

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

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

« ____ » _____ 2024 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»
зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему: «Методика багатокритеріального порівняльного аналізу
алгоритмів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах»**

Виконав:

студент II курсу, групи ТЗ-21мп

Славінський Дмитро Юрійович _____

Керівник:

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

Лисенко О.І. _____

Рецензент:

В.о. завідувача кафедри ІТТ НН ІТС, професор

д.т.н., с.н.с., професор

Скулиш М.А. _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2024 року

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

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Славінському Дмитру Юрійовичу

1. Тема дисертації «Методика багатокритеріального порівняльного аналізу алгоритмів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах», науковий керівник дисертації Лисенко Олександр Іванович, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «31» жовтня 2023 р. № 5075-с.
2. Термін подання студентом дисертації 05.01.2024 р.
3. Об'єкт дослідження мобільна бездротова сенсорна мережа
4. Предмет дослідження алгоритми маршрутизації в мобільних сенсорних мережах
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - Провести літературний огляд за темою дослідження
 - Проведення огляду та аналізу існуючих методів маршрутизації, їх переваг та недоліків.
 - Розробити методику багатокритеріального порівняльного аналізу
 - Запропонувати покращений енергоефективний метод маршрутизації
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:

- Тема, мета, актуальність, задачі, дослідження
- Огляд основних особливостей БСМ
- Методика багатокритеріального порівняльного аналізу
- Модифікований енергоефективний протокол маршрутизації на основі нечіткої логіки
- Результати імітаційного моделювання

7. Орієнтовний перелік публікацій

- 1) Славінський Д.Ю. Семенко В.В. МЕТОДИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ. Наукові праці П'ятої міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій», 1 червня 2023 р. (Київ, Україна). — К.: НУХТ, 2023. — с. 83–84.
- 2) Славінський Д.Ю. МЕТОДИКА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ АЛГОРИТМІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ. Практичні питання функціонування і відновлення об'єктів муніципальної інфраструктури та промисловості України в сучасних умовах : зб. матеріалів всеукр. науково-практ. конф., ТНУ імені В. І. Вернадського, м. Київ, 2023. с. 195–197.

8. Дата видачі завдання “ 7 ” жовтня 2022 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз технічних характеристик сенсорів для мобільних сенсорних мереж	7.10.2022-7.12.2022	виконано
2	Аналіз існуючих методів енергоефективної маршрутизації в безпроводовій сенсорній мережі	11.12.2022-08.02.2023	виконано
3	Огляд енергоефективних протоколів для WSN.	16.02.2023-05.03.2023	виконано
4	Розвиток методів маршрутизації.	06.03.2023-07.04.2023	виконано
5	Модифікований енергоефективний протокол маршрутизації на основі нечіткої логіки.	08.04.2023-12.06.2023	виконано
6	Моделювання енергетичної ефективності запропонованого методу.	14.06.2023-10.08.2023	виконано
7	Розробка стартап проекту.	11.08.2023-07.10.2023	виконано
8	Формулювання загальних висновків та	13.10.2023-21.12.2023	виконано

	оформлення дипломної роботи згідно норм контролю.		
--	--	--	--

Студент

Дмитро СЛАВІНСЬКИЙ

Науковий керівник дисертації

Олександр ЛИСЕНКО

РЕФЕРАТ

Робота містить 88 сторінок, 31 рисуноків та 19 таблиць. В процесі написання дисертації було використано 49 джерел.

Актуальність теми: Швидкий розвиток мобільних технологій, таких як IoT та розширена реалізація мобільного Інтернету, призводить до росту обсягів даних та кількості підключених пристроїв у мережах. Цей ріст у використанні сенсорних пристроїв породжує потребу вдосконалення алгоритмів маршрутизації, що забезпечують ефективний обмін даними в умовах змінної топології мережі та рухомих вузлів. Вибір оптимального протоколу для кожного застосунку є важливим для забезпечення стабільності, швидкодії та безпеки передачі інформації в бездротовій мережі. В цій роботі проведено порівняльний аналіз найпопулярніших алгоритмів маршрутизації що використовуються в бездротових сенсорних мережах, також було запропоновано модифікований протокол маршрутизації на основі нечіткої логіки

Мета роботи: Мета роботи полягає в проведенні багатокритеріального порівняльного аналізу алгоритмів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах, що дозволить зробити об'єктивне порівняння їхньої ефективності з точки зору різних критеріїв, таких як надійність та енергоефективність. Також в роботі було запропоновано модифікований енергоефективний протокол маршрутизації на основі нечіткої логіки.

Завдання дослідження:

1. Дослідження основних особливостей WSN.
2. Проведення порівняльного аналізу методів маршрутизації в WSN.
3. Розробка модифікованого енергоефективного протоколу маршрутизації на основі нечіткої логіки.
4. Розробка стартап проекту на основі проведеного дослідження.

Об'єкт дослідження: бездротові сенсорні мережі.

Предмет дослідження: методи маршрутизації в бездротових сенсорних мережах.

Наукова новизна отриманих результатів: В результаті проведення досліджень було запропоновано модифікований метод маршрутизації на основі нечіткої логіки для мобільних бездротових сенсорних мереж.

Практична новизна отриманих результатів: Розроблений модифікований метод маршрутизації на основі нечіткої логіки під час моделювання показав кращі результати роботи ніж протокол HEED на якому базується модифікація, завдяки цьому ефективність використання сенсорних мереж буде підвищена.

Ключові слова : БСМ, вузол, протокол, кластеризація, маршрутизація.

ABSTRACT

The work includes 88 pages, 31 figures and 19 tables. 49 sources were used in the process of writing the dissertation.

Relevance of the topic: The rapid development of mobile technologies, such as IoT and the expanded implementation of the mobile Internet, leads to the growth of data volumes and the number of connected devices in networks. This growth in the use of sensor devices gives rise to the need to improve routing algorithms that provide efficient data exchange in conditions of variable network topology and mobile nodes. Choosing the optimal protocol for each application is important to ensure stability, speed and security of information transmission in a wireless network. In this work, a comparative analysis of the most popular routing algorithms used in wireless sensor networks was carried out, and a modified routing protocol based on fuzzy logic was also proposed.

The purpose of the work: The purpose of the work is to conduct a multi-criteria comparative analysis of routing algorithms in mobile sensor networks, which will allow an objective comparison of their effectiveness from the point of view of various criteria, such as speed, reliability and energy efficiency. The paper also proposed a modified energy-efficient routing protocol based on fuzzy logic.

Research objectives:

1. Study of the main features of WSN.
2. Carrying out a comparative analysis of routing methods in WSN.
3. Development of a modified energy-efficient routing protocol based on fuzzy logic.
4. Development of a startup project based on the conducted research.

Research object: wireless sensor networks.

Research subject: routing methods in wireless sensor networks.

Scientific novelty of the obtained results: As a result of the research, a modified method of routing based on fuzzy logic for mobile sensor networks was proposed.

Practical novelty of the obtained results: The developed modified routing method based on fuzzy logic during simulation showed better performance than the HEED protocol on which the modification is based, thanks to which the efficiency of using sensor networks will be increased.

Keywords: WSN, node, protocol, clustering, routing.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	12
РОЗДІЛ 1 БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ, ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД.....	13
1.2 Сфери застосування мобільних сенсорних мереж:	14
1.3 Особливості сенсорних вузлів	16
1.3.1 Технічні характеристики сенсорних вузлів в БСМ	16
1.3.2 Види сенсорних датчиків та їх функції:	18
1.3.3 Особливості габаритних показників сенсорних вузлів	19
1.3.4 Технічні обмеження сенсорних вузлів.....	21
1.3.5 Вплив технічних характеристик сенсорів на результати їх застосувань.....	23
1.4 Аналіз топологій бездротових сенсорних мереж.	24
Висновки	31
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ АЛГОРИТМІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ.....	33
2.1 Класифікація на основі керування протоколами	34
2.2 Класифікація на основі виявлення маршруту	35
2.2.1 Проактивні (табличні) протоколи маршрутизації	35
2.2.2 Реактивні протоколи маршрутизації.....	36
2.2.3 Гібридні протоколи маршрутизації.....	37
2.3 Класифікація на основі мережевої структури або організації.	37
2.3.1 Маршрутизація на основі місцезнаходження	38
2.3.2 Неієрархічна маршрутизація.....	41
2.3.3 Ієрархічна маршрутизація	49
2.4 Методика та порівняльний аналіз основних протоколів маршрутизації на основі класифікаційних ознак.....	56
Висновки	60

РОЗДІЛ 3 МОДИФІКОВАНИЙ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ПРОТОКОЛ МАРШРУТИЗАЦІЇ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ	61
3.1 Протокол MFL-NEED	61
3.2 Практична реалізація модифікованого протоколу MFL-NEED	65
Висновки	70
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	71
4.1 Опис ідеї стартап-проекту	71
Висновки	80
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82

ВСТУП

Бездротові сенсорні мережі (WSN) відіграють ключову роль у сучасному світі, Ці мережі використовуються в багатьох галузях життєдіяльності людини: від моніторингу навколишнього середовища та виробничих процесів до медичних систем і військових застосувань. Загалом можна виділити наступні переваги бездротових сенсорних мереж:

- Гнучкість та мобільність: БСМ можуть бути розгорнуті в різних середовищах, та охоплювати досить великі площі.
- Просте розгортання та масштабування: БСМ можуть бути легко розгорнуті та розширені з ростом обсягу даних або об'єму вимірів, що потребують обробки.
- Здатність працювати в умовах обмеженої інфраструктури: У випадку недостатньої інфраструктури або природних катастроф, БСМ можуть забезпечувати зв'язок та збір даних, забезпечуючи надійну мережу для важливих завдань.
- Низькі витрати на обслуговування: У порівнянні з провідними мережами, БСМ зазвичай вимагають менше витрат на обслуговування та ремонт, що робить їх економічно вигідними у використанні.

Висока потреба у передачі даних та обміні інформацією в бездротових сенсорних мережах вимагає постійного пошуку оптимальних рішень для їхньої ефективної роботи. Одним із критичних факторів є енергоефективність - вміння максимально ефективно використовувати обмежені енергетичні ресурси, що стає вирішальним для тривалості та функціонування мереж особливо якщо бездротові сенсорні мережа працюють в у важкодоступних або віддалених місцевостях. Для забезпечення ефективної роботи БСМ, вкрай важливим є проведення порівняльного аналізу протоколів маршрутизації, він дозволяє визначити оптимальний протокол, враховуючи конкретні умови експлуатації. Оптимізація споживання енергії є надзвичайно важливою для забезпечення стабільності та продуктивності бездротових

сенсорних, оскільки допомагає зменшити витрату енергії сенсорними вузлами, що життєво важливо в умовах коли доступ до джерел живлення є обмеженим.

Таким чином, проведення порівняльного аналізу є одним з найважливіших процесів при проектуванні або розробці нових сенсорних мереж оскільки воно забезпечує вибір оптимального методу маршрутизації в залежності від конкретної ситуації.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

IoT	Internet of Things
BS	Base Station
CH	Cluster Head
WSN	Wireless Sensor Network
MWSN	Mobile Wireless Sensor Network
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
TEEN	Threshold sensitive Energy Efficient Network
PEGASIS	Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems
SPIN	Sensor Protocol for Information via Negotiation
HEED	Hybrid Energy-Efficient Distributed
GAF	Geographic Adaptive Fidelity
QoS	Quality of Service
ST	Soft Threshold
HT	Hard Threshold

РОЗДІЛ 1

БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ, ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД

Сучасний світ вже давно вступив в еру бездротових технологій та інтернету речей (IoT), що стало можливим завдяки мобільним сенсорним мережам. Бездротові сенсорні мережі (Wireless Sensor Networks, WSN) - це інноваційна та надзвичайно перспективна технологія, яка об'єднує в собі бездротові засоби збирання даних та інтелектуальний аналіз для реалізації різноманітних застосувань. В їх основі лежать сенсорні вузли, які є центральними елементами цих мереж. Бездротові сенсорні мережі представляють собою революційний підхід до збору та аналізу даних у реальному часі. Вони допомагають вирішувати ряд суттєвих завдань у різних галузях, надаючи можливість збирати інформацію безпосередньо з навколишнього середовища [1,14].

1.1 Архітектура бездротових сенсорних мереж

Архітектура бездротових сенсорних мереж (БСМ) базується на двох основних компонентах (рис.1.1):

- **Сенсорні вузли (Сенсори):** Це основні елементи мережі, обладнані вбудованими датчиками для збору різних типів даних (температура, вологість, рух тощо). Сенсори також володіють бездротовими модулями для передачі зібраних даних до базових станцій.
- **Базові станції (Base Stations):** Це вузли, що приймають дані від сенсорних вузлів. Вони можуть служити точками збору даних або центральними вузлами для передачі інформації до вищих рівнів мережі або систем керування.

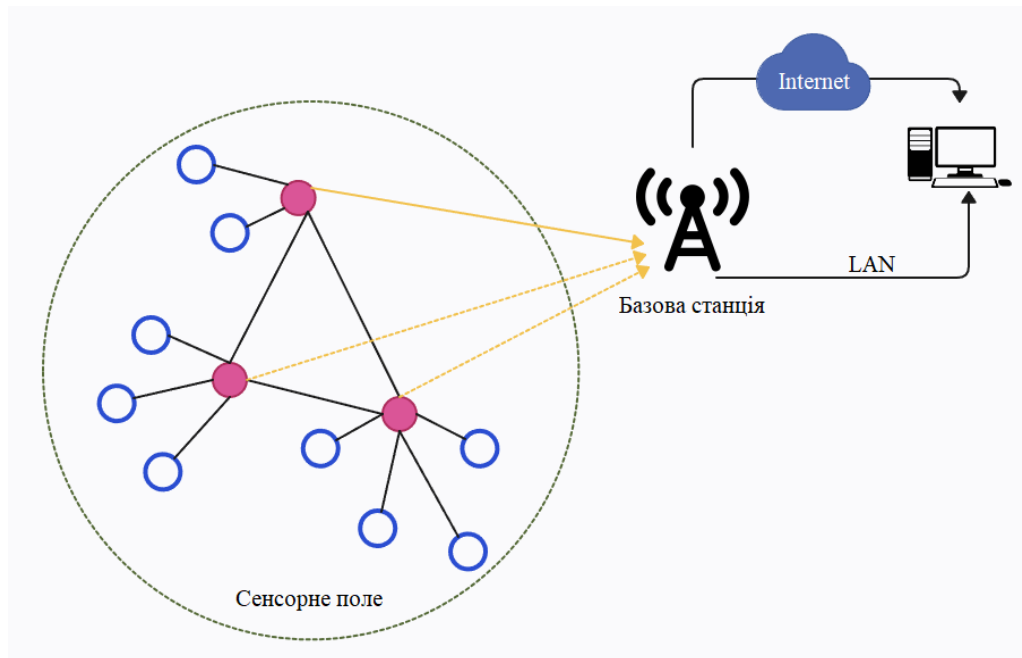


Рис. 1.1 Структура БСМ

1.2 Сфери застосування мобільних сенсорних мереж:

Завдяки своїм можливостям, використання бездротових сенсорних мереж набуло широкого розповсюдження в світі технологій, де вони відіграють важливу роль у зборі, передачі та аналізі даних [2]. Ці мережі, особливо мобільні сенсорні мережі (MWSN), є важливим інструментом для реалізації багатьох застосувань в сучасному світі (рис. 1.2).

Розглядаючи конкретні застосування цих мереж найбільш розповсюдженими є:

- *Моніторинг довкілля:* Однією з найважливіших сфер застосування є моніторинг довкілля, який дозволяє вчасно виявляти зміни в якості повітря, води, ґрунту та інших екологічних параметрах.
- *Аграрний сектор:* У сільському господарстві БСМ використовуються для вимірювання і контролю параметрів, що впливають на вирощування рослин, це такі параметри як: температура, вологість ґрунту, концентрація речовин в ґрунті.

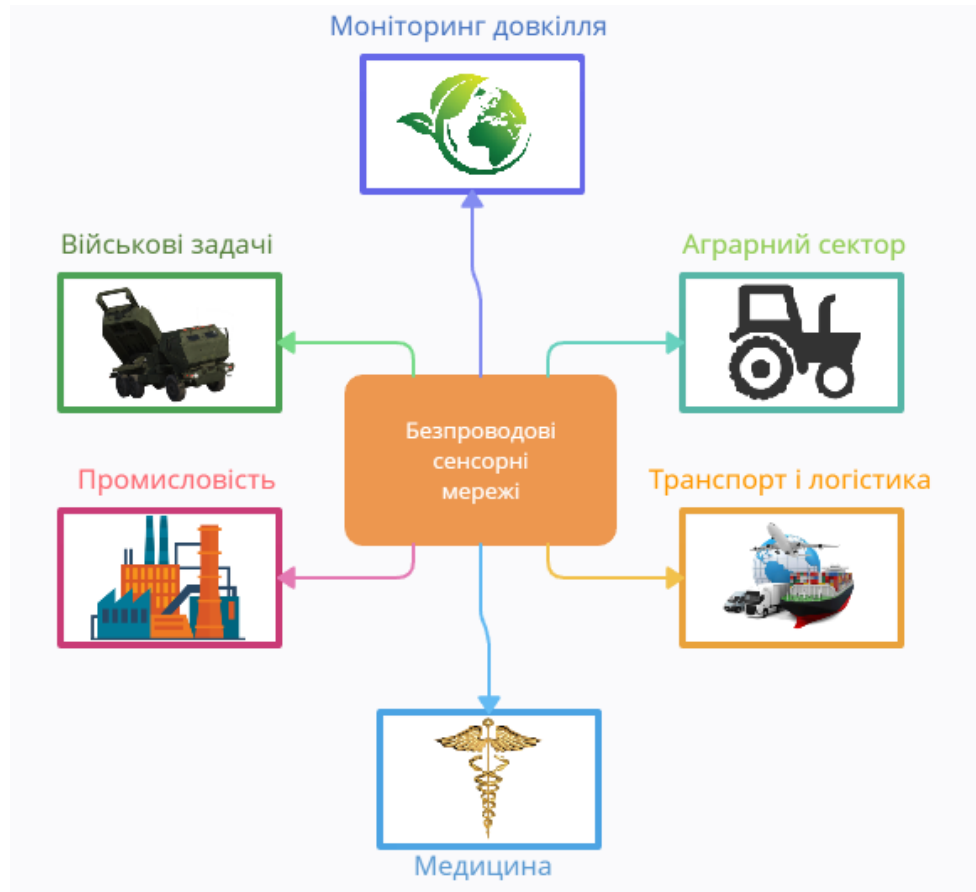


Рис.1.2 Основні сфери використання бездротових сенсорних мереж

- *Транспорт і логістика:* В сфері транспорту БСМ можуть використовуватися для відстеження транспортних засобів, моніторингу руху, стану шляхів і доріг, а також для оптимізації логістичних процесів.
- *Медицина:* У сфері медицини БСМ можуть використовуватися для моніторингу біологічних показників пацієнтів з хронічними захворюваннями.
- *Промисловість:* У виробництві БСМ використовуються для моніторингу стану обладнання, підвищення продуктивності та зменшення витрат на обслуговування.
- *Військові задачі:* Безпроводові сенсорні мережі можуть використовуватися в деяких військових цілях, наприклад моніторинг повітря на наявність отруйних речовин [11].

1.3 Особливості сенсорних вузлів

Одним із найбільших викликів в бездротових сенсорних мережах є збалансування обмежених ресурсів сенсорів з вимогами до точності та продуктивності. Ефективне управління енергією є ключовим аспектом, оскільки від нього залежить тривалість роботи сенсорів. Мобільні сенсорні мережі мають переваги у вигляді можливості моніторингу в реальному часі та автоматизації процесів в різних галузях. Вони допомагають зменшити людські помилки та підвищити якість обслуговування [45]. Технічні характеристики сенсорів є ключовими для аналізу і розуміння їхньої ролі та ефективності в мобільних сенсорних мережах. У цьому розділі детально розглядаються технічні характеристики сенсорів, що впливають на функціональність всієї мережі.

1.3.1 Технічні характеристики сенсорних вузлів в БСМ

В цій частині докладно проведено огляд та аналіз технічних характеристик сенсорних вузлів та вплив цих характеристик на функціональність та довговічність мобільних сенсорних мереж. Саме сенсорні вузли відіграють ключову роль в роботі бездротових сенсорних мереж, вони є основними компонентами цих мереж і дозволяють здійснювати моніторинг та збір даних, однак зазвичай вони мають обмежені ресурси, такі як обчислювальна потужність, пам'ять, енергія, тощо. Основними елементами сенсорних вузлів в БСМ є ряд компонентів, які працюють разом для забезпечення нормальної роботи сенсорних вузлів та досягнення конкретних цілей застосування (рис.1.3) .

Аналіз технічних характеристик сенсорів для мобільних сенсорних мереж стає насамперед важливим для дослідження параметрів БСМ, наприклад енергоефективності. Висока технічна продуктивність сенсорів в поєднанні з ефективним використанням енергії визначає їх здатність працювати в режимі безперервного моніторингу і збирання даних [4]. Енергоефективність є ключовим аспектом у дослідженні мобільних

сенсорних мереж, оскільки від неї залежить тривалість їх функціонування та стабільність збору інформації.

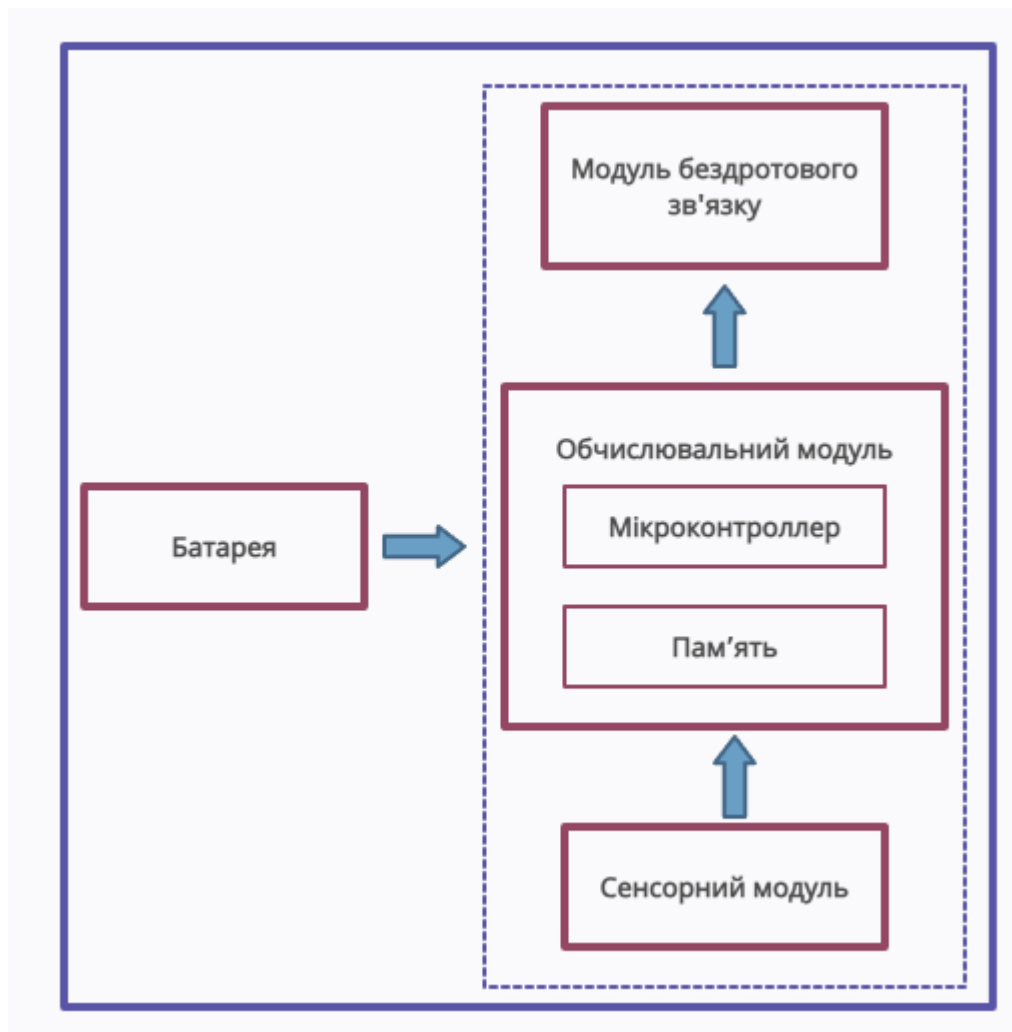


Рис.1.3 основні складові сенсорного вузла

Основними складовими сенсорних вузлів в мобільних сенсорних мережах є наступні елементи:

- **Сенсори (датчики):** Це фізичні пристрої, що здатні збирати різні типи даних з навколишнього середовища. Сенсори можуть бути спроектовані для вимірювання різних параметрів, таких як температура, вологість, освітленість, тиск, рух та інші. Вони відповідають за збір інформації та її передачу вузлам мережі;
- **Мікроконтроллер (Microcontroller):** це вбудований обчислювальний пристрій, який керує роботою сенсорів та виконує обробку даних. Він

відповідає за керування сенсорами, збір даних, виконання локальної обробки та взаємодію з іншими вузлами в мережі;

- **Пам'ять (Memory):** Пам'ять використовується для збереження програмного коду, даних і тимчасового зберігання інформації перед її передачею або обробкою. Це може бути флеш-пам'ять, EEPROM або інші типи пам'яті;
- **Модуль бездротового зв'язку (Wireless Communication Module):** Цей модуль дозволяє сенсорному вузлу бездротово комунікувати з іншими вузлами в мережі або з центральним вузлом. Він включає в себе антену та бездротовий чип, який підтримує відповідні комунікаційні протоколи, такі як Zigbee, Bluetooth, LoRa, Wi-Fi та інші;
- **Батарея або джерело живлення (Power Source):** Сенсорні вузли можуть живитися від батарей, акумуляторів, сонячних панелей або інших джерел енергії. Ефективне живлення є критичним для тривалої роботи сенсорів у мобільних сенсорних мережах, оскільки вони можуть бути розташовані в важкодоступних місцях [8].

1.3.2 Види сенсорних датчиків та їх функції:

Розглядаючи бездротові сенсорні мережі (WSN), можна відзначити широкий спектр сенсорів, що використовуються для збору різноманітних типів даних з навколишнього середовища. Кожен із цих сенсорів має свої унікальні характеристики та функції, спрямовані на збір конкретної інформації, яка є важливою для різних галузей застосування. Серед основних різновидів сенсорів які найчастіше застосовуються можна виділити наступні:

- **Температурні сенсори:** Вимірюють температуру навколишнього середовища. Використовуються для моніторингу клімату, керування опаленням, охолодженням і кондиціонуванням повітря, а також для виявлення температурних змін у промислових процесах.

- **Сенсори вологості:** Вимірюють вологість повітря або інших середовищ. Використовуються в сільському господарстві для контролю вологості ґрунту та у метеорологічних станціях.
- **Сенсори освітленості:** Вимірюють рівень освітленості в навколишньому середовищі. Використовуються для автоматичного управління освітленням, диммерів та вуличних ліхтарів.
- **Сенсори руху:** Виявляють рух об'єктів в навколишньому просторі. Використовуються для безпеки, як системи сповіщення про вторгнення, а також для автоматизованих систем, які активуються при виявленні руху.
- **Сенсори звуку:** Вимірюють рівень звукових хвиль або звуковий сигнал. Використовуються в системах моніторингу шуму, розпізнавання голосу, акустичних системах та інших аплікаціях.
- **Сенсори тиску:** Вимірюють тиск рідин або газів. Використовуються в метеорології для вимірювання атмосферного тиску, а також в промисловості для контролю за тиском в трубопроводах та резервуарах.
- **Сенсори газів:** Виявляють наявність та концентрацію певних газів в атмосфері. Використовуються для виявлення витоків газів, контролю якості повітря та для безпеки в промисловості.

1.3.3 Особливості габаритних показників сенсорних вузлів

У бездротових сенсорних мережах, незалежно від того, чи вони є мобільними чи стаціонарними, габаритні показники сенсорних вузлів залишаються важливою складовою. Розмір, маса, форма і інші фізичні характеристики вузлів можуть впливати на їхню ефективність, енергоспоживання, здатність пристосовуватися до конкретних завдань, а також загальну надійність мережі. Зазвичай сенсорні вузли проектуються з урахуванням компактності та невеликого розміру, оскільки їх призначенням є

розміщення для збору даних з навколишнього середовища в важкодоступних місцях або в середовищах що мають певні обмеження (Рис.1.4). Оптимальні розміри сенсорних вузлів визначаються багатьма факторами, такими як їх призначення, функціональність, живлення та умови експлуатації.

Зовнішній вигляд сенсорних вузлів

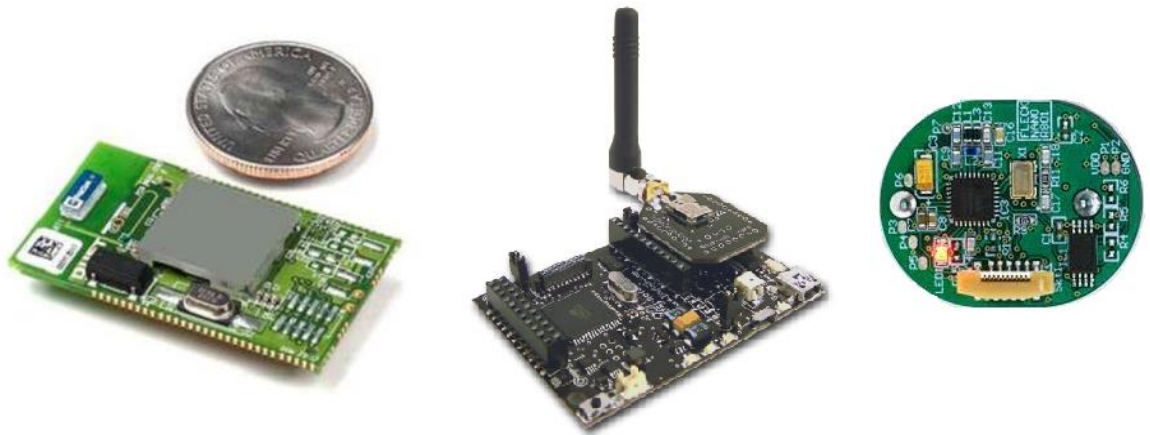


Рис.1.4 Приклади розмірів сенсорних вузлів

Основними характеристиками сенсорних вузлів що стосуються їх габаритів є:

- **Мініатюрність:** Багато сенсорних вузлів спроектовані для мінімізації розмірів, щоб їх можна було легко розмістити в обмежених просторах або прикріпити до різних об'єктів. Наприклад, сенсорні вузли для моніторингу стану рослин можуть бути розміщені безпосередньо на стеблі рослин, тому їх розміри повинні бути компактними.
- **Різноманітність форм:** Сенсорні вузли можуть мати різні форми, включаючи куби, циліндри, плоскі панелі та інші. Це дозволяє їм відповідати вимогам різних застосувань.
- **Мінімальна вага:** Зазвичай сенсорні вузли мають легку конструкцію, оскільки це полегшує їх розміщення і перенесення. Легкість ваги особливо важлива, коли сенсорні вузли живляться від батарей або акумуляторів.

- **Захист від зовнішніх впливів:** Сенсорні вузли можуть мати водонепроникні або пилонепроникні корпуси, які захищають їх від зовнішніх факторів, таких як погодні умови або агресивні середовища.

Малий розмір сенсорних вузлів сприяє їхній можливості встановлення в різноманітних місцях, включаючи важкодоступні або обмежені області. Однак, з урахуванням малих розмірів сенсорних вузлів, важливо враховувати їхні обмежені можливості щодо потужності, зберігання енергії та обробки даних. Це може створювати певні виклики при розробці оптимальних алгоритмів та методів управління енергією для забезпечення тривалої роботи таких вузлів. Отже, враховуючи малі розміри сенсорних вузлів, важливо забезпечити баланс між їхньою компактністю та функціональністю.

1.3.4 Технічні обмеження сенсорних вузлів.

Сенсорні вузли в безпроводових сенсорних мережах мають деякі обмеження і обмежуючі фактори, які важливо враховувати при їх розробці та експлуатації. Технічні обмеження, що виникають у сенсорних вузлах бездротових сенсорних мереж, наприклад: енергетична місткість, обчислювальні можливості та обмеженість мережевого зв'язку і т.д., визначають основні параметри їхньої роботи та можливостей застосування. До найважливіших обмежень можна віднести наступні:

- **Потужність:** Сенсорні вузли зазвичай живляться від батарей або акумуляторів, або використовують альтернативні джерела енергії, наприклад сонячні панелі. Це обмежує їхню потужність і тривалість роботи. Споживання енергії має бути оптимізованим, щоб забезпечити тривалу автономну роботу.
- **Обсяг пам'яті:** Сенсорні вузли зазвичай мають обмежений обсяг пам'яті для збереження програмного коду та даних. Це вимагає ефективного управління пам'яттю та стиснення даних.

- **Обчислювальна потужність:** Сенсорні вузли часто мають обмежену обчислювальну потужність. Це може ускладнювати обробку даних на місці та вимагати оптимізованого програмного забезпечення.
- **Пропускна здатність:** БСМ використовують бездротовий зв'язок для передачі даних, і пропускна здатність цього зв'язку обмежена. Це може впливати на швидкість передачі даних і мережеву завантаженість.
- **Зона покриття:** Зони покриття сенсорних вузлів обмежені бездротовим зв'язком і потужністю передавачів. Це важливо враховувати при плануванні розміщення вузлів у мережі.
- **Точність вимірювань:** Сенсори можуть мати обмежену точність вимірювань, що може впливати на якість зібраних даних.
- **Життєвий цикл компонентів:** Компоненти сенсорних вузлів мають обмежений життєвий цикл, і це може призводити до потреби у підтримці, оновленні та заміні вузлів.
- **Умови експлуатації:** Сенсори можуть використовуватися в різних умовах, включаючи важкодоступні місця, екстремальну температуру, вологість та інші несприятливі умови, що ставлять вимоги до їхньої міцності та надійності.

Ці обмеження впливають на функціональність вузлів у мобільних сенсорних мережах та вимагають ретельного управління ресурсами для забезпечення їх тривалої роботи. Хоча сенсорні вузли мають досить багато різних технічних обмежень, але вони також мають великий потенціал для збору важливої інформації з навколишнього середовища та сприяють автоматизації процесів у різних галузях, що дозволяє збільшити ефективність та якість обслуговування. Для подолання цих обмежень необхідно вдосконалювати технології та методи оптимізації, спрямовані на збільшення енергоефективності, поліпшення обчислювальних можливостей та розширення можливостей мережевого зв'язку. Застосування новітніх методів

управління енергією, розробка більш продуктивних алгоритмів обробки даних та забезпечення високого рівня безпеки та приватності можуть сприяти подоланню цих обмежень.

1.3.5 Вплив технічних характеристик сенсорів на результати їх застосувань

Результати застосувань мобільних сенсорних мереж напряму залежать від технічних характеристик сенсорів. В сільському господарстві, сенсори з високою точністю вимірювань та великою швидкістю передачі даних допомагають фермерам приймати обґрунтовані рішення щодо поливу, використання добрив та інших аспектів сільського господарства. У медицині, технічні характеристики сенсорів впливають на точність та надійність моніторингу стану пацієнтів. Сенсори з великою швидкістю передачі даних допомагають лікарям отримувати дані в реальному часі та вчасно реагувати на зміни в стані пацієнтів. В промисловості, технічні характеристики сенсорів визначають їхню здатність вчасно виявляти поломки та передавати дані для аналізу технічним спеціалістам. Сенсори з великими можливостями передачі даних та надійною роботою в умовах високих температур або вологості можуть збільшити надійність обладнання та підвищити продуктивність виробництва [16].

Відтак, технічні характеристики сенсорних вузлів є ключовим фактором у досягненні успіху в різних застосуваннях мобільних сенсорних мереж. Вони дозволяють досягти точних та надійних вимірювань, забезпечити стійкий зв'язок та підвищити ефективність всіх галузей де вони використовуються, від сільського господарства до медицини та промисловості.

1.4 Аналіз топологій бездротових сенсорних мереж.

Розвиток бездротових сенсорних мереж викликає постійний інтерес до вдосконалення та розробки нових методів маршрутизації. Цей інтерес зумовлений різноманітністю умов, у яких доводиться функціонувати таким

мережам, та унікальними сценаріями їх застосування. Відповідно, розробка оптимальних методів маршрутизації стає важливим фактором для досягнення ефективної передачі даних, подовження тривалості роботи сенсорних вузлів та мінімізації споживання енергії.

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) є складними системами, що складаються з великої кількості бездротових сенсорних вузлів, які здатні збирати та передавати різноманітні дані через бездротові зв'язки. Ці мережі можуть використовуватися для моніторингу навколишнього середовища, управління промисловими процесами, медичного моніторингу, екологічного контролю та багатьох інших сфер. Потенціал бездротових сенсорних мереж полягає в їхній здатності до збору великої кількості різноманітних даних з різних джерел, це дозволяє здійснювати комплексний аналіз навколишнього середовища та отримувати важливі дані для подальшого прийняття рішень. Однією з головних переваг БСМ є їхня можливість працювати в умовах, коли встановлення дротів є складним або взагалі неможливим. Це відкриває широкі перспективи застосування в різних областях, включаючи важкодоступні території або об'єкти. Проте, існують виклики, пов'язані з енергозабезпеченням, обмеженою пропускнуою здатністю мережі, проблемами безпеки даних та координації роботи великої кількості вузлів. Ці аспекти потребують постійного вдосконалення технологій для досягнення більшої ефективності та надійності бездротових сенсорних мереж.

Зв'язок та організація сенсорних вузлів у мобільних сенсорних мережах створюють основу їхньої функціональності та ефективності. У реалізації мережі топологія визначає структуру, шляхи передачі даних, керування енергією та загальну продуктивність системи. Топологічна організація мережі впливає на її масштабованість, стійкість, ефективність використання ресурсів та можливості управління. Найпоширенішими формами мережевих топологій що використовуються в сенсорних мережах є: зірка, лінія, шина, кільце, дерево та Mesh.

Лінійна топологія

Лінійна топологія - це організація, де сенсорні вузли утворюють послідовний ланцюг зв'язку, де кожен вузол має з'єднання тільки з двома сусідніми вузлами, як це зображено на (рис.1.5). Ця структура створює незалежні маршрути для передачі даних, які проникають через кожен вузол в послідовному порядку. Головна ідея лінійної топології полягає в тому, що кожен вузол приймає дані від одного вузла та передає їх до наступного, утворюючи ланцюг, по якому інформація може швидко пройти від одного кінця до іншого. Головною перевагою цієї топології є те, що ця топологія відносно проста для налаштування та розгортання, оскільки вимагає лише прямих з'єднань між вузлами. Також перевагою є швидкість передачі даних та спрощена маршрутизація, оскільки дані можуть швидко пройти через кожен вузол по ланцюгу. Однак через обмежену пропускну здатність ця топологія є менш ефективною у великих мережах, крім того мережа має вразливість до відмови вузлів, якщо вузол виходить з ладу то це може призвести до зупинки передачі даних у всій мережі.

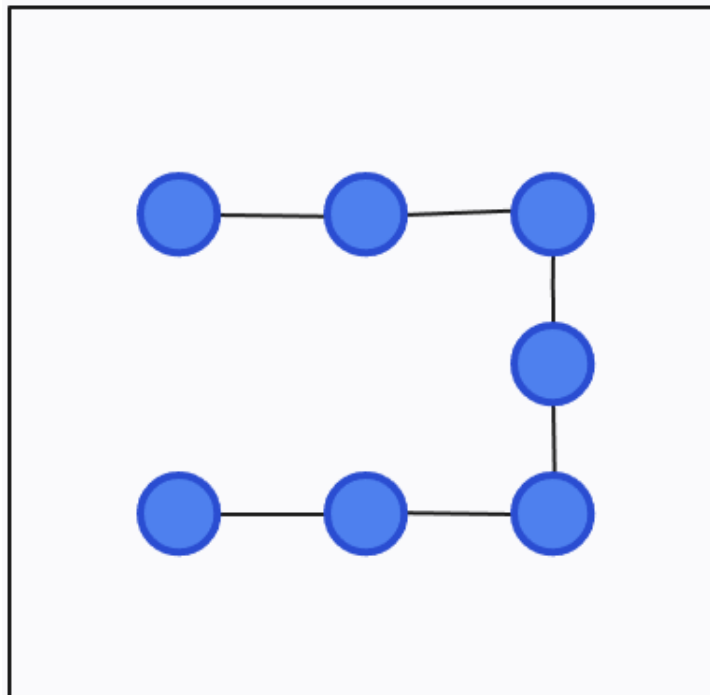


Рис. 1.5 Мережева структура лінійної топології

Топологія “Кільце”

Мережа що використовує топологію “кільце” побудована таким чином, як це показано на (рис.1.6). Дана топологія є досить схожою з лінійною топологією, в якій кінцеві вузли з'єднані один з одним. При використанні цієї топології, кожен вузол в мережі з'єднується лише з двома іншими вузлами. Передача даних відбувається наступним чином, вузол що є джерелом надсилає дані, вони перетікають від джерела в одному напрямку поступово до кожного вузла на шляху, до того моменту поки дані не знайдуть необхідний вузол який є одержувачем [3]. Однією з основних переваг цієї топології є те що її досить легко встановити та переналаштувати відповідно до потреб, але процес керування такою мережею може бути дорогим, тому що через збій або вихід з ладу одного вузла вся мережа що побудована за кільцевою топологією може стати несправною. Вирішенням цієї проблеми було додавання другого кільця зв'язку, що передавало дані в протилежному напрямі. Кільцева топологія певний час була поширеною але з часом вона втратила свою популярність тому зараз використовується досить рідко.

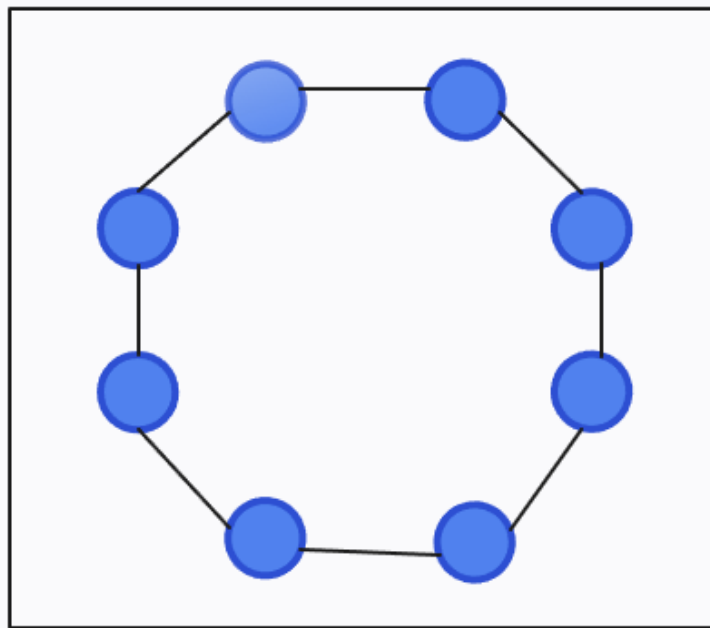


Рис. 1.6 Мережева структура топології “Кільце”

Топологія “Дерево”

Топологія "Дерево" у мобільних сенсорних мережах передбачає ієрархічну структуру організації вузлів, в цій топології виділяється один “кореневий” вузол що виконує роль основного мережевого маршрутизатора (рис.1.7). Кореневі вузли розміщені на верхніх рівнях ієрархії, а звичайні сенсорні вузли - на нижніх. Під час роботи мережі, сенсорні вузли збирають та передають свої дані через “кореневі” вузли, які відповідають за їхню передачу до базових станцій або інших вузлів в мережі [17]. Серед переваг даної топології можна виділити масштабованість, а також те, що досить проста структура мережі дає можливість легко визначити та ізолювати несправності що виникають при роботі мережі. Також варто зазначити недоліки даної топології, одним з основних недоліків є обмежений обсяг передачі даних та збільшення затримок у великих мережах, це зумовлено структурою мережі в якій кожен сенсорний вузол має лише один шлях передачі даних. Також недоліком є залежність від “кореневого” вузла, вихід з ладу цього вузла може вплинути на ефективність передачі даних всього кластеру.

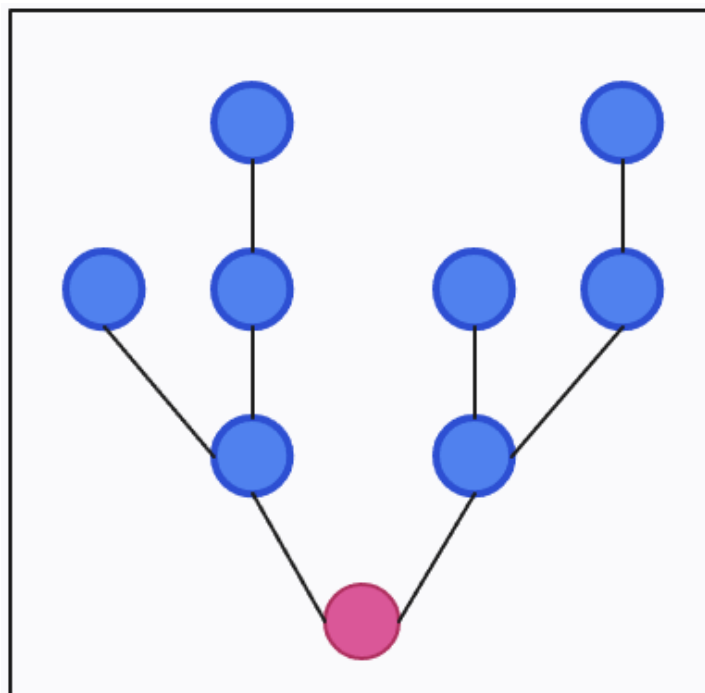


Рис.1.7 Мережева структура топології “Дерево”

Топологія “Зірка”

Топологія "Зірка" є однією з найпоширеніших та часто застосовується в малих або статичних мережах, де потрібна проста організація та надійність зв'язку. Дана топологія передбачає структуру, де кожен сенсорний вузол підключений безпосередньо до центрального вузла який є концентратором (рис.1.8), у великих мережах це може стати фактором, що обмежує їхній обсяг та продуктивність передачі даних. Ця топологія досить проста для реалізації та управління [15]. Робота кожного сенсорного вузла не залежить від інших вузлів, у випадку виходження з ладу одного сенсорного вузла, інші вузли мережі не страждають і можуть продовжувати працювати, крім того завдяки простоті структури, локалізація проблем у такій мережі може бути досить легкою. Аналогічно до топології “дерево”, в цій топології відмова центрального вузла може призвести до втрати зв'язку з усіма сенсорними вузлами. Через обмежену дальність передачі даних між кожним сенсорним вузлом та базовою станцією, покриття такої мережі теж обмежується, тому в умовах, де потрібно щоб покриття мережі охоплювало велику площу, ефективність топології "Зірка" є низькою.

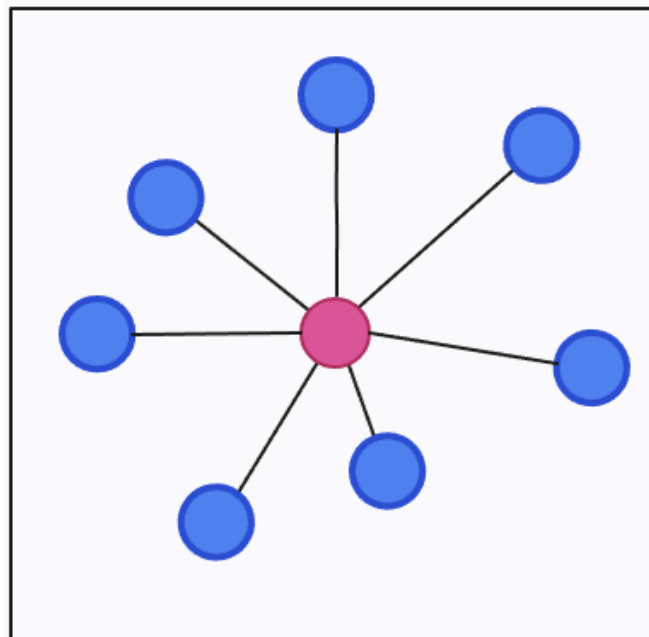


Рис. 1.8 Мережева структура топології “Зірка”

Топологія “Mesh”

Топологія "Mesh" є однією з найбільш гнучких і розширюваних структур. В кожній мережі з такою топологією кожен сенсорний вузол може бути зв'язаний з кількома іншими вузлами (рис.1.9), формуючи мережу, де дані можуть передаватися через різноманітні шляхи та альтернативні маршрути. Одна з ключових особливостей топології "Mesh" полягає в тому, що вузли можуть динамічно адаптуватися до змін у мережі. Якщо один вузол виявляється недоступним або виникають якісь перешкоди, інші вузли можуть автоматично встановити нові маршрути, щоб забезпечити неперервність зв'язку та надійність передачі даних. Це дає можливість забезпечити досить гарну стійкість мережі до відмов та підвищує її надійність [29]. Крім того, оскільки кожен вузол має декілька шляхів передачі даних це сприяє збільшенню пропускної здатності мережі, також це дозволяє уникнути перевантажень вузлів та забезпечити більш ефективне використання ресурсів. Керування маршрутизацією в мережах що використовують Mesh топологію може бути складним завданням через потребу у постійному оновленні та виборі найбільш ефективного шляху передачі даних.

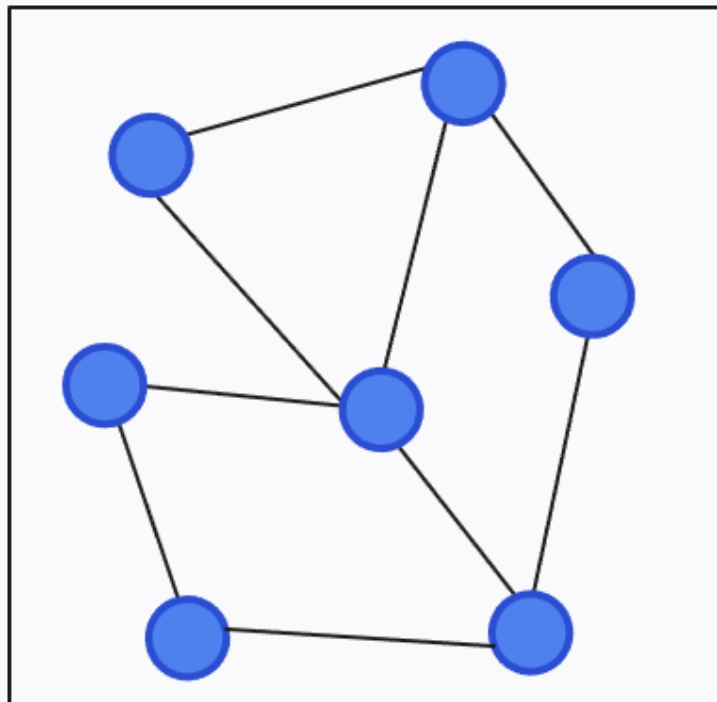


Рис. 1.9 Мережева структура топології “Mesh”

Топологія “Шина”

Топологія "Шина" - це структура мережі, що базується на одному центральному каналі передачі даних, до якого підключені всі вузли (рис. 1.10). Кожен вузол у цій мережі спільно використовує цей канал для передачі інформації, яка відправляється одним вузлом та призначена іншому. Основна ідея топології "Шина" полягає в тому, що всі вузли мають доступ до спільного каналу, але лише вузол, що відправляє дані, має можливість передачі в цей канал у певний момент часу. Кожен вузол отримує сигнали, але тільки вузол, якому вони призначені, сприймає та обробляє ці дані. Ця топологія вважається простою для встановлення, також завдяки стратегії інтегрованої активної та пасивної архітектури на основі пріоритету рівня класифікації що застосовується системою топології шинної мережі, дана топологія дозволяє забезпечити ефективну систему керування пріоритетом шини. Незважаючи на ці переваги, топологія "Шина" має обмеження. Вона може бути менш ефективною у великих мережах, оскільки збільшення кількості вузлів може призвести до перенасичення каналу передачі даних та зниження швидкості передачі.

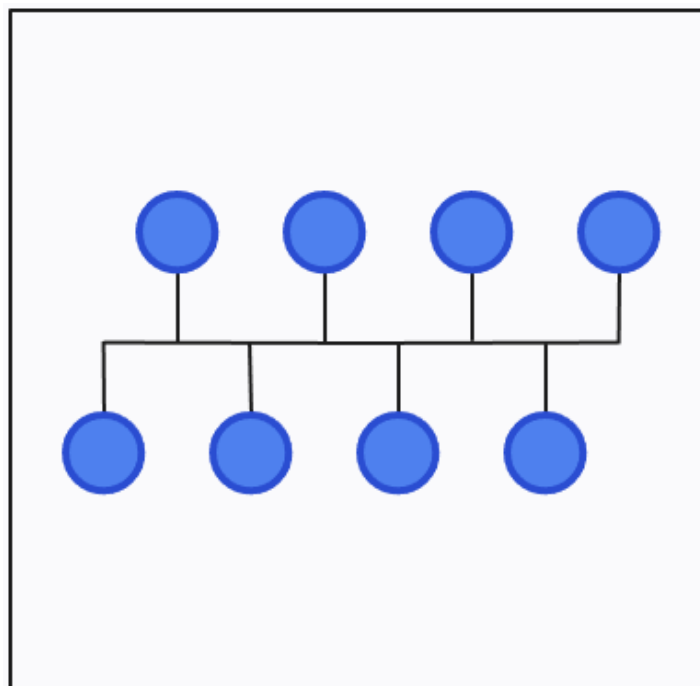


Рис.1.10 Мережева структура топології “Шина”

Висновки

В даному розділі було проведено загальний огляд бездротових сенсорних мереж. Визначено що всі сенсорні мережі мають два основних елементи, це базові станції та сенсорні вузли. БСМ є перспективною технологією що може застосовуватися в багатьох сферах життєдіяльності людини, серед них: медична сфера, військова, аграрний сектор тощо. Як і інші мережеві технології, бездротові сенсорні мережі використовують різні топології такі як кільце, зірка, дерево та інші. Мобільні сенсорні мережі залишаються динамічним і швидкозмінним полем досліджень та розвитку. Технічні характеристики сенсорів постійно поліпшуються, і нові можливості відкриваються для різних галузей. Також науковці та інженери, постійно розробляють більш потужні сенсори, які забезпечать кращу точність та надійність, а також розширення мереж і покращення методів передачі даних.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ АЛГОРИТМІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

Аналіз існуючих методів енергоефективної маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах (БСМ) є надзвичайно важливим для максимізації ефективності мережі та забезпечення тривалої роботи сенсорних вузлів. Важливими аспектами, які потрібно враховувати при аналізі цих методів, є споживання енергії, пропускна здатність, затримки, стійкість до відмов та інші фактори [13]. На цей момент методи маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах (БСМ) можна класифікувати за допомогою трьох основних класів, які враховують аспекти мережевої структури та організації, виявлення маршруту та керування протоколами (рис. 2.1).



Рис.2.1 Класифікація методів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах.

2.1 Класифікація на основі керування протоколами

Методи маршрутизації можна також класифікувати на основі функцій, які вони здійснюють (рис.2.2).

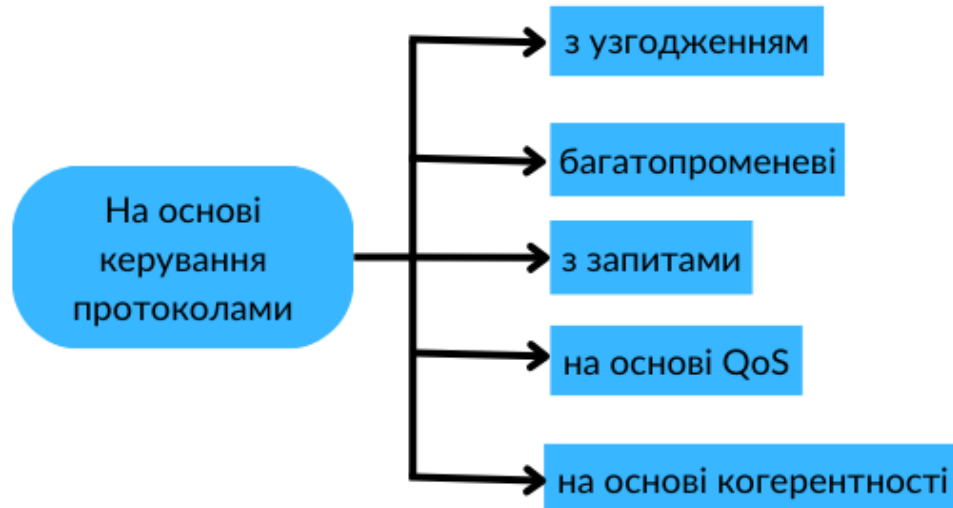


Рис.2.2 Класифікація на основі керування протоколами

Наприклад є протоколи на основі узгодження (Negotiation-Based Protocols), ці протоколи використовують процес взаємодії між сенсорними вузлами для визначення маршрутів. Вони враховують стан сенсорних вузлів та умови мережі під час прийняття рішень про маршрутизацію, прикладами протоколів на основі взаємодії є SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) який використовує договірний процес між сенсорними вузлами для оптимізації передачі даних в безпроводових сенсорних мережах, та SPAN (Sensor Protocol for Activity Negotiation). Протоколи багатопроменевого маршруту (Multipath-Based Protocols) розроблені з метою підвищення надійності та стійкості безпроводових сенсорних мереж до втрати даних [25]. Вони дозволяють сенсорним вузлам використовувати кілька альтернативних маршрутів для передачі даних. Це стає актуальним у ситуаціях, коли один маршрут може бути ненадійним через перешкоди, втрати пакетів або зміну умов мережі. Протоколи на основі якості обслуговування (QoS-Based Protocols) ставлять за мету оптимізацію маршрутів для забезпечення високої якості передачі даних, зокрема для мультимедійних даних та інших

застосувань, де важлива якість обслуговування [10, 27]. Протоколи на основі запиту (Query-Based Protocols), основна ідея протоколів цього типу полягає в тому що вони визначають маршрути лише тоді, коли сенсорні вузли в мережі ініціюють запити на отримання конкретних даних, тобто сенсорні вузли будуть надсилати дані лише у відповідь на запити, створені вузлом призначення. Протоколи на основі когерентності (Coherent-Based Protocols) розглядають сенсорну мережу як єдиний організм, де сенсорні вузли працюють спільно для вирішення задач маршрутизації, що дозволяє рівномірно розподіляти навантаження та енергію між сенсорними вузлами, та покращує тривалість служби мережі.

2.2 Класифікація на основі виявлення маршруту

Основним принципом цих методів є визначення маршруту для передачі даних в режимі реального часу. Ці методи можна розділити на три основні підкласи, а саме: проактивні, реактивні та гібридні методи маршрутизації (Рис.2.3).

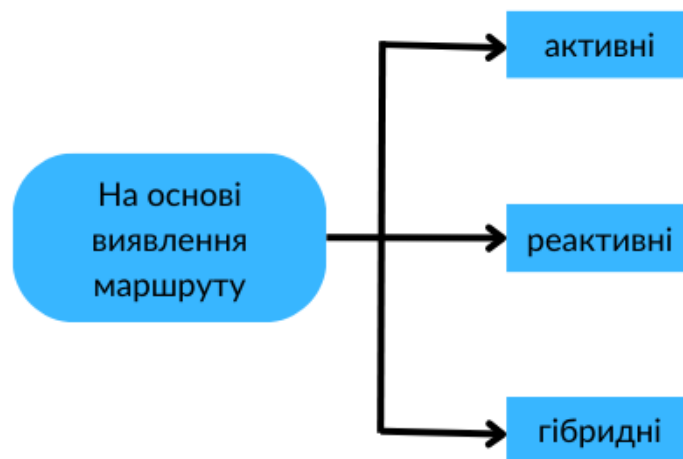


Рис.2.3 Класифікація на основі виявлення маршруту

2.2.1 Проактивні (табличні) протоколи маршрутизації

Проактивні, або табличні, методи маршрутизації в бездротових сенсорних мережах передбачають попереднє визначення маршрутів та

підтримку актуальних таблиць маршрутизації на кожному сенсорному вузлі. Основна ідея полягає в тому, що сенсорні вузли вже заздалегідь визначають маршрути для передачі даних, тобто до фактичної потреби в передачі даних. Кожен сенсорний вузол заздалегідь знає маршрути до інших вузлів у мережі, для цього сенсорні вузли постійно відстежують стан мережі та вимірюють параметри зв'язку між вузлами. Ця інформація використовується для оновлення та підтримки таблиць маршрутизації на кожному вузлі. Така маршрутизація позитивно впливає на затримку передачі інформації, оскільки маршрути вже визначені перед передачею даних [18]. Однак варто зазначити, що така маршрутизація має певні недоліки, наприклад збільшене споживання енергії, оскільки сенсорні вузли постійно проводять моніторинг стану мережі та оновлюють таблиці маршрутизації, навіть якщо активна передача даних відсутня.

2.2.2 Реактивні протоколи маршрутизації

Реактивні протоколи, також відомі як протоколи за вимогою, визначають маршрути лише в той момент, коли це потрібно. Коли вузол потребує відправити дані, він ініціює процес визначення маршруту. В порівнянні з проактивними протоколами маршрутизації, основна перевага реактивних протоколів полягає в зменшенні споживання енергії, оскільки таблиці маршрутизації не підтримуються постійно [49]. Сенсорні вузли заощаджують енергію, не витрачаючи її на оновлення таблиць маршрутизації, як це роблять проактивні методи, проте це також і впливає на затримки оскільки маршрути формуються лише на запит, і процес передачі інформації може займати деякий час. Загалом, реактивні методи маршрутизації є найкращим варіантом для сценаріїв з обмеженими ресурсами, де важлива оптимізація енергоспоживання та ефективне використання мережі.

2.2.3 Гібридні протоколи маршрутизації

Гібридні протоколи комбінують елементи як проактивних, так і реактивних підходів для підвищення ефективності маршрутизації [13]. Вони підтримують таблиці маршрутизації, але також ініціюють визначення маршрутів за вимогою. Цей тип протоколів спрямований на збалансування між актуальністю інформації про маршрути та мінімізацією навантаження. Гібридні протоколи зазвичай підтримують певну кількість попередньо визначених маршрутів, які активуються за замовчуванням. Це дозволяє зменшити затримки в мережі, оскільки деякі маршрути вже відомі, але також реагують на запити сенсорних вузлів для визначення нових маршрутів, ці протоколи спрямовані на досягнення балансу між швидкістю визначення маршрутів і ефективністю використання енергії. Вони спроектовані так, щоб зменшити затримки у мережі, які характерні для реактивних методів, і одночасно ефективно використовувати ресурси, подібно до проактивних методів.

2.3 Класифікація на основі мережевої структури або організації.

Методи маршрутизації на основі мережевої структури в безпроводових сенсорних мережах (БСМ) визначають, яким чином сенсорні вузли організовані та взаємодіють між собою. Ця категорія методів маршрутизації враховує мережеву топологію, структуру та організацію сенсорних вузлів (рис.2.4).

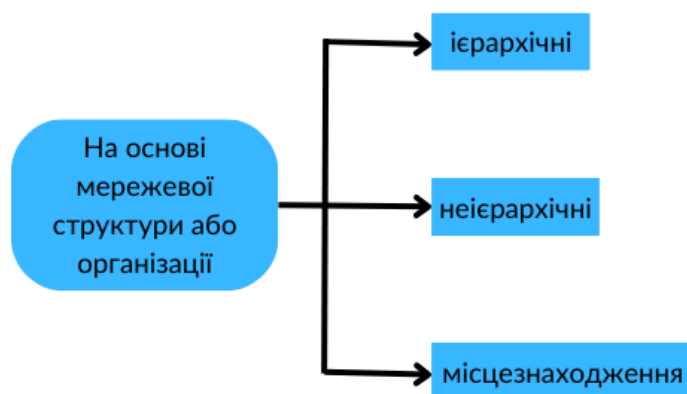


Рис.2.4 Класифікація на основі мережевої структури

Основні підкатегорії методів маршрутизації на основі мережевої структури включають:

2.3.1 Маршрутизація на основі місцезнаходження

Методи маршрутизації на основі місцезнаходження в безпроводових сенсорних мережах використовують фізичну географічну інформацію про розташування сенсорних вузлів для прийняття рішень щодо передачі даних. Ці методи враховують, що сенсорні вузли можуть мати різні географічні координати в просторі і використовують цю інформацію для побудови оптимальних маршрутів. При використанні даних методів маршрутизації, кожен сенсорний вузол в мережі має інформацію про своє точне місцезнаходження, яке може бути визначено за допомогою GPS або інших технологій, це дозволяє забезпечити кращу ефективність і масштабованість [22]. Інформація про місцезнаходження включає координати в просторі (широту, довготу, висоту) та використовується маршрутизаційними протоколами для обчислення відстаней між сенсорними вузлами та визначення найоптимальнішого маршруту для передачі даних, зазвичай дані будуть передаватися до сусідніх сенсорних вузлів, які найближче до отримувача. Інтелектуальне прийняття рішень є ключовою особливістю протоколів маршрутизації на основі місцезнаходження в безпроводових сенсорних мережах, ця особливість дозволяє оптимізувати маршрути з урахуванням різноманітних факторів, що можуть впливати на ефективність мережі та якість обслуговування, вузол що надсилає інформацію додає місце призначення до кожного пакету даних що відправляється, проміжні вузли що на шляху отримують цей пакет, надсилають його сусідам з одним переходом, які географічно найближчі до пункту призначення, цей процес буде тривати, до тих пір поки вузол призначення не отримає пакети даних [24]. Можна виділити наступні переваги маршрутизації на основі місцезнаходження:

- Ефективність маршрутизації: Враховуючи фізичне розташування сенсорних вузлів, маршрутизаційні протоколи можуть вибирати

оптимальні маршрути для передачі даних. Це означає, що сенсорні вузли можуть обирати шляхи, які мінімізують витрати енергії та забезпечують більш швидку доставку даних до призначення.

- **Збільшена енергоефективність:** Маршрутизація на основі місцезнаходження дозволяє сенсорним вузлам ефективніше управляти витратами енергії. Вони можуть вибирати маршрути, які мінімізують використання енергії на передачу та прийом даних, що сприяє подовженню терміну служби сенсорних вузлів.
- **Адаптація до змін середовища:** Маршрутизація на основі місцезнаходження дозволяє сенсорним вузлам реагувати на зміни у фізичному середовищі. Вони можуть адаптувати маршрути та оптимізувати їх під час зміни місця розташування вузлів або при з'явленні перешкод у мережі.

Варто зазначити що незважаючи на всі переваги, методи маршрутизації на основі місцезнаходження також мають свої обмеження, зокрема вимагають більшої кількості ресурсів для визначення місця розташування вузлів та можуть бути більш складними у реалізації. Однак при правильному використанні вони виявляються дуже корисними для створення продуктивних та енергоефективних безпроводових сенсорних мереж.

Протокол GAF

Geographic Adaptive Fidelity (GAF) є протоколом маршрутизації що поєднує інформацію про місцезнаходження сенсорних вузлів і спроектований для підвищення продуктивності та енергоефективності мережі. Протокол GAF розділяє область в якій знаходиться мережа на декілька однакових віртуальних сіток [47]. Щоб визначити свою належність до конкретної сітки, кожен вузол в мережі використовує географічні координати на основі GPS, вузол що має найбільшу залишкову енергію є головним в квадраті, саме

цей вузол відповідає за пересилання даних на базову станцію, в цей момент інші вузли в тому самому квадраті знаходяться в сплячому режимі. (рис.2.5)

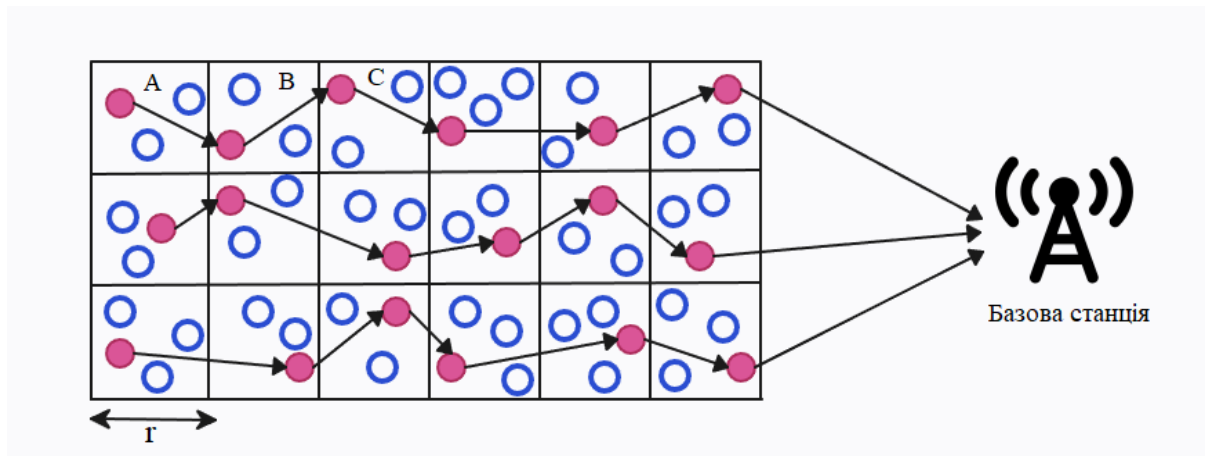


Рис.2.5 Віртуальна сітка в протоголі GAF

За допомогою формули наведеної нижче можна вивести розмір сітки r із співвідношення між r і радіусом дії R :

$$r \leq R/\sqrt{5}$$

В протоколі GAF вузли можуть перебувати в трьох різних станах. Починається все з того що вузол знаходиться в стані виявлення, в цьому стані він прослуховує повідомлення вузлів що знаходяться в його квадраті та обмінюється повідомленнями про відкриття, все це відбувається з включеним ідентифікатором сітки, це необхідно для того щоб знайти інші вузли в своїй сітці. Вузол встановлює таймер на деякий час, якщо впродовж цього часу він не чує жодного повідомлення про відкриття від інших вузлів, то цей вузол стає головним. У випадку якщо крім цього вузла, в стані виявлення знаходиться ще хоча б один вузол то головним стає той що має найбільший залишок енергії. Вузол що виконує роль головного, буде залишатися активним впродовж часу який визначається іншим таймером, після того як час на другому таймері закінчиться, вузол змінює свій стан на відкриття це дає можливість іншим вузлам в цій самій сітці стати головним. Після цього, процес вибору головного вузла повторюється, якщо головним вузлом стає

інший вузол, то вузол який був до цього моменту головним переходить у стан сну.

Протокол GAF надає можливість збалансувати навантаження та енерговитрати в мережі, розподіляючи трафік між вузлами, також даний алгоритм може адаптуватися до змін у мережі, таких як рух сенсорних вузлів або зміни умов передачі даних, це дозволяє постійно оптимізовувати маршрути передачі даних та уникнути зайвих енерговитрат.

2.3.2 Неієрархічна маршрутизація

Неієрархічна маршрутизація є альтернативним методом організації безпроводових сенсорних мереж (БСМ) порівняно з ієрархічними підходами, такими як кластеризація. У цьому методі відсутня ієрархія, і кожен сенсорний вузол взаємодіє безпосередньо з іншими вузлами, щоб передавати дані до їх призначених місць. (рис.2.6)

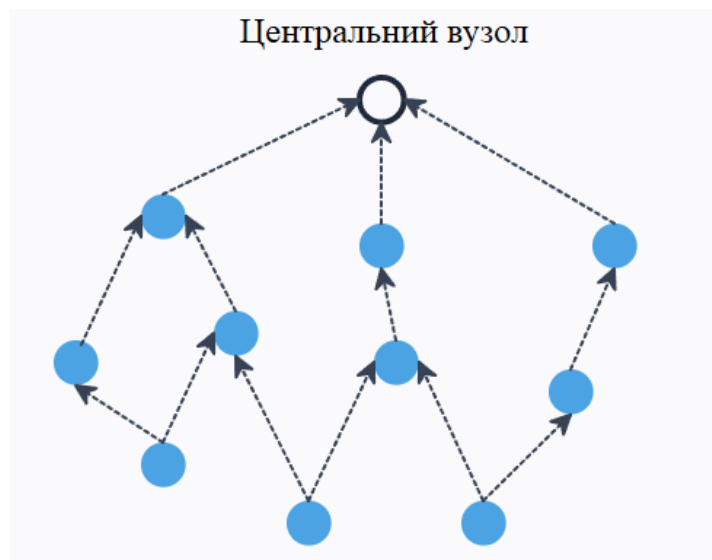


Рис.2.6 Неієрархічна маршрутизація

Неієрархічна маршрутизація має певні особливості, деякі з них можна віднести до переваг цього типу маршрутизації, а деякі навпаки є недоліками, до переваг неієрархічної маршрутизації можна віднести децентралізовану структуру, кожен сенсорний вузол є рівноправним і може взаємодіяти з будь-яким іншим вузлом, це дозволяє спростити вибір маршруту та зменшити

залежність від вузлів-посередників, також така маршрутизація дозволяє більш ефективно адаптуватися до змін у мережі, таких як виходи з ладу деяких вузлів, зміни в навантаженні або потреба у перенаправленні даних. Недоліками неієрархічної маршрутизації є складніше керування маршрутизацією, оскільки відсутність централізованої ієрархії може призвести до більш складних методів керування маршрутизацією та відлагодження мережі. Без централізованого планування та контролю важко визначити, де можуть виникати проблеми у мережі [30]. Відновлення та виправлення помилок стають складними завданнями. Діагностика та виявлення несправностей вимагає більше зусиль та часу, також відсутність централізованого керування може сприяти зростанню кількості керувальних повідомлень, що обмінюються між сенсорними вузлами. Це може призвести до зайвого трафіку в мережі та споживання додаткових ресурсів, включаючи енергію. Представниками класу неієрархічних протоколів є:

- **Протокол Rumor Routing**

Цей протокол є методом маршрутизації в бездротових сенсорних мережах, що базується на розповсюдженні "чутток" в мережі для передачі даних. Основною ідеєю даного протоколу є використання спеціальних довготривалих повідомлень "агентів", ці повідомлення містять локальну інформацію про події та необхідні для прокладання шляхів, що будуть вести до події, тоді коли вона відбудеться, у випадку якщо агенти стикаються з коротшим шляхом, вони оновлюють таблиці маршрутизації для відображення найоптимальнішого шляху [42]. Коли агент доходить до вузла, він додає до своєї таблиці маршрутизації всі сусідні вузли. Агенти можуть бути запуснені в мережі для доставки даних до конкретного вузла або для розповсюдження інформації по всій мережі, в процесі пересилання агенти можуть використовувати випадковий вибір напрямку або розраховувати градієнти, для того щоб

вибрати оптимальний маршрут доставки повідомлення [31]. Процес роботи протоколу Rumor routing зображено на (рис.2.7).

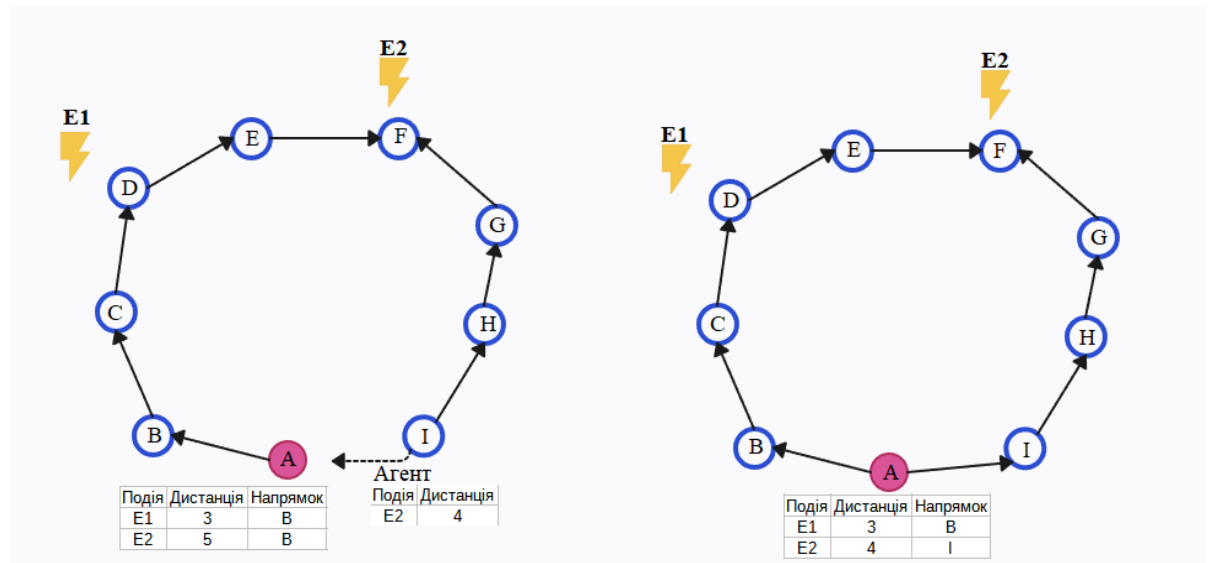


Рис.2.7 принцип роботи протоколу Rumor routing

Відбулися дві події E1 та E2. Вузол A має в своїй таблиці маршрутизації шлях до цих подій через вузол B, агент що дійшов від вузла I до вузла A має свою власну таблицю маршрутизації та також знає шлях до події E2, але вже через вузол I. Агент синхронізує свою таблицю маршрутизації з таблицею вузла A, після цього вузол A розуміє що дані про подію E2 можна отримати також і через вузол I, при цьому відповідно до таблиць маршрутизації, довжина маршруту до події E2 через вузол I буде навіть меншою ніж довжина маршруту через вузол B. Після завершення синхронізації, таблиці маршрутизації вузла A будуть оновлені з урахуванням тієї інформації що мав агент [46].

Головною перевагою даного протоколу є його висока стійкість до збоїв та масштабованість. Він може працювати в мережах зі сотнями або навіть тисячами вузлів, навіть якщо деякі вузли вийшли з ладу, мережа все одно здатна ефективно передавати дані, крім того цей протокол може забезпечити баланс навантаження в мережі та витрати енергії.

Проте також протокол Rumor Routing має свої недоліки. Одним із них є потенційний зайвий обсяг агентів в мережі, що може призвести до надмірного трафіку, що може вплинути на пропускну здатність мережі та споживання енергії.

- **Протокол SPIN**

Протокол маршрутизації SPIN (Sensor Protocol for Information via Negotiation) спрямований на передачу даних за допомогою переговорів між сенсорними вузлами. Головна особливість протоколу SPIN полягає в тому, що сенсорні вузли в мережі можуть взаємодіяти між собою та обмінюватися даними без необхідності підтримувати постійно актуалізовані таблиці маршрутизації, замість цього вузли ініціюють запити на передачу даних лише в тих випадках, коли є актуальна інформація для відправки. Такий спосіб передачі даних дозволяє мінімізувати споживання енергії та гарантує відсутність зайвих даних, які надсилаються по всій мережі [43].

Протокол SPIN є триступеневим протоколом, тобто для зв'язку між собою, сенсорні вузли використовують три типи повідомлень:

- ADV - використовується для оголошення нових даних.
- REQ - використовується для запиту даних.
- DATA - використовується для надсилання самих даних.

Протокол запускається, коли сенсорний вузол отримує нові дані, якими бажає поділитися. Це робиться шляхом трансляції повідомлення ADV, що містить метадані. У випадку якщо сусід зацікавлений у даних, він надсилає повідомлення REQ для запиту даних, і після цього дані надсилаються цьому сусідньому вузлу, потім сусідній сенсорний вузол повторює аналогічним чином цей процес зі своїми сусідами. В результаті вся область датчика отримає копію даних. Варто зазначити,

що на повідомлення ADV відповідають тільки ті вузли, що не мають копії даних які інший вузол хоче передати [44]. Даний процес зображено на (рис.2.8)

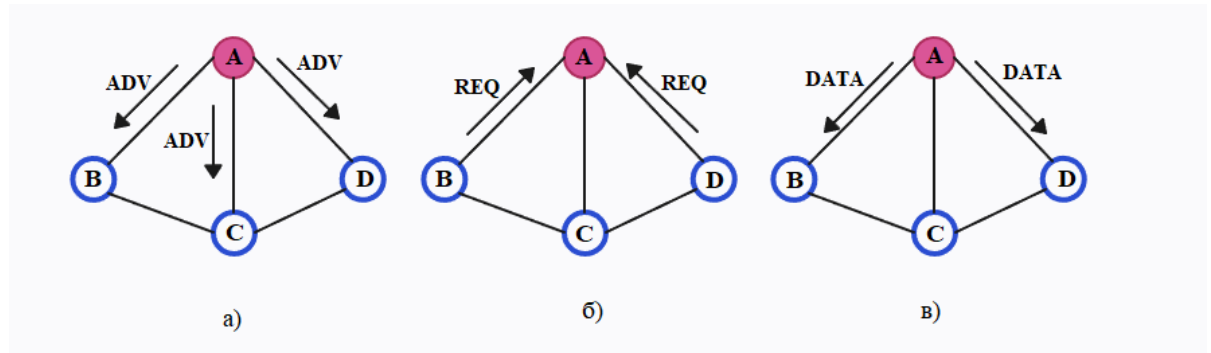


Рис.2.8 Принцип роботи протоколу SPIN: а – фаза інформування, б — фаза запиту, в — фаза передачі інформації

До сімейства протоколів SPIN входять чотири протоколи: SPIN-PP, SPIN-BC, SPIN-RL, SPIN-EC і модифікованого SPIN(MSPIN).

SPIN-PP є протоколом що оптимізований для мереж, що використовують середовище передачі «точка-точка», де вузли A і B можуть спілкуватися виключно один з одним, не заважаючи іншим вузлам. Основними перевагами використання цього протоколу є його простота, а також те, що кожен вузол вимагає знати лише про своїх сусідів з одним переходом і не потребує іншої інформації про топологію [26].

SPIN-EC, аналогічно до протоколу SPIN-PP, в ньому сенсорні вузли обмінюються даними за допомогою того самого протоколу 3-стороннього рукошлякування, але в цьому протоколі також присутній і контроль за енерговитратами. Активну участь в роботі протоколу можуть брати тільки ті вузли, залишок енергії яких перевищує певний мінімальний поріг, це дає гарантію того, що вузол зможе завершити всі інші етапи протоколу. Вузол що отримав повідомлення ADV не буде надсилати повідомлення REQ, в тому випадку якщо він не має

достатньої кількості енергії для передачі повідомлення REQ, а також отримання повідомлення DATA.

SPIN-BC це різновид протоколу SPIN, спеціально розроблений для масового розповсюдження інформації в бездротових сенсорних мережах. Основна функція цього протоколу - ефективно відправляти повідомлення всім сенсорним вузлам в мережі, щоб повідомити їх про певну подію або надіслати певну інформацію. Процес роботи протоколу виглядає наступним чином, коли вузол надсилає повідомлення ADV, його отримують усі інші вузли в певному діапазоні вузла-відправника. Перш ніж відправити повідомлення REQ, вузлам що отримали повідомлення ADV, потрібно почекати певний час. Коли вузол, що не є вузлом-відправником повідомлення ADV, отримує повідомлення REQ, він скасовує свій запит, щоб не було надлишкових запитів для того самого повідомлення. Коли вузол що розсилав всім іншим повідомлення ADV отримує повідомлення REQ, він надсилає повідомлення даних (DATA) лише один раз, оскільки це ширококомовна мережа, навіть якщо він міг отримати кілька запитів на одне повідомлення.

SPIN-RL, даний протокол відрізняється від протоколу SPIN-BC, тим що вносить дві основні зміни. Кожен вузол відстежує всі повідомлення ADV, які він чує, і ті вузли, з яких він чує ці повідомлення. Якщо він не отримує жодних повідомлень типу REQ протягом певного періоду часу, він надсилає запит повторно. Сенсорні вузли мають обмеження по частоті з якою будуть повторно надсилатися повідомлення, після того як повідомлення типу DATA було надіслано, вузол повинен зачекати певний проміжок часу, перш ніж відповідати на інші запити на те саме повідомлення DATA.

Крім енергозбереження, до основних переваг протоколів типу SPIN є те, що топологічні зміни в них локалізовані, оскільки кожен вузол знає

лише своїх сусідів з одним переходом, також узгодження метаданих дозволяє досить суттєво зменшити надлишкові дані. Серед недоліків варто виділити затримки, вони можуть призвести до втрати деяких даних або до несправності системи в цілому.

- **Протокол Directed Diffusion**

Даний протокол є класичним протоколом маршрутизації, орієнтованим на дані. Основна ідея протоколу Directed Diffusion полягає в тому, що передача даних від джерела до приймача відбувається за допомогою виборчих маршрутів [38]. Перед надсиленням даних, вузли мережі використовують рекламні запити, щоб сповістити інші вузли про наявність даних або інших ресурсів, які можуть бути використані для передачі. Сенсори можуть визначати оптимальні маршрути, враховуючи різні фактори, такі як якість зв'язку, відстань до базової станції, зайнятість каналу тощо. Ця інтелектуальна передача даних допомагає знизити зайвий трафік в мережі, що зменшує енергоспоживання сенсорів. Всі сенсорні вузли в мережі зберігають кеш-таблиці, в яких фіксують інформацію про активні запити, маршрути та ресурси, що використовуються в мережі. Ця інформація включає в себе дані про доступні маршрути, рішення щодо вибору маршруту, якість зв'язку, відстань до інших вузлів, енергетичні показники тощо. Дані кеш-таблиці є досить важливими для всієї мережі, вони дають можливість сенсорним вузлам знаходити оптимальний маршрут для передачі даних [40].

Процес передачі даних за допомогою протоколу Directed Diffusion відбувається наступним чином (рис.2.9), спочатку центральний вузол розповсюджує повідомлення що він готовий приймати дані, далі між цим та сусідніми вузлами встановлюються градієнти, градієнти визначають як швидкість передачі даних, так і напрямки, у якому надсилаються події. Для того щоб збільшити надійність доставки,

запити періодично повторюються. Якщо виникає подія яка зацікавила центральний вузол то починається зворотна маршрутизація, тепер вже від вузла що має необхідну інформацію до центрального вузла, при цьому використовуються ті ж самі маршрути що були встановлені під час запиту. Як результат обирається найбільш оптимальний маршрут який є найкоротшим та дозволяє оптимізувати витрати енергії [39,41].

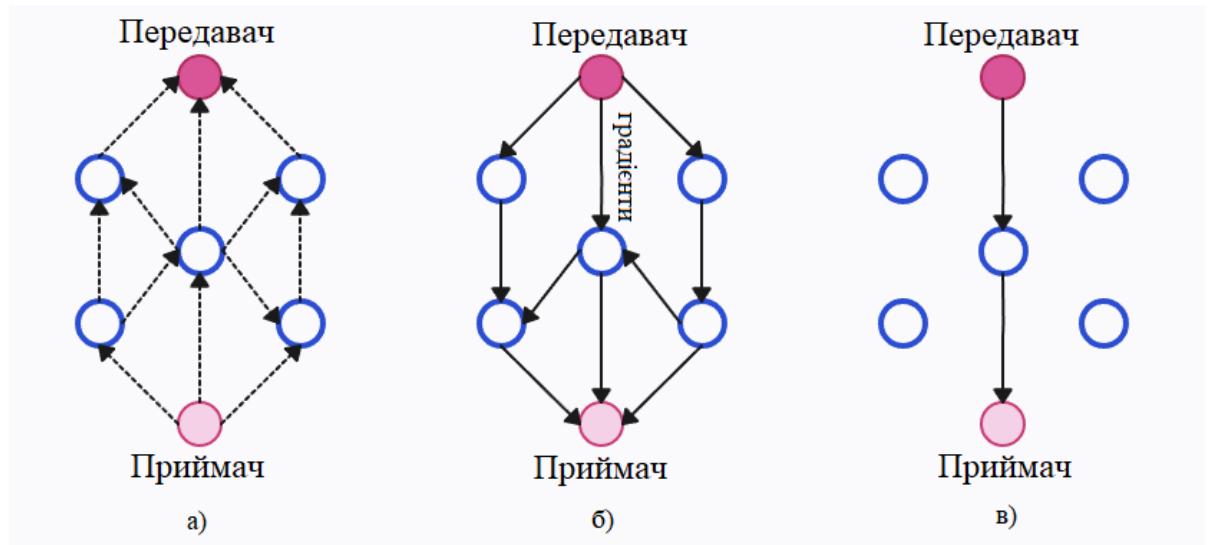


Рис.2.9 Принцип роботи протоколу Directed Diffusion

(а — розповсюдження зацікавленості, б — встановлення градієнтів, в — передача даних)

Проаналізувавши все написане вище можна зробити висновок що даний протокол має декілька переваг, наприклад він дозволяє оптимізувати використання доступної пропускну здатності, роблячи передачу даних більш ефективною та зменшуючи надмірний трафік в мереж, також механізм вибору специфічних маршрутів та перерозподілу дає можливість ефективно використовувати обмежену енергію сенсорів, до недоліків можна віднести те, що даний протокол не підходить для застосувань, де вимагається безперервна передача даних.

2.3.3 Ієрархічна маршрутизація

Ієрархічні методи маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах (БСМ) встановлюють ієрархію в організації сенсорних вузлів для ефективного керування і координації даних у мережі [6]. Однією з головних особливостей ієрархічних методів маршрутизації є кластеризація, що передбачає розділення сенсорних вузлів на окремі кластери, де кожен з них має один або декілька керуючих вузлів (cluster head). Це допомагає покращити керування та зменшити навантаження на окремі сенсорні вузли [7]. Існують два ключових способи побудови кластерної структури у безпроводових сенсорних мережах - це прямий зв'язок голів кластерів з центральним вузлом і мультихоповий зв'язок голів кластерів (рис 2.10).

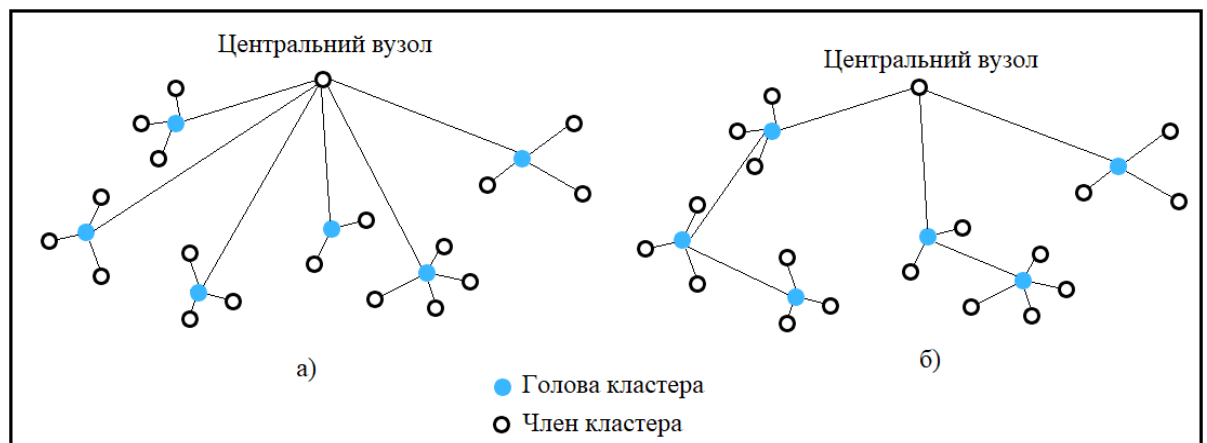


Рис.2.10 Ієрархічна маршрутизація

При прямому зв'язку голів кластерів з центральним вузлом кожен сенсорний вузол підключається безпосередньо до керуючого вузла або базової станції. Це означає, що голова кожного кластера (кластерний голова) має прямий зв'язок з центральним вузлом, і весь обмін даними відбувається через цих кластерних голів. Цей метод зв'язку може бути корисним, коли потрібно ефективно керувати кластерами та координувати роботу сенсорних вузлів [9, 48].

Мультихоповий зв'язок голів кластерів з центральним вузлом представляє інший спосіб організації кластерної структури. У цьому випадку

голови кластерів використовують мультихоповий зв'язок для сполучення з центральним вузлом. Замість прямого зв'язку, дані передаються через декілька проміжних сенсорних вузлів, створюючи багатопроточний мультихоповий шлях до центрального вузла. Цей метод може забезпечити більшу стійкість до відмов, покращити покриття мережі та забезпечити вищу робочу ефективність в великих та розповсюджених мережах. Прикладами ієрархічних протоколів маршрутизації є:

Протокол LEACH

LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) вважається одним із найпопулярніших енергоефективних протоколів для БСМ, цей протокол був розроблений для розв'язання проблеми споживання енергії сенсорними вузлами та подовження їхньої тривалості служби [19]. Однією з ключових особливостей LEACH є його ієрархічна структура (рис.2.11). Сенсорні вузли в мережі групуються в кластери, кожен із яких має свого обраного керівника або кластерного голову (cluster head), вузли які є кластерними головами відповідають за організацію та управління вузлами у своєму кластері. Основна ідея цього протоколу полягає в тому, що кластерні голови обираються на випадкових підставах серед всіх сенсорів, і вони обирають нових голів на початку кожного раунду [20]. Цей процес розподілу відповідальності допомагає рівномірно розподілити навантаження та зменшити споживання енергії сенсорами. Кластерні голови виконують функції збору даних від сенсорів у своєму кластері, стиснення і агрегації інформації, та відправки даних на базову станцію або координатор. Після завершення раунду кластерні голови можуть спробувати оптимізувати вибір нових голів на наступний раунд, щоб збільшити тривалість служби сенсорів та забезпечити рівномірний розподіл споживання енергії.

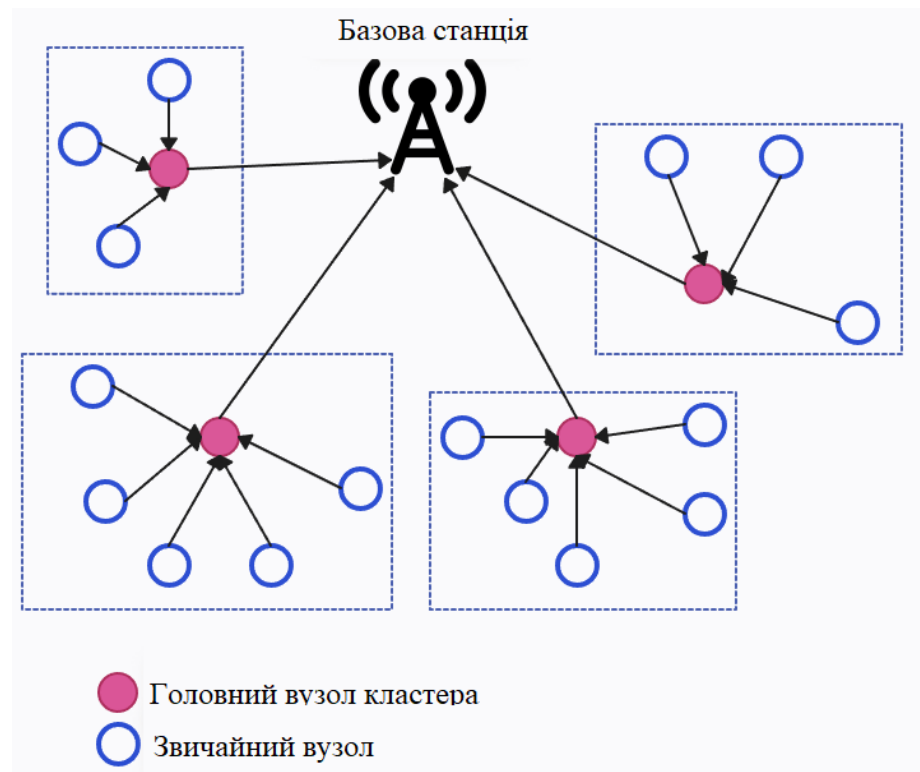


Рис.2.11 Протокол LEACH

Робота протоколу складається з декількох фаз, це:

Фаза ініціалізації (Initialization Phase) є першою фазою, цій фазі проводяться підготовчі кроки для формування кластерів та вибору кластерних голів. На початку кожного раунду сенсорні вузли випадковим чином вибираються в якості кластерних голів для наступного раунду. Прийнятний кластерний голова надсилає сповіщення вузлам, які входять до його діапазону, щоб стати членом кластера, сенсорні вузли приєднуються до найближчого кластерного голови, створюючи кластери.

Фаза вибору (Cluster Setup Phase) в цій фазі сенсорні вузли, які ще не вибрані як кластерні голови, посилають рекламні повідомлення, а кластерні голови вибираються залежно від сили сигналу та інших параметрів. Відбувається це за допомогою наступного алгоритму:

Сенсорні вузли обирають випадкове число, від 1 до 0 якщо це число є меншим ніж задана порогова вартість $T(n)$, то цей вузол стає головним в кластері. Порогова вартість визначається формулою (2.1):

$$T(n) = \frac{p}{1 - p(r \cdot \text{mod}(1/p))} \text{ якщо } n \in G \quad (2.1)$$

в цій формулі змінна p це відсоток датчиків-лідерів серед усіх сенсорних вузлів, змінна r це поточний інтервал функціонування сенсорної мережі, кількість датчиків, що не отримали роль датчиків-лідерів за останні $1/p$ інтервалів позначається змінною G .

Фаза зв'язку (Steady-State Phase) в цій фазі, після того як кластерний голова отримав відповіді від відповідних пов'язаних вузлів, на основі технології TDMA він створює розклад та надсилає його до пов'язаних членів кластера, щоб повідомити їм, коли їм потрібно передати їхню інформацію. В цій фазі дані що були зібрані окремими сенсорними вузлами передаються голові кластера, голова кластера агрегує дані отримані від сенсорних вузлів та передає їх до головного вузла. Через деякий час мережа повертається до першої фази і вузли знову починають обирати голів кластерів.

Загалом протокол LEACH є досить гарним енергоефективним протоколом, але варто зауважити що він має декілька недоліків, наприклад вибір голів кластерів здійснюється на випадковому принципі, це може призвести до неефективного розташування кластерів, оскільки іноді кластери можуть знаходитися занадто близько один до одного або, навпаки, дуже далеко, що може погано вплинути на для збереження енергії і відповідно забезпечення якості обслуговування, також випадковий вибір голів кластерів може призвести до нерівномірного розподілення навантаження між ними тобто є вірогідність що деякі кластерні голови можуть витрачати більше енергії на обробку даних та комунікацію і відповідно може призвести до скорочення їхньої тривалості служби [23].

Протокол TEEN

Протокол TEEN (Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol) є спеціалізованим енергоефективним протоколом для безпроводових сенсорних мереж. Він спрямований на виявлення подій в

середовищі та передачу даних тільки у випадку, коли виникає певний подійний поріг, тобто сенсорні вузли визначають, коли відбуваються певні події, і передають дані тільки у випадку, коли ці події перевищують певний поріг чутливості, це дає можливість зменшити кількість надлишкових даних, що передаються в мережі [12]. Архітектура цього протоколу зображена на (рис.2.12)

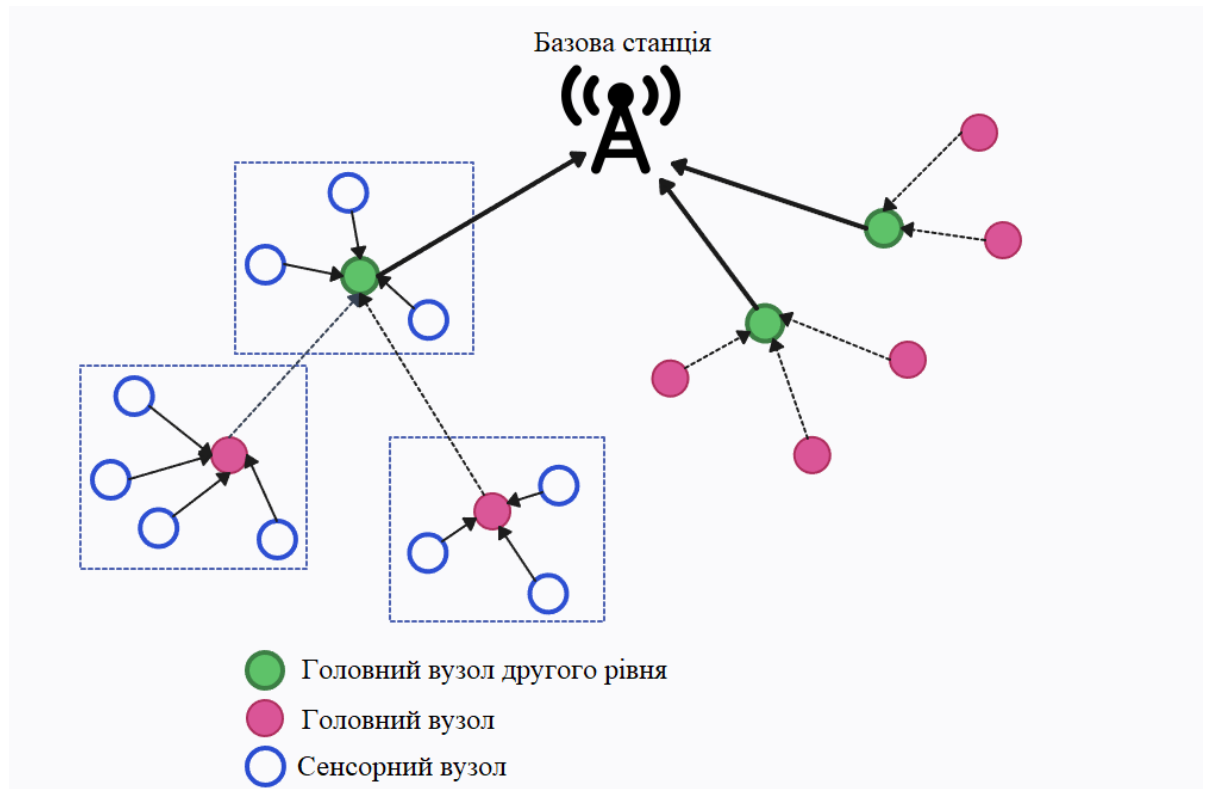


Рис.2.12 Протокол TEEN

Цей протокол є досить гнучким для застосування в різних сферах життєдіяльності людини оскільки в ньому є можливість налаштовувати та обирати різні типи подій для відстеження. Протокол TEEN використовує дві характеристики це “жорсткий поріг (HT)” та “м’який поріг (ST)”:

- Жорсткий поріг (HT): це граничне значення чутливості, подія повинна перевищити це значення, щоб бути класифікованою як така що є "важливою", за межами цього значення, вузол буде вмикати свій передавач та

надсилати дані до вузла що є головою кластера.

- М'який поріг (ST): це значення яке виступає в ролі “порога сну”. Якщо показник вимірюваного параметра опускається нижче цього значення то це означає, що подія більше не є актуальною або важливою, тобто сенсорний вузол буде переходити в режим сну.

Підсумовуючи написане можна виділити основні переваги та недоліки протоколу маршрутизації TEEN:

Даний протокол передбачає надання сенсорним вузлам можливість перебувати у режимі сну до того моменту, поки не виникає важлива подія для цього в протоколі передбачені жорсткий та м'який пороги чутливості. Це значно покращує енергоефективність цього протоколу і відповідно збільшує період життя сенсорних вузлів. Також цім пороги чутливості, допомагають уникнути зайвого обсягу даних, оскільки сенсорні вузли передають дані тільки в тому випадку, коли вони є важливими [33]. Протокол TEEN ідеально підходить для деяких додатків, де події відбуваються рідко і можуть бути легко визначені за високим порогом чутливості, але в додатках де є необхідність вимірювати часті події, використання цього протоколу буде малоефективним, оскільки вузли можуть не передати жодної інформації в тому випадку якщо порогові значення не будуть досягнуті. У випадку якщо вузли що виконують роль голови кластера знаходиться на відстані яка є більшою ніж їхній радіус зв'язку то дані можуть взагалі не передаватися, тому що передача даних виконується лише через вузли які є головами кластерів.

Протокол PEGASIS

Протокол PEGASIS (Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems) - це метод маршрутизації, який використовує ланцюговий підхід для передачі даних у бездротових сенсорних мережах (рис.2.13). Основна ідея полягає в тому, що сенсорні вузли в мережі об'єднуються в ланцюги, і дані

передаються вздовж цих ланцюгів через послідовне з'єднання сенсорів, такий спосіб допомагає зменшити витрати енергії пов'язані з передачею даних[21, 32]. Загалом цей протокол є вдосконаленою версією протоколу LEACH.

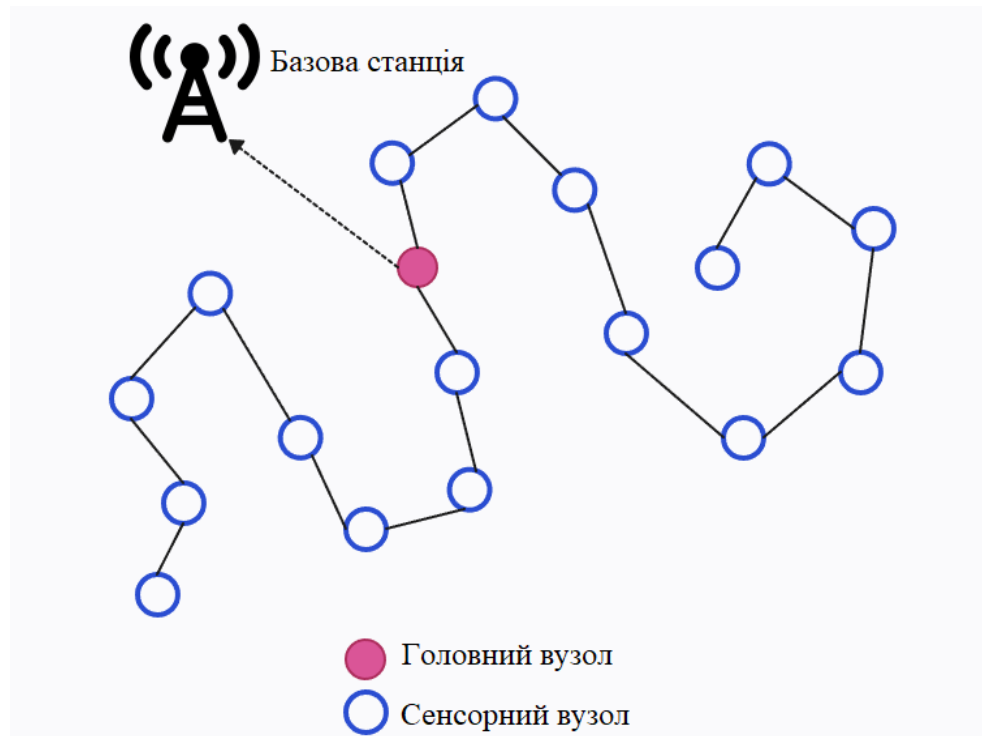


Рис.2.13 протокол PEGASIS

Процес роботи протоколу складається з трьох етапів:

Формування ланцюга: Формування ланцюга починається з найдалшого вузла від базової станції. Решта вузлів у мережі додаються до ланцюга поступово за допомогою жадібного алгоритму.

Вибір лідера ланцюга: Вузол що буде виконувати роль лідера ланцюга обирається кожен раунд випадковим чином, після того як вибір вузла який буде лідером було завершено, він передає спеціальне повідомлення-маркер для того щоб розпочати збір даних, це повідомлення проходить по всьому ланцюжку, починаючи з вузла що є кінцевим. Такий підхід до вибору вузла-лідера дозволяє збалансувати споживання енергії в усій мережі[37].

Передача даних: На цьому етапі, кожен вузол у ланцюзі керує двома повідомленнями: одне він отримує, а інше передає. (рис 2.14)

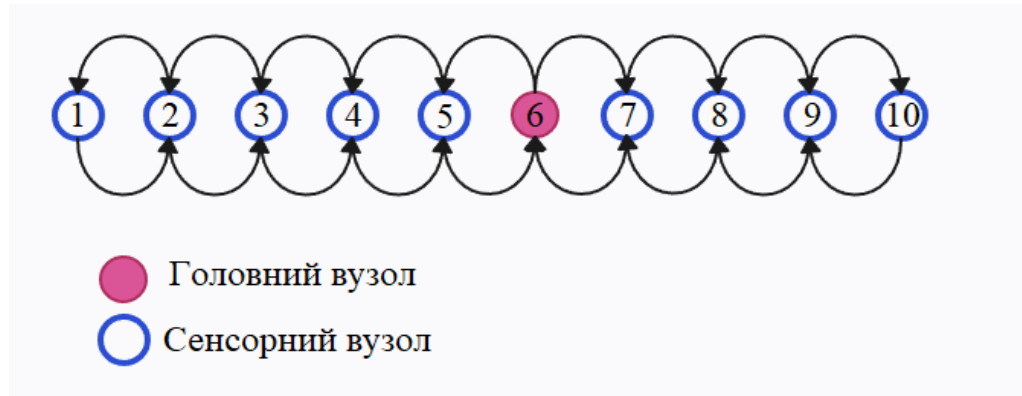


Рис.2.14 процес передачі даних

Загалом кожен вузол в ланцюзі (крім термінальних) може отримати дані лише від одного вузла-сусіда, після отримання даних від сусіда, вузол об'єднує свої дані з ним та передає його наступному вузлу, цей процес буде продовжуватися поки поки всі дані ланцюга не досягнуть вузла який є лідером ланцюга, який потім передасть отримані дані на базову станцію[36].

Підсумовуючи сказане вище можна виділити наступні переваги та недоліки протоколу PEGASIS, однією з основних переваг цього протоколу є послідовна передача даних вдовж ланцюга, це дає змогу суттєво зменшити витрати енергії на комунікацію, оскільки кожен вузол пересилає дані лише тому вузлу, який є його безпосереднім сусідом. Недоліком даного протоколу є збільшена затримка яка зумовлена тим що дані проходять через певну кількість сенсорів перед тим як досягнуть базової станції [34, 35].

2.4 Методика та порівняльний аналіз основних протоколів маршрутизації на основі класифікаційних ознак

Існує досить багато різних протоколів маршрутизації в бездротових сенсорних мережах, кожен з яких має свої переваги і обмеження. Тому перед побудовою або проектуванням сенсорних мереж, дуже важливим є порівняння основних протоколів маршрутизації, воно допомагає визначити найкращий протокол для конкретного застосування, враховуючи характеристики мережі та поставлені завдання. Для того щоб порівняльний аналіз був об'єктивним для його проведення варто використовувати певну

методику [5]. Методика багатокритеріального порівняльного аналізу протоколів маршрутизації на основі класифікаційних ознак є важливою для визначення оптимальних протоколів для використання мережі в специфічних умовах та забезпечення потреб сенсорної мережі. Цей аналіз допомагає визначити оптимальний протокол, що враховує різні критерії, такі як підтримка масштабованості, мобільність, тощо. Це дозволяє не лише підвищити продуктивність та тривалість роботи сенсорних мереж, а й забезпечити ефективне використання ресурсів мережі, що є ключовим аспектом в розробці сучасних бездротових сенсорних мереж. Як видно з рис.2.15 Методика складається з п'яти пунктів.

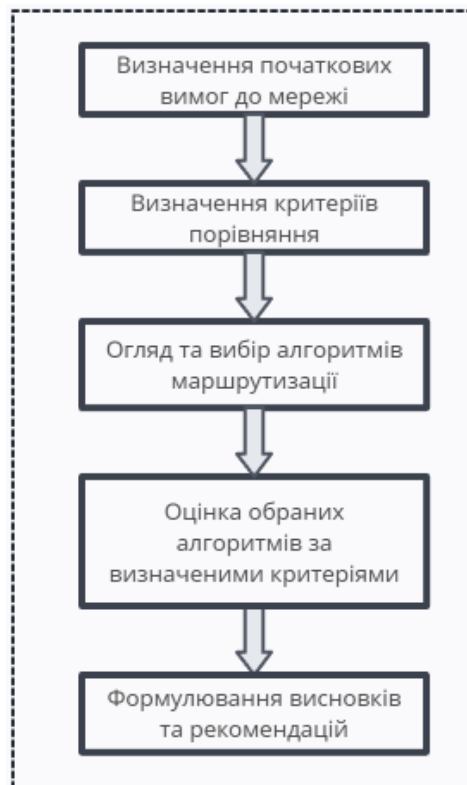


Рис. 2.15 Методика багатокритеріального порівняльного аналізу протоколів маршрутизації.

1. Відповідно до рис.2.15 Спочатку потрібно визначити початкові вимоги до мережі, з якою метою її створюють, оцінка типів та обсягу даних, які передбачається передавати в мережі. визначення обмежень щодо споживання енергії для тривалості роботи мережі.

2. Наступним кроком є визначення критеріїв порівняння, це можуть бути: мобільність, масштабованість, стійкість до відмов, тощо. Ці критерії відіграють важливу роль в оцінці протоколів маршрутизації.
3. Після того як було визначено початкові вимоги до мережі та основні критерії порівняння, потрібно виконати відбір протоколів маршрутизації для порівняння, наприклад LEACH, TEEN, PEGASIS та інші алгоритми що наведені в таблиці для подальшого аналізу.
4. Далі необхідно провести оцінку підібраних протоколів за кожним з визначених критеріїв наприклад ті що були наведені в другому пункті, це: мобільність, масштабованість, стійкість до відмов.
5. Після оцінки обраних протоколів за необхідними параметрами проводиться аналіз отриманих результатів та формується висновок щодо найбільш ефективного протоколу маршрутизації для конкретних вимог мережі. На основі сформульованого висновку можна розробити рекомендації щодо використання певних протоколів в конкретних ситуаціях.

Таблиця 2.1

Порівняння основних протоколів маршрутизації

Протокол	Мобільність	Керування енерговитратами	Термін служби мережі	Масштабованість	Обізнаність про наявні ресурси
LEACH	Фіксована БС	підтримується	дуже великий	підтримується	так
TEEN	Фіксована БС	підтримується	дуже великий	підтримується	так
PEGASIS	Фіксована БС	підтримується	дуже великий	підтримується	так
SPIN	підтримується	обмежене	великий	обмежена	так

Продовження таблиці 2.1

GAF	обмежена	обмежене	великий	обмежена	так
HEED	обмежена	підтримується	дуже великий	підтримується	так
DD	обмежена	обмежене	великий	обмежена	так
RR	Дуже обмежена	Не підтримується	дуже великий	підтримується	так

Продовження таблиці 2.1

Протокол	Класифікація	Агрегація даних	На основі запитів	Multipath
LEACH	Ієрархічний	Ні	Ні	Ні
TEEN	Ієрархічний/ реактивний	Так	Ні	Ні
PEGASIS	Ієрархічний/ реактивний	Так	Ні	Ні
SPIN	Неієрархічний/ активний	Так	Так	Так
GAF	На основі місцезнаходження	Ні	Ні	Ні
HEED	Ієрархічний	Так	Ні	Ні
DD	Неієрархічний/ активний	Так	Так	Так
RR	Неієрархічний/ гібридний	Так	Так	Ні

Проаналізувавши дані наведені в таблиці, можна зробити висновок, що масштабованість мережі найкраще підтримується в ієрархічних протоколах, а кращу відмовостійкість забезпечують неієрархічні протоколи маршрутизації.

Висновки

В даному розділі було проведено порівняльний аналіз методів маршрутизації в бездротових сенсорних мережах, розглянуто класифікацію методів маршрутизації та запропоновано методику проведення порівняльного аналізу. Визначено що всі методи маршрутизації в БСМ можна розділити на три основних класи, це: маршрутизація на основі мережевої структури, маршрутизація на основі виявлення маршруту та маршрутизація на основі керування протоколами. Оскільки головною метою дослідження є створення енергоефективного протоколу маршрутизації, було обрано ієрархічний тип протоколів, головна особливість ієрархічної маршрутизації в тому, що такий тип протоколів має гарну масштабованість, ієрархічні протоколи використовують кластерний підхід тобто всі вузли розділяються на окремі кластери, це дозволяє використовувати односкачковий режим роботи вузлів, такий підхід дуже гарно впливає на енергоефективність всієї мережі оскільки дозволяє ефективно розподіляти наявний запас енергії між вузлами.

РОЗДІЛ 3

МОДИФІКОВАНИЙ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ПРОТОКОЛ МАРШРУТИЗАЦІЇ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Для розробки модифікованого протоколу, за основу був взятий протокол HEED. Даний протокол є енергоефективним протоколом що базується на залишковій енергії сенсорних вузлів та вартості зв'язку для забезпечення збільшення терміну служби мережі [28]. Щоб визначити, що сенсорний вузол є головою кластеру, протокол розглядає вартість внутрішньокластерного зв'язку за один стрибок як другий параметр разом із залишковою енергією. При формуванні кластерів протокол HEED вибирає набір голів кластерів, використовуючи критерії залишкової енергії для сенсорних вузлів, і розриває зв'язки між сенсорними вузлами, використовуючи вартість внутрішньокластерного зв'язку.

3.1 Протокол MFL-HEED

Модифікований варіант цього протоколу передбачає його нечітку реалізацію, в цій реалізації, вибір голови кластера (CH) визначається на основі трьох параметрів, а саме: залишкова енергія, ступінь вузла та відстань між датчиком і базовою станцією.

- **Залишкова енергія:** це параметр що являє собою енергію, яку використовує сенсорний вузол для отримання, обробки та передачі повідомлення. Енергія, яка використовується для передачі певного повідомлення вузлом, називається енергією розсіювання, а енергія, що залишається у вузла після віднімання розсіяної енергії з енергії вузла для передачі даного повідомлення, називається залишковою енергією. Енергія є ключовим параметром для розрахунку ймовірності вибору голів кластера.
- **Щільність вузла:** це параметр що позначає кількість вузлів в його діапазоні чутливості датчика. Щільність сенсорного вузла має великий

вплив на енергію цього вузла, особливо якщо цей вузол є головою кластера, оскільки вузол який є головою кластера витрачає енергію для збору даних від всіх вузлів які є членами його кластера.

- **Відстань:** це параметр що визначається як відстань між сенсорним вузлом і базовою станцією. Витрачання енергії сенсорного вузла напряму залежить від відстані, чим більша відстань, тим більша кількість енергії буде витрачатися.

В даному протоколі використовується модель Мамдані вона є однією з найбільш популярних для механізму логічного висновку. Кожна змінна, а саме: відстань, енергія вузла та ступінь вузла, має три функції належності:

залишкова енергія - (низька, середня, висока);

ступінь вузла -(рідко, середньо, щільно);

відстань - (близько, середня відстань, далеко)

Функція приналежності, (що відповідає ймовірності) має дев'ять значень, які включають: дуже слабке, слабке, трохи слабке, нижче середнє, середнє, вище середнє, мало сильне, сильне, дуже сильне.

В цьому алгоритмі використовується 27 правил нечіткого логічного висновку, і форма правил має наступний вигляд: ЯКЩО А і В і С, ТО D, де А, В, С і D представляють залишкову енергію, ступінь вузла, відстань і ймовірність. Правила засновані на ймовірності, що оцінюється за допомогою формули (3.1):

$$Prob = \frac{a * L_{re} + b * L_{dn} + c * (D_m - L_d)}{a * M_{re} + b * M_{dn} + c * M_d} \quad (3.1)$$

Де а, b і с є константами, що відповідають за рівень залишкової енергії, щільності вузлів та відстані відповідно. L_{re}, L_{dn} і L_d означають значення

рівня для залишкової енергії, ступеня вузла та відстані, а M_{re} , M_{dn} і M_d є їхніми відповідними максимальними рівнями значення. В цьому прикладі залишкова енергія має низьке, середнє та високе значення, що відповідають значенням рівня 0, 1 та 2. Щільність вузлів має значення рідкий, середній та щільний, що відповідають значенням рівня 0, 1 і 2 відповідно. Параметр “відстань” має значення: близька, середня, далека, що дорівнюють значенням 0, 1, 2. Таким чином, значення M_{re} , M_{dn} і M_d дорівнюють 2, а L_{re} , L_{dn} і L_d можуть мати значення 0 або 0.1 або 2.

На рис.3.1 у вигляді схеми показано принцип вибору голови кластера в протоколі.

Параметр CH_{prob} (probability of becoming a cluster head) в алгоритмі є ймовірністю обрання вузла в якості голови кластера (cluster head) в сенсорній мережі. Це значення визначає, наскільки ймовірно вузлу стати керівним вузлом у кожному раунді формування кластерів.

Обираючи CH_{prob} , користувач встановлює ймовірність того, що вузол буде обраний як головний в момент створення кластерів. Це допомагає регулювати кількість головних вузлів у мережі залежно від вимог до продуктивності, споживання енергії та інших факторів, що впливають на ефективність мережі сенсорних вузлів.

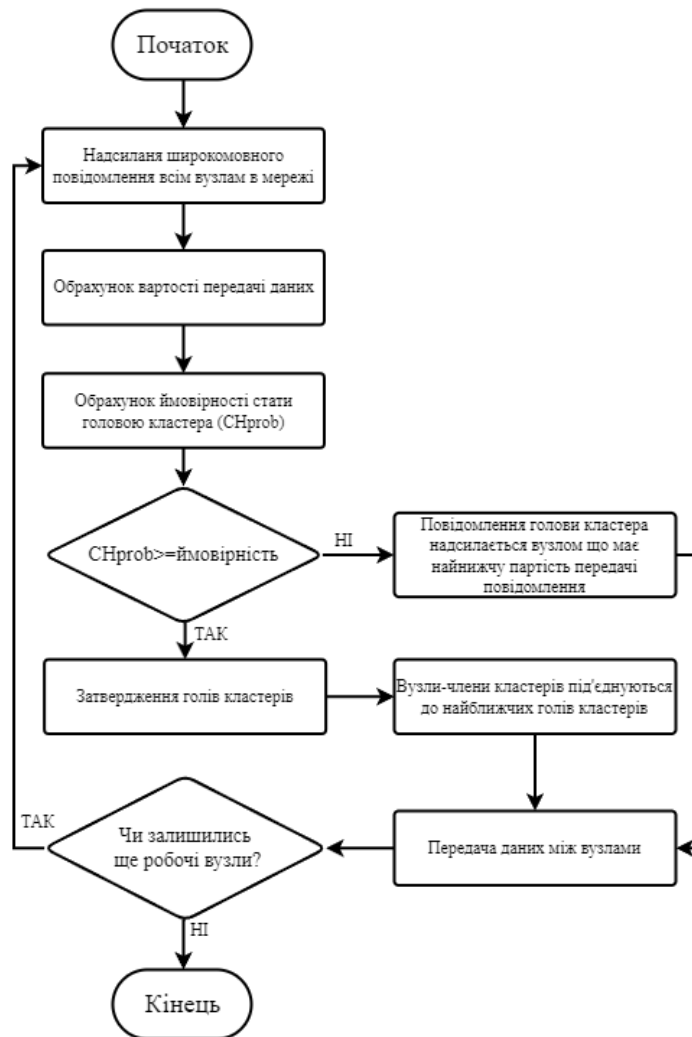


Рис.3.1 алгоритм вибору голови кластера

Вибір вузла який буде виконувати роль голови кластера серед вузлів на основі ймовірностей забезпечує балансування навантаження. Таким чином, за наведеною формулою (3.1) було визначено голову кластера. Після визначення голів кластерів вони починають отримувати інформацію від інших вузлів і надсилати її на базову станцію.

Для БСМ було визначено наступні припущення:

- **Сенсорні вузли є квазістаціонарними**, і всі вузли мають однакові можливості, такі як зв'язок та обробка інформації.
- **Мережа має один стаціонарний приймач посередині**, голова кластера збирає інформацію та обробляє її. Сенсорні вузли бувають однорідними та неоднорідними за своєю природою, і вони розподілені випадковим чином.

- **Зв'язки є симетричними**, тобто два вузли можуть комунікувати, використовуючи однаковий рівень потужності передачі.
- **Вузли залишаються без нагляду**, після розгортання мережі та не знають про своє місцезнаходження, якщо вони не мають підтримки GPS.

3.2 Практична реалізація модифікованого протоколу MFL-HEED

Використавши методику що наведена в третьому розділі було виконано оцінку продуктивності цього протоколу та його порівняння з протоколом HEED, для цього було взято прямокутну область що мала розмір 100х100м, в цій області випадковим чином було розміщено 100 сенсорних вузлів кожен з яких має початкову енергію 0,2 Дж. Для визначення ймовірності вибору головних вузлів в кластері було використано нечітку логіку як в оригінальному протоколі HEED, де вибір головного вузла кластера розраховувався на основі двох параметрів, це залишкова енергія та щільність вузлів. Оскільки модифікований варіант протоколу, MFL-HEED базується на звичайному протоколі HEED, для вибору голів кластерів тут теж використовуються залишкова енергія та щільність вузлів, але також крім них тут використовується ще відстань між сенсорним датчиком та базовою станцією, цю відстань можна обчислити за допомогою сили отриманого сигналу. Параметри що були використані при моделюванні даного протоколу представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Параметри моделювання

Параметр	Значення
Протокол маршрутизації	MFL-HEED
Кількість вузлів	100

Продовження таблиці 3.1

Параметр	Значення
Розташування БС	(50, 50)
Радіус кластера	25м
Розмір повідомлення	4000біт
Початкова енергія	0.5Дж
Область	X=100м, Y=100м
Енергія для агрегації даних	5нДж/біт/сигнал
Кількість раундів	4000
Топологія	Випадкова

На рис. 3.2 показано відношення кількості активних вузлів до кількості раундів, видно, що нова модифікація протоколу HEED показує кращий результат ніж базова версія протоколу.

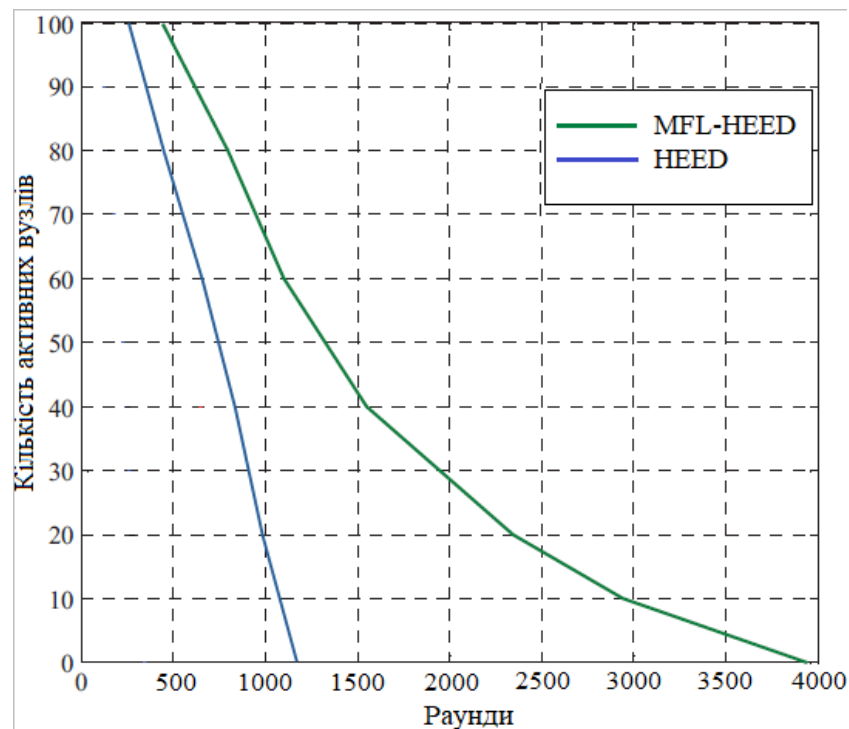


Рис. 3.2 відношення кількості активних вузлів до кількості раундів

Крім того було обчислено інші результати продуктивності, наприклад: пропускна здатність, навантаження трафіку, загальна затримка. Загальна

затримка визначається за формулою 3.2, де t_s і t_r це моменти часу коли якийсь пакет генерується та приймається.

$$Delay = t_r - t_s \quad (3.2)$$

Сукупна затримка визначається за формулою 3.3

$$AgDelay = \frac{Delay}{Packets} \quad (3.3)$$

Пропускна здатність визначається за формулою 3.4

де t_{sim} – час симуляції

$$Проп. \text{ здатність} = \frac{Packets * Size * 8}{t_{sim}} \quad (3.4)$$

Транспортне навантаження визначається формулою 3.5

$$Tload = Packets * Size \quad (3.5)$$

На (рис. 3.2) показано навантаження трафіку. На графіку видно що швидкість збільшення навантаження для протоколу MFL-HEED є вищою порівняно з HEED, оскільки в нечіткому реєстрі надсилається більше пакетів.

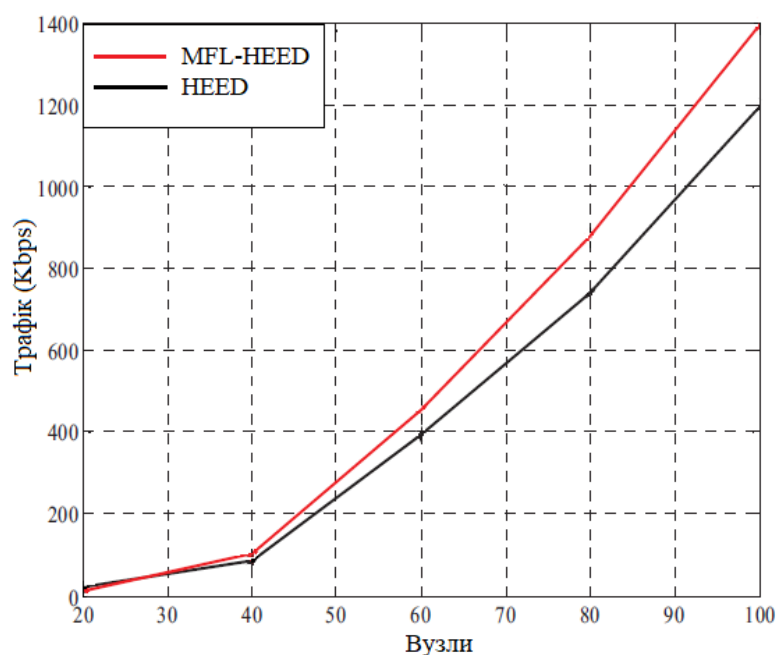


Рис. 3.3 Трафік в мережі

Залежність сукупної затримки від кількості вузлів показано на рис. 3.3

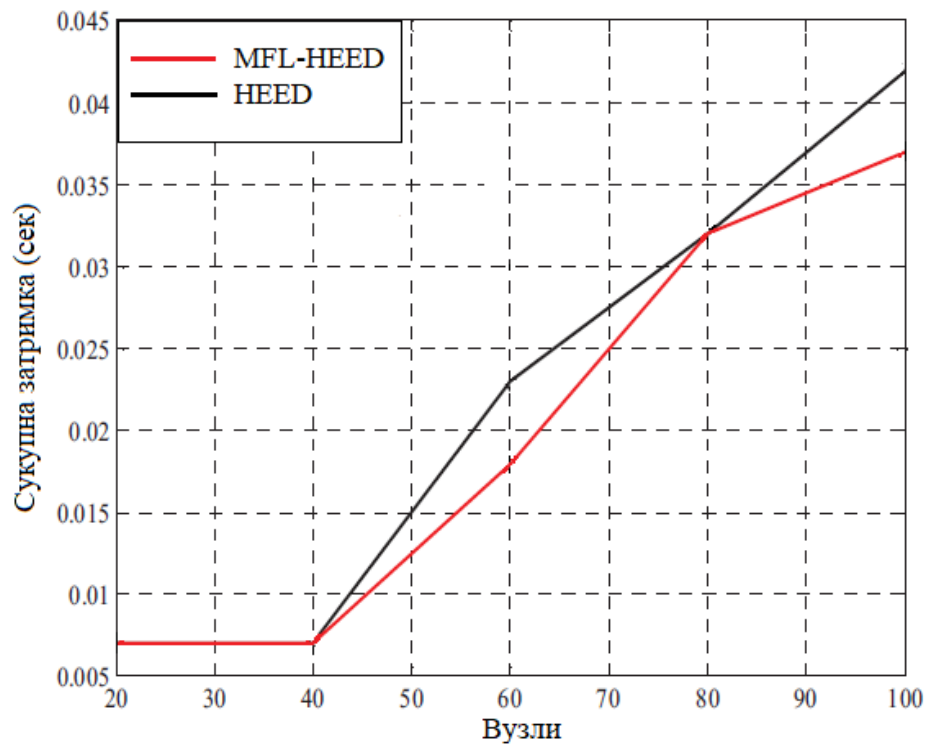


Рис.3.4 Загальна затримка

Як показано на рис. 3.4, кількість сенсорних вузлів в мережі впливає на пропускну здатність мережі, чим більша кількість датчиків тим краща пропускну здатність. Проаналізувавши порівняння модифікованого варіанту на основі нечіткої логіки з базовим алгоритмом HEED Видно, що для модифікованого варіанту збільшення вище, ніж у базового протоколу.

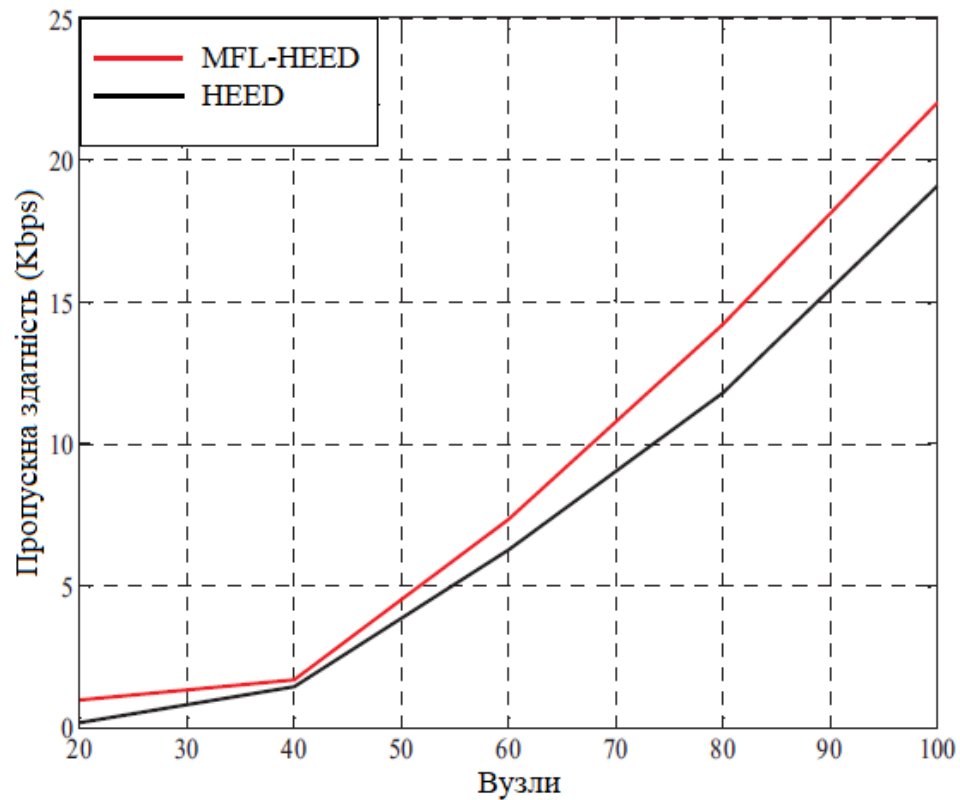


Рис.3.5 Пропускна здатність

Крім того було обчислено результати моделювання, де досліджено як залежить розсіювання енергії від кількості раундів (рис.3.5). Як видно на діаграмі, зі збільшенням кількості раундів, енергія мережі швидко розсіюється як для HEED, так і для модифікованого алгоритму MFL-HEED. Зі збільшенням рівня неоднорідності швидкість споживання енергії зменшується. Модифікований протокол MFL-HEED працює краще, ніж звичайний алгоритм HEED. Отже новий модифікований протокол має нижчу швидкість витрати енергії ніж звичайний протокол HEED.

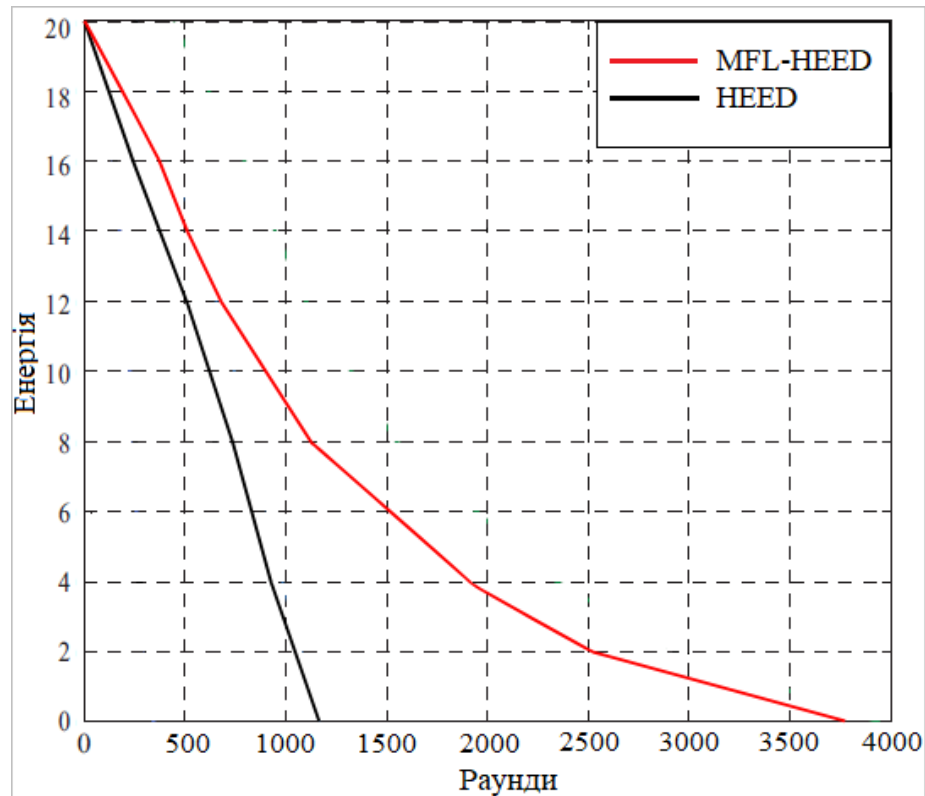


Рис.3.6 Витрачання енергії

Висновки

В цьому розділі було описано покращений енергоефективний метод маршрутизації в бездротовій сенсорній мережі що має назву MFL-HEED, даний метод використовує нечітку логіку для визначення голів кластерів, завдяки цьому було покращенню показники енергоефективності та надійності мережі. З результатів моделювання видно що протокол MFL-HEED має кращі показники, ніж базовий протокол HEED на якому він заснований та один з найбільш популярних протоколів маршрутизації, протокол LEACH. Тому можна зробити висновок що модифікований енергоефективний протокол на основі нечіткої логіки MFL-HEED є перспективним та в майбутньому може використовуватися в реальному житті.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

Протягом останніх років бездротові сенсорні мережі здобули велику популярність та стали важливою складовою для багатьох сфер життя. Розвиток технологій у цій галузі виявився ключовим фактором у вдосконаленні методів маршрутизації та енергозбереження, розширюючи можливості їх застосування в сучасному світі. Четверта частина дисертації представляє собою економічний аналіз стартап-проекту “Методика багатокритеріального порівняльного аналізу алгоритмів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах” створеного на основі написаної роботи.

У даному дослідженні проводиться аналіз перспектив розвитку цих технологій та їхнього впливу на стартап проекти та визначення їхньої цінності у сучасному ринковому середовищі.

4.1 Опис ідеї стартап-проекту

Основна ідея цього стартапу полягає у впровадженні модифікованого енергоефективного протоколу маршрутизації, що допоможе збільшити ефективність використання та відповідно покращити результативність використання БСМ.

Таблиця 4.1

Опис ідеї стартапу

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигода для користувача
Впровадження модифікованого енергоефективного алгоритму маршрутизації	Моніторинг навколишнього середовища	Новий енергоефективний алгоритм допоможе збільшити термін служби БСМ та точність вимірювання що дозволить краще моніторити зміни клімату, погоду
	Агропромисловість	Новий енергоефективний алгоритм дозволить покращити ефективність та термін служби БСМ, що дозволить краще досліджувати стан ґрунтів, концентрацію різних речовин в них.

Продовження таблиці 4.1

	Контроль біологічних показників живих організмів	Новий енергоефективний алгоритм допоможе оптимізувати використання БСМ для моніторингу різних параметрів організму, таких як тиск, температура тощо.
	Військова сфера	Новий енергоефективний алгоритм допоможе покращити використання БСМ для виконання певних військових задач, наприклад моніторинг повітря на наявність отруйних речовин.
	Моніторинг сейсмічної активності	Новий енергоефективний алгоритм допоможе збільшити термін служби БСМ та покращить результати моніторингу сейсмічної активності, це буде дуже корисним для країн з високою сейсмічною активністю.

Проведено порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначені показники, що мають:

- гірші значення (слабкі - W);
- кращі значення (сильні - S).

Таблиця 4.2

Визначення сильних та слабких характеристик

	Потенційні товари/концепції конкурентів	
	Мій проект	TEEN, LEACH
S Сильна сторона	Висока стабільність роботи, Енергоефективність	Простота реалізації
W слабка сторона	Недоцільність використання для малих мереж викликана високою собівартістю .	кількість переданих пакетів не залежно від розмірів мережі є низькою

Таблиця 4.3.

Технологічний аудит проекту

Ноп/п	Ідея проекту	Методи реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1	Модифікований енергоефективний алгоритм маршрутизації що покращить функціонування БСМ	Реалізація у безпроводових сенсорних мережах	Технологія наявна	Технологія є доступною
Обрана технологія реалізації проекту: MFL-HEED				

Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Таблиця 4.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	100000грн
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність перешкод для входу	Сертифікації
5	Специфічні вимоги до стандартизації /сертифікації	немає

Таблиця 4.5.

Характеристика потенційних клієнтів стартап проекту

Ноп/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів дотовару
1	Недостатній термін служби бездротових сенсорних мережі при використанні існуючих алгоритмів маршрутизації	Охоронні системи, медичні заклади, дослідження довкілля	Провайдер може самостійно установлювати формат. Додаткові можливості для юридичних осіб.	Покращена ефективність що забезпечується надійною та енергоефективною передачею даних.

Таблиця 4.6.

Фактори загроз

Но п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Збільшення ціни	Вартість проекту залежність від економічної ситуації в світі	Пошук надійних постачальників, додаткова реклама
2	Складність технічної реалізації	Постійне оновлення технологій зв'язку, запровадження нових стандартів	Збільшення фінансування для залучення перспективних працівників

Таблиця 4.7

Таблиця факторів можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Збільшення ціни	Вартість проекту залежність від економічної ситуації в світі	Пошук надійних постачальників, додаткова реклама
2	Складність технічної реалізації	Постійне оновлення технологій зв'язку, запровадження нових стандартів	узгодження плану розробки та релізу з розробниками. Збільшення фінансування для залучення перспективних працівників

Таблиця 4.8

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність компанії (можливі дії компанії, щоб стати конкурентоспроможною)
Вказати тип конкуренції — монополія/олігополія/ чиста /монополістична	Чиста	Розробка ексклюзивних програм лояльності для клієнтів або партнерство з провідними постачальниками послуг для створення унікальних пропозицій для клієнтів
За рівнем конкурентної боротьби -локальний/ національний	Національний	Розвиток маркетингової кампанії що буде орієнтована національний ринок

Продовження таблиці 4.8

За галузевою ознакою - міжгалузева/внутрішньо галуза	Внутрішньогалузева	Впровадження нового функціоналу та покращення наявного.
Конкуренція за видами товарів: товарно-видова товарно-родова між бажаннями	товарно-видова	Розробка ексклюзивних програм лояльності для клієнтів
За характером конкурентних переваг цінова та нецінова	цінова	Впровадження стратегії динамічного ціноутворення, яка враховує змінні фактори ринку, такі як попит.
За інтенсивністю - марочна/немарочна	марочна	Розробка та впровадження інноваційної рекламної кампанії, спрямованої на підвищення впізнаваності бренду серед цільової аудиторії.

Таблиця 4.9

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти	Клієнти	Постачальники	Товари замітники
	Протоколи LEACH, TEEN,	Зацікавленість у технології	Короткі терміни постачання, приваблива ціна	Зміна технологічних стандартів
Висновки	Ефективність наявних протоколів є недостатньою	Зацікавленість у технології є високою, адже технологія є досить перспективною	Встановлення стратегічних партнерств з постачальниками, що надасть більшу позицію у переговорах та можливість отримувати кращі умови.	Постійний моніторинг ринкових тенденцій, інновацій та змін у вимогах споживачів для того, щоб реагувати на загрози заміщення

Таблиця 4.10

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактори конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Збільшена енергоефективність	Наразі енергоефективність цього протоколу більша ніж у більшості протоколів конкурентів
2	Покращена надійність передачі даних	Покращена енергоефективність також позитивно впливає і на надійність протоколу

Таблиця 4.11

Порівняльний аналіз слабких та сильних сторін

№ п/п	Фактори конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товару-конкурентів в порівнянні з даним продуктом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Збільшена енергоефективність	17			+				
2	Покращена надійність	15				+			
3	Швидкість обробки даних	15					+		

Таблиця 4.12

SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Висока енергоефективність та пропускну здатність мережі	Слабкі сторони: Фінансові обмеження Недостатній маркетинг
Можливості: Зростання інтересу споживачів Можливість укласти партнерські угоди з приватними компаніями або урядовими органами	Загрози: Збільшення конкуренції Регулятивні обмеження

Таблиця 4.13

Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки Реалізації
1	Орієнтація поточної моделі на ринок медичних закладів.	20%	2 місяць
2	Орієнтація поточної моделі на військовий ринок	30%	2 місяці
3	Орієнтація поточної моделі на аграрний ринок	50%	1 місяць

Таблиця 4.14

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Медичні заклади	Потребують переговорів	Середній	Середня	Складно
2	Військові органи	Потребують переговорів	Високий	Середня	Складно
3	Аграрні компанії	Готові	Високий	Середня	Просто
Які цільові групи обрано: Медичні заклади, Аграрні компанії, Військові органи					

Таблиця 4.15

Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
-------	--------------------------------------	---------------------------	--	---------------------------

Продовження таблиці 4.15

1	Орієнтація компанії на світовий ринок	Сегментація ринку і спеціалізація (Розділення ринку на різні сегменти та надання продуктів або послуг, які відповідають конкретним потребам)	Ефективність та вигода: Технологія є енергоефективною тому дозволяє знизити витрати.	Стратегія спеціалізації
---	---------------------------------------	--	--	-------------------------

Таблиця 4.16

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є стартап-проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде дана компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде дана компанія копіювати основні характеристик и товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Компанія буде забирати споживачів у конкурентів	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

Таблиця 4.17

Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару від цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту
-------	---	---------------------------	---	---

Продовження таблиці 4.17

1	Наявність гарантії на обслуговування мережі протягом якогось часу (рік-два)	Стратегія спеціалізації на ринковому сегменті (Фокус на певних сегментах ринку)	Гарантія на обслуговування мережі. Надійність мережі що зумовлюється її енергоефективністю	Надійність Енергоефективність
---	---	--	--	-------------------------------

Висновки

В процесі роботи над даним розділом було розроблено стартап-проект що базується на енергоефективному алгоритмі M-NEED. Даний стартап є досить перспективним та має досить великі шанси на успіх. Розроблений алгоритм буде корисним в різних галузях життєдіяльності людини, особливо в медицині, військовій сфері, аграрному секторі. Конкурентна ситуація на ринку є досить сприятливою та дає можливість розглянути даний стартап, оскільки в порівнянні з основними конкурентами він має гарні показники стабільності та енергоефективності. Підсумовуючи написане вище можна з впевненістю сказати що подальший розвиток проекту є доцільним.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Дана магістерська дисертація присвячена дослідженню бездротових сенсорних мереж, та протоколів маршрутизації що використовуються в цих мережах. В процесі проведення дослідження було визначено основні особливості бездротових сенсорних мереж, їх архітектуру, основні характеристики. БСМ є перспективною технологією яка може використовуватись в багатьох сферах життєдіяльності людини, від медицини та логістики до військових застосувань та аграрного сектору. Важливою особливістю цих мереж є те що вони є досить простими в розгортанні та можуть використовуватися в місцевостях які є важкодоступними для людей. Також було ретельно проаналізовано технічні характеристики та ключові параметри сенсорних вузлів, оскільки саме від них залежить робота бездротових сенсорних мереж. Сенсорні вузли разом з базовою станцією є основними елементами бездротових сенсорних мереж, тому дослідження їх особливостей є ключовим завданням щоб зрозуміти принцип роботи цих мереж. Другий розділ дисертації присвячений аналізу та порівнянню методів маршрутизації в БСМ. В даному розділі описано основну класифікацію протоколів маршрутизації, також було проаналізовано основні протоколи маршрутизації, такі як LEACH, TEEN, PEGASIS, HEED та ін. їх принцип роботи та основні особливості. Використовуючи протокол маршрутизації HEED було розроблено модифікований протокол що має назву MFL-HEED. MFL-HEED це енергоефективний протокол що використовує нечітку логіку в процесі кластеризації. Проведене моделювання показало що даний протокол має кращі показники ніж базовий протокол HEED на якому він заснований. В четвертому розділі дисертації було запропоновано стартап-проект що заснований на запропонованому енергоефективному протоколі маршрутизації, даний стартап має певні переваги над конкурентами та буде корисним в медичній сфері та агропромисловості, його використання допоможе збільшити результативність діяльності людей в цих галузях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Досягнення в телекомунікаціях 2019 / за наук. ред. М.Ю.Ільченка, С.О.Кравчука: монографія. - Київ: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019.- 336 с. Рекомендовано до друку ВР КПП ім.І.Сікорського (прот.№10 від 04.11.2019 р.) ISBN 978-617-7734-12-2
2. Лисенко О.І., Романченко І.С., Чумаченко С.М., Данилюк С.Л., Новіков В.І., Тачинінв О.М., Кірчу П.І., Валуйський С.В. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях. – К.: НАУ, 2016. – 332 с.
3. Рожков А. А. Розвиток методів енергозбереження в мобільних сенсорних мережах. Магістерська дисертація
4. МЕТОДИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ. Славінський Д. Ю., Семенко В. В. Наукові праці П'ятої міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем і телекомунікаційних технологій», 1 червня 2023 р. (Київ, Україна). — К.: НУХТ, 2023. — с. 83–84.
5. Славінський Д.Ю. МЕТОДИКА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ АЛГОРИТМІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ В МОБІЛЬНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ. Практичні питання функціонування і відновлення об'єктів муніципальної інфраструктури та промисловості України в сучасних умовах : зб. матеріалів всеукр. науково-практ. конф., ТНУ імені В. І. Вернадського, м. Київ, 2023. с. 195–197.
6. Штойко, О. О. Розвиток методів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах на основі використання адаптивного алгоритму кластеризації : магістерська дис. : 172 Телекомунікації та радіотехніка / Штойко Олександр Олександрович. – Київ, 2021. – 109 с.

7. Осинський, А. К. ., & Лисенко, О. І. . (2021). РОЗВИТОК МЕТОДУ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ АЛГОРИТМУ ВИБОРУ ГОЛОВНИХ КЛАСТЕРНИХ ВУЗЛІВ. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ»*, 325–327. вилучено із <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/231322>
8. Гогу, О. П. Сенсорні мережі відомчого призначення: дипломна робота ... бакалавра : 172 Телекомунікації та радіотехніка / Гогу Олександр Петрович. – Київ, 2019. – 65 с.
9. Кучеренко, А. А. ., Лисенко, О. І. ., & Новіков, В. І. . (2022). КЛАСТЕРИЗАЦІЯ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «ПЕРСПЕКТИВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ»*, 189–191. вилучено із <http://conferenc.its.kpi.ua/proc/article/view/256848>
10. Гуринчук, І. О. Розвиток методів маршрутизації в мобільних сенсорних мережах : магістерська дис. : 172 Телекомунікації та радіотехніка / Гуринчук Ілля Олегович. – Київ, 2022. – 81 с.
11. Міночкін А.І, Романюк В.А., Жук О.В. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж // Збірник наукових праць № 4. – К.: ВІПІ НТУУ —КПІ. – 2007. С. 112 – 119.
12. Аналіз характеристик ієрархічних протоколів маршрутизації бездротових сенсорних мереж / О. Тимченко, М. Зеляновський // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр. — К.: ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України, 2010. — Вип. 57. — С. 234-241. — Бібліогр.
13. Shabbir, N., & Hassan, S. R. (2017). Routing Protocols for Wireless Sensor Networks (WSNs). *Wireless Sensor Networks - Insights and Innovations*.doi:10.5772/intechopen.70208
14. Mukhdeep S. M. *Wireless Sensor Networks: A Survey* [Електронний

- pecypc] / Singh Manshahia Mukhdeep // International Journal of Scientific & Engineering Research ISSN 2229-5518. – 2016.
15. Buratti, C.; Conti, A.; Dardari, D.; Verdone, R. An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution. *Sensors* 2009, 9, 6869-6896. <https://doi.org/10.3390/s90906869>
 16. Matin, M. A., & Islam, M. M. (2012). Overview of Wireless Sensor Network. *Wireless Sensor Networks - Technology and Protocols*. doi:10.5772/49376
 17. Sharma, D. & Verma, Sandeep & Sharma, K.. (2013). Network topologies in wireless sensor networks: A review. *Int. J. Electron. Commun. Technol.* 4. 93-97.
 18. Zagrouba, R.; Kardi, A. Comparative Study of Energy Efficient Routing Techniques in Wireless Sensor Networks. *Information* 2021, 12, 42. <https://doi.org/10.3390/info12010042>
 19. J. Yan, M. Zhou and Z. Ding, "Recent Advances in Energy-Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: A Review," in *IEEE Access*, vol. 4, pp. 5673-5686, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2598719.
 20. H. Gou and Y. Yoo, "An Energy Balancing LEACH Algorithm for Wireless Sensor Networks," *2010 Seventh International Conference on Information Technology: New Generations*, Las Vegas, NV, USA, 2010, pp. 822-827, doi: 10.1109/ITNG.2010.12.
 21. A. Khan, N. Rakesh, A. Bansal and D. Chaudhary, "Comparative study of WSN Protocols (LEACH, PEGASIS and TEEN)," in *2015 Third International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, Wagnaghat, India, 2015 pp. 422-427. doi: 10.1109/ICIIP.2015.7414810
 22. Kumar, A. , Shwe, H. , Wong, K. and Chong, P. (2017) Location-Based Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey. *Wireless Sensor Network*, 9, 25-72. doi: 10.4236/wsn.2017.91003.

23. Guleria, K., Verma, A.K. Comprehensive review for energy efficient hierarchical routing protocols on wireless sensor networks. *Wireless Netw* 25, 1159–1183 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11276-018-1696-1>
24. Pandian, A. P., Fernando, X., & Islam, S. M. S. (Eds.). (2021). *Computer Networks, Big Data and IoT. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. doi:10.1007/978-981-16-0965-7
25. Maratha, P., & Gupta, K. (2019). *A comprehensive and systematized review of energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks. International Journal of Computers and Applications*, 1–18. doi:10.1080/1206212x.2019.1697513
26. Mohammed Salamath, Sunitha .R. A Survey on SPIN Protocol in Wireless Sensor Network. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2016. Volume 5, Issue 3. P. 1463–1466.
27. Sarkar, A., & Senthil Murugan, T. (2016). *Routing protocols for wireless sensor networks: What the literature says? Alexandria Engineering Journal*, 55(4), 3173–3183. doi:10.1016/j.aej.2016.08.003
28. Martey, Abraham & Esenogho, Ebenezer & Swart, Theo. (2020). Improved Cluster to Normal Ratio Protocol for Increasing the Lifetime of Wireless Sensor Networks. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*. 10.12928/TELKOMNIKA.v19i2..
29. Maitri Rashmikant Sakarvadia, Dr.Manish Mangal. NETWORK TOPOLOGIES IN WIRELESS SENSOR NETWORK. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*. 2022. Volume 10, Issue 5.
30. Al-Karaki, J. N., & Kamal, A. E.(2004). *Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. IEEE Wireless Communications*, 11(6), 6–28. doi:10.1109/mwc.2004.1368893
31. Firoj Ahamad, Rakesh Kumar. Energy Efficient Protocols for Wireless Sensor Networks: A Review. *International Journal of Innovations &*

Advancement in Computer Science. 2015. Volume 4.

32. Mood, Ravinder & Kulkarni, Vikram. (2021). Review on Energy Efficient Wireless Sensor Network Protocols. 1-6. 10.1109/EEEIC/ICPSEurope51590.2021.9584696.
33. Manjeshwar, A., & Agrawal, D. P. (n.d.). TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. Proceedings 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium. IPDPS 2001. doi:10.1109/ipdps.2001.925197
34. Bhavana, V. & Rathi, J. & Reddy, K.R. & Madhavi, K.. (2018). Energy efficiency routing protocols in wireless sensor networks-A comparative study. International Journal of Pure and Applied Mathematics. 118. 585-592.
35. Lindsey, S., & Raghavendra, C. S. (n.d.). PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems. Proceedings, IEEE Aerospace Conference. doi:10.1109/aero.2002.1035242
36. Chakraborty, Malay & Shekhar, Surya. (2021). A Comparative Analysis of LEACH and PEGASIS Hierarchical Protocol for Wireless Sensor Networks. 10.47531/MANTECH/ECC.2021.44.
37. H. H. El-Sayed, S. K. Refaay, S. A. Ali and M. T. El-Melegy, "Chain Based Leader Selection using Neural Network in Wireless Sensor Networks protocols," *2021 9th International Japan-Africa Conference on Electronics, Communications, and Computations (JAC-ECC)*, Alexandria, Egypt, 2021, pp. 105-110, doi: 10.1109/JAC-ECC54461.2021.9691426.
38. Samaras, Nicholas & Triantari, Foteini. (2016). On Direct Diffusion Routing for Wireless Sensor Networks. 89-94. 10.1109/RTUWO.2016.7821862.
39. Ning Hu and Deyun Zhang, 2006. Source Routing Directed Diffusion in Wireless Sensor Networks. *Information Technology Journal*, 5: 534-539
40. Rawat, Umesh & Kumar, Mukesh. (2012). Directed Diffusion: Features,

- Current Developments, Issues and Analysis. International Journal of Computer Applications. 50. 10.5120/7681-0986
41. Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Estrin, D., Heidemann, J., & Silva, F. (2003). *Directed diffusion for wireless sensor networking*. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(1), 2–16. doi:10.1109/tnet.2002.808417
 42. Rathi, N. (2012). *A Review on Routing Protocols for Application in Wireless Sensor Networks*. *International Journal of Distributed and Parallel Systems*, 3(5), 39–58. doi:10.5121/ijdp.2012.3505
 43. Ankit Gaur , Rosy Verma, 2020, SPIN Protocol in Wireless Sensor Network, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH & TECHNOLOGY (IJERT) Volume 09, Issue 05 (May 2020)
 44. Juneja G., Juneja S. A STUDY ON A ROUTING PROTOCOL SPIN IN WSN. *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*. 2012. P. 345–352
 45. Bharathidasan, Archana, and Vijay Anand Sai Ponduru. "Sensor networks: An overview." *IEEE INFOCOM*. Vol. 4. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002.
 46. Braginsky, David & Estrin, Deborah. (2002). Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks. *Proceedings of the ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*. 22-31. 10.1145/570738.570742.
 47. Grover, Jitender & Sharma, Shikha & Sharma, Mohit. (2014). A Study of Geographic Adaptive Fidelity Routing Protocol in Wireless Sensor Network. *IOSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*. 16. 2278-661. 10.9790/0661-16548896.
 48. Raouf, Mervat & Baghdad Iraq, Jbcesu. (2019). Clustering in Wireless Sensor Networks (WSNs). 10.13140/RG.2.2.34342.98887.

49. Bhattacharyya, Debnath & Kim, Tai-hoon & Subhajit, Pal. (2010). A Comparative Study of Wireless Sensor Networks and Their Routing Protocols. *Sensors* (Basel, Switzerland). 10. 10506-23. 10.3390/s101210506.