти додаткові витрати енергії та знижувати ефективність роботи системи. Саме тому в сенсорних мережах часто застосовуються спрощені алгоритми маршрутизації.

Значну роль відіграє здатність мережі працювати при великій кількості вузлів. У сучасних системах число пристроїв може постійно змінюватися залежно від умов використання. Алгоритми повинні підтримувати стабільне передавання інформації незалежно від щільності розміщення вузлів та розміру мережі (рис. 2.3).

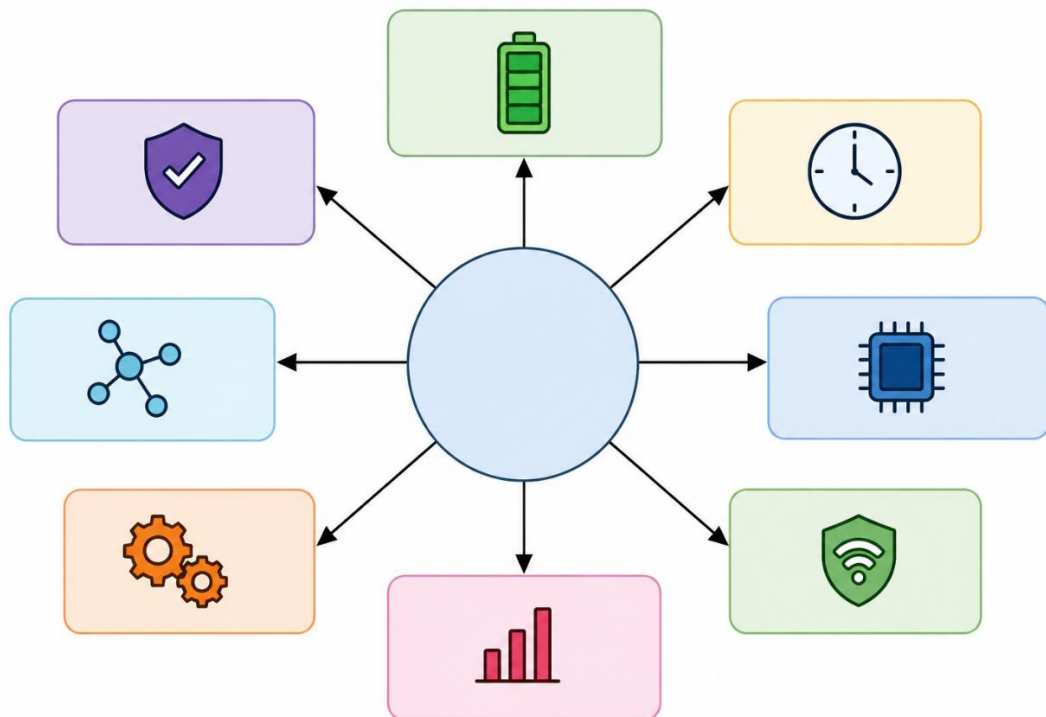


Рис. 2.3 Основні вимоги до алгоритмів маршрутизації

Отже, алгоритми маршрутизації повинні забезпечувати ефективний обмін

даними, раціональне використання ресурсів та стабільну роботу мережі при зміні умов функціонування.

2.3 Класифікація методів маршрутизації

У сенсорних мережах використовуються різні методи маршрутизації, які відрізняються способом організації передавання даних, структурою мережі та принципом вибору маршруту. Вибір певного методу залежить від кількості вузлів, умов функціонування мережі, рівня енергоспоживання та вимог до швидкості обміну інформацією. Сучасні алгоритми маршрутизації спрямовані на підвищення ефективності роботи мережі, зменшення навантаження на вузли та забезпечення стабільного передавання пакетів даних.

Методи маршрутизації в сенсорних мережах поділяються на ієрархічні, географічні, енергозберігаючі та адаптивні. Кожен із цих підходів має власні особливості побудови маршрутів та використовується залежно від структури мережі й умов передавання інформації. Основні типи методів маршрутизації наведено на рисунку 2.4.



Рис. 2.4 Класифікація методів маршрутизації в сенсорних мережах

2.3.1 Ієрархічна маршрутизація

Ієрархічна маршрутизація базується на поділі мережі на окремі групи або кластери. У межах кожного кластера обирається головний вузол, який виконує збір інформації від інших пристроїв та передає дані до базової станції. Такий спосіб дозволяє зменшити навантаження на мережу та скоротити кількість передач між вузлами.

Під час роботи кластерної структури звичайні сенсорні вузли передають інформацію лише до головного вузла свого кластера. Після цього виконується обробка або об'єднання даних, а далі інформація надсилається до центрального вузла мережі. Подібний принцип дозволяє зменшити енергоспоживання та підвищити ефективність роботи мережі [24].

Однією з особливостей ієрархічної маршрутизації є періодична зміна головних вузлів. Це дозволяє рівномірно розподіляти енергетичне навантаження між пристроями та запобігати швидкому розрядженню окремих вузлів. Найбільш відомими протоколами ієрархічної маршрутизації є LEACH та PEGASIS [22].

Ієрархічні методи найчастіше використовуються у великих мережах із великою кількістю сенсорних вузлів. Вони забезпечують зниження навантаження на канали зв'язку та дозволяють збільшити тривалість функціонування мережі.

2.3.2 Географічна маршрутизація

Географічна маршрутизація ґрунтується на використанні координат розташування вузлів мережі. Передавання пакетів здійснюється через пристрої, які знаходяться ближче до вузла-приймача. Напрямок руху інформації визначається відповідно до розташування сусідніх вузлів та відстані між ними.

Побудова маршрутів виконується без використання великих таблиць маршрутизації. Кожен вузол самостійно обирає наступний пристрій для передавання даних на основі координат сусідніх елементів мережі. Такий принцип дозволяє зменшити кількість службових повідомлень та скоротити навантаження на систему.

Однією з переваг географічної маршрутизації є висока швидкість визначення маршруту. Використання координат дозволяє оперативно знаходити напрям передавання пакетів навіть у великих мережах. Такі методи ефективно працюють при значній кількості вузлів та зміні структури мережі.

Для визначення координат можуть використовуватися GPS-модулі, сенсорні системи позиціонування або спеціальні алгоритми локалізації. Використання додаткових засобів визначення місцезнаходження збільшує складність системи та підвищує енергоспоживання окремих вузлів. Основні особливості географічної маршрутизації наведено на рисунку 2.5.

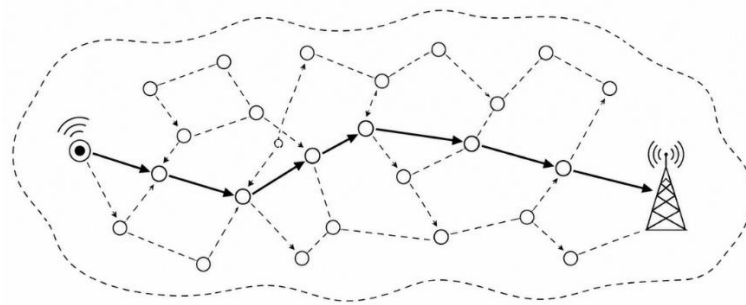


Рис. 2.5 Географічна маршрутизація в сенсорній мережі

2.3.3 Енергозберігаюча маршрутизація

Енергозберігаюча маршрутизація спрямована на зменшення енергоспоживання сенсорних вузлів під час передавання інформації. Основним завданням таких алгоритмів є продовження часу роботи мережі та рівномірний розподіл навантаження між пристроями.

Під час вибору маршруту враховується рівень заряду батареї вузлів, відстань між пристроями та кількість переданих пакетів даних. Алгоритми намагаються уникати надмірного використання окремих вузлів, щоб запобігти їх швидкому розрядженню.

Для економії енергії можуть використовуватися режими сну, агрегування даних та багатострибкове передавання інформації. Частина вузлів у певний момент часу може переходити в режим низького енергоспоживання, а передавання даних виконується лише активними пристроями.

Енергозберігаючі методи широко використовуються у сенсорних мережах, які працюють у важкодоступних місцях або не мають можливості регулярної заміни джерел живлення.

2.3.4 Адаптивна маршрутизація

Адаптивна маршрутизація передбачає автоматичну зміну маршрутів залежно від стану мережі. Під час функціонування системи алгоритми аналізують навантаження каналів зв'язку, рівень енергоспоживання вузлів та наявність доступних маршрутів.

У разі зміни структури мережі або виходу окремих вузлів з ладу алгоритми автоматично перебудовують шляхи передавання інформації. Це дозволяє підтримувати стабільний обмін даними та зменшувати ризик втрати пакетів.

Адаптивні методи забезпечують високу гнучкість роботи мережі та дозволяють швидко реагувати на зміну умов функціонування. Такі алгоритми ефективно працюють у мережах із динамічною структурою та змінним навантаженням [24].

Недоліком адаптивної маршрутизації є складність реалізації та збільшення кількості службових повідомлень між вузлами. Через постійний аналіз стану мережі можуть зростати енергетичні витрати та навантаження на сенсорні пристрої.

2.4 Протоколи маршрутизації в сенсорних мережах

Для організації передавання інформації у сенсорних мережах використовуються спеціальні протоколи маршрутизації. Вони визначають порядок обміну даними між вузлами, формування маршрутів та способи підтримання стабільного зв'язку в мережі. Вибір протоколу залежить від структури мережі, кількості сенсорних вузлів, вимог до енергоспоживання та умов функціонування системи.

2.4.1 LEACH

Протокол LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) належить до ієрархічних методів маршрутизації та використовується для зменшення енергоспоживання сенсорної мережі. Принцип його роботи базується на формуванні кластерів, у межах яких один із вузлів виконує роль головного вузла – cluster head. Звичайні сенсорні вузли передають зібрану інформацію своєму cluster head'у, після чого виконується обробка даних та їх подальше надсилання до базової станції [25].

Робота протоколу складається з двох основних етапів: формування кластерів та передавання інформації. На першому етапі сенсорні вузли самостійно організовуються у групи та обирають cluster head. Вибір головного вузла відбувається з певною ймовірністю, що дозволяє рівномірно розподіляти енергетичне навантаження між пристроями мережі. Через певний проміжок часу виконується повторний вибір cluster head і перебудова кластерної структури.

Після вибору головного вузла він передає службове повідомлення іншим вузлам мережі. Сенсорні пристрої аналізують рівень сигналу та приєднуються до найбільш енергоефективного кластера. Далі cluster head формує розклад передавання даних для кожного вузла. Для уникнення конфліктів під час обміну інформацією використовується TDMA-розклад, який визначає окремий часовий інтервал для роботи кожного пристрою.

На етапі передавання інформації вузли надсилають дані до cluster head у призначений час. Після отримання інформації головний вузол виконує її обробку, об'єднання та передавання до базової станції. Для зменшення кількості перешкод між кластерами застосовуються CDMA-коди. Перед надсиланням даних cluster head перевіряє стан каналу зв'язку та виконує передачу лише за відсутності зайнятості каналу [25].

Однією з головних переваг LEACH є рівномірний розподіл енергетичних витрат між вузлами мережі. Додатково використання обробки даних на рівні

cluster head дозволяє зменшити кількість пакетів, що передаються мережею. Протокол також забезпечує збільшення часу функціонування мережі порівняно з методами прямого передавання інформації та статичними кластерними структурами.

2.4.2 PEGASIS

Протокол PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) є вдосконаленою версією LEACH та належить до енергозберігаючих методів маршрутизації. На відміну від кластерної структури, у цьому протоколі сенсорні вузли об'єднуються у послідовний ланцюг. Передавання інформації виконується від одного вузла до іншого, після чого один із пристроїв надсилає зібрані дані до базової станції [25].

Під час роботи мережі роль вузла, який передає інформацію до базової станції, періодично змінюється. Такий принцип дозволяє рівномірно розподіляти енергетичне навантаження між пристроями та зменшувати витрати енергії. За показниками енергоефективності протокол PEGASIS перевищує LEACH, оскільки кількість передач на великі відстані є меншою [25].

Недоліком цього методу є збільшення затримки передавання даних, особливо для вузлів, які знаходяться на кінцях ланцюга. Через послідовне передавання інформації час доставки пакетів до базової станції може суттєво зростати.

2.4.3 Directed Diffusion

Directed Diffusion належить до протоколів маршрутизації, орієнтованих на передавання даних за запитом. Робота протоколу базується на поширенні спеціальних повідомлень interest, які містять інформацію про необхідний тип даних. Базова станція розсилає такі повідомлення мережею, після чого сенсорні вузли починають передавання відповідної інформації.

Під час роботи протоколу вузли формують маршрути на основі градієнтів передавання даних. Інформація надходить лише тими шляхами, які

забезпечують найбільш ефективний обмін пакетами. Такий принцип дозволяє зменшити кількість зайвих передач і скоротити енергетичні витрати мережі.

Однією з особливостей Directed Diffusion є можливість агрегування даних під час передавання інформації. Сенсорні вузли можуть об'єднувати отримані пакети та передавати лише необхідні результати обробки. Це дозволяє зменшити навантаження на канали зв'язку та підвищити ефективність роботи мережі [25].

Перевагою протоколу є економне використання енергетичних ресурсів і підтримання гнучкої маршрутизації. Недоліком вважається складність використання у великих мережах із високою динамікою зміни структури.

2.4.4 AODV

AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector) належить до адаптивних протоколів маршрутизації та працює за принципом побудови маршрутів за потребою. На відміну від табличних методів, маршрути створюються лише в момент необхідності передавання даних між вузлами мережі.

Під час пошуку маршруту вузол надсилає спеціальний запит RREQ. Якщо інший вузол знає шлях до вузла-приймача, він формує відповідь RREP і передає її назад джерелу. Після цього між вузлами створюється маршрут для передавання пакетів даних [25].

Протокол підтримує автоматичне оновлення маршрутів при зміні структури мережі або втраті з'єднання між вузлами. Завдяки цьому AODV може ефективно працювати у мережах із динамічною топологією та змінним навантаженням.

Перевагою AODV є зменшення кількості службової інформації в мережі, оскільки маршрути створюються лише за потребою. До недоліків належать затримки під час пошуку нового маршруту та збільшення навантаження при частій зміні структури мережі.

2.5 Проблеми маршрутизації в сенсорних мережах

Під час організації маршрутизації в сенсорних мережах виникає низка проблем, які впливають на стабільність передавання даних та ефективність роботи системи. Однією з головних причин є обмежені енергетичні ресурси сенсорних вузлів. Постійне передавання інформації та обмін службовими повідомленнями призводять до швидкого розрядження джерел живлення та скорочення часу функціонування мережі.

Складність маршрутизації також пов'язана зі зміною структури мережі під час роботи. Окремі вузли можуть виходити з ладу через пошкодження, перешкоди сигналу або вичерпання заряду батареї. У таких умовах алгоритми повинні швидко перебудовувати маршрути та підтримувати стабільне передавання інформації між пристроями.

Ще однією проблемою є перевантаження окремих вузлів мережі. Частина пристроїв може використовуватися для передавання великої кількості пакетів даних, що спричиняє підвищене енергоспоживання та збільшує ризик виходу вузлів із мережі. Через нерівномірний розподіл навантаження зменшується загальна ефективність функціонування системи.

Під час передавання інформації можуть виникати затримки та втрати пакетів даних. Причиною цього є перевантаження каналів зв'язку, обмежена пропускна здатність мережі або значна відстань між вузлами. У системах моніторингу та керування надмірна затримка може негативно впливати на швидкість обробки інформації.

Проблемою також є забезпечення безпеки передавання даних. Через використання бездротових каналів зв'язку існує ризик перехоплення інформації, несанкціонованого доступу до мережі або навмисного порушення роботи системи. Для захисту інформації використовуються спеціальні методи шифрування та механізми контролю доступу.

У великих мережах ускладнюється процес керування маршрутами та підтримання стабільного зв'язку між вузлами. Зі збільшенням кількості пристроїв зростає обсяг службової інформації та навантаження на систему. Через це алгоритми маршрутизації повинні забезпечувати ефективну роботу

мережі навіть при значній кількості сенсорних вузлів (на рис. 2.6).

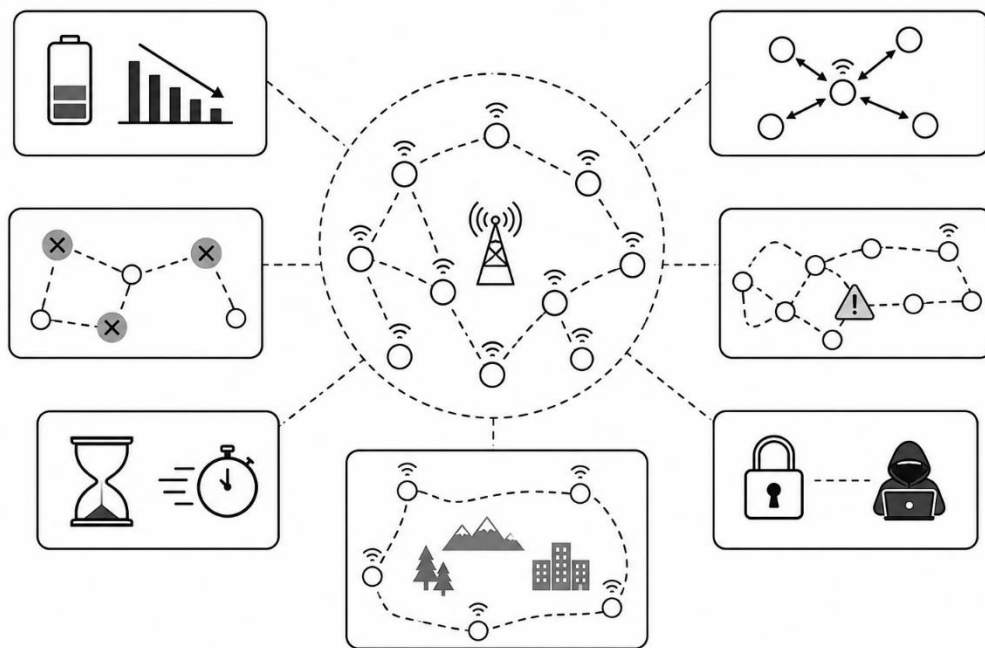


Рис. 2.6 Основні проблеми маршрутизації в сенсорних мережах

Маршрутизація в сенсорних мережах потребує врахування великої кількості факторів, пов'язаних із передаванням даних, енергоспоживанням та зміною структури мережі. Саме тому сучасні методи маршрутизації постійно вдосконалюються для підвищення ефективності роботи сенсорних систем.

Додатковою проблемою є нестабільність безпроводного сигналу під впливом зовнішніх факторів. На якість передавання інформації можуть впливати електромагнітні перешкоди, фізичні перепони між вузлами та погодні умови. Через це у мережі можуть виникати помилки передавання пакетів і повторні спроби надсилання інформації, що збільшує навантаження на систему.

Складність функціонування сенсорних мереж зростає і при високій щільності розміщення вузлів. При одночасному передаванні великої кількості пакетів підвищується ймовірність конфліктів у каналах зв'язку та збільшується кількість службових повідомлень. У результаті цього можуть виникати затримки під час доставки інформації та зниження продуктивності мережі.

Окрему увагу приділяють проблемі балансування навантаження між вузлами мережі. Частина пристроїв бере участь у маршрутизації значно частіше за інші, через що швидше втрачає енергетичні ресурси. Поступове відключення таких вузлів може призводити до утворення нестабільних ділянок мережі та ускладнювати процес передавання даних.

Під час функціонування сенсорних систем також виникають труднощі з підтриманням якості обслуговування мережі. Для різних типів інформації можуть висуватися різні вимоги щодо швидкості доставки пакетів, допустимого рівня втрат даних та стабільності зв'язку. Через це алгоритми маршрутизації повинні враховувати пріоритетність інформації та поточний стан каналів передавання даних.

Додатковою складністю є необхідність постійного оновлення маршрутів у динамічних мережах. При зміні розташування вузлів або навантаження на окремі ділянки системи виникає потреба у швидкому перебудуванні структури маршрутів. Це збільшує обсяг службового трафіку та може спричиняти додаткові витрати енергії під час роботи мережі.

Висновки

У другому розділі розглянуто основні методи маршрутизації та особливості передавання даних у сенсорних мережах. Проаналізовано принципи роботи алгоритмів маршрутизації, основні вимоги до їх функціонування та класифікацію сучасних методів маршрутизації.

Окрему увагу приділено протоколам LEACH, PEGASIS, Directed Diffusion та AODV, які широко використовуються у сенсорних мережах. Визначено їх особливості, переваги та недоліки. Також розглянуто основні проблеми маршрутизації, пов'язані з енергоспоживанням, затримками передавання даних, перевантаженням вузлів та зміною структури мережі.

Проведений аналіз показав, що ефективність функціонування сенсорної мережі значною мірою залежить від вибору алгоритму маршрутизації та способу організації передавання інформації між вузлами мережі.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

3.1 Порівняння сучасних методів маршрутизації

У сучасних сенсорних мережах використовується велика кількість методів маршрутизації, які відрізняються принципом передавання даних, рівнем енергоспоживання та способом організації структури мережі. Вибір певного алгоритму залежить від умов функціонування системи, кількості вузлів, вимог до швидкості передавання інформації та стабільності зв'язку. Кожен метод має власні переваги та обмеження, що впливають на ефективність роботи мережі.

Одним із найбільш відомих протоколів є LEACH, який базується на кластерній організації мережі. Передавання інформації здійснюється через головні вузли кластерів, які виконують збір та обробку даних. Використання періодичної зміни cluster head дозволяє рівномірно розподіляти енергетичне навантаження між пристроями мережі. Протокол забезпечує зменшення енергоспоживання та збільшення тривалості роботи сенсорної системи [26; 27; 28].

Протокол PEGASIS використовує інший принцип організації передавання інформації. Сенсорні вузли формують ланцюг, через який виконується послідовне передавання пакетів даних. Такий спосіб дозволяє скоротити кількість передач на великі відстані та зменшити витрати енергії. Водночас послідовна структура збільшує затримку передавання інформації для вузлів, розташованих наприкінці ланцюга.

Directed Diffusion належить до методів маршрутизації, орієнтованих на передачу даних за запитом. Передавання інформації виконується лише після отримання спеціального повідомлення interest від базової станції. Перевагою такого підходу є скорочення кількості зайвих передач та зменшення

навантаження на мережу. Додатково протокол підтримує агрегування даних під час обміну інформацією між вузлами.

Протокол AODV працює за принципом побудови маршрутів лише у випадку необхідності передавання даних. У процесі роботи маршрути створюються динамічно відповідно до поточного стану мережі. Такий метод дозволяє скоротити обсяг службової інформації та підтримувати роботу мережі при зміні структури з'єднань між вузлами. Недоліком AODV є збільшення затримки під час пошуку нового маршруту.

Порівняння сучасних методів маршрутизації показує, що кожен протокол орієнтований на виконання певних завдань. Ієрархічні методи забезпечують зменшення енергоспоживання, географічні алгоритми спрощують побудову маршрутів, а адаптивні протоколи дозволяють підтримувати стабільну роботу при зміні структури мережі.

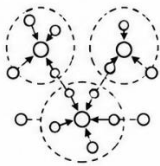
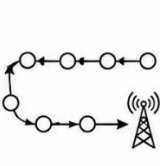
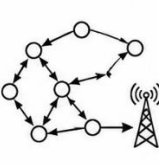
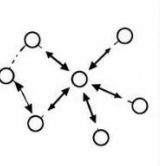
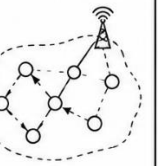
					
	● ● ● ●	● ● ●	● ●	● ●	● ● ●
	○ ○	○	○ ○	○ ○ ○	○ ○
	● ● ●	● ●	● ● ●	● ●	● ● ● ●
	● ● ●	○ ○	● ● ● ●	● ● ●	● ● ●
	○ ○	○ ○ ○	○ ○	○ ○ ○	○ ○
	● ● ●	● ●	● ● ●	● ●	● ● ●

Рис. 3.1 Порівняння сучасних методів маршрутизації

Отже, ефективність використання протоколів маршрутизації залежить від умов функціонування мережі, вимог до швидкості передавання даних та рівня енергоспоживання сенсорних вузлів.

3.2 Аналіз енергоспоживання сенсорних вузлів

Енергоспоживання є одним із головних факторів, що впливають на тривалість функціонування сенсорної мережі. Більшість сенсорних вузлів працює від автономних джерел живлення, тому надмірні витрати енергії можуть призводити до швидкого виходу окремих пристроїв із мережі. Найбільше енергії витрачається під час передавання та приймання даних через радіоканал.

Рівень енергоспоживання залежить від способу організації маршрутизації, кількості переданих пакетів та відстані між вузлами мережі. Передавання інформації на великі відстані потребує значно більших енергетичних витрат, ніж обмін даними між сусідніми пристроями. Через це у сенсорних мережах часто використовується багатострибкове передавання інформації, при якому дані проходять через декілька проміжних вузлів.

Підвищене навантаження на окремі вузли може спричиняти нерівномірне використання енергетичних ресурсів. Вузли, які постійно беруть участь у маршрутизації, швидше втрачають заряд батареї та можуть припинити роботу раніше за інші пристрої. У результаті цього змінюється структура мережі та виникає потреба у перебудові маршрутів передавання даних.

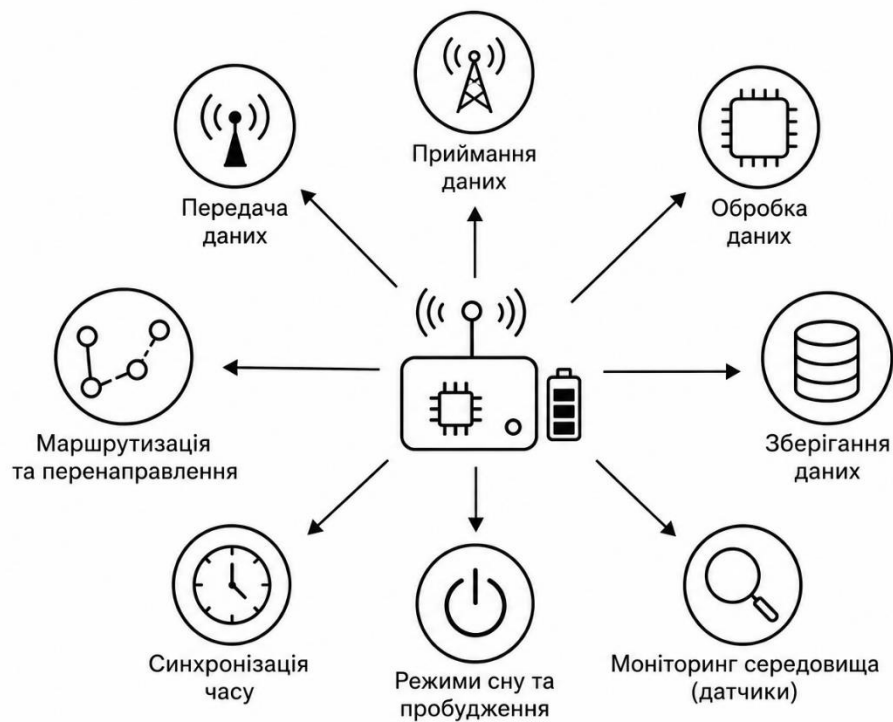
Для зменшення енергетичних витрат у сенсорних мережах застосовуються спеціальні методи енергозбереження. Одним із таких способів є використання режимів сну, при яких частина вузлів тимчасово переходить у стан низького енергоспоживання. Активними залишаються лише ті пристрої, які беруть участь у передаванні інформації.

Зменшити енергоспоживання також дозволяє агрегування даних. У цьому випадку вузли об'єднують отриману інформацію та передають до базової станції вже оброблені результати. Такий підхід скорочує кількість пакетів у мережі та знижує навантаження на канали зв'язку.

Рівень витрат енергії залежить і від типу протоколу маршрутизації. Ієрархічні методи дозволяють зменшити навантаження на більшість вузлів за рахунок використання cluster head. Адаптивні алгоритми забезпечують перебудову маршрутів залежно від залишкового заряду батареї окремих пристроїв. Географічні методи скорочують довжину маршрутів та кількість службових повідомлень у мережі.

Основні джерела енергоспоживання сенсорних вузлів наведено на рис. 3.2.

Ри
с.
3.2
Ос
но
вні
дж
ере
ла
ен
ерг



оспоживання сенсорних вузлів

Отже, рівень енергоспоживання значною мірою визначає ефективність функціонування сенсорної мережі та тривалість її роботи. Саме тому сучасні методи маршрутизації орієнтовані на зменшення енергетичних витрат і рівномірний розподіл навантаження між вузлами.

3.3 Оцінка продуктивності протоколів маршрутизації

Продуктивність протоколів маршрутизації визначає ефективність передавання даних у сенсорній мережі та впливає на стабільність

функціонування всієї системи. Під час оцінювання враховуються швидкість доставки пакетів, рівень втрат інформації, енергоспоживання вузлів, навантаження каналів зв'язку та час формування маршрутів. Аналіз цих параметрів дозволяє визначити ефективність використання конкретного протоколу в різних умовах роботи мережі.

Одним із головних показників є затримка передавання даних. Вона характеризує час, необхідний для доставки інформації від джерела до вузла-приймача або базової станції. Найменші затримки зазвичай забезпечують географічні методи маршрутизації, оскільки вони використовують коротші маршрути передавання інформації. У протоколах із багатоступеневою структурою затримка може збільшуватися через проходження пакетів через проміжні вузли.

Важливим параметром є коефіцієнт доставки пакетів. Він показує частку інформації, яка успішно надходить до вузла-приймача без втрат. Зменшення цього показника може бути пов'язане з перевантаженням каналів зв'язку, помилками передавання або нестабільною роботою окремих вузлів мережі.

Під час оцінювання продуктивності також аналізується рівень енергоспоживання. Частина протоколів орієнтована на мінімізацію енергетичних витрат шляхом скорочення кількості передавань та використання режимів сну. Інші методи забезпечують швидше передавання інформації, однак потребують більших витрат енергії. Через це вибір протоколу залежить від вимог конкретної системи.

Ще одним показником є навантаження мережі службовими повідомленнями. Під час побудови маршрутів вузли обмінюються службовою інформацією, необхідною для підтримання структури мережі. Надмірна кількість таких повідомлень може збільшувати навантаження на канали зв'язку та прискорювати розрядження джерел живлення вузлів.

Продуктивність маршрутів також залежить від топології мережі та щільності розміщення сенсорних вузлів. При збільшенні кількості пристроїв зростає складність організації обміну інформацією та навантаження на окремі

ділянки мережі. У таких умовах адаптивні алгоритми забезпечують кращу стабільність роботи та швидше реагують на зміну структури мережі.

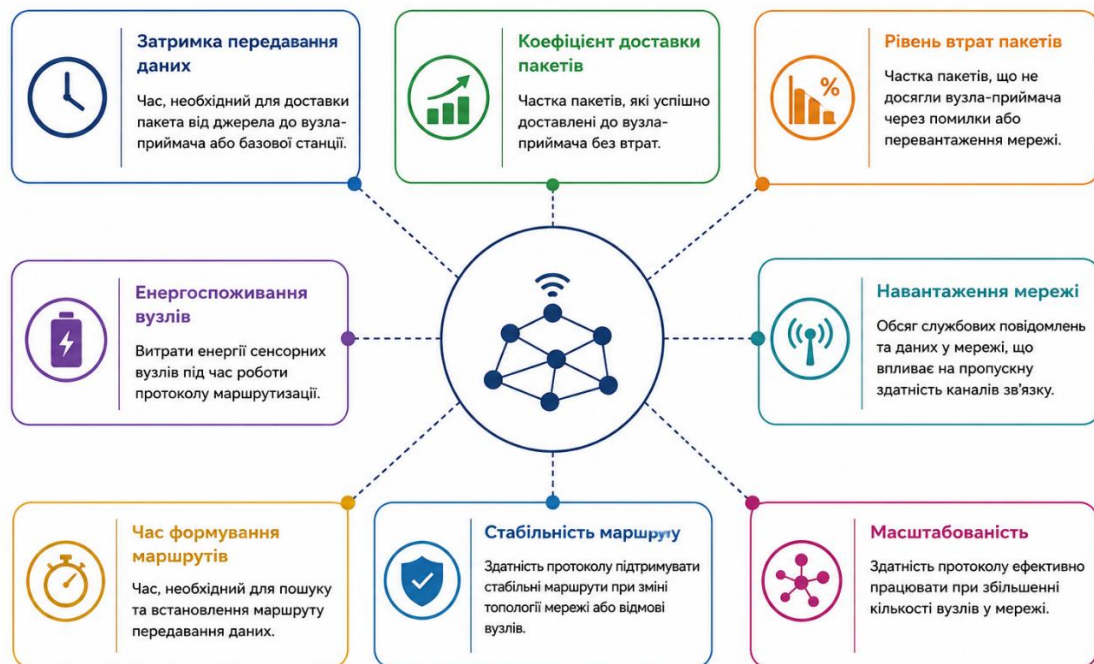


Рис. 3.3 Показники оцінювання продуктивності протоколів маршрутизації

Отже, оцінювання продуктивності дозволяє визначити ефективність використання протоколів маршрутизації в різних умовах функціонування сенсорної мережі та обрати найбільш доцільний спосіб організації передавання даних.

3.4 Вплив топології мережі на ефективність маршрутизації

Від способу організації зв'язків між пристроями залежить довжина маршрутів, навантаження на окремі вузли та стабільність функціонування мережі. При неправильному виборі топології можуть виникати перевантаження каналів зв'язку, збільшення затримки передавання даних і швидке розрядження вузлів.

У зіркоподібній топології всі сенсорні вузли передають інформацію безпосередньо до центрального координатора або базової станції. Така структура забезпечує просту організацію обміну даними та невеликі затримки передавання інформації. Водночас центральний вузол отримує найбільше

навантаження, що призводить до підвищеного енергоспоживання та збільшує ризик порушення роботи всієї мережі у випадку його пошкодження.

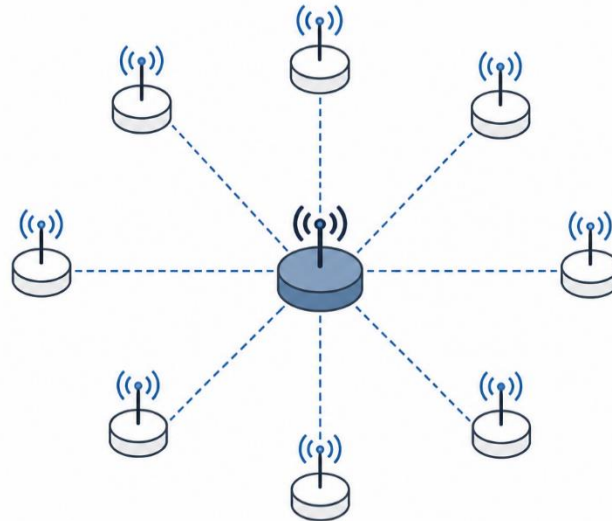


Рис. 3.4 Зіркоподібна топологія сенсорної мережі

Деревоподібна топологія дозволяє організувати ієрархічне передавання інформації між вузлами мережі. Дані проходять через проміжні вузли до базової станції, що дозволяє зменшити навантаження на окремі пристрої та збільшити площу покриття мережі. Однак пошкодження вузлів верхніх рівнів може призводити до втрати зв'язку з окремими ділянками системи.

У комірчастій топології кожен вузол може підтримувати зв'язок одразу з кількома сусідніми пристроями. Така структура забезпечує високу надійність маршрутизації та дозволяє використовувати альтернативні шляхи передавання даних. У разі виходу окремого вузла з ладу мережа автоматично перебудовує маршрути обміну інформацією. Разом із цим збільшується кількість службових повідомлень і навантаження на систему.

Під час аналізу ефективності маршрутизації встановлено, що комірчаста топологія забезпечує найвищу надійність передавання даних, однак потребує більших енергетичних витрат. Зіркоподібна структура характеризується мінімальними затримками, але має нижчу відмовостійкість. Деревоподібна

топология забезпечує компроміс між енергоспоживанням, швидкістю передавання інформації та складністю організації маршрутів.

На ефективність маршрутизації також впливає щільність розміщення сенсорних вузлів. При недостатній кількості пристроїв збільшується довжина маршрутів і навантаження на окремі вузли. Надмірна щільність мережі може призводити до перевантаження каналів зв'язку та зростання кількості службових пакетів.

Під час функціонування сенсорної мережі значний вплив на ефективність маршрутизації має кількість доступних маршрутів між вузлами. При наявності альтернативних шляхів передавання інформації підвищується стійкість мережі до пошкодження окремих ділянок. У випадку розриву одного зі з'єднань система може автоматично перенаправляти пакети іншими маршрутами без припинення обміну даними.

Для мереж із великою площею покриття особливе значення має рівномірне розташування сенсорних вузлів. Нерівномірна структура може призводити до утворення перевантажених зон, у яких окремі пристрої виконують надмірну кількість передач. Через це збільшується навантаження на вузли та скорочується тривалість їх автономної роботи.

Під час побудови топології також враховується характер передавання інформації між вузлами мережі. Для систем із постійним потоком даних доцільно використовувати структури з мінімальною кількістю проміжних переходів. У мережах із динамічним навантаженням більш ефективними є топології, здатні швидко перебудовувати маршрути залежно від поточного стану системи.

Організація топологічної структури безпосередньо впливає на складність керування мережею та обсяг службового трафіку. Зі збільшенням кількості зв'язків між вузлами зростає навантаження на систему маршрутизації та ускладнюється процес контролю маршрутів. Через це під час проєктування сенсорних мереж необхідно забезпечувати баланс між надійністю передавання інформації та витратами ресурсів мережі.

Порівняння впливу різних типів топологій на ефективність маршрутизації наведено на рисунку 3.5.

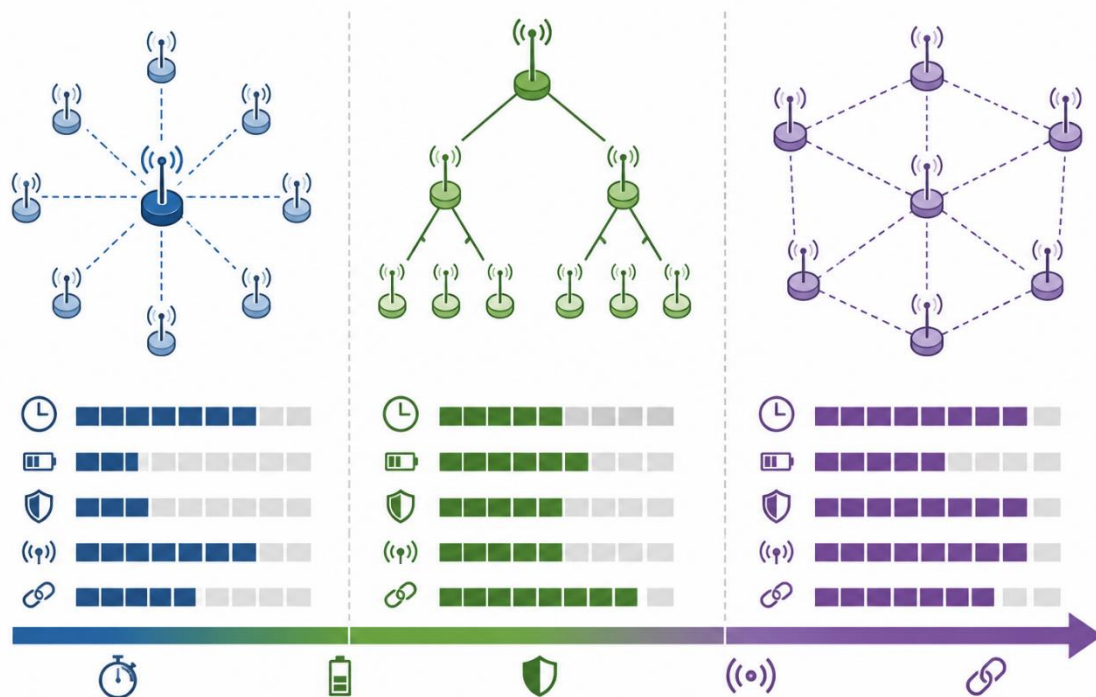


Рис. 3.5 Вплив топології мережі на ефективність маршрутизації

У результаті проведеного аналізу встановлено, що тип топології впливає на швидкість передавання даних та навантаження на вузли мережі. Від структури з'єднань залежить стабільність маршрутів і рівень енергетичних витрат під час роботи системи. Для різних умов функціонування сенсорних мереж використовуються різні типи топологій.

3.5 Практичний приклад організації маршрутизації в сенсорній мережі

Для аналізу роботи алгоритмів маршрутизації було розглянуто приклад сенсорної мережі, призначеної для моніторингу температури та вологості у виробничому приміщенні. Сенсорні вузли встановлюються у різних частинах об'єкта та виконують постійний збір інформації про стан навколишнього середовища. Передавання даних здійснюється до базової станції, де

виконується подальша обробка отриманої інформації.

У запропонованій мережі використовується 20 сенсорних вузлів, які об'єднані у чотири окремі кластери. У кожному кластері один із вузлів виконує функцію cluster head. Головний вузол приймає інформацію від інших пристроїв, виконує її об'єднання та передає результати до базової станції. Для організації маршрутизації використовується протокол LEACH.

Сенсорні вузли розміщуються на відстані 8–12 м один від одного. Базова станція знаходиться у центральній частині приміщення. Передавання даних між звичайними вузлами та cluster head виконується на невеликій відстані, що дозволяє зменшити витрати енергії під час роботи мережі.

Схему організації сенсорної мережі наведено на рисунку 3.6.

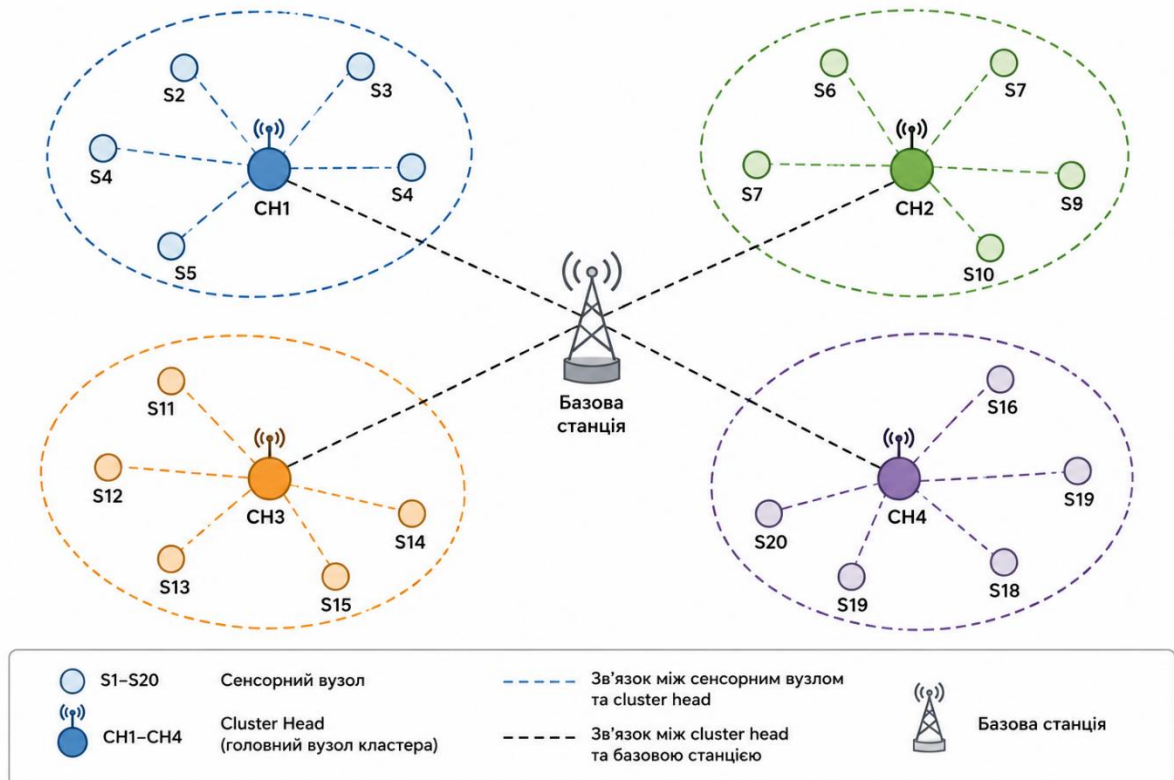


Рис. 3.6 Структура сенсорної мережі з кластерною маршрутизацією

Після формування кластерів кожен cluster head створює графік передавання даних для вузлів свого сектора. Для цього використовується TDMA-метод доступу до каналу зв'язку. Кожен сенсорний вузол передає інформацію лише у визначений часовий інтервал, що дозволяє уникнути

конфліктів під час обміну пакетами.

У процесі функціонування мережі кожен вузол виконує вимірювання температури та вологості через однакові проміжки часу. Отримані значення передаються до cluster head, де виконується агрегування інформації. Після обробки дані надходять до базової станції для подальшого аналізу.

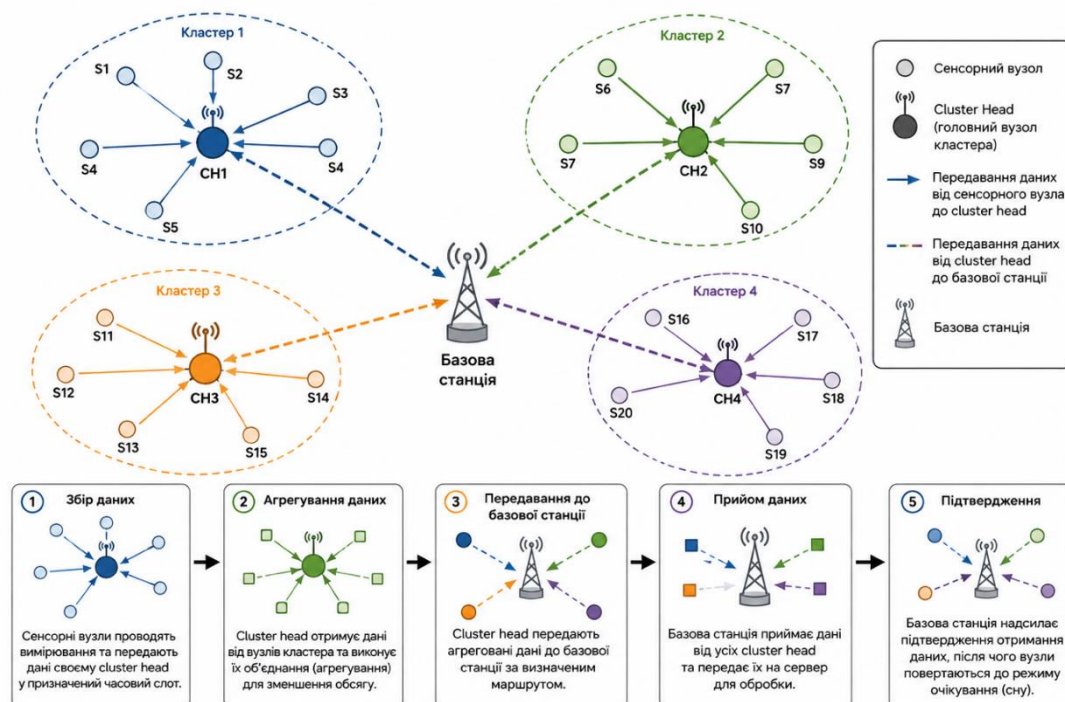
Для зменшення енергоспоживання частина вузлів після передавання інформації переходить у режим сну. У активному стані залишаються лише cluster head та вузли, які у цей момент передають дані. Можна зазначити, що це дозволяє збільшити тривалість роботи мережі без заміни джерел живлення.

Під час моделювання було встановлено, що використання кластерної структури дозволяє зменшити енергетичні витрати приблизно на 35 % у порівнянні з прямим передаванням інформації до базової станції. Середній час доставки пакетів становить 0,12–0,18 с, а коефіцієнт доставки пакетів перевищує 95 %.

При перевантаженні або виході окремого вузла з ладу маршрути автоматично перебудовуються через інші доступні пристрої кластера. Завдяки цьому мережа продовжує функціонувати без повного припинення передавання інформації. Додатково зменшується ризик втрати пакетів та перевантаження окремих ділянок мережі.

П

ро
цес
пер
еда
ван
ня
дан
их
у
сен



сорній мережі наведено на рисунку 3.7.

Рис. 3.7 Передавання даних між вузлами сенсорної мережі

Додатково під час моделювання було проаналізовано вплив кількості вузлів на стабільність маршрутизації. При збільшенні числа сенсорних пристроїв зростає навантаження на cluster head та кількість пакетів, що одночасно передаються мережею. Для уникнення перевантаження виконується періодична зміна головних вузлів кластерів, що дозволяє рівномірно розподіляти витрати енергії між усіма пристроями системи.

У процесі роботи мережі кожен сенсорний вузол передає пакет даних розміром 200–400 байт. Частота передавання інформації становить один пакет кожні 5–10 секунд залежно від інтенсивності зміни контрольованих параметрів. Передавання виконується багатострибковим способом через cluster head, що дозволяє скоротити витрати енергії на далекі передачі.

Під час проведення аналізу також було враховано вплив відстані між вузлами на якість зв'язку. При збільшенні відстані понад 15–20 м спостерігається зростання кількості втрат пакетів та підвищення часу доставки інформації. Найбільш стабільна робота мережі забезпечується при рівномірному розміщенні сенсорних вузлів у межах робочої зони.

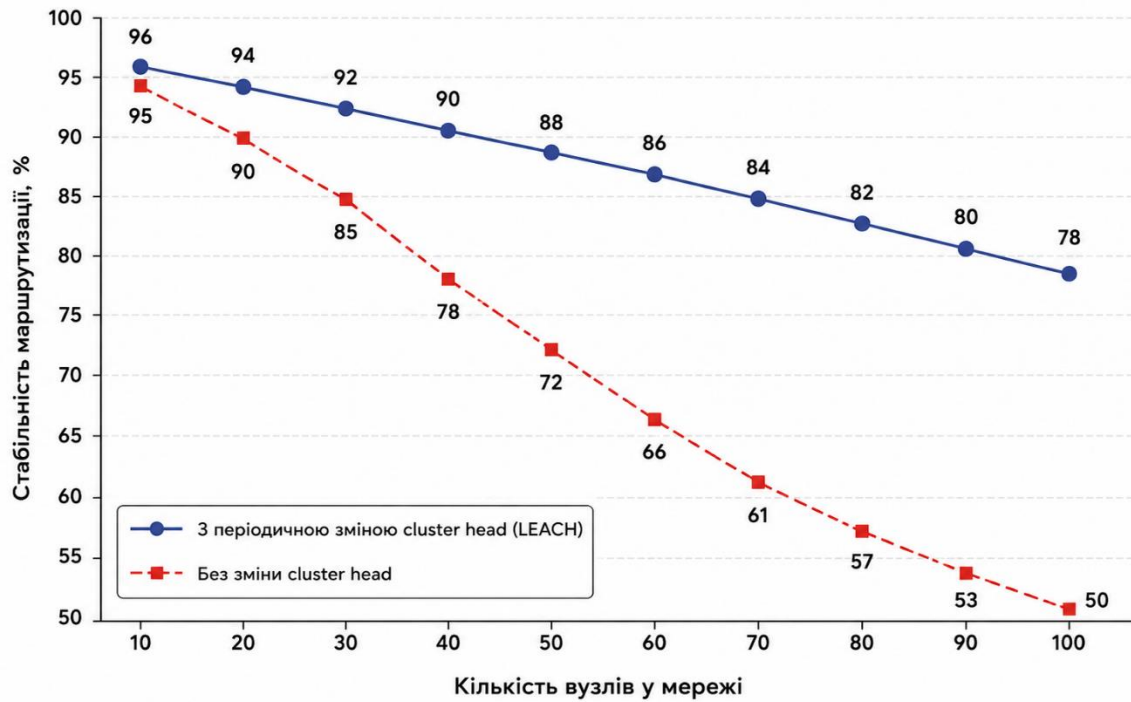


Рис. 3.8 Аналіз стабільності маршрутизації та якості передавання даних у сенсорній мережі

Для оцінювання ефективності маршрутизації виконувалося порівняння роботи мережі при використанні прямого передавання інформації та кластерного способу обміну даними. У випадку прямого передавання окремі вузли швидше втрачали заряд батареї через постійний зв'язок із базовою станцією. При використанні LEACH навантаження розподілялося між cluster head, що дозволило збільшити середній час роботи мережі.

Під час роботи системи cluster head виконує не лише передавання інформації, а й попередню обробку даних. Отримані результати вимірювань групуються, після чого до базової станції передається вже узагальнена інформація. Це дозволяє скоротити кількість пакетів у мережі та зменшити навантаження на канали зв'язку.

У процесі дослідження також було встановлено, що найбільші енергетичні витрати виникають під час передачі даних на великі відстані. Саме тому використання кластерної структури є більш ефективним для сенсорних мереж із великою кількістю вузлів та значною площею покриття.

При аварійному відключенні одного з cluster head сусідні вузли

автоматично підключаються до іншого доступного кластера. Завдяки цьому мережа зберігає працездатність навіть при частковому пошкодженні окремих ділянок системи. Такий механізм підвищує надійність маршрутизації та зменшує ризик повної втрати зв'язку між вузлами.

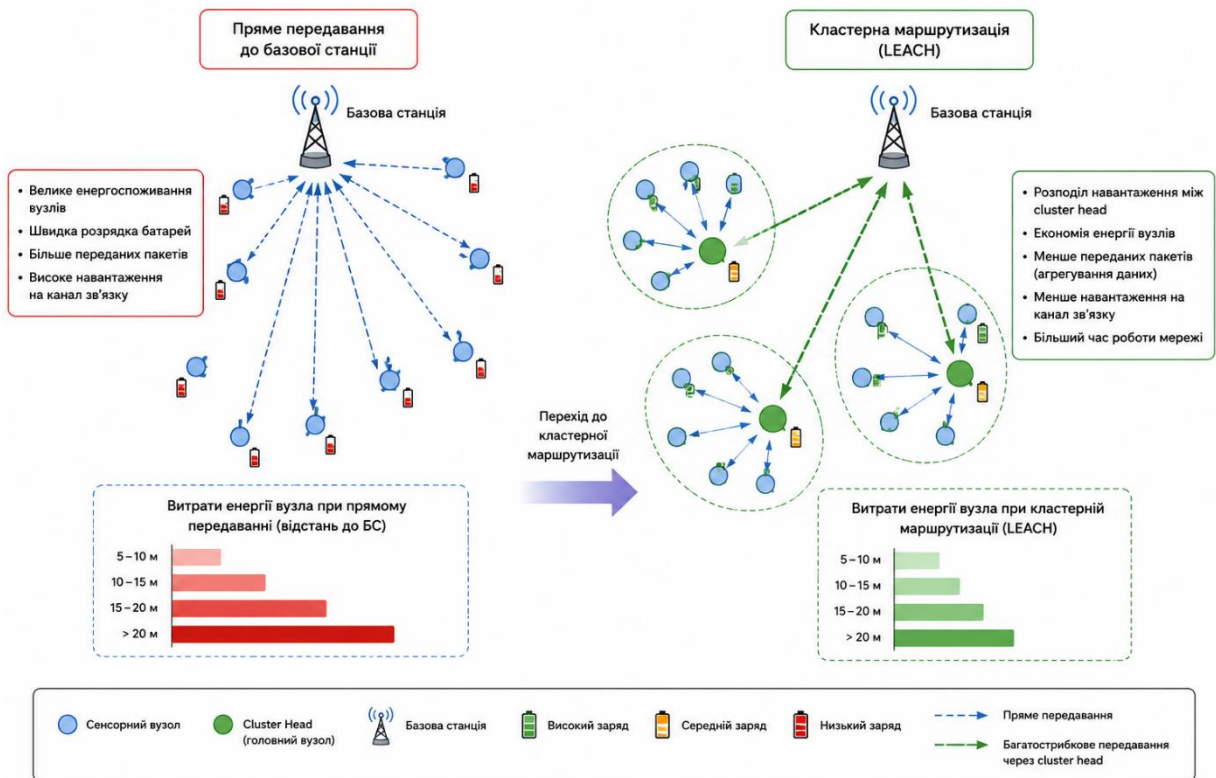


Рис. 3.9 Порівняння прямого та кластерного способів передавання даних у сенсорній мережі

Отримані результати підтверджують ефективність використання кластерної маршрутизації у сенсорних мережах із великою кількістю вузлів. Застосування протоколу LEACH дозволяє скоротити енергетичні витрати, зменшити кількість службових повідомлень та підвищити стабільність передавання даних у мережі.

Під час функціонування мережі було встановлено, що найбільше навантаження припадає на вузли, які розташовані поблизу базової станції. Через постійне передавання інформації такі пристрої швидше витрачають енергетичні ресурси. Для зменшення навантаження виконується періодичний перерозподіл маршрутів між сусідніми вузлами, що дозволяє підтримувати

стабільну роботу мережі протягом тривалого часу.

У процесі моделювання також оцінювалася ефективність роботи мережі при збільшенні інтенсивності обміну даними. При підвищенні частоти передавання пакетів спостерігалось зростання навантаження на канали зв'язку та збільшення часу доставки інформації. Використання кластерної маршрутизації дозволило частково зменшити перевантаження за рахунок локальної обробки даних у межах кластерів.

Окремо було враховано вплив перешкод сигналу на стабільність передавання інформації між вузлами. При появі перешкод окремі пакети могли втрачатися або надходити із затримкою. Для підтримання працездатності системи використовувалися резервні маршрути передавання даних через сусідні вузли мережі.

Під час роботи сенсорної системи забезпечувалося постійне оновлення маршрутів залежно від стану мережі та рівня навантаження на вузли. Автоматичне коригування структури маршрутів дозволило підтримувати стабільний обмін інформацією навіть при частковому відключенні окремих пристроїв. У результаті підвищувалася надійність функціонування мережі та зменшувалася ймовірність втрати даних.

3.6 Напрями вдосконалення методів маршрутизації

Сучасні сенсорні мережі постійно ускладнюються, тому методи маршрутизації потребують подальшого розвитку та адаптації до нових умов роботи. Одним із головних напрямів удосконалення є зменшення енергетичних витрат сенсорних вузлів. Для цього розробляються алгоритми, які дозволяють скорочувати кількість передач, рівномірно розподіляти навантаження між вузлами та автоматично переводити частину пристроїв у режим низького енергоспоживання.

Значна увага приділяється підвищенню надійності передавання даних. У сучасних системах використовуються механізми резервних маршрутів, які дозволяють швидко перебудовувати шляхи передавання інформації у разі

виходу окремих вузлів із ладу. Завдяки цьому мережа зберігає працездатність навіть при пошкодженні частини сенсорних пристроїв.

Одним із перспективних напрямів є використання інтелектуальних алгоритмів керування маршрутизацією. Методи на основі штучного інтелекту та машинного навчання дозволяють аналізувати стан мережі, прогнозувати навантаження та автоматично обирати найбільш ефективні маршрути передавання пакетів. Такі алгоритми можуть адаптуватися до зміни структури мережі без втручання оператора.

Для покращення ефективності роботи сенсорних систем також застосовуються гібридні методи маршрутизації. Вони поєднують особливості декількох алгоритмів та дозволяють використовувати різні способи передавання інформації залежно від умов функціонування мережі. Наприклад, у межах однієї системи можуть одночасно використовуватися кластерна та географічна маршрутизація.

Окремим напрямом розвитку є вдосконалення механізмів захисту інформації. У процесі передавання даних сенсорні мережі можуть піддаватися перехопленню пакетів, перевантаженню каналів зв'язку або несанкціонованому доступу до вузлів. Через це сучасні алгоритми маршрутизації доповнюються методами шифрування, автентифікації та контролю цілісності інформації.

Для мереж із великою кількістю вузлів важливим завданням залишається підвищення масштабованості. При збільшенні площі покриття та кількості пристроїв маршрутизація ускладнюється, а навантаження на канали зв'язку зростає. Нові алгоритми орієнтовані на зменшення кількості службових повідомлень та скорочення часу формування маршрутів.

У сучасних сенсорних системах також активно розвиваються енергоефективні способи обробки даних. Частина інформації може аналізуватися безпосередньо у вузлах мережі без постійного передавання до базової станції. Як бачимо, що це дозволяє скоротити обсяг трафіку та зменшити витрати енергії під час роботи системи (на рисунку 3.10).



Рис.3.10 Напрями вдосконалення методів маршрутизації

Проведений аналіз показує, що розвиток алгоритмів маршрутизації спрямований на підвищення стабільності роботи мережі. Також він передбачає зменшення енергетичних витрат сенсорних вузлів. Окрім того, підвищується ефективність передавання інформації в мережі.

Перспективним напрямом розвитку є використання самонавчальних мережевих систем, здатних автоматично змінювати параметри маршрутизації залежно від інтенсивності трафіку та стану вузлів. Завдяки цьому можна підвищити швидкість реагування мережі на зміну умов функціонування та зменшити ймовірність перевантаження окремих ділянок системи.

Для підвищення стабільності функціонування сенсорних мереж удосконалюються механізми балансування навантаження між вузлами. Рівномірний розподіл процесів передавання інформації дозволяє уникати надмірного використання окремих пристроїв і збільшувати тривалість роботи всієї системи. Додатково скорочується ризик порушення маршрутизації при

виході вузлів із ладу.

Подальший розвиток маршрутних протоколів спрямований на скорочення часу доставки інформації між вузлами мережі. Для цього використовуються алгоритми швидкого формування маршрутів і механізми прогнозування навантаження каналів зв'язку. Завдяки цьому підвищується стабільність передавання даних та зменшується ймовірність перевантаження мережі.

У сучасних сенсорних системах активно вдосконалюються способи інтеграції з хмарними сервісами та технологіями Інтернету речей. Використання віддаленої обробки інформації дозволяє зменшити навантаження на сенсорні вузли та підвищити ефективність аналізу отриманих даних. Одночасно розширюються можливості централізованого моніторингу та керування мережею.

Висновки

У третьому розділі було проведено аналіз ефективності методів маршрутизації в сенсорних мережах та розглянуто особливості їх практичного використання. Виконано порівняння сучасних алгоритмів маршрутизації за показниками енергоспоживання, стабільності передавання даних, навантаження на вузли та швидкості доставки пакетів.

Під час дослідження встановлено, що кластерні методи маршрутизації забезпечують більш рівномірний розподіл енергетичних витрат між сенсорними вузлами. Використання протоколу LEACH дозволяє зменшити кількість передавань на великі відстані та збільшити тривалість роботи мережі.

У роботі також було проаналізовано вплив топології мережі на ефективність маршрутизації. Встановлено, що комірчаста структура характеризується високою надійністю, а зіркоподібна забезпечує мінімальні затримки передавання інформації. Деревоподібна топологія дозволяє підтримувати баланс між навантаженням на вузли та площею покриття мережі.

На основі практичного прикладу досліджено процес організації передавання даних у сенсорній мережі з використанням кластерної

маршрутизації. Результати аналізу підтвердили доцільність застосування багатострибкового способу обміну інформацією для зменшення енергетичних витрат та підвищення стабільності функціонування системи.

Проведений аналіз показав ефективність сучасних методів маршрутизації для організації передавання даних у сенсорних мережах. Використання адаптивних алгоритмів дозволяє підвищити стабільність роботи системи та зменшити навантаження на вузли мережі. Подальший розвиток маршрутних протоколів спрямований на скорочення енергетичних витрат і підвищення надійності обміну інформацією.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Сенсорні мережі є одним із перспективних напрямів розвитку сучасних інформаційних і телекомунікаційних технологій. Їх використання забезпечує автоматичний збір, обробку та передавання інформації у режимі реального часу без необхідності постійного втручання людини. Завдяки автономності, масштабованості та здатності до самоорганізації сенсорні системи широко застосовуються у промисловості, транспортній сфері, медицині, системах безпеки, екологічному моніторингу та інших галузях.

Функціонування сенсорної мережі базується на взаємодії великої кількості сенсорних вузлів, які обмінюються інформацією через безпроводові канали зв'язку. Ефективність роботи системи залежить від стабільності передавання даних, швидкості обміну інформацією, правильного вибору структури мережі та раціонального використання ресурсів вузлів. Значний вплив на роботу мережі мають енергоспоживання, навантаження на канали зв'язку, відстань між вузлами та умови функціонування системи.

Сенсорні вузли мають обмежений запас енергії, невеликий обсяг пам'яті та невисоку обчислювальну потужність. Через це особлива увага приділяється скороченню енергетичних витрат і підвищенню ефективності передавання інформації. Найбільше навантаження виникає під час роботи радіомодуля та обміну пакетами даних між вузлами мережі. Саме тому сучасні сенсорні системи орієнтовані на використання енергоефективних алгоритмів маршрутизації та механізмів оптимізації обміну інформацією.

Самоорганізація дозволяє сенсорній мережі автоматично формувати структуру зв'язків між вузлами, перебудовувати маршрути передавання інформації та підтримувати працездатність системи при зміні топології. У разі виходу окремих вузлів із ладу або зміни умов роботи мережі інші пристрої можуть автоматично оновлювати маршрути та продовжувати обмін даними. Завдяки цьому підвищується надійність функціонування сенсорної системи та зменшується ризик втрати інформації.

Використання різних типів топологій дозволяє адаптувати структуру мережі до умов функціонування системи. Зіркоподібна структура характеризується простотою організації зв'язку та невеликими затримками передавання інформації. Деревоподібна топологія забезпечує багаторівневу організацію обміну даними та дозволяє охоплювати великі території. Комірчаста структура підтримує високу надійність маршрутизації завдяки використанню альтернативних шляхів передавання інформації між вузлами.

Організація маршрутизації належить до основних процесів функціонування сенсорної мережі. Від способу побудови маршрутів залежить швидкість доставки пакетів, рівень енергоспоживання вузлів, навантаження на систему та стабільність зв'язку між пристроями. У сучасних мережах використовуються різні методи маршрутизації, серед яких ієрархічні, географічні, адаптивні та енергозберігаючі алгоритми.

Ієрархічні методи маршрутизації забезпечують зменшення навантаження на мережу шляхом використання кластерної структури та головних вузлів. Географічні алгоритми дозволяють швидко визначати маршрути на основі координат вузлів. Адаптивні методи підтримують автоматичне оновлення маршрутів відповідно до стану мережі. Енергозберігаючі алгоритми спрямовані на скорочення витрат енергії та продовження часу функціонування сенсорної системи.

Серед сучасних протоколів маршрутизації найбільш поширеними є LEACH, PEGASIS, Directed Diffusion та AODV. Кожен із них має власні особливості побудови маршрутів і використовується залежно від умов функціонування мережі. Кластерні протоколи дозволяють скорочувати кількість передач на великі відстані та зменшувати навантаження на сенсорні вузли. Адаптивні алгоритми забезпечують стабільне передавання інформації при зміні структури мережі та динамічному навантаженні.

Під час функціонування сенсорних систем можуть виникати проблеми, пов'язані з перевантаженням каналів зв'язку, затримками передавання даних, втратами пакетів і нерівномірним розподілом енергетичних витрат між

вузлами. Значний вплив на стабільність роботи мережі мають перешкоди сигналу, велика відстань між пристроями та обмежені ресурси сенсорних вузлів. Додатковою проблемою є забезпечення захисту інформації під час передавання даних через бездротові канали зв'язку.

Порівняння сучасних методів маршрутизації показує, що ефективність роботи мережі залежить від умов функціонування системи та способу організації передавання інформації. Одні алгоритми забезпечують скорочення енергоспоживання, інші дозволяють підвищити швидкість доставки пакетів або стабільність маршрутизації. Вибір протоколу повинен враховувати особливості мережі, кількість вузлів, площу покриття та вимоги до обміну даними.

Застосування кластерної організації мережі дозволяє скоротити навантаження на канали зв'язку та підвищити ефективність використання енергетичних ресурсів. Передавання інформації через cluster head забезпечує зменшення кількості пакетів у мережі та дозволяє рівномірно розподіляти навантаження між вузлами. Додатково підвищується стабільність функціонування системи при зміні структури мережі або виході окремих пристроїв із ладу.

Подальший розвиток сенсорних мереж пов'язаний із використанням інтелектуальних алгоритмів керування маршрутизацією, підвищенням рівня енергоефективності та вдосконаленням механізмів захисту інформації. Використання адаптивних методів дозволить підвищити швидкість передавання даних, зменшити навантаження на вузли та забезпечити стабільну роботу системи в умовах зміни структури мережі. Удосконалення сенсорних технологій сприятиме розширенню сфер застосування бездротових сенсорних мереж і підвищенню ефективності автоматизованих систем моніторингу та керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дослідження задач побудови бездротових сенсорних мереж / В. М. Джулій, А. В. Краснік, Є. С. Ленков, М. М. Охрамович, Л. О. Ряба // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – Київ : ВІКНУ, 2022. – Вип. №75. – С. 51-65.
2. Ленков С. В., Джулій В. М., Орленко В. С., Селюков О. В., Атаманюк А. В. Модель безпеки поширення забороненої інформації в інформаційно-телекомунікаційних мережах // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2020. № 68. С. 53–64.
3. Ленков С. В., Джулій В. М., Берназ Н. М., Божук С. О. Аналіз існуючих методів та алгоритмів виявлення атак в бездротових мережах передачі даних // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2017. № 56. С. 124–132.
4. Джулій В. М., Муляр І. В., Селюков О. В., Кізюн Б. М. Модель оцінки ймовірно-часових характеристик інформаційної взаємодії в мережі Інтернет речей // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2019. № 63. С. 96–106.
5. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless Sensor Networks: A Survey // Computer Networks. 2002. Vol. 38, № 4. P. 393–422.
6. Karl H., Willig A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. Chichester : John Wiley & Sons, 2005. 497 p. URL: Wiley Online Library
7. Sohraby K., Minoli D., Znati T. Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications. Hoboken : John Wiley & Sons, 2007. 307 p.
8. Yick J., Mukherjee B., Ghosal D. Wireless Sensor Network Survey // Computer Networks. 2008. Vol. 52, № 12. P. 2292–2330.
9. Krishnamachari B. Networking Wireless Sensors. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 216 p.

10. Akkaya K., Younis M. A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks // Ad Hoc Networks. 2005. Vol. 3, № 3. P. 325–349.
11. Ammari H. M. Wireless Sensor Networks and Applications. New York : Springer, 2012. 819 p.
12. Senouci, M.R.; Mellouk, A. Deploying Wireless Sensor Networks Theory and Practice Preface; Elsevier: Oxford, UK, 2016.
13. Vieira M. A. M., Cunha A. B. Da, Silva Jr. D. C. Da. Designing Wireless Sensor Nodes // SAMOS 2006: Proceedings of the International Conference on Embedded Computer Systems: Architectures, Modeling, and Simulation. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 4017 / ed. S. Vassiliadis et al. Berlin : Springer, 2006. P. 99–108.
14. Heinzelman W., Chandrakasan A., Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks / / Proceedings 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Wailea Maui, Hawaii, USA, Jan. 2000.
15. Семко О. В., Складанний П. М., Семко В. В., Бурячок В. Л. Методологія інтелектуального управління маршрутизацією в конфліктуючих сенсорних мережах варіативної топології // Сучасна спеціальна техніка. 2019. № 4(55). С. 64–76.
16. Гоков О. М. Технічне забезпечення видавничих систем : навч. посіб. / О. М. Гоков, В. Ю. Вовьюнов, Є. А. Жидко. Харків : Вид. ХНЕУ, 2009. 268 с.
17. Sobin C. A Survey on Architecture, Protocols and Challenges in IoT. Wirel Pers Commun. 2020; 112: 1383–1429.
18. Masud F., Abdullah A., Altameem A., Abdul-Salaam G., Muchtar F. Traffic Class Prioritization-Based Slotted-CSMA/CA for IEEE 802.15.4 MAC in Intra-WBANs. Sen-sors. 2019; 19: 466.
19. Al-Karaki J. N., Kamal A.E.: „Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A survey”, IEEE Wireless Communications, 2004, vol. 11, no. 6, s. 6–28.

20. Тимченко О.В., Зеляновський М.Ю. Методи і протоколи обміну даними сенсорних мереж // Зб. Наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.46. – К.: 2008. – С. 176-183.
21. Колодій Р.С., Тимченко О.В. Використання безпроводних технологій для потреб екстреної медицини // Моделювання та інформаційні технології. Зб. Наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Вип.53. – К.: 2009. – С. 181-185.
22. Sichitiu M.L. Wireless mesh networks: opportunities and challenges / Sichitiu M.L. // Proc. of the Wireless World Congress. – 2005. — P. 263— 268.
23. Akyildiz F., Wang X. A Survey on Wireless Mesh Networks // IEEE Communications Magazine. – 2005. – 43, N 9. – P. 412-418.
24. Жук О.В., Міночкін А.І., Романюк В.А. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж // Зб. Наук, праць ВІПІ НТУУ “КПІ”, 2007. - № 2. – С. 111-119.
25. Кузьмін О., Мицько О., Грицак В. Класифікація протоколів маршрутизації у безпроводних сенсорних мережах // Національний університет «Львівська політехніка». 2010. С. 267.
26. Основи побудови безпроводових сенсорних мереж [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Інженерія та програмування інфокомунікацій» спеціальності 172 - Електронні комунікації та радіотехніка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Кравчук С. О., Лисенко О. І., Явіся В. С., Валуйський С. В., Новіков В. І., Гуйда О. Г. – Електронні текстові дані (1 файл: 7,26 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 313 с. – Назва з екрана. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67939> (Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 8 від 20.06.2024 р.) за поданням вченої ради Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем (протокол № 5 від 27.05.2024 р.)
27. Теорія ймовірностей. Ймовірність події та випадкові величини в галузі електронних комунікацій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інженерія та програмування

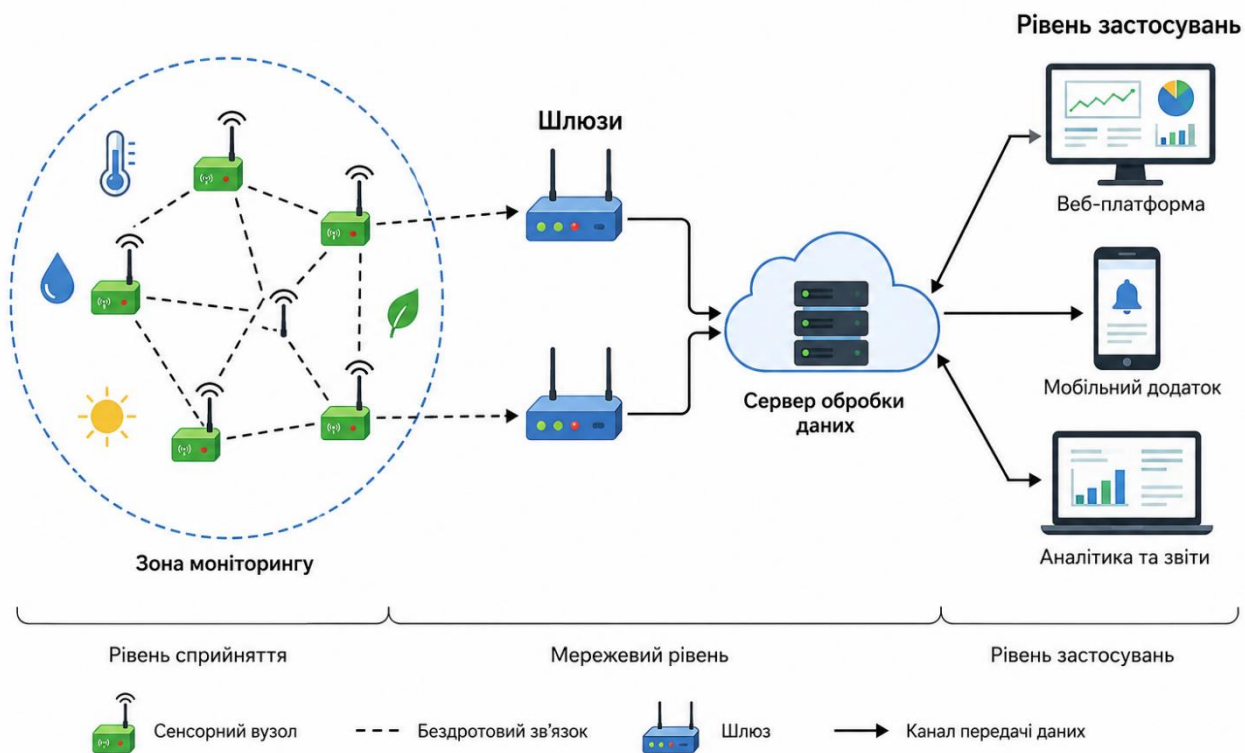
інфокомунікацій» спец. G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. І. Лисенко, В. С. Явіся, В. І. Новіков, І. О. Сушин. – 2-ге вид., переробл. та доповн. – Електрон. текст. дані (1 файл: 3,77 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 219 с. – Назва з екрана.
<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/77397>.

28. Математичні методи оптимізації. Частина 1. Статичні системи [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інженерія інноваційних інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем» спец. G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Лисенко О. І., Тачиніна О. М., Алексеєва І. В., Явіся В. С., Новіков В. І., Потьомкін М. М., Валуйський С. В. – Електрон. текст. дані (1 файл: 9,06 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 360 с. – Назва з екрана.
<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/77400>.

ДОДАТКИ

Додаток А

Організація багатострибкової маршрутизації в сенсорній мережі



Додаток Б

Порівняльна характеристика протоколів маршрутизації в сенсорних мережах

Протокол	Тип маршрутизації	Основний принцип роботи	Переваги	Недоліки
LEACH	Ієрархічна	Формування кластерів і вибір cluster head	Низьке енергоспоживання, рівномірний розподіл навантаження	Потреба у періодичній перебудові кластерів
PEGASIS	Енергозберігаюча	Передавання даних через ланцюг вузлів	Зменшення витрат енергії	Значні затримки передавання
Directed Diffusion	Адаптивна	Передавання даних за запитом interest	Скорочення службового трафіку, агрегування даних	Складність роботи у великих мережах
AODV	Адаптивна	Формування маршруту за потребою	Гнучкість підтримка динамічної топології	Затримка під час пошуку маршруту
Географічна маршрутизація	Географічна	Використання координат вузлів	Швидке визначення маршруту	Необхідність позиціонування вузлів
Кластерна маршрутизація	Ієрархічна	Об'єднання вузлів у групи	Зменшення навантаження на мережу	Перевантаження cluster head