

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Інститут телекомунікаційних систем  
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра телекомунікацій  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено  
В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Явіся В.С.  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
“ ” \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Магістерська дисертація**  
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка,  
(код і назва)

За освітньо-професійною програмою Інженерія та програмування  
інфокомунікацій.

на тему: Розвиток методів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах

Виконав: студент 2 курсу, групи ТЗ-81 мп  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Хижняк Євген Павлович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник д.т.н., професор Лисенко О.І. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент д.т.н., с.н.с., М.А. Скулиш \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 рік

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут телекомунікаційних систем  
( повна назва )

Кафедра телекомунікацій  
( повна назва )

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
(код і назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою Інженерія та програмування інфокомунікацій.

ЗАТВЕРДЖУЮ  
В.о. завідувача кафедри

Явіся В.С.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Хижняку Євгену Павловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Розвиток методів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах»

науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_ д.т.н., професор Лисенко О.І.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_07\_» «\_11\_» 2019р. № \_3840-с\_

2. Строк подання студентом дисертації 06.12.2019

3. Об'єкт дослідження безпроводові сенсорні мережі

4. Предмет дослідження методи маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

- Розглянути існуючі методи маршрутизації в сенсорних мережах;
- Провести аналіз сучасних методів маршрутизації та визначити їх основні переваги та недоліки;

- Представити математичну модель задачі маршрутизації в сенсорній мережі;
- Запропонувати та розвинути покращений метод маршрутизації;
- Виконати комп'ютерне моделювання та оцінку ефективності запропонованого методу.

#### 6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу

- 1) Тема, постановка задачі, об'єкт, предмет дослідження.
- 2) Розглядання наукової задачі/проблеми.
- 3) Математична модель задачі.
- 4) Комп'ютерне моделювання.
- 5) Загальні висновки по роботі.

#### 7. Орієнтовний перелік публікацій

1. Хижняк Є.П., Петрова В.М., «Як 5G, AI і IoT забезпечують інтелектуальний зв'язок» // Хижняк Є.П., Петрова В.М., - «Актуальні проблеми розвитку науки в контексті глобальних трансформацій інформаційного суспільства»: II Міжнародна науково-практична конференція 25-26 жовтня 2019 р., К.: с. 161...167;
2. Хижняк Є.П., Петрова В.М., «Проблеми IoT» // Хижняк Є.П., Петрова В.М., - «Ідеї академіка В.М. Глушкова і сучасні проблеми штучного інтелекту»: VIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Глушковські читання» 29 листопада 2019 р., К.: с. 145...147;

8. Дата видачі завдання 20.09.2018

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розробка, оформлення узгодження та затвердженнь технічного завдання на роботу.	01.11.2018	Виконано
2	Вибір напрямку досліджень. Аналітичний огляд інформаційних матеріалів.	15.01.2019	Виконано
3	Опрацювання першого розділу. Аналіз існуючих методів локалізації сенсорів.	05.03.2019	Виконано
4	Опрацювання другого розділу. Математична модель задачі локалізації сенсорів.	20.04.2019	Виконано
5	Опрацювання третього розділу. Метод локалізації сенсорів в сенсорній мережі.	07.05.2019	Виконано
6	Опрацювання четвертого розділу. Комп'ютерне моделювання і оцінка ефективності запропонованого методу.	12.07.2019	Виконано
7	Підготовка тез та доповіді на конференції.	24.08.2019	Виконано
8	Оформлення дипломного проекту.	15.10.2019	Виконано
9	Чистовий варіант дипломної роботи, плакати.	21.11.2019	Виконано

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_

(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

ТЕМА: «Розвиток методів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах»

Пояснювальна записка представлена на 89 сторінці і включає в себе 22 ілюстрації, 4 таблиці і 52 джерела за переліком посилань.

Методика порівняльного аналізу методів маршрутизації і вибір найоптимальнішого методу з урахуванням характеристик та особливостей побудови мережі є надзвичайно важливою частиною розробки сенсорної мережі, адже лише змодельовавши і порівнявши основні варіанти вирішення проблем ми можемо вирішити якою буде топологія мережі, алгоритм маршрутизації і т.д.

Об'єктом дослідження виступають безпроводові сенсорні мережі.

Предметом дослідження виступають методи маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах.

Метою роботи є аналіз принципів побудови та функціонування безпроводових сенсорних мереж. Створення нового методу підвищення ефективності маршрутизації у безпроводових сенсорних мережах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- дослідження основних особливостей та вимог до БСМ;
- дослідження та класифікація способів маршрутизації в БСМ;
- аналіз основних алгоритмів маршрутизації в БСМ;
- порівняльний аналіз протоколів маршрутизації в БСМ;
- розробка методу маршрутизації.

При виконанні досліджень та прийнятті рішень використовувались такі підходи: цілісності, ієрархічності, структуризації, комплексний підхід.

В даній роботі розглянуто основні особливості та вимоги до процесу маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах. Проаналізовані параметри маршрутизації в залежності від призначення мережі. Наведена класифікація способів маршрутизації та розглянуто найвідоміші протоколи маршрутизації.

Виконано порівняння цих протоколів та вказані переваги та недоліки кожного з них. В ході дослідження були визначенні основні вимоги до побудови БСМ, було обрано оптимальну структуру мережі та проведено порівняльний аналіз методів маршрутизації, що дало змогу на основі проведених досліджень розробити новий метод маршрутизації безпроводової сенсорної мережі.

Основні наукові результати магістерської дисертації полягають у розробці методу маршрутизації для збільшення стабільності і терміну служби бездротових сенсорних мереж. Цей метод, на відміну від існуючих, покращує стабільну область ієрархії кластеризації і зменшує ймовірність відмов вузлів і збільшує термін служби мережі завдяки збалансованому розсіюванню енергії окремого вузла по всій мережі. Це дало змогу продовжити термін роботи безпроводової сенсорної мережі майже вдвічі.

Результати досліджень опубліковані в тезах доповідей на наукових конференціях.

Ключові слова: безпроводові сенсорні мережі, маршрутизація, сенсорні вузли, кластер, ретрансляція повідомлень, балансування навантаження трафіку.

## ABSTRACT

TOPIC: «Development of routing methods in wireless sensor measurements»

Explanatory memorandum presented on 89 pages and includes 22 illustrations, 4 tables and 52 sources for references.

The methodology of the comparative analysis of routing methods and the selection of the optimal method, taking into account the characteristics and features of building a network, is a very important part of the development of a sensor network, because only after modeling and comparing the main solutions to the problems, we can decide what the network topology, routing algorithm, etc.

The object of research is wireless sensor networks.

The subject of research is routing methods in wireless sensor networks.

The purpose is to analyze the principles of construction and operation of wireless sensor networks. Creation of a new method for increasing routing efficiency in wireless sensor networks.

To achieve this goal it is necessary to solve the following tasks:

- study of the main features and requirements for BSM;
- research and classification of routing methods in BSM;
- analysis of the basic routing algorithms in BSM;
- comparative analysis of routing protocols in BSM;
- development of a routing method.

In carrying out research and decision-making, the following approaches were used: integrity, hierarchy, structuring, an integrated approach.

This paper discusses the main features and requirements for the routing process in wireless sensor networks. The routing parameters are analyzed depending on the purpose of the network. The classification of routing methods is given and well-known routing protocols are considered. A comparison of these protocols is made and the advantages and disadvantages of each of them are indicated. During the study, the basic requirements for building a BSM were identified, the optimal network structure and a

comparative analysis of routing methods were selected, which allowed us to develop a new method for routing a wireless sensor network based on our studies.

The main scientific results of the master's thesis are to develop a routing method to increase the stability and service life of wireless sensor networks. This method, unlike the existing ones, improves the stable area of the clustering hierarchy and reduces the probability of node failures and increases the service life of the network due to the balanced dissipation of energy of an individual node throughout the network. This allowed to extend the life of the wireless sensor network by almost half.

Research results are published in abstracts at scientific conferences.

Key words: wireless sensor networks, routing, sensor nodes, cluster, message relay, traffic load balancing.



## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ .....	11
ВСТУП.....	13
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ.....	14
1.1. Загальні відомості .....	14
1.2 Мережеві топології.....	16
1.3 Аналіз існуючих методів маршрутизації .....	17
1.4 Неієрархічні протоколи маршрутизації .....	19
1.5 Ієрархічні протоколи маршрутизації.....	23
1.6 Координатні (географічні) протоколи маршрутизації.....	33
Висновки до розділу 1 .....	39
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ МАРШРУТИЗАЦІЇ .....	40
2.1 Представлення моделі бездротової мережі.....	41
2.2 Завдання маршрутизації .....	44
2.3 Завдання пошуку оптимальних маршрутів.....	45
2.4 Завдання маршрутизації із забезпеченням максимального часу життя мережі .....	45
2.5 Алгоритм вибору шлюзу .....	47
2.6 Алгоритм вибору заголовка кластера.....	47
2.7 Адаптація до змін в топології мережі .....	49
2.8 Модель розсіювання енергії радіовипромінювання. ....	50

					<b>КПІ ім.Ігоря Сікорського 3840-с 10.ТЗ-81мп.2019.ПЗ</b>
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	
Розроб.		Хижняк Є.П.			Розвиток методів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах
Перевір.		Лисенко О.І.			
Реценз.		Скулиш М.А.			Літ.
Н. Контр.		Петрова В.М.			Арк.
Затверд.		Явіся В.С.			Акрушів
					9
					89
Пояснювальна записка					ІТС

2.9	Оптимальна кількість кластерів.....	51
	Висновки до розділу 2 .....	53
3	МЕТОД МАРШРУТИЗАЦІЇ В СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ.....	55
3.1	Hierarchical Adaptive Balanced energy efficient Routing Protocol (HABRP)	55
3.2	Модель мережі HABRP .....	56
3.3	Опис протоколу HABRP .....	60
	Висновки до розділу 3 .....	61
4	КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ .....	63
4.1	Налаштування параметрів.....	63
4.2	Результати симуляції .....	64
4.2.1	Аналіз енергоспоживання .....	64
4.2.2	Час життя мережі .....	65
4.2.3	Варіація розташування базової станції .....	66
4.2.4	Відсоток відмов вузла.....	68
4.2.5	Стабільний період в гетерогенних БСС.....	69
4.2.6	Неоднорідність у великих мережах .....	69
4.2.7	Поліпшення періоду стабільності .....	70
4.3	Аналіз результатів .....	71
	Висновки до розділу 4 .....	72
	ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК .....	74
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	76
	Додаток А. ЛІСТИНГ СКРИПТА ПРОГРАМУВАННЯ.....	82

					КПІ ім.Ігоря Сікорського 3840-с 10.ТЗ-81мп.2019.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

BSM Беспроводова Сенсорна Мережа  
GPS Global Positioning System  
BS Базова Станція  
EM BBC Еталонної Моделі взаємодії відкритих Систем  
QoS Quality of Service  
DD Directed Diffusion  
RR Rumor routing  
GBR Gradient-Based Routing  
IDSQ Information-driven Sensor Querying  
CADR Constrained Anisotropic Diffusion Routing  
ACQUIRE A Ctive QUery forwarding In sensoR nEtworks  
EAR Energy Aware Routing  
QARP QoS Aware Routing Protocol  
EQSR Eficientand QoS aware multi-path routing protocol  
ГВЗ Головних Вузлів Зони  
ГВ Головний Вузол  
LEACH Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy  
TEEN Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol  
APTEEN Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient sensor  
Network protocol  
MECN Minimum Energy Communication Network  
SMECN Small Minimum Energy Communication Network  
VGA Virtual Grid Architecture routing  
HPAR Hierarchical Power-aware Routing  
TTDD Two-Tier Data Dissemination  
P2PGDR Peer-to-peer based Market-guided Distributed routing  
CHIRON Chain-based hierarchical routing protocol  
MWTP Minimum weighted total power

EART Energy-aware QoS Routing  
CCS Concentric clustering scheme  
EADAT Energy-aware data aggregation tree  
МКМ Методи координатної маршрутизації  
GAF Geographic Adaptive Fidelity  
GEAR Geographic and Energy Aware Routing  
GOAFR The Greedy Other Adaptive Face Routing  
PCDST Directed spanning tree based power control  
UDG Unit Disk Graph  
NCG (Normal node | Cluster Head | Gateway)  
HABRP Hierarchical Adaptive Balanced energy efficient Routing Protocol  
TDMA Time Division Multiple Access

## ВСТУП

Останнім часом активний розвиток отримали самоорганізаційні мережі, основною перевагою яких є можливість встановлення з'єднання між терміналами по всюди і в будь-який момент часу без допомоги фіксованою, а на практиці часто жорстко визначеною, централізованої мережевої інфраструктури [50]. Мобільні самоорганізаційні мережі - одна з найбільш перспективних напрямків розвитку інформаційно-комунікаційних мереж. Однак необхідно відзначити і проблеми [51], безпосередньо впливають із самого визначення самоорганізаційних мобільних мереж: мобільність вузлів веде до додаткового підвищення динамічності топології мережі, так як до можливості обриву зв'язку через перешкоди або включення/вимикання вузла додається ймовірність його переміщення; запас джерел живлення мобільних вузлів може бути обмежений, у зв'язку з чим при проектуванні апаратних засобів і протоколів необхідно враховувати ще й енергоспоживання.

Енергозберігаюча конструкція в самоорганізаційних мережах важлива і складна, ніж в інших безпроводових мережах. По-перше, через відсутність інфраструктури мобільні вузли в мережі Ad-hoc повинні діяти як маршрутизатори і брати участь в процесі пересилання пакетів. Тому навантаження трафіку в цих мережах більше, ніж в інших бездротових мережах з фіксованими точками доступу або базовими станціями, і, отже, Ad-hoc мережі мають більше енергоспоживання. По-друге, енергозберігаючий режим повинен враховувати різні критерії продуктивності мережі. Наприклад, протоколи маршрутизації зазвичай намагаються знайти найкоротший шлях від джерел до пунктів призначення. Тому прості рішення, які враховують обмеження потужності, можуть привести до серйозного зниження продуктивності.

## 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ

Завдяки нещодавнім технологічним досягненням та швидким темпам розвитку технологій виробництва, виготовлення малих і недорогих датчиків стало технічно і економічно вигідним. Чутливі електронні датчики вимірюють навколишні умови, пов'язані з навколишнім середовищем і перетворюють данні в електронний сигнал і передають зібрані данні по безпроводному каналу. В результаті, після обробки даного сигналу можливо отримати інформацію про властивості об'єктів або подій, що відбуваються поблизу датчика. Велика кількість таких датчиків, які здатні контролювати велику територію, обмінюючись даними по безпроводному зв'язку, складають єдину безпроводову сенсорну мережу.

### 1.1. Загальні відомості

Безпроводова сенсорна мережа – це розподілена мережа, яка стійка до відмови окремих елементів. Водночас загальна кількість елементів може сягати від сотні до десятків тисяч сенсорних вузлів [1]. Сенсорні вузли обмінюються інформацією не тільки один з одним, а й з базовою станцією, що дозволяє їм надати зібрані данні для дистанційної обробки, аналізу та збереження. При цьому можлива функція ретрансляції повідомлень між різними елементами мережі, що дозволяє збільшити зону покриття до декількох кілометрів. Отже, узагальнену структурну схему безпроводової сенсорної мережі можна зобразити у вигляді двох груп датчиків, які контролюють дві різні ділянки простору та підключені до Інтернету за допомогою базових станцій (рис. 1.1).

Можливості сенсорних вузлів в БСМ можуть змінюватися в широких межах. Наприклад, прості вузли датчиків можуть контролювати один фізичний параметр, в той час як в більш складних датчиках можуть бути об'єднані різні методи зондування (наприклад, акустичні, оптичні, магнітні). Вони також можуть відрізнятися за можливостями передачі даних, наприклад, за допомогою ультразвуку, інфрачервоних або радіочастотних технологій з різною швидкістю

передачі даних і затримками. У той час як прості датчики можуть тільки збирати і передавати інформацію, більш потужні пристрої з кращими обчислювальними та енергетичними ресурсами, можуть самостійно проводити обробку та агрегацію даних. Такі пристрої часто дозволяють реалізувати додаткові функції в БСМ, наприклад, вони можуть утворювати першочергові шляхи зв'язку для з'єднання сенсорних вузлів з обмеженими ресурсами з базовою станцією. Нарешті, деякі пристрої можуть мати доступ до додаткових допоміжних технологій, наприклад, глобальних систем позиціонування (GPS) для визначення координат вузлів [2]. Однак, додаткові функції часто призводять до надмірних витрат енергії джерел живлення. А це стає причиною до зменшення часу життя мережі. Оскільки кожен елемент має власне автономне джерело живлення, то у випадку його виснаження, елемент відключається.

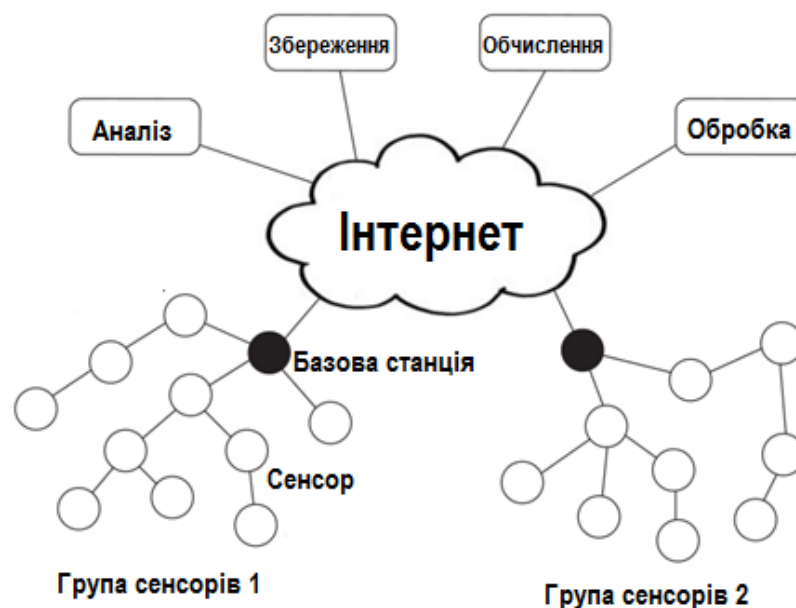


Рис. 1.1 Безпроводова сенсорна мережа

Отже, однією з основних цілей проектування БСМ є здійснення обміну даними при одночасному прагненні продовжити термін служби мережі і запобігти погіршенню з'єднання шляхом використання методів управління енергією, зокрема, вибору доцільного способу маршрутизації [3].

## 1.2 Мережеві топології

Три основні топології мережі для БСМ показані на рис. 1.2.

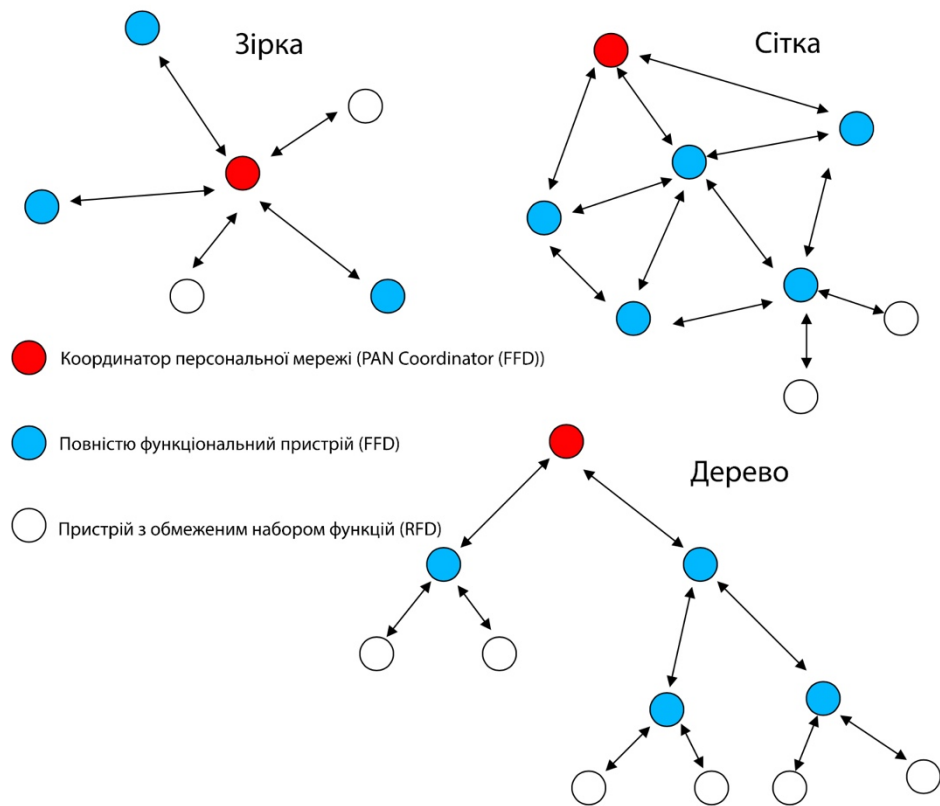


Рис. 1.2 Основні топології мережі для бездротової сенсорної мережі

У топології «зірка» кожен пристрій передає пакети в координатор PAN, і прямі передачі між пристроями заборонені. Щоб розширити покриття мережі, в топології осередків використовується багатоетапне розгортання. Деякий маршрутизатор розгорнуто між координатором PAN і цільовим вузлом датчика. Маршрутизатор також є звичайними пристроями, але крім операцій розпізнавання вони також можуть пересилати пакети від одного вузла датчика до іншого.

У топології дерево, маршрутизація до координатора PAN, створюється на основі відносин батько-нащадок. Дані пристрої можуть бути спрямовані в координатор PAN через його батьківський вузол. Недоліком топології дерева є



те, що збір маршрутизатора може привести до розриву всього маршруту. Відновлення топології може споживати багато енергії.

Нарешті, в сіткових топологіях дозволені прямі передачі між пристроями; отже, один пристрій може мати більше одного з'єднання з іншими вузлами, і надійність підвищується. Топологія сітки підходить для деяких високодинамічних додатків, що вимагають ефективною самоконфігурації і великого охоплення. Недоліком є збільшення затримки в мережі через ретрансляції повідомлень. Методи агрегування даних можуть бути класифіковані відповідно до топологій мережі: топологіями осередків і кластерів.

### 1.3 Аналіз існуючих методів маршрутизації

Фактори, які необхідно враховувати при розробці протоколів маршрутизації в БСМ:

- Спосіб розміщення вузлів: детермінований або випадковий.
- Обмеженість ємності батарей вузлів: від ємності батареї залежить час роботи кожного вузла [4].
- Спосіб збору даних: почасовий спосіб (постійний моніторинг або інтервальний), на підставі подій, на підставі запиту і гібридний спосіб [5].
- Гетерогенність функцій сенсорів вузлів: це можливість використовувати різні типи сенсорів в залежності від їх області застосування (контроль показників температури, тиску, вологості або виявлення вторгнення в зону, що охороняється).
- Розмірність: це кількість вузлів, розгорнені в певній області, він може досягати сотень тисяч або більше.
- Динамічна топологія: мережева архітектура сенсорних вузлів враховує статичну топологію але іноді необхідне використання мобільних БС або сенсорних вузлів, вузли можуть вийти з ладу внаслідок відсутності живлення, фізичних пошкоджень, екологічних втручань та інше [6].

- Параметри фізичного та каналного рівня Еталонної Моделі взаємодії відкритих Систем (ЄМ ВВС): низька пропускна спроможність радіоканалів вузлів (від 1 до 100 кБайт/с), та обмежений радіус дії.
- Покриття: фізична область є обмежена, кожен сенсор може покрити тільки обмежену фізичну область.
- Якість обслуговування (Quality of Service, QoS): наявність наборів параметрів (пропускна спроможність, затримка доставки пакетів та її варіація та ін.) для певного класу трафіка [7].

Всі методи маршрутизації, запропоновані для застосування в сенсорних мережах, можна класифікувати за наступними ознаками (рис. 1.3) [8]:

- за способом побудови і підтримки маршрутів: таблично-орієнтовані (табличні), зондові та гібридні;
- за кількістю одержувачів: однокористувальницькі, групові та „хвильові”;
- за кількістю і типом параметрів в метриці вибору маршруту: однопараметричні і багатопараметричні; енергозберігаючі, із заданою якістю обслуговування та ін.
- за кількістю маршрутів: одношляхові та багатошляхові;
- за типом маршрутів: симетричні та асиметричні.
- за наявністю обладнання позиціювання: координатні та некоординатні;
- за організацією мережі: ієрархічні та неієрархічні (однорівневі);
- за прийняттям рішень з маршрутизації: пасивні та активні (інтелектуальні)



Рис. 1.3 Класифікація методів маршрутизації в БСМ

Завданням методу маршрутизації є створення, зберігання і підтримання маршруту(ів) заданої якості між відправником і адресатом. У якості критерію оцінки маршруту можуть виступати наступні параметри: ширина смуги пропускання каналу, час затримки передачі пакетів у мережі, енергоємність батарей та ін.

На сьогоднішній день запропоновано ряд методів та протоколів маршрутизації призначених для використання в БСМ (перелік та порівняльна характеристика наведена в табл. 1) [10 – 42, 49].

Розглянемо детальніше окремі протоколи, їхні переваги та недоліки.

#### 1.4 Неієрархічні протоколи маршрутизації

Directed Diffusion [10]: Протокол використовує метод централізованої маршрутизації (створює маршрути від декількох відправників до одного пункту призначення).

Вузли поєднують дані різних відправників під час передачі. Базова станція запитує дані, надсилаючи запит на зонд. Запит зонда визначає завдання, покладені на мережу для виконання та коригування градієнта (маршрут для отримання даних в БС). Градієнт визначає пріоритет даних та шлях передачі інформації. Протокол працює, поки всі градієнти (маршрути) від відправника повернуться до БС. Мета протоколу - це визначення оптимального шляху для комбінування даних у декількох маршрутах (для забезпечення ефективної консолідації та передачі даних від відправника до БС), рис. 1.4.

Переваги: значна економія енергії, видалення надмірності, використання кешу (покрощує ефективність, стабільність та координацію між вузлами).

Недоліки: програми, які потребують постійної передачі даних (наприклад, екологічний моніторинг), неможливі; оскільки в цьому випадку методи збору даних на основі запитів неефективні в цьому випадку (визначають, чи відповідають дані запитам).

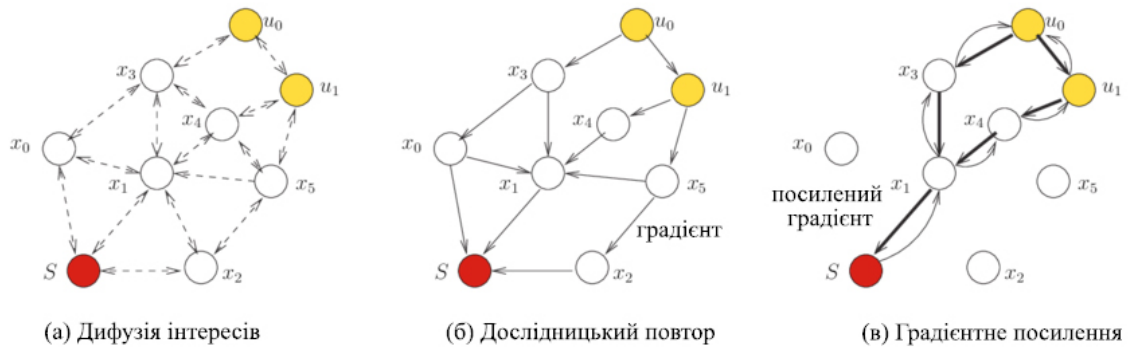


Рис. 1.4 Три фази Directed Diffusion

Rumor routing [11,12]: протокол призначений для мереж, які не мають можливості здійснювати географічну маршрутизацію. Для отримання інформації базова станція запитує лише вузли, які збирають інформацію (замість того, щоб запитувати всю мережу). Кожен вузол має таблицю сусідів, і після виявлення події записує її у свою таблицю (таблицю подій) та формує службове повідомлення (таблицю подій), яке описує кількість інформації (таблиця подій), надіслану в мережу (відповідно, діапазони маршруту). Делегат розподіляється між сусідами даного вузла (використовуючи таблицю сусідів) і синхронізує таблицю подій цього вузла з таблицями сусідніх подій. Як результат, кожен хост знає мінімальний маршрут до кожної події. Для інформування БС, вузли використовують найбільш відповідний маршрут, вивчаючи таблиці подій та сусідів.

Переваги: запитуйте лише окремі вузли замість усієї мережі.

Недоліки: протокол ефективний тільки тоді, коли відбувається незначна кількість подій. Коли подій багато, неможливо зберігати данні та таблиці по кожному вузлу.

Gradient-Based Routing (GBR) [13]: кожен мережевий вузол створює шлях до BS шляхом обчислення параметра, який називається вартістю вузла (мінімальна кількість діапазонів шляху для досягнення БС). Градієнтом називається різниця між вартістю вузла і значенням його сусідів. Пакет

надсилається за маршрутом з найбільшим градієнтом, тобто мінімальною кількістю інтервалів. Також протокол GBR має змогу використовувати допоміжні методи (передача даних під час передачі та розподілу даних) для рівномірного розподілу трафіку по всій мережі. GBR використовує три різні методи вибору маршруту при передачі даних:

- Стохастичний метод: якщо два або більше маршрутів мають однаковий градієнт, вузол обирає випадковий градієнт (маршрут).
- Енергетичний метод: завищує вартість вузла (з падінням до заздалегідь визначеного порогу ємності батареї), щоб вузли не надсилали дані по цьому шляху.
- Метод управління потоком даних: нові дані не відслідковуються через вузли, які в даний час є частиною інших шляхів передачі даних.

Переваги: рівномірний розподіл трафіку в мережі.

Недоліки: складність у виборі та керуванні методами вибору маршруту.

Information-driven Sensor Querying (IDSQ) та Constrained Anisotropic Diffusion Routing (CADR) [14]: основна ідея протоколів полягає в оцінці мінімальної затримки та максимальної пропускної здатності запитів до датчиків для отримання найбільш достовірної інформації з мінімальним споживанням енергії та побудови маршрутів у мережі. Протоколи поширюють запити, використовуючи набір критеріїв вибору інформації (активуються лише датчики, близькі до певної події, а маршрути динамічно задаються).

Переваги: енергозбереження, централізоване управління мережею.

Недоліки: він не визначає, який тип запиту та інформації надсилається між датчиками та БС (можна вважати лише технікою додаткової оптимізації).

COUGAR [15]: цей протокол використовує декларативні запити (обробка запитів не входить до функцій мережевого рівня, дозволяє підбирати необхідні датчики тощо). Протокол створює базу даних для сенсорної мережі, в якій вузли датчиків вибирають основні вузли (передача та з'єднання фрагментів даних під

час передачі даних до БС). БС створює шаблони попиту (визначає пріоритетність інформації та визначає критерії вибору батьківських вузлів).

Переваги: енергоефективна обробка даних в мережі з великим обсягом даних.

Недоліки: додавання схеми запитів для кожного вузла спричиняє додаткові витрати (споживання енергії, ємність пам'яті тощо). Вузли повинні бути синхронізовані для обробки даних у мережі (не всі дані надходять одночасно).

Active Query forwarding In sensor networks (ACQUIRE) [16]: протокол діє як розподілена база даних. БС надсилає в мережу запит (складний, разовий або на вимогу) та здійснює централізований збір даних. Кожен вузол відповідає на запит частково або повністю (використовуючи інформацію в кеші) і пересилає його назад на інший вузол або БС. Якщо інформація не оновлювалася протягом певного часу, вузол оновлює запит, використовуючи повідомлення, надіслане до сусідніх вузлів на кілька ретрансляційних відстаней. Розширений запит відправляється назад до БС за допомогою найкоротшого шляху.

Переваги: Одночасне реагування декількома вузлами, ефективний попит в мережі (встановлення значення діаметра мережі).

Недоліки: аналогічний протоколу COUGAR.

Energy Aware Routing (EAR) [17]: під час фази ініціалізації протоколу БС поширює накладні повідомлення у хвильовій формі. Відповідно до цього повідомлення, кожен вузол мережі обчислює всі маршрути (та їх витрати) до БС та записує їх у таблицю маршрутизації. Метрики використовуються як критерій вибору маршруту (споживання енергії на кожному маршруті та залишкова енергія кожного вузла). Коли вузол виявляє подію, він надсилає повідомлення своєму сусідові в таблиці маршрутизації (найменша вартість, залишкова енергія). Вибір найкращого діапазону маршруту повторюється до появи повідомлення у БС. БС періодично оновлює таблиці маршрутизації всіх вузлів мережі.

Переваги: ефективне використання енергії вузлами.

Недоліки: він вимагає збору інформації про розташування вузлів.

QoS aware routing protocol (QARP) [18]: Протокол маршрутизації, призначений для бездротових сенсорних мереж у реальному часі (залежно від затримки) з мобільними базовими станціями. Особливості протоколу:

- Виконує керування мережею, забезпечуючи баланс між управлінням потужністю та маршрутизацією.
- Алгоритми ефективно покращують якість прийому та обслуговування.
- Забезпечує мінімальні затримки шляхом поділу та передачі трафіку відповідно до типу.

Переваги: зменшує затримки та дозволяє передавати в мережі реального часу.

Недоліки: він вимагає збору інформації про розташування вузлів.

Efficient and QoS aware multi-path routing protocol (EQSR) [19]: Він призначений для створення маршрутів в умовах перешкод і повідомлень про затримку. В основному він використовує механізм протоколу Directed Diffusion. Під час фази пошуку маршруту вартість кожного з'єднання приймається як індикація. Під час створення маршруту враховуються співвідношення сигнал/шум, ємність буфера вузлів та залишкова енергія акумулятора.

Переваги: збільшує час мережі за рахунок балансування витрат на енергію між кількома вузлами та контролює затримку трафіку.

Недоліки: не підходить для побудови маршрутів у мультимедійних сенсорних мережах.

### 1.5 Ієрархічні протоколи маршрутизації

Дослідження великих сенсорних мереж показало, що навіть незначне збільшення динамічності топології мережі призводить до значного збільшення

трафіку послуг. Інтенсивність накладних інформаційних потоків збільшується (множення кількості вузлів на кількість топологічних змін). Очевидно, щоб вирішити цю проблему, необхідно ввести ієрархічний контроль БСМ, щоб розділити БСМ на окремі зони (кластери) шляхом виділення головних вузлів зони (ГВЗ), вузлів шлюзу та внутрішніх вузлів [20]. Множина ГВЗ та виділені вузли-шлюзи утворюють у мережі віртуальну магістраль, яка може використовуватися як для поширення інформації про маршрутизацію, так і для передачі корисної інформації. Варіанти створення ієрархічних методів маршрутизації представлені на рис. 1.5. Зі збільшенням кількості вузлів (на кілька тисяч) БСМ може бути розташований на  $m$ -рівнях ієрархії.



Рис. 1.5 Особливості реалізації методів ієрархічної маршрутизації

Однак це значно ускладнює процес управління мережею. Тому на практиці частіше використовують дворівневу мережеву організацію. БСМ забезпечує ієрархічну організацію

- підвищення стійкості мережевої топології (динаміка змін в мережевій області значно нижча, ніж динаміка змін у з'єднаннях окремих мережевих вузлів);
- повторне використання частотного (кодового) джерела радіозв'язку через його просторове різноманіття;



- підвищити ефективність управління мережею (ГВЗ може ефективно керувати своїми мережевими ресурсами порівняно з центром управління мережею).

Однак ієрархічна організація мережі ускладнює процес управління мережею та включає вирішення наступних завдань: динамічне створення та підтримка мережеских зон; динамічна адресація абонентів; внутрішньорегіональна та міжрегіональна маршрутизація пакетів; відновлення управління зоною унаслідок відмови (включення) ГВЗ.

Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) [21]: Протокол складається з двох фаз, фази налаштування та робочої фази. Під час фази налаштування певний вузол  $p$  набору визначається як ГВ. Вузол датчика обирає число  $r$  (0 до 1), якщо воно менше порогового значення,  $T(n)$  (1.1), вузол стає ГВ для певної області вузла ( $1/p$ ):

$$T(n) = \frac{p}{1 - p(r \bmod (1/p))} \quad \text{якщо } n \in G \quad (1.1)$$

де  $G$  - це набір вузлів, які обирають ГВ. Кожен обраний ГВ передає повідомлення іншим вузлам про те, що він є головним у кластері. Після отримання цього повідомлення вузли обирають кластер, до якого вони належать (рішення приймається відповідно до рівня потужності сигналу-запиту). ГВ генерують графік TDMA для кожного підлеглого вузла. Через певний час (заздалегідь визначений) мережа повертається до фази налаштування. ГВ спілкується із залежними вузлами, використовуючи різні методи доступу (CDMA), що зменшують інтерференцію вузлів інших кластерів.

Переваги: довший термін служби мережі.

Недоліки: у масштабних мережах неможливо здійснити (кластеризація накладає додаткові витрати на відбір та зміну ГВ), потрібна додаткова методика для визначення порогу енергії.

A Stable Election Protocol (SEP) [49]: Алгоритм SEP запропонований Дж. Марагдакісом як класичний алгоритму маршрутизації кластеризації гетерогенних мереж. Цей алгоритм розроблено на основі протоколу LEACH, додавши початковий енергетичний ізоморфізм цього елемента, використовуючи другу енергетичну гетерогенну мережу. Відповідно до неоднорідних характеристик мережа ділиться на звичайні вузли і вузли високого рівня, і встановлюється інша ймовірність вибору кластера, так що ймовірність вибору кластера для вузлів високого рівня більше, ніж у звичайного вузла. Так що високорівневі вузли і звичайні вузли наближаються до вименення одночасно, і продовжують стабільність мережевого циклу.

Алгоритм SEP присвоює кожному вузлу вагу, відповідну оптимальній ймовірності  $P_{opt}$ , а його вага є відношенням початкової енергії вузла високого рівня до початкової енергії нормального вузла. І визначається  $P_{nrm}$  для ймовірності звичайних зважених по вузлу виборів,  $P_{adv}$  для ймовірності звичайних зважених по вузлу виборів і визначається як:

$$\begin{cases} P_{nrm} = \frac{P_{opt}}{1 + \alpha m} \\ P_{adv} = \frac{P_{opt}}{1 + \alpha m} (1 + \alpha) \end{cases} \quad (1.2)$$

де  $\alpha$  - відношення початкової енергії вищого вузла до початкової енергії нормального вузла,  $m$  - частка розширених вузлів в загальній кількості вузлів.

Звичайні вузли і вузли високого рівня стають порогом заголовка кластера  $T(S_{nrm})$  і  $T(S_{adv})$ :

$$\begin{cases} T(S_{nrm}) = \frac{P_{nrm}}{1 - P_{nrm} \left[ r \bmod \left( \frac{1}{P_{nrm}} \right) \right]} \\ T(S_{adv}) = \frac{P_{adv}}{1 - P_{adv} \left[ r \bmod \left( \frac{1}{P_{adv}} \right) \right]} \end{cases} \quad (1.3)$$

де  $r$  - поточне число переходів.

Переваги: довший термін служби мережі.

Недоліки: у масштабних мережах неможливо здійснити.

Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol (TEEN) та Adaptive Periodic Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol (ARTEEN) [22, 23]. У протоколі TEEN вузли постійно сканують периметр, але інформація передається періодично. ГВ передають жорсткий поріг (порогова оцінка прочитаної інформації) та м'який поріг (незначно змінюється, ініціюючи вузол для передачі) на підвузли. Жорсткий поріг зменшує кількість передач (лише шляхом передачі необхідної інформації). М'який поріг контролює кількість передач (передача, що містить лише певну кількість інформації). Таким чином, користувач може контролювати рішення між точністю даних та енергоефективністю. При зміні головних вузлів (рис. 1.6 (а)) встановлюються нові порогові значення.

Переваги: менше споживання енергії, ніж мережі, що використовують таблично-орієнтовані методи.

Недоліки: коли поріг не встановлено, вузли ніколи не обмінюються інформацією та користувач не отримує жодних даних.

ARTEEN - це протокол, який має властивість гібридності, він може змінювати періодичність передач або порогові значення.

Параметри, які передають головні вузли (рис. 1.6 (б)):

1. Характеристики (X): - набір фізичних параметрів (тип необхідної інформації).
2. Пороги: параметри важкого порогу (ВП) та м'якого порогу (МП).
3. Графік: графік TDMA (встановлює час роботи кожного вузла).
4. Підрахунок часу (ПЧ): це максимальний період часу між двома наступними звітами, що посилається вузлом.

Вузли зчитують середовище постійно, але передають лише вузли, які прочитують задані дані (пороги). Якщо вузол не надсилає дані упродовж певного періоду часу (ПЧ), він примусово передає дані. Графік TDMA визначає час передачі для кожного вузла кластера.

Переваги: надає користувачеві великі можливості редагування параметрів маршруту (порогові значення для споживання енергії, підрахунок часу).

Недоліки: складність завдання та реалізація встановлення порогових функцій та часу підрахунку.



Рис. 1.6 Робота: а) TEEN; б) APTEEN

Minimum Energy Communication Network (MECN) та Small Minimum Energy Communication Network (SMECN) [24, 25]: протоколи обчислюють енергоефективні підмережі і визначають область ретрансляції кожного вузла. Основним завданням MECN є виявлення мережі з наявністю мінімальної кількості вузлів і визначення мінімальної кількості енергії для передачі між вузлами (створення енергоефективних шляхів).

SMECN є доповненням до MECN. Підграф  $G^*$  графа  $G$  представляє сенсорну мережу, знижуючи споживання енергії, використовуючи наступні умови:

1. Кількість меж у  $G^*$  менше ніж в  $G$ .
2. Енергія, необхідна для передачі даних з вузла до його сусідів підграфі  $G^*$ , менше енергії, необхідної для передачі всім сусідам у графі  $G$ . Передбачається, що  $r = (u, u_1, \dots, u_{k-1}, v)$  – маршрут між  $u$  і  $v$ , який перекриває  $k-1$  проміжних вузлів.

Загальне енергоспоживання одного маршруту:

$$C(r) = \sum_{i=0}^{k-1} (p(u_i, u_{i+1}) + c) \quad (1.4)$$

де  $u = u_0$  і  $v = u_k$ .

Енергія, що необхідна для передачі даних згідно цього протоколу:  $p(u, v)^n = td(u, v)^n$ , для певної відповідної константи  $t$ ,  $n$  – експонента втрат на шляху для моделі розповсюдження радіохвиль  $2 \geq n$ , і  $d(u, v)$  – відстань між  $u$  і  $v$ .

Недоліки: розглянутий алгоритм є локальним. Значні енергетичні витрати вносить обчислення підмережі з малим числом меж.

Virtual Grid Architecture routing (VGA) [26]: Щоб збільшити термін служби мережі, запропонована енергозберігаюча парадигма маршрутизації за допомогою інтеграції та обробки даних у мережі (головні вузли (ГВ) використовуються для отримання лінійної віртуальної топології). Мережа поділена на зони, і в кожній зоні обирається по одному ГВ. Побудова маршрутів та об'єднання сегментів даних відбувається на двох рівнях: локальному (зони ГВ виконують місцеве об'єднання) та глобальному (підмножина ГВ локальних об'єднань здійснює глобальну консолідацію частин даних). Вибір вузла - це питання, яке ГВ завершує для визначення оптимального набору маршруту та для консолідації інформації. Вибір набору оптимальних маршрутів та вибір вузлів для об'єднання інформації є повною проблемою.

Hierarchical Power-aware Routing (HPAR) [27]: протокол розділяє мережу на групи датчиків (зони). Кожна зона ієрархічно контролює передачу повідомлень (вибір напрямку передачі між зонами) для максимального збільшення часу роботи від акумулятора вузлів у мережі. Повідомлення надсилається по маршруту з максимальним мінімумом (вибирає максимальне значення з усієї мінімальної енергії, що залишилася). Протокол заснований на компромісі між зменшенням загальної споживаної енергії та збільшенням мінімальної залишкової енергії мережі. По-перше, алгоритм використовує алгоритм Дійкстри для визначення маршруту, що споживає мінімальну енергію ( $P_{min}$ ). По-друге, алгоритм виявляє маршрут, збільшуючи мінімальну залишкову енергію мережі. Запропонований алгоритм намагається оптимізувати обидва критерії рішення. Це досягається за рахунок зниження мінімального

енергоспоживання ( $zP_{\min}$  з параметром  $z \geq 1$  обмеження потужності, що споживається для надсилання одного повідомлення).

Переваги: висока продуктивність.

Недоліки: складність застосування у масштабних мережах.

Two-Tier Data Dissemination (TTDD) [28]: кожен відправник даних, таблично-орієнтований, створює мережеву структуру для передачі даних на мобільні базові станції. Вузли датчика нерухомі і знають своє положення. Як тільки відбувається подія, навколишні датчики генерують сигнал, і одним з них є відправник (формує звіти про дані). Щоб сформувати мережеву структуру, вузол відправки вибирає себе в якості вихідної точки для формування сітки і надсилає службове повідомлення кожному з чотирьох сусідніх через точки щонайближчої наявності інформації. Під час цієї процедури кожен проміжний вузол зберігає інформацію про відправника у власній таблиці та передає повідомлення сусіднім через точки (сусідів), за винятком вузла, який надсилає це повідомлення. БС динамічно коригує структуру маршрутів для інформації.

Переваги: низька затримка.

Недоліки: застосовується лише з фіксованою мережевою структурою; складність в отриманні інформації про місцезнаходження БС.

Peer-to-peer based Market-guided Distributed routing (P2PGDR) [29]: Основна мета протоколу - встановити маршрут на основі вимог різних типів трафіку. Протокол динамічно контролює побудову кластерів на основі характеристик мережі (кількість вузлів, продуктивність датчика вузла, пропускну здатність, тип трафіку).

Переваги: використовується в гібридних мережах (тип трафіку) для забезпечення певної якості обслуговування.

Недоліки: можливість збільшення затримки збільшується зі збільшенням трафіку.

Chain-based hierarchical routing protocol (CHIRON) [30]: Цей протокол маршрутизації базується на типі топології ланцюга, метою якого є зменшення таких недоліків, як затримка передачі даних. Цей протокол складається з двох етапів роботи:

- формування структури,
- вибір головних вузлів та передача даних.

Створюючи структуру мережі, вона поділяється на кілька областей. БС посилає керуючу інформацію для всіх вузлів, і всі вузли визначають, до яких груп вони належать. Тут використовується жадібний алгоритм.

Вибір головних вузлів кластера базується на максимальній залишковій енергії. По-перше, лідер групової ланцюга присвоюється вузлу, який знаходиться найдалі від БС. Потім вузол із залишковою енергією буде обраний головним вузлом.

Переваги: можуть ефективно зменшити довжину ланцюга та надлишкові шляхи передачі, зменшивши тим самим затримку передачі.

Недоліки: протокол не слід застосовувати у масштабних мережах, оскільки баланс споживання енергії та затримки передачі стає важко підтримувати при збільшенні мереж.

Minimum weighted total power (MWTP) [31] - енергоефективний протокол побудови однорідних кластерів. Періодично вибирає головний вузол кластера і намагається зменшити затримку пакетів і мінімізувати споживання електроенергії. Алгоритм найкоротшого шляху Дійкстри використовується для обчислення маршруту.

Переваги: висока продуктивність.

Недоліки: виникнення «вузьких місць» під час передачі в масштабних мережах.

Energy-aware QoS Routing (EART) [32] протокол використовується для передачі трафіку в режимі реального часу, вибираючи великий

енергоефективний маршрут, щоб збалансувати енергоспоживання вузлів і продовжити термін служби мережі. Пропонований протокол враховує параметри маршрутизації, затримки та підвищення надійності QoS.

Переваги: побудувати енергоефективний шлях передачі трафіку в режимі реального часу.

Недоліки: підходить лише для передачі певного типу трафіку.

Concentric clustering scheme (CCS) [33]: централізований протокол маршрутизації енергозбереження. Вся мережа розділена на кілька концентричних кругових доріжок, що представляють різні кластери на різних рівнях. Усі вузли на всіх рівнях передають дані до найближчих сусідніх вузлів. Після вибору головного вузла дані передаються від одного головного вузла до двох сусідніх головних вузлів з переходом на різних рівнях.

Переваги: Підвищує енергоефективність як протокол PEGASIS.

Недоліки: затримка та незбалансоване споживання електроенергії.

Energy-aware data aggregation tree (EADAT) [34]: Основна мета цього алгоритму - вирішити проблему дефіциту енергії, звернувши увагу на енергію, витрачену на маршрутизацію даних. Алгоритм запускається з вузла, який надсилає службове повідомлення. Шлюз вважається коренем вузлів у дереві збору даних. Якщо вузол датчика вперше отримує повідомлення управління службою, він встановлює таймер, який рахує час, якщо канал перебуває в режимі очікування. З кожним датчиком пов'язаний таймер. Початкове значення таймера - це зменшується функція, що залишилася потужність. Іншими словами, чим більша залишкова потужність, тим менше значення таймера і коротший час витримки. Під час цього процесу датчик тепер вибирає вузол з більшою потужністю і коротшим шляхом до "головного" приймача. Коли таймер виходить з ладу, лічильник вузлів збільшується по черзі і передає керуюче повідомлення.



Переваги: легко здійснити, обчислюються два параметри: відстань між силами та вузлами.

Недоліки: потенційно небезпечні моменти при перебудові дерева, після втрати придатності старої структури.

У табл. 1 приведено порівняння ієрархічних і неієрархічних протоколів маршрутизації які використовуються в сенсорних мережах.

Таблиця 1. Порівняння ієрархічних і неієрархічних протоколів маршрутизації

Ієрархічна маршрутизація	Неієрархічна маршрутизація
Планування на основі резервування	Планування на основі конкуренції
Уникають зіткнень	Присутні зіткнення
Об'єднання даних головними вузлами	Вузли об'єднують дані, що поступають від сусідів
Вимагає глобальної і локальної синхронізації	Інтервали маршруту, формуються "на льоту" без синхронізації
Енергетичні витрати пов'язані з формуванням кластерів	Маршрути формуються тільки в областях, що мають інформацію для передачі
Низька затримка	Затримка при включенні проміжних вузлів і формуванні множини маршрутів
Рівномірні енергетичні втрати, немає можливості управляти енергетичними втратами	Енергетичні втрати залежать від моделі трафіка
Рівномірний розподіл каналів	Рівномірний розподіл каналів не гарантований

### 1.6 Координатні (географічні) протоколи маршрутизації

Особливості БСМ визначають основні вимоги методів координатної (географічної) маршрутизації (МКМ): розподілена функціональність; мінімальне завантаження мережі службовою інформацією у відповідь на зміни в мережі; відсутність петельних шляхів; швидка конвергенція; гарантія доставки

пакетів адресату. При синтезі методу маршрутизації ці вимоги повинні бути виконані та виконувати наступні функції (рис. 1.7):

- 1) Збір інформації про стан мережі (яку інформацію ви будете збирати, коли і як часто?);
- 2) Зберігання маршрутів (яка інформація та де вона зберігається?);
- 3) Обчислення шляху передачі пакетів (із зазначенням правил для вибору одного або декількох вузлів ретрансляції).

Дивлячись на обсяг моніторингу стану мережі, її можна збирати глобально (інформація про стан усіх вузлів мережі) або локально на відстані, вказаній номером ретранслятора (1, 2, ..., R) ділянок ретрансляцій). Тип і спосіб збору інформації про стан мережі тісно пов'язані [35].



Рис. 1.7 Функції методів геомаршрутизації

Geographic Adaptive Fidelity (GAF) [36]: протокол маршрутизації з економією енергії (розроблений для ad-hoc мереж, але також застосовний до сенсорних мереж). Мережа розділена на зони (створюється віртуальна мережева архітектура). Кожен вузол використовує систему GPS. Протокол GAF має три стани: виявлення (ідентифікація сусідів у районі), активна обробка (передача повідомлення, вузол - маршрутизатор) та бездіяльність (режим сну). Кожен вузол у зоні визначає час виконання (життя) та відправляє його сусідам. Коли діючий вузол (маршрутизатор) закінчується, незадіяні вузли включаються, і один з них стає активним (маршрутизатором). Тому GAF може значно збільшити термін служби мережі. На рис. 1.8 показаний приклад зонування. Зони

вибираються рівними та квадратними (вибір розміру зони залежить від заданої потужності передачі та напрямку передачі інформації). Коли сигнал досягає відстані  $a = \frac{r}{\sqrt{5}}$ , відбувається вертикальна і горизонтальна передача інформації (два сенсорні вузли в сусідніх вертикальних або горизонтальних областях можуть передавати інформацію безпосередньо.) При діагональній передачі інформації сигнал повинен покривати відстань  $b = \frac{r}{2\sqrt{2}}$ .

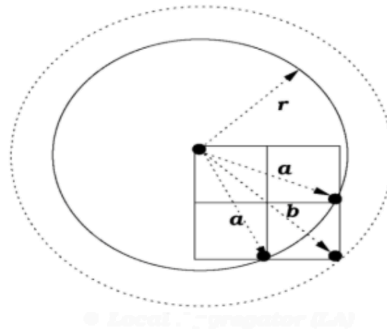


Рис. 1.8 Приклад зонування сенсорної мережі

Протокол GAF розроблений для немобільних (GAF-basic) і мобільних (GAF-mobility adaptation) вузлів.

Недоліки: проблемний вибір ГВ; існує складність використання GPS-технологій на етапі проектування БСМ.

Geographic and Energy Aware Routing (GEAR) [37]: використовує інтуїтивні функції енергозберігаючої та географічно поінформованої побудови маршруту (вибір сусідів) для відправки пакета адресату. Ключова ідея - обмежити кількість запитів, враховуючи лише конкретну область, а не запити всієї мережі.

Кожен вузол в GEAR знає своє місцезнаходження, місцезнаходження своїх сусідів (за допомогою GPS) і записує орієнтовну вартість (поєднання енергії вузла/відстані вузла цілі) та вивчену вартість (доповнення до оцінної вартості, яка описує витрати маршрутизації щодо порожнеч (вузол не має сусіда) в мережі).

Протокол складається з двох етапів:

- побудова шляху для відправки пакета до певної зони: вузол візуально перевіряє своїх сусідів (вибирається найближчий сусід (враховується залишок енергії), в області, заданій на наступному кроці.

Якщо у вузла немає сусідів (недійсний), тоді вартість вибору маршруту (сусіда) базується на функції перегляду;

- побудова шляху в межах даного регіону: коли пакет досягає певного регіону, маршрут здійснюється шляхом рекурсивного географічного відльоту (висока щільність вузла) або обмеженого поширення хвилі (низька щільність вузла).

Переваги: зменшує споживання енергії порівняно з маршрутами та покращує доставку пакетів.

Недоліки: недостатня кількість в мережах з високою мобільністю вузлів.

MFR, DIR, и GEDIR [38]: У цих протоколах відправник або будь-який проміжний вузол створює маршрут на основі конкретного критерію. Алгоритм GEDIR - "жадібний" алгоритм, який завжди надсилає пакет сусіду на мінімальній відстані. У протоколі DIR вибрано для формування сусіднього маршруту з мінімальним кутовим відстанню від уявної лінії, що з'єднує цей вузол і ціль. У методі MFR наступний крок вибирається сусідом з мінімальним скалярним продуктом  $DA \cdot DS$ , де S, D - відправник і одержувач. SD представляє Евклідову відстань між вузлами D і S.

Переваги: висока продуктивність протоколу (низька затримка, висока швидкість передачі даних та т. п.)

Недоліки: протокол DIR можна зациклювати (якщо не запам'ятовується попередній трафік або не встановлено часовий інтервал).

The Greedy Other Adaptive Face Routing (GOAFR) [39]: геометричний алгоритм ad-hoc маршрутизації, який поєднує в собі „жадібну” та face маршрутизацію. Алгоритм створює маршрут від відправника за допомогою "жадібного" методу від точки s до адерсата t по краю мережевого графіка. Мета

протоколу - визначити найближчий до цілі вузол за допомогою геометричних площин.

Переваги: висока продуктивність у мережах з високою щільністю вузлів.

Недоліки: не використовується для простих конфігурацій.

SPAN [40]: SPAN - протокол, що є таблично-орієнтованим. У мережі обираються вузли-координатори (маршрутизатори чи ретранслятори), а інші вузли залишаються у сплячому режимі. Мережа регулярно змінює вузли-координатори (збалансований розподіл енергії).

Кожен вузол періодично передає повідомлення "hello", що містить статус вузла (координатор чи некоординатор, місцезнаходження та кількість сусідів).

Під час передачі пакетів по мережі координатні вузли використовують „жадібної” метод маршрутизації. Вузол відправника "позначає" кожний пакет, що вказуючи координати розташування вузла призначення.

Після отримання пакету вузол координатора поза радіодіапазоном пересилає пакет до сусіднього координатора (найближчого до пункту призначення). Якщо такого координатора немає, пакет відправляється в звичайний вузол, ближче до одержувача.

Якщо вузол "спить", пакети для нього не втрачаються, а зберігаються їх сусідом і передаються при його включенні.

Недоліки: недостатня енергоефективність через необхідність підтримувати маршрути для двох-трьох сусідів.

Directed spanning tree based power control (PCDST) [41]: Оскільки ресурси БСМ обмежені, протокол координує мережевий та фізичний рівень моделі OSI. Координати вузлів використовуються для створення дерева маршрутизації. Протокол збільшує час мережі та покращує пропускну здатність мережі.

Переваги: врівноважує споживання енергії та надійність мережі (підвищує ефективність).

Недоліки: не підходить для малих мереж.

Таблиця 2. Порівняльна характеристика методів (протоколів) маршрутизації в БСМ

Протоколи	Класифікація	Мобільність вузлів	Розмірність мережі	Об'єднання даних в мережі	QoS	Використання GPS	Енергоспоживання
SPIN	Н, З, Пр. З., Пр. У., Ц	Нормальна	Обмежена	Так	Ні	Ні	Обмежене
Directed Diffusion	Н, З, Пр. У, Ц	Обмежена	Обмежена	Так	Ні	Ні	Обмежене
Rumor Routing	Н, Т, Пр. У, Ц	Обмежена	Добра	Так	Ні	Ні	Н/Д
GBR	Н,Ц	Обмежена	Обмежена	Так	Ні	Ні	Н/Д
MCFA	Н,Пр,У,Ц	Ні	Добра	Ні	Ні	Ні	Н/Д
CADR	Н, Пр. З., Ц, Г	Ні	Обмежена	Так	Ні	Ні	Обмежене
COUGAR	Н, Пр. З., Ц	Ні	Обмежена	Так	Ні	Ні	Обмежене
AQUIRE	Н, З, Ц	Обмежена	Обмежена	Так	Ні	Ні	Н/Д
EAR	Н, Т, Ц	Обмежена	Обмежена	Ні	Ні	Ні	Н/Д
LEACH	И,Пр.У	Стационарні БС	Добра	Так	Ні	Ні	Максимальне
SEP	И,Пр.У	Стационарні БС	Добра	Так	Ні	Ні	Максимальне
TEEN і APTEEN	И,Пр.З	Стационарні БС	Добра	Так	Ні	Ні	Максимальне
PEGASIS	И, З, Пр. З	Стационарні БС	Добра	Ні	Ні	Ні	Максимальне
MECN і SMECN	И,Пр.З	Ні	Обмежена	Ні	Ні	Ні	Максимальне
SOP	И, Пр. З,Т	Ні	Обмежена	Ні	Ні	Ні	Н/Д
HPAR	И,Т	Ні	Добра	Ні	Ні	Ні	Н/Д
VGA	И,Т	Ні	Добра	Так	Ні	Ні	Н/Д
TTDD	И,Т,НЦ	Так	Обмежена	Ні	Ні	Ні	Обмежене
GAF	К,НЦ	Обмежена	Добра	Ні	Ні	Так	Обмежене
GEAR	К,Пр.З	Обмежена	Обмежена	Ні	Ні	Так	Обмежене
SPAN	К,НЦ,Т	Обмежена	Обмежена	Ні	Ні	Так	Н/Д
MFR і GEDIR	К,Т	Ні	Обмежена	Ні	Ні	Так	Н/Д
GOAFR	К,НЦ	Ні	Добра	Ні	Ні	Так	Н/Д
QARP	Н,Г,НЦ	З моб. базовою станцією	Добра	Так	Ні	Ні	Обмежене
MWTP	И,Ц	Так	Добра	Так	Так	Ні	Обмежене
P2PGDR	Г,Ц,И	Ні	Добра	Так	Так	Ні	Н/Д
EART	И,Г	Ні	Добра	Ні	Так	Ні	Обмежене
PCDST	И,Т	Ні	Добра	Так	Ні	Так	Обмежене
EQSR	И,Г,Ц	Так	Добра	Так	Так	Так	Обмежене
CHIRON	И,НЦ	Ні	Обмежена	Так	Ні	Ні	Середнє
EADAT	Ц,И	Ні	Обмежена	Так	Ні	Так	Обмежене
PEDAP	Ц,И	Так	Добра	Так	Ні	Ні	Середнє
HGMR	НЦ,И,У	Ні	Добра	Так	Так	Так	Низьке
GMCARE	НЦ,И	Ні	Обмежена	Так	Ні	Ні	Середнє
LBDD	НЦ,И	Так	Добра	Так	Ні	Ні	Середнє
VLDD	НЦ,И,У	Так	Добра	Так	Ні	Так	Середнє
CCS	Ц,И	Ні	Добра	Так	Ні	Ні	Середнє
BATR	НЦ,И	Ні	Обмежена	Так	Так	Ні	Низьке

Скорочення які використані в таблиці: Н–неієрархічна маршрутизація, И–ієрархічна маршрутизація, К–координатний метод маршрутизації, З–зондовий метод маршрутизації, Т–таблично–орієнтований метод маршрутизації, Г–гібридний метод маршрутизації, Пр.З.–протокол використовує запити, Пр.У.–протокол використовує узгодження, Ц–централізований протокол, НЦ–не централізований протокол, НД –недіагностувався.

## Висновки до розділу 1

У цьому розділі досліджена класифікація протоколів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах. Наведені переваги та недоліки кожного з розглянутих протоколів маршрутизації. Детально описано алгоритм роботи протоколів. Усі розглянуті протоколи маршрутизації широко використовуються у БСМ і є базовими протоколами з можливістю подальшої оптимізації та модифікації.

Наразі для БСМ розроблено велику кількість методів (протоколів) маршрутизації. Однак більшість орієнтовані на цивільне використання та не враховують усіх особливостей функціонування БСМ. Синтезуючи нові методи маршрутизації для БСМ, необхідно враховувати їх:

1. Обмежену енергоємність батарей вузлів та необхідність максимізації тривалості функціонування сенсорної мережі.
2. Обмежену кількість адресатів (базових станцій) сенсорної інформації.
3. Типи та частота завантаження.
4. Види та якість передачі інформації для моніторингу.

## 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ МАРШРУТИЗАЦІЇ

Бездротові сенсорні мережі (WSN) складаються з безлічі однорідних або гетерогенних сенсорних вузлів з обмеженими ресурсами. Методи маршрутизації є найбільш важливою проблемою для мереж, де ресурси обмежені. Зростання обчислювальної потужності технології WSN вимагає, щоб ці сенсорні вузли були все більше оснащені для виконання більш складних функцій. Кожен датчик в основному обмежений за рівнем енергії, потужності обробки та чутливості. Таким чином, мережа цих датчиків створює більш надійну і точну мережу. Було проведено безліч досліджень по WSN, які показали, що ця технологія постійно знаходить нове застосування в різних областях, таких як віддалені і ворожі райони, як це видно у військових, для спостереження за полем битви, спостереження за територією противника, виявлення атак і етикету безпеки. Інші застосування цих датчиків використовуються в секторах охорони здоров'я, де пацієнти можуть носити невеликі датчики для отримання фізіологічних даних, і при розгортанні в районах, схильних до стихійних лих, для моніторингу навколишнього середовища. Відзначено, що для забезпечення надійної доставки інформації, необхідне агрегування і об'єднання інформації, що необхідно для ефективного і дієвого зв'язку між цими сенсорними вузлами. Тільки оброблена і стичнута інформація повинна доставлятися в приймачі, щоб зменшити енергію зв'язку, продовжуючи ефективний термін служби мережі при оптимальній доставці даних.

Неефективне використання доступної енергії призводить до низької продуктивності і короткому життєвому циклу мережі. З цією метою енергія в цих датчиках є дефіцитним ресурсом і повинна ефективно управлятися.



## 2.1 Представлення моделі бездротової мережі

Будь-яку бездротову сенсорну мережу можна представити у вигляді зваженого орієнтованого графа  $G=(V,E,\omega)$ , в якому безліч вершин  $V$  відповідає вузлам мережі в кількості  $|V| = n$ , дуга  $e = (v;w) \in E$ , вона є спрямованою від вершини  $v$  до вершини  $w$ , яка позначає бездротове з'єднання (канал зв'язку) між вузлами  $v$  і  $w$ , у яких передача інформації можлива тільки в одну сторону від  $v$  до  $w$ , а  $\omega: E \rightarrow [1; +\infty)$  - це деяка вагова функція призначена для дуг графа. Граф  $G$  вважається сильно зв'язковим, це означає, що для будь-якої пари вершин  $v$  та  $w$  на графі  $G$  існує два види шляху - від  $v$  до  $w$ , так і від  $w$  до  $v$ .

Надалі в роботі наступні пари термінів є синонімами: «граф» - «мережа», «вершина» - «вузол» і «дуга» - «з'єднання».

Припустимо, що між двома вузлами можна задати максимальну можливу дальність радіозв'язку рівну  $r$  м. Тоді будь-які два вузла  $v$  і  $w$  передають пакети даних один одному тільки в тому випадку, якщо відстань між ними, менше або дорівнює  $r$ , тобто будь-які дві вершини  $v$  і  $w$  вважаються сусідніми тільки при умові  $d_E(v,w) \leq r$ , де  $d_E(v,w)$  - Евклідова відстань між відповідними вузлами  $v$  та  $w$ .

Вважаємо, що вузли можуть передавати пакети тільки по одному каналу зв'язку, тому сусідні вершини  $v$  і  $w$  з'єднані тільки двома протилежно спрямованими дугами  $(v;w)$  і  $(w;v)$ . У реальних радіочастотних каналах можливі помилки при прийомі даних, тому якість зв'язку між сусідніми вузлами  $v$  та  $w$  описується двома параметрами:  $\beta_{vw}$  - ймовірність бітової помилки при передачі даних від  $v$  до  $w$ ,  $(\beta_{wv}$  - ймовірність бітової помилки при передачі в зворотному напрямку. Тут і далі розглядаємо лише цифрові канали зв'язку.

Вагова функція  $\omega(e)$  для дуги  $e = (v;w)$  вважається метрикою вартості з'єднання між сусідніми вузлами  $v$  і  $w$ . Чим більше значення цієї вартості з'єднання  $e = (v;w)$ , тим витрати ресурсів вузлів на передачу пакета більше від вузла  $v$  до сусіднього вузла  $w$ . Витратами можна вважати різні величини

(наприклад, оцінка кількості енергії необхідної на передачу та/або прийом), при цьому вагова - функція задається в такому вигляді, що  $1 \leq \omega(e) < \infty$  для  $\forall e \in E$ .

Звернемо увагу на те, що якщо граф  $G$  змінити на звичайний неорієнтований, то відстані між вузлами  $d_E(v;w)$  необхідно нормувати щодо дальності радіозв'язку  $r$  і прийняти  $\beta_{vw} = \beta_{wv} = 0$  для  $\forall v, w \in V$ , то ми отримаємо модель мережі, яка виглядає як граф одиничного радіуса (unit disk graph (UDG)), така модель є в багатьох дослідженнях і використовується як найбільш просте уявлення мережі, але, як буде показано далі, у ній не відображаються особливості бездротових з'єднань, що призводить до істотних розбіжностей між теоретичними і експериментальними результатами.

Безліч сусідніх вузлів вузла  $v$  будемо називати його мережевим оточенням і позначимо як  $N(v)$ , тобто  $N(v) = \{w \in V : (v;w) \in E\}$ . Вважаємо, що кожен вузол мережі здатний підтримувати в актуальному стані інформацію про власний мережевому оточенні, зокрема адреси сусідніх вузлів, якість зв'язку з ними, їх залишковий запас енергії та інші службові дані, але при цьому обсяг цієї інформації фіксований і не залежить від  $n$ .

Далі припустимо, що вузли розташовані випадково і рівномірно на двомірній площині і покривають площу  $A$  м<sup>2</sup>. Якщо знехтувати крайовими ефектами на кордоні площі покриття мережі, ймовірність наявності у деякого вузла сусіднього вузла дорівнює ймовірності попадання точки в коло радіуса  $r$ , тобто

$$\lambda = \frac{\pi r^2}{A}, \quad (2.1)$$

Очевидно, що кількість вузлів, що знаходяться в межах кола радіуса  $r$ , є біноміальною випадковою величиною з параметрами розподілу  $n$  і  $\lambda$ . Отже, ймовірність наявності у вузла рівно  $m$  сусідів дорівнює

$$\Pr[|N(v)| = m] = C_n^m \lambda^m (1 - \lambda)^{n-m}, \quad \forall v \in V, \quad (2.2)$$

Використовуючи властивості біноміального розподілу, отримуємо, що середня кількість сусідів у кожного вузла, тобто  $\rho = M[|N(v)|]$  для  $\forall v \in V$ , дорівнює

$$\rho = n\lambda = \frac{n\pi r^2}{A}, \text{ вузлів.} \quad (2.3)$$

Величину  $\rho$  будемо називати щільністю мережевого оточення і щільністю розміщення вузлів в просторі. У термінах теорії графів параметр  $\rho$  можна задати наступним чином:

$$\rho = \sum_{v \in V} dg^-(v) = \frac{1}{n} \sum_{v \in V} dg^+(v) = \frac{1}{2n} \sum_{v \in V} dg(v), \quad (2.4)$$

де  $dg^-(v)$ ,  $dg^+(v)$ ,  $dg(v)$  - полустепені заходу, полустепені результату і ступінь вершини  $v$  відповідно.

Під діаметром мережі  $D$  розумітимемо максимальна відстань між всілякими парами вузлів, виміряний як довжина найкоротшого шляху на графі  $G$  між відповідними вершинами. Параметр  $D$  відображає розмір топології мережі і оцінюється за формулою

$$D \approx \frac{\sqrt{A}}{rd_{hop}(\rho)} = \frac{1}{d_{hop}(\rho)} \sqrt{\frac{\pi n}{\rho}}, \quad (2.5)$$

Якщо при передачі пакету до вузла-призначення на кожному кроці ретрансляції скорочується Евклідова відстань до нього, то середня відносна дистанція  $d_{hop}$  (нормована до  $r$  величина), пройдена за одну елементарну передачу, залежить від обраних критеріїв маршрутизації (див. далі) і щільності розміщення вузлів в просторі  $\rho$ . У даній роботі для оцінки величини  $d_{hop}$  використовуємо вираз з роботи [30],

$$d_{hop}(\rho) = 1 + \exp(-\rho) - \int_{-1}^1 \exp\left[-\frac{\rho}{\pi} (\arccos x - x\sqrt{1-x^2})\right] dx, \quad (2.6)$$

хоча можуть використовуватися й інші формули розрахунку  $d_{hop}$ .

Припущення про розподіл вузлів на площині вибрано заради наочності. При має місце на практиці розподілі вузлів в тривимірному просторі змінюється тільки вид виразів, що описують співвідношення між  $n$ ,  $\rho$  і  $D$ , а інші міркування залишаються колишніми, за винятком спеціально обумовлених випадків.

Незважаючи на те, що в реальності мережу безперервно трансформується з різних причин (вихід з ладу або додавання нових вузлів, зміна умов поширення

сигналів і т.п.), в роботі передбачається, що мережа знаходиться в стаціонарному режимі. Це допущення не знижує значущість отриманих результатів, оскільки швидкість подібних змін мала і топологія мережі постійна на інтервалах часу значно більших проміжків часу, які потрібні для виявлення маршрутів, при цьому вузли постійно і своєчасно адаптуються до поточного стану мережі (зокрема, оновлюють свої віртуальні координати і інформацію про мережевий оточенні).

## 2.2 Завдання маршрутизації

Маршрут  $p(s, t)$  між вузлом-відправником  $s$  і вузлом-одержувачем  $t$  - це шлях в орієнтованому зваженому графі  $G$  у вигляді кінцевої послідовності вершин  $\{s - v_0, \dots, v_i = t\}$  такий, що дуга  $(v_i; v_{i+1}) \in V, i = \overline{0: l - 1}$ .

Кількість з'єднань  $l$ , через які маршрут  $p(s, t)$  проходить, будемо називати довжиною маршруту і позначати як  $l(p)$ .

Вартість маршруту  $p(s, t)$  визначимо як суму вартостей з'єднань, через які він проходить, тобто

$$C[p(s, t)] = \sum_{i=0}^{l-1} \omega[v_i; v_{i+1}], \quad (2.7)$$

Між вузлом - відправником  $s$  і вузлом - одержувачем  $t$  може існувати кілька різних маршрутів, всю безліч яких позначимо як  $P(s, t)$ .

В області БСМ можна виділити два завдання маршрутизації, що відрізняються критеріями пошуку маршрутів:

- завдання пошуку оптимальних маршрутів;
- завдання маршрутизації із забезпеченням максимального часу життя мережі.

При цьому для розширення сфер практичного застосування БСМ зазначені завдання мають бути вирішені як для типу трафіку «багато-до-одного», так і для типу трафіку «багато-до-багатьох». Крім того, вирішення поставлених завдань

повинні мати розподілену реалізацію з низькою алгоритмічної складністю і високу масштабованість.

### 2.3 Завдання пошуку оптимальних маршрутів

У цьому завданні оптимальним маршрутом вважається шлях доставки пакетів інформації від вузла-відправника  $s$  до вузла-призначення  $t$ , що вимагає мінімальних сумарних витрат ресурсів вузлів цього шляху, тобто шлях володіє мінімальною вартістю:

$$p_{opt}(s, t) = \min_{p(s,t) \in P(s,t)} C[p(s, t)], \text{ для } \forall s, t \in V, \quad (2.8)$$

Вирішенню саме цього завдання присвячено переважна більшість робіт з маршрутизації в БСМ. При цьому, як правило, робиться припущення, що  $\omega(e) = 1$  для  $\forall e \in E$ , і завдання зводиться до проблеми пошуку найкоротших маршрутів, оскільки вважається, що витрати енергії (найбільш важливий ресурс в БСМ) на передачу по маршруту  $\rho$  залежать тільки від його довжини  $l(\rho)$ . Однак далі буде показано, що в загальному випадку це допущення помилково.

### 2.4 Завдання маршрутизації із забезпеченням максимального часу життя мережі

В області БСМ одним з найбільш важливих параметрів є час життя мережі, яке визначається як її термін експлуатації до першого виходу з ладу одного з вузлів через виснаження автономного джерела живлення.

Описаний вище пошук маршрутів з мінімальною вартістю може призводити до нерівномірного розподілу мережевого навантаження між вузлами мережі, так як вузли, що знаходяться на часто використовуваних оптимальних маршрутах, будуть частіше виконувати ретрансляцію пакетів. Отже, можуть утворюватися точки підвищеного навантаження, в яких виникнуть проблеми з пропускнуою здатністю і/або передчасним виснаженням джерел енергії. Тому для забезпечення високих показників якості. Обслуговування (наприклад, тривалого

часу життя мережі) для всієї мережі в цілому необхідно виконувати так зване балансування навантаження (Load balancing), тобто розподіл потоків трафіку між вузлами для більш рівномірного використання їх ресурсів (в першу чергу, енергії). Таким чином, завдання пошуку маршрутів з балансуванням навантаження полягає в оптимізації загальних витрат для мережі в цілому, а не для кожного маршруту окремо незалежно від інших. Природно, в цьому випадку деякі маршрути можуть перестати бути оптимальними за критерієм (2.8).

Існують різні формулювання завдання маршрутизації із забезпеченням максимального часу життя мережі, наведемо формулювання з роботи [47]. Припустимо, що кожен вузол мережі  $v \in V$  має початковий запас енергії  $E_0(v)$ , а інтенсивність генерованого їм трафіку дорівнює  $q_v$ . Також вважаємо, що потік пакетів від вузла  $v$  до вузла  $w$  дорівнює  $q_{vw}$ , а на передачу одного пакета потрібна кількість енергії  $e_{vw}$ . Позначимо через  $S$  і  $T$  безліч вузлів - відправників і безліч вузлів - одержувачів пакетів відповідно.

Тоді можна записати умову балансу вхідних і вихідних потоків

$$\sum_{w \in N(v)} q_{wv} + q_v = \sum_{u \in N(v)} q_{vu}, \quad \forall v \in V \setminus T, \quad (2.9)$$

Якщо у спрощеному варіанті враховувати витрати енергії тільки на передачу пакетів, то час життя вузла  $v$  при загальному мережевому трафіку  $q = \{q_{vw}\}$  дорівнює:

$$LT_v(q) = \frac{E_0(v)}{\sum_{w \in N(v)} e_{vw} q_{vw}}, \quad (2.10)$$

Отже, відповідно до даного вище визначенню час-життя мережі визначається виразом

$$LT(q) = \min_{v \in V} LT_v(q), \quad (2.11)$$

і завдання оптимізації має наступний вигляд:

$$\max_q LT(q) = \max_q \min_v \frac{E_0(v)}{\sum_{w \in N(v)} e_{vw} q_{vw}}, \quad (2.12)$$

Якщо  $e_{vw} = e_v$  для всіх  $w \in N(v)$ , то описана задача еквівалентна відомій оптимізаційній задачі про максимальний потік з обмеженням пропускної

здатності як дуг, так і вершин. Однак на практиці ця умова нездійсненна, тому що витрати енергії на передачу пакета  $e_{vw}$  залежать, зокрема, від відстані (при використанні адаптивного регулювання вихідної потужності передавача) і якості зв'язку між вузлами  $v$  і  $w$ , тому задачу (2.12) слід розглядати як окрему.

## 2.5 Алгоритм вибору шлюзу

Кожен датчик  $S$  обирає себе в якості шлюзу на початку кожного періоду, переходу. Це рішення засноване на запропонованому відсотку шлюзів для мережі (певному апіорі) і кількості періодів, в яких вузол був шлюзом до сих пір. Необхідний відсоток шлюзів обирається таким чином, щоб очікувана кількість вузлів шлюзу для кожного раунду становила  $N_g$ . Таким чином, якщо в мережі є  $N \times m$  NCG вузлів (розвинутих вузлів), бажаний відсоток шлюзів буде:

$$P_g = \frac{N_g}{N \times m}, \quad (2.13)$$

Рішення стати шлюзом приймається вузлами  $S$ , які обирають випадкове число  $x$  між 0 і 1. Вузол стає шлюзом для поточного періоду, якщо число  $x$  менше наступного порогового значення:

$$T(S_{\text{gat}}) = \begin{cases} \frac{P_g}{1 - P_g * (r \bmod \frac{1}{P_g})} * \frac{E_{s\_current}}{E_{s\_initial}} & \text{if } S \in G_{\text{gat}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.14)$$

Визначаємо як  $T(S_{\text{gat}})$  поріг для вузла шлюзу  $S$ ,  $r$  – поточний періодів,  $G_{\text{gat}}$  - набір вузлів, що не були шлюзами за період  $1/P_g$ ,  $E_{s\_current}$  - поточна енергія вузла, а  $E_{s\_initial}$  - початкова енергія вузол.

## 2.6 Алгоритм вибору заголовка кластера

Основна ідея полягає в тому, щоб сенсорні вузли самостійно обирали свої енергетичні рівні. Мета полягає в тому, щоб мінімізувати вартість зв'язку і максимізувати мережеві ресурси в інших цілях, щоб гарантувати, що стиснута інформація відправляється в приймач. Кожен вузол передає дані до найближчого

головного кластера, а головні кластери виконують агрегування даних. Припустимо, оптимальна кількість кластерів  $C_{opt}$  в кожному періоді [52]. Очікується, що в якості головного кластера буде витрачено більше енергії, ніж стати членом кластера. Кожен вузол може стати головним кластером з імовірністю  $P_{opt}$ , і кожен вузол повинен стати головним кластером один раз за період  $1/P_{opt}$ .

Оптимальна ймовірність того, що вузол стане голоїним кластером,  $P_{opt}$ , може бути обчислена в такий спосіб:

$$P_{opt} = \frac{C_{opt}}{N - N_g}, \quad (2.15)$$

$N_g$  - число вузлів шлюзу,  $C_{opt}$  - оптимальна кількість кластерів, яка виражається як:

$$C_{opt} = \sqrt{\frac{N - N_g}{2\pi}} \times \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{fs}}} \times \frac{M}{d_{toBS}^2}, \quad (2.16)$$

Цей підхід полягає в призначенні ваги оптимальної ймовірності  $P_{opt}$ . Ця вага має дорівнювати початковій енергії кожного вузла, поділеній на початкову енергію нормального вузла. Ініціюємо  $P_{nrm}$  як зважену ймовірність вибору для нормальних вузлів, а  $P_{adv}$  - зважену ймовірність вибору для розширених вузлів.

Фактично існує  $N \cdot (1 + a \cdot m)$  вузлів з енергією, що дорівнює початковій енергії нормального вузла. Щоб підтримувати мінімальне споживання енергії в кожному стрибку упродовж доби, середнє число головних кластерів за період має бути постійним і рівним  $C_{opt}$ . Зважені ймовірності для нормальних і просунутих вузлів відповідно:

$$P_{nrm} = \frac{P_{opt}}{1 + a \times m}, \quad (2.17)$$

$$P_{adv} = \frac{P_{opt}}{1 + a \times m} \times (1 + a), \quad (2.18)$$

У рівнянні вище замінюємо  $P_{opt}$  на зважені ймовірності, щоб отримати поріг, який використовується для вибору головного кластера в кожному періоді.



Визначаємо  $T(S_{nrm})$  як поріг для нормальних вузлів, а  $T(S_{adv})$  поріг для просунутих вузлів. Таким чином, для нормальних вузлів маємо:

$$T(S_{nrm}) = \begin{cases} \frac{P_{nrm}}{1 - P_{nrm} * (r \bmod \frac{1}{P_{nrm}})} * \frac{E_{s\_current}}{E_{s\_initial}} & \text{if } S_{nrm} \in G_{nrm} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.19)$$

де  $r$  - поточний період,  $G_{nrm}$  - набір нормальних вузлів, які не стали головними кластерів за період  $\frac{1}{P_{nrm}}$ ,  $T(S_{nrm})$  - граничне значення, що застосовується до нормальних вузлах.

Аналогічно, для просунутих вузлів ми маємо:

$$T(S_{adv}) = \begin{cases} \frac{P_{adv}}{1 - P_{adv} * (r \bmod \frac{1}{P_{adv}})} * \frac{E_{s\_current}}{E_{s\_initial}} & \text{if } S_{adv} \in G_{adv} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.20)$$

де  $r$  - поточний період,  $G_{adv}$  - набір просунутих вузлів, які не стали голоїними кластерів за період  $1/P_{adv}$ , а  $T(S_{adv})$  - граничне значення, що застосовується до просунутих вузлів.

## 2.7 Адаптація до змін в топології мережі

Раніше передбачалося, що топологія мережі абсолютно статична, але на практиці топологія змінюється через мобільність, вихід з ладу і приєднання вузлів, а також з причини значної, варіації надійності бездротових з'єднань. Отже, необхідно оновлювати безліч опорних вузлів  $V_L$  для адаптації мережі до поточних умов [44].

По-перше, під час експлуатації мережі можливий вихід з ладу одного або декількох опорних вузлів. Якщо вузол  $v$  виявив відмову  $m$ -го опорного вузла, то він виконує процедуру «вибір опорних вузлів» з множиною  $L = \{ 1, 2, \dots, m - 1, m + 1, \dots, n_L \}$  для пошуку заміни опорного вузла з порядковим номером  $m$ .

По-друге, якщо мережа функціонує протягом тривалого часу, топологія мережі може змінитися наскільки значно, що чинний розподіл опорних вузлів не відповідатиме їй. Тому набір  $V_L$  повинен підтримуватися в актуальному стані

шляхом періодичного послідовного перепризначення опорних вузлів. На черговому «виборному періоді» вузли спочатку встановлюють  $L = \{2, 3, \dots, n_L\}$  і обирають перший опорний вузол за описаною вище процедурою. Далі при  $L = \{1, 3, \dots, n_L\}$  перебирається другий опорний вузол, процес продовжується до тих пір, поки не будуть знову обрані всі  $n_L$  опорних вузлів відповідно до поточної мережевої топології.

Заміна вийшовшого з ладу і переобрання  $m$ -го опорного вузла займає деякий проміжок часу, протягом якого  $m$ -а компонента векторів віртуальних координат вузлів некоректна, тому під час цієї перехідної фази алгоритм маршрутизації повинен враховувати тільки компоненти  $\{1, 2, \dots, m-1, m+1, \dots, n_L\}$ .

## 2.8 Модель розсіювання енергії радіовипромінювання.

Модель радіозв'язку, яка використовується для розсіювання енергії апаратурою радіозв'язку для досягнення прийнятного сигналу відношення сигнал-шум (SNR) при передачі повідомлення в  $k$  біт на дистанцію  $d$ , показана на рис. 2.1, [45].

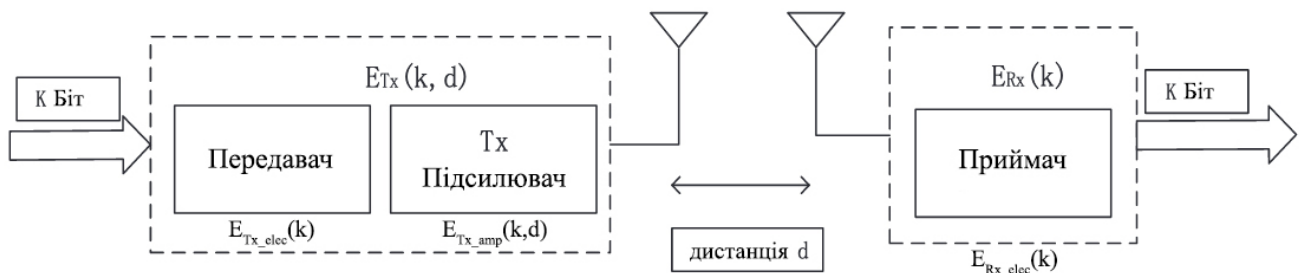


Рис. 2.1 Модель розсіювання енергії радіовипромінювання.

де  $k$  - кількість бітів на пакетну передачу,  $d$  - відстань між передавачем і приймачем.

Споживання енергії електронікою однаково для передачі і прийому даних, яке визначається як:

$$E_{Tx}(k) = E_{Rx}(k) = E_{elec} \times k, \quad (2.21)$$

де  $E_{elec}$  - енергія, що розсіюється на біт для роботи передавача або приймача.

Вартість передачі для передачі  $k$ -бітного сполучення між будь-якими двома вузлами на відстань визначається таким рівнянням:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} \times k + E_{amp}(k, d), \quad (2.22)$$

де  $E_{amp}(k, d)$  - це енергоспоживання підсилювача, і воно може бути додатково виражено через  $\epsilon_{fs}$  або  $\epsilon_{mp}$ , в залежності від застосовуваного режиму підсилювача передавача. Вони є коефіцієнтами втрати потужності для вільного простору (втрати  $d^2$ ), коли  $d < d_0$ ; і багатопроменеве завмирання (втрати  $d^4$ ) при  $d \geq d_0$  відповідно, де  $d_0$  - це поріг перемикавання між вільним простором і багатопроменевим режимом.

Щоб передати  $k$ -бітове повідомлення на відстані  $d$ , вузол витрачає:

$$E_{Tx}(k, d) = \begin{cases} (E_{elec} * k) + (\epsilon_{fs} * k * d^2) & \text{if } d \leq d_0 \\ (E_{elec} * k) + (\epsilon_{mp} * k * d^4) & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (2.23)$$

Прирівнюючи два вирази  $d = d_0$ , ми маємо:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}}, \quad (2.24)$$

Щоб отримати  $k$ -бітове повідомлення, вузол витрачає:

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} \times k, \quad (2.25)$$

де  $E_{elec}$  - енергія, яка використовується електронікою приймача.

## 2.9 Оптимальна кількість кластерів

Можна припустити, що є  $N$  вузлів, розподілених рівномірно в області  $M \times M$ . Якщо є  $C$  кластерів, то в середньому доводиться  $N/C$  вузлів на кластер.

Кожен головний вузол кластеру розсіює сигнали прийому енергії від вузлів, формуючи променеві сигнали і передаючи сукупний сигнал на базову

станцію. Отже, енергія, що розсіюється в вузлі головного кластера протягом одного стрибка, дорівнює:

$$E_{CH} = \left[ k * E_{elec} * \frac{N}{C} \right] + \left[ k * E_{DA} * \frac{N}{C} \right] + [k * E_{elec} + k * \varepsilon_{mp} * d_{toBS}^4] \quad (2.26)$$

де  $k * E_{elec} * ((N/C)-1)$  - це енергія, споживана головним кластером для отримання  $k$  бітової інформації від  $((N/C)-1)$  некластерних заголовків, а  $E_{DA}$  являє обробку вартості агрегації даних в бітах на сигнал. Вираз для енергії, що витрачається не за головком кластера, визначається як:

$$E_{non-CH} = k * E_{elec} + k * \varepsilon_{fs} * d_{toCH}^2, \quad (2.27)$$

де  $d_{toCH}^2$  - відстань від вузла до заголовка кластера. Площа, яку займає кожен кластер, становить приблизно  $M^2/C$ . Загалом, це область довільної форми з розподілом вузлів  $p(x, y)$ .

Очікувана квадратна відстань від вузлів до головного кластера (передбачається, що він знаходиться в центрі кластера) визначається як:

$$d_{toCH}^2 = \iint ((x^2 + y^2) * p(x, y)) dx = \iint r^2 p(r, \theta) r dr d\theta, \quad (2.28)$$

Якщо ми припустимо, що ця область є кругом з радіусом  $R = (M/\sqrt{\pi C})$  і  $p(r, \theta)$  постійна для  $r$  і  $\theta$ , (2.28) спрощується до:

$$d_{toCH}^2 = p \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{(M/\sqrt{\pi C})} r^3 dr d\theta = \frac{p}{2\pi} \frac{M^4}{C^2}, \quad (2.29)$$

Якщо щільність вузлів рівномірна по всій площі кластера, то  $p = (1/M^2/C)$ , тоді

$$d_{toCH}^2 = \frac{1}{2\pi} \frac{M^2}{C}, \quad (2.30)$$

Отже, в цьому випадку вираз для енергії, що витрачається некластерною головкою:

$$E_{non-CH} = k * E_{elec} + k * \varepsilon_{fs} * \frac{1}{2\pi} \frac{M^2}{C}, \quad (2.31)$$

Енергія, що розсіюється в кластері за період,  $E_{cluster}$ , виражається як:

$$E_{cluster} = E_{CH} + \left(\frac{N}{C} - 1\right) \times E_{non-CH} \approx E_{CH} + \frac{N}{C} \times E_{non-CH}, \quad (2.32)$$

Отже, загальна енергія, що розсіюється в мережі за період,  $E_{total}$ , виражається як:

$$E_{total} = C \times E_{cluster}, \quad (2.33)$$

Ми можемо знайти оптимальну кількість кластерів, взявши похідну  $E_{total}$  по  $C$  до нуля [46]:

$$\frac{\partial E_{total}}{\partial C} = 0, \quad (2.34)$$

$$C_{opt} = \sqrt{\frac{N}{2\pi}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}} \frac{M}{d_{toBS}^2}}, \quad (2.35)$$

Оптимальна ймовірність того, що вузол стане головним у кластері,  $P_{opt}$ , може бути обчислена в такий спосіб:

$$P_{opt} = \frac{C_{opt}}{N}, \quad (2.36)$$

Оптимальна ймовірність того, що вузол стане головним в кластері, дуже важлива. Автори [46] показали, що якщо кластери не побудувати оптимальним чином, загальна споживана енергія сенсорної мережі за період збільшується експоненціально або коли число створюваних кластерів більше, або особливо коли кількість побудованих кластерів менше, ніж оптимальна кількість кластерів.

## Висновки до розділу 2

У даному розділі було розглянуто маршрутизацію у безпроводових сенсорних мережах. Розглянуті основні варіанти зв'язку між вузлами мережі.

Ефективність функціонування безпроводових сенсорних мереж багато в чому визначається вибором протоколів маршрутизації пакетів. При проектуванні БСМ необхідно прагнути до зменшення і вирівнювання навантаження вузлів, що досягається завдяки протоколу маршрутизації.

Виділяють дві основні задачі маршрутизації:

- завдання пошуку оптимальних маршрутів;
- завдання маршрутизації із забезпеченням максимальної тривалості життя мережі.

В залежності від призначення, розмірів та технічних особливостей, безпроводові сенсорні мережі широко відрізняються у своїх обмеженнях і характеристиках, що має братися до уваги при розробці протоколу маршрутизації. Для охарактеризування можливостей протоколів маршрутизації, з урахуванням споживання ресурсів, необхідної продуктивності та потужності обладнання, використовують наступні основні показники протоколів маршрутизації: кількість проміжних вузлів, енергоефективність, надійність, необхідна якість обслуговування.

Детально проаналізовані фактори, які впливають на якість передачі інформації та ресурси мережі, необхідні для її покращення. Оскільки більшість методів маршрутизації прагне поліпшити тільки один з показників якості обслуговування, наприклад, середню затримку передачі пакета або загальну пропускну здатність мережі. Покращення декількох показників одночасно, негативно впливає на інші параметри збільшує енерговитрати мережі. Тому при розробці БСМ постає задача оптимізації ресурсів, з метою знайти баланс між покращенням ключових параметрів і енергоефективністю мережі в цілому.

### 3 МЕТОД МАРШРУТИЗАЦІЇ В СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ

У цьому розділі запропоновано ієрархічний адаптивний збалансований енергоефективний протокол маршрутизації (HABRP), щоб зменшити ймовірність відмов вузлів і продовжити часовий інтервал до відмови першого вузла (період стабільності) і збільшити час життя в гетерогенних WSN, що вкрай важливо для багатьох додатків. Розглядається вплив неоднорідності вузлів з точки зору їх енергії в бездротових сенсорних мережах, які ієрархічно кластеризовані. У цих мережах деякі високоенергетичні вузли, звані вузлами NCG (Normal node | Cluster Head | Gateway), обираються як «головні в кластері» для агрегування даних їх кластерних вузлів і передачі їх на вибрані «шлюзи», яким потрібна мінімальна енергія зв'язку для зменшення споживання енергії головного в кластері та зменшити ймовірність відмов вузлів і правильно збалансувати розсіювання енергії. Результат моделювання показує поліпшення ефективного терміну служби мережі і підвищення надійності роботи при наявності неоднорідності енергії.

#### 3.1 Hierarchical Adaptive Balanced energy efficient Routing Protocol (HABRP)

Ієрархічний адаптивний збалансований енергоефективний протокол маршрутизації HABRP, який є розширенням LEACH [47], який покращує період стабільності ієрархічної кластеризації і зменшує ймовірність відмов вузлів, використовуючи характерні параметри неоднорідності.

Маршрутизація в HABRP працює по періодах, і кожен період ділиться на дві фази: фазу налаштування і фазу стійкого стану, кожен датчик знає, коли кожен період починається з використанням синхронізації часу. Можна розглянути випадок, коли відсоток сенсорних вузлів забезпечений великою кількістю енергетичних ресурсів (розвинені вузли), ніж інші вузли (нормальні вузли). Нехай  $m$  буде частиною загального числа вузлів  $N$ , які оснащені в рази більшою енергією, ніж інші, а решта  $(1-m)*N$  як нормальних вузлів з  $E_0$

початкової енергії. Можна припустити, що всі вузли розподілені рівномірно по сенсорному полю. Загальна кількість вузлів і загальна енергія в мережі виражається як:

$$N = N \times m[\text{NCG вузлів}] + N \times (1 - m)[\text{звичайних вузлів}], \quad (3.1)$$

$$E[\text{total}] = N \times m \times E_0 \times (1 + m) + N \times (1 - m) \times E_0, \quad (3.2)$$

### 3.2 Модель мережі HABRP

Базова модель системи протоколу HABRP зображена на рис. 3.1. Кожен вузол датчика відправляє виявлені дані до головного вузла кластера. Головний вузол кластера об'єднує зібрані дані і передає інформацію до найближчого шлюзу, який буде відправляти дані на базову станцію.

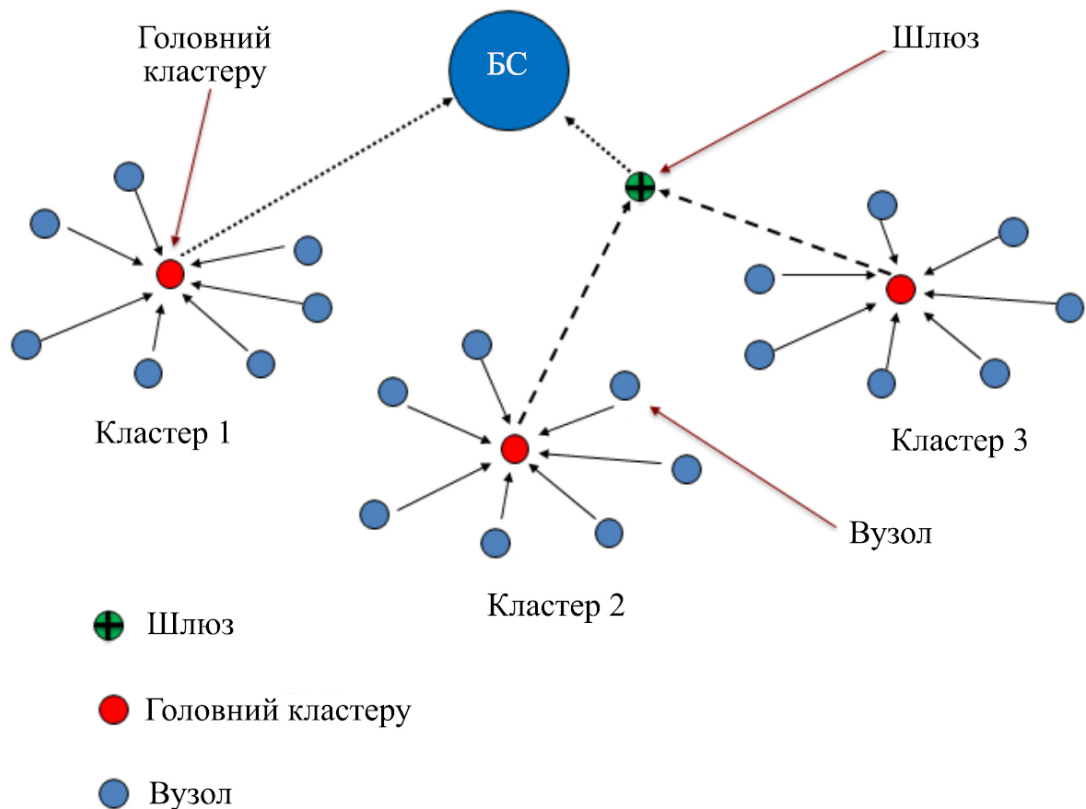


Рис. 3.1 Модель мережі HABRP



Як і у випадку з оригінальним LEACH, робота представленого протоколу складається з декількох періодів, кожен з яких розділений на дві фази: фаза налаштування і фаза стійкого стану (рис. 3.2). На етапі налаштування обираються шлюзи, а кластери організуються. Він складається з алгоритму вибору шлюзу, алгоритму вибору кластера і алгоритму формування кластера (рис. 3.3). Коли вони обрані, вони надсилають цю інформацію для іншої частини мережі.

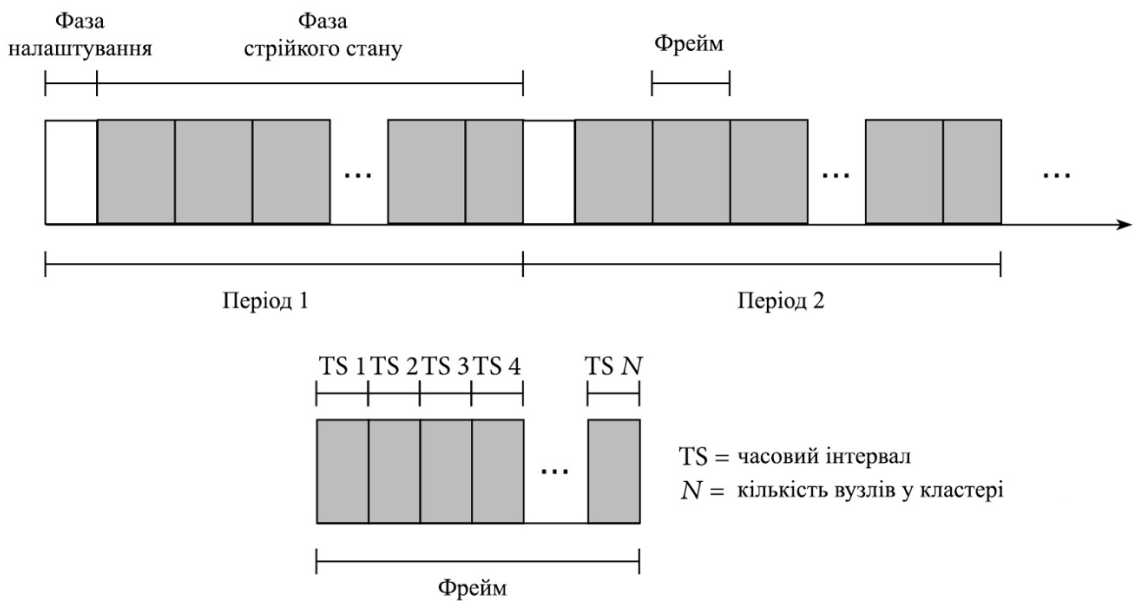


Рис. 3.2 Графік внутрішньокластерної часової структури протоколу HAVRP



Рис. 3.3 Графік внутрішньокластерної часової структури, що показує фазу налаштування

Після фази налаштування настає фаза стійкого стану. Вузли передають свої пакети до головного вузла кластера тільки в своєму виділеному інтервалі розкладу TDMA і залишаються в сплячому стані в інший час.

Розклад TDMA складається з усіх членів кластера, упорядкованих за часом їх приєднання до кластеру. Кожна ітерація цього розкладу від початку до кінця називається фреймом. Є кілька кадрів в раунді, в залежності від довжини слота і довжини раунду, це два з найбільш важливих параметрів. Оскільки ці параметри не залежать одне від одного, а кількість членів кластера апріорі невідома, кількість кадрів в раунді може не бути цілим числом.

Далі відбувається агрегування даних заголовком кластера і подальша передача їх на базову станцію через шлюз, який потребує мінімальної енергії зв'язку. Тривалість стійкої фази більше, ніж тривалість фази налаштування, щоб мінімізувати накладні витрати.

Відмінність, представлена в HABRP, полягає в тому, що пакет запиту JOIN, що відправляється від вузлів до заголовка кластера, має додаткове поле, яке вказує рівень заряду запитуючого вузла. Це дозволяє заголовку визначити, який з найближчих вузлів зможе замінити його перед тим, як він розрядиться.

Блок-схема на рис. 3.4 ілюструє всі операції і показує рішення і дії, що виконуються вузлами, відповідно з їх ролями. Він також відображає повідомлення, якими обмінюються вузли в фазі налаштування і фазі стійкого стану.

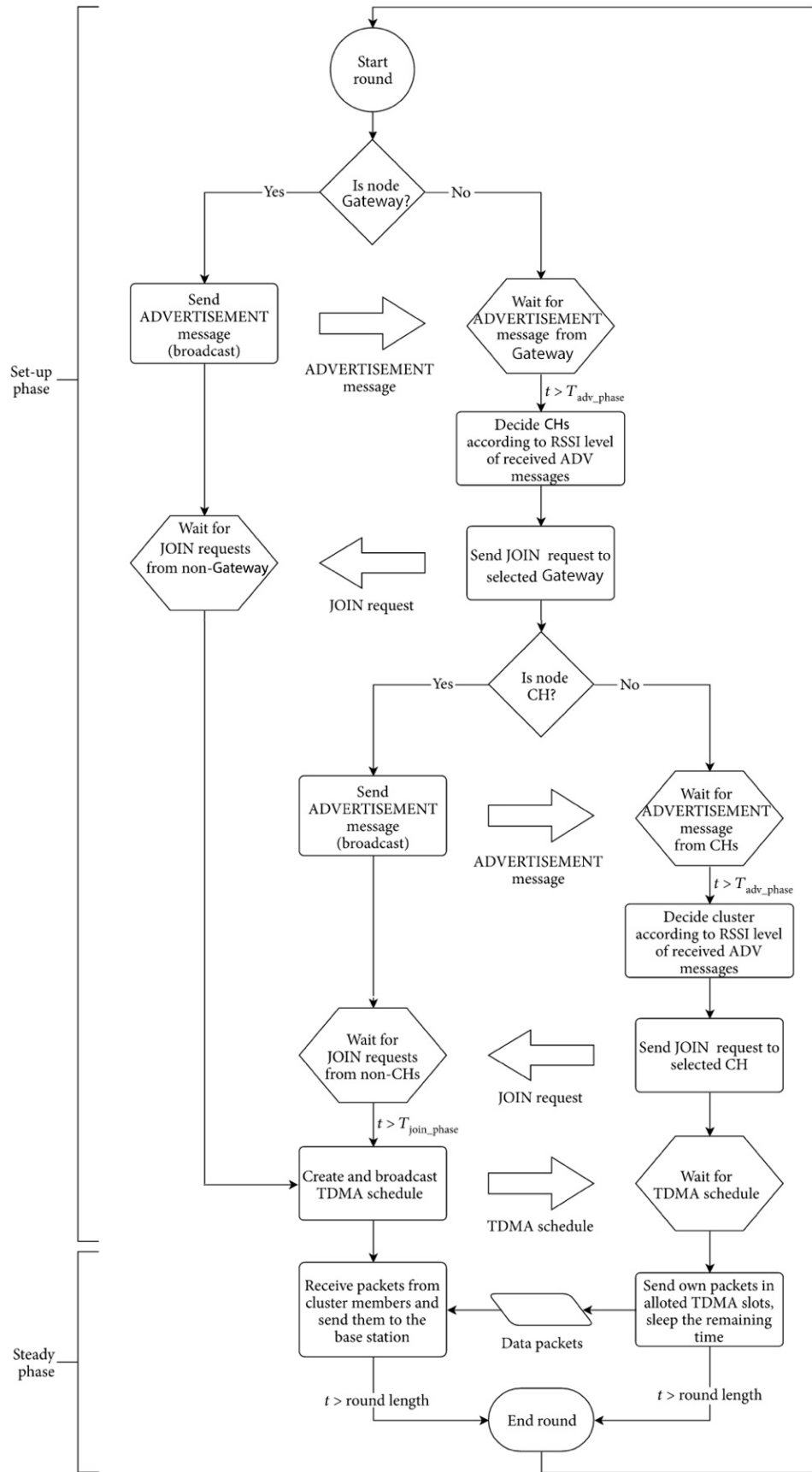


Рис. 3.4 Блок-схема, що ілюструє етап налаштування HANBRP

### 3.3 Опис протоколу HABRP

HABRP - це самоорганізаційний адаптивний протокол кластеризації, який використовує рандомізацію для рівномірного розподілу енергетичного навантаження між датчиками в мережі. Кожен датчик обирає себе в якості шлюзу на початку кожного періоду з певною ймовірністю.

Ці шлюзові вузли передають свій стан іншим датчикам в мережі, використовуючи оголошуючі повідомлення (ADV). Вузли, які не є шлюзами, з певною ймовірністю обирають себе головними кластерів.

Ці головні вузли кластера передають свій стан іншим датчикам в мережі, використовуючи оголошуюче повідомлення (ADV). Вузли, які не є головними кластера, очікують оголошення головного кластера від інших вузлів. Кожен сенсорний вузол визначає, до якого кластеру він повинен належати, обираючи головного кластера, який вимагає мінімальної енергії зв'язку, і відправляє повідомлення запиту на приєднання (Join-REQ) обраному головному кластера, і головні вузли кластера очікують повідомлення запиту на приєднання від інших вузлів.

Після того як всі вузли організовані в кластери, кожен головний вузол кластеру створює розклад для вузлів в своєму кластері. Це дозволяє постійно відключати радіокомпоненти кожного вузла, який не є головним вузлом кластера, за винятком часу його передачі, що дозволить витратити мінімум енергії, що розсіюється в окремих датчиках. Як тільки головний вузол кластера отримує всі дані від вузлів в своєму кластері, головний вузол кластера об'єднує дані і потім передає їх у стислій формі:

- До обраного шлюзу, якщо потрібна мінімальна енергія зв'язку, щоб знизити споживання енергії головним вузлом кластера і зменшити ймовірність відмови вузлів, якщо виконується умова:

$$E_{CH\_to\_BS} > E_{CH\_to\_Gat} + E_{Gat\_to\_BS}, \quad (3.3)$$

Усі зібрані дані передаються на базову станцію з використанням маршрутизації головного шлюзу кластера.

- На базову станцію безпосередньо, якщо:

$$E_{CH\_to\_BS} \leq E_{CH\_to\_Gat} + E_{Gat\_to\_BS}, \quad (3.3)$$

де  $E_{CH\_to\_BS}$  - це загальна енергія, що розсіюється для відправки даних від заголовка кластера до базової станції, а  $E_{CH\_to\_Gat}$  - загальна енергія, що розсіюється для відправки даних від заголовка кластера до шлюзу, а  $E_{Gat\_to\_BS}$  - загальна енергія, що розсіюється для відправки даних від шлюзу до базової станції, як показано на рис. 3.5.

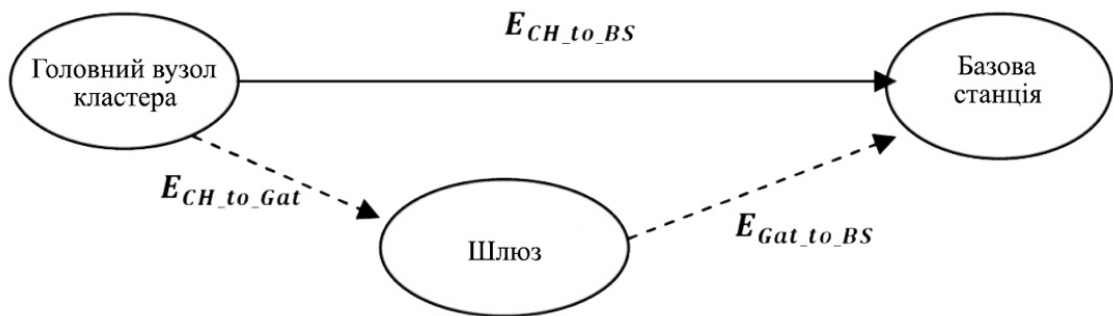


Рис. 3.5 Головний вузол кластер буде передавати на базову станцію через

шлюз, якщо  $E_{CH\_to\_Gat} + E_{Gat\_to\_BS} < E_{CH\_to\_BS}$

### Висновки до розділу 3

У цьому розділі запропонована модель протоколу HABRP для бездротових сенсорних мереж та описано стадії її роботи. Енергоефективність та простота розгортання роблять протокол затребуваним і надійним протоколом для бездротових сенсорних мереж. Щоб збільшити термін служби і продуктивність мережі, маршрутизація в HABRP працює в кілька періодів, і кожен період ділиться на дві фази: фазу налаштування і фазу стійкого стану. На етапі

налаштування деякі високоенергетичні вузли, звані вузли NCG, є обраними шлюзами, організовуються вибрані головні вузли кластерів і формуються самі кластери. Під час фази стійкого стану данні передаються від вузлів кластера до головних вузлів кластера, щоб об'єднати дані і передати їх до базовій станції через обрані шлюзи, для яких потрібна мінімальна енергія зв'язку, щоб знизити енергоспоживання заголовка кластера і зменшити ймовірність відмови вузлів.

## 4 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ

### 4.1 Налаштування параметрів

Для моделювання було використано область  $100 \times 100$  м із 100 сенсорними вузлами, розміщеними випадковим чином. Для реалізації симуляції використовується пакет прикладних програм для вирішення задач технічних обчислень - MATLAB. Щоб провести справедливе порівняння, було представлено розширені рівні енергії для вузлів протоколів LEACH і SEP з тими ж налаштуваннями, що і в представленому протоколі HABRP, щоб оцінити продуктивність цих протоколів при наявності неоднорідності.

Зокрема, було обрано наступні налаштування параметрів:

Таблиця 3. Параметри симуляції

Позначення	Опис	Значення
$M \times M$	Площа	100x100, 300x300
$N$	Кількість датчиків	100, 900
$sinkX, sinkY$	Розташування БС	50x50, 50x200, 50x300, 300x300
$E_0$	Початкова енергія	0.5 J
$E_{elec}$	Енергія електроніки	50nJ/bit
$E_{DA}$	Енергія агрегації даних	5nJ/bit
$d_0$	Порогова відстань	90m
$\epsilon_{fs}$	Посилена передача енергії з використанням вільного простору	10pJ/bit/m <sup>2</sup>
$\epsilon_{mp}$	Посилена передача енергії за допомогою багатоканальності	0.0013pJ/bit/m <sup>4</sup>
$k$	Розмір пакету даних	500bytes
$k_{broad}$	Розмір пакету, що передається	25 bytes
$P_{opt}$	Оптимальна ймовірність того, що вузол стане головним в кластері	0.05
$C_{opt}$	Оптимальна кількість кластерів	5
$N_g$	Кількість вузлів шлюзу	4

Метрики продуктивності, які використовуються в данному моделюванні:

- Аналіз енергоспоживання;
- Довжина стабільної області для різних значень неоднорідності;
- Період стабільності - це період з початку роботи мережі і першої відмови вузла;
- Кількість живих вузлів за раунд;
- Відсоток відмови вузла;
- Варіації розташування базової станції;
- Чутливість до ступеня неоднорідності в великих мережах;
- Поліпшення періоду стабільності (Improvement):

$$\text{Improvement} = \frac{\text{Stable period of HABRP} - \text{Stable period of LEACH}}{\text{Stable period of LEACH}} \quad (4.1)$$

## 4.2 Результати симуляції

### 4.2.1 Аналіз енергоспоживання

Продуктивність HABRP порівнюється з характеристиками LEACH і SEP з точки зору енергії і показана на рис. 4.1 і рис. 4.2.

При використанні вузлів шлюзу для передачі даних від заголовків кластера до приймача енергоспоживання мережі знижується. Це пов'язано з приростом енергії, що розсіюється головками кластера до базової станції. З рисунків видно, що HABRP може досягти подвоєної економії енергії, ніж протоколи LEACH і SEP.



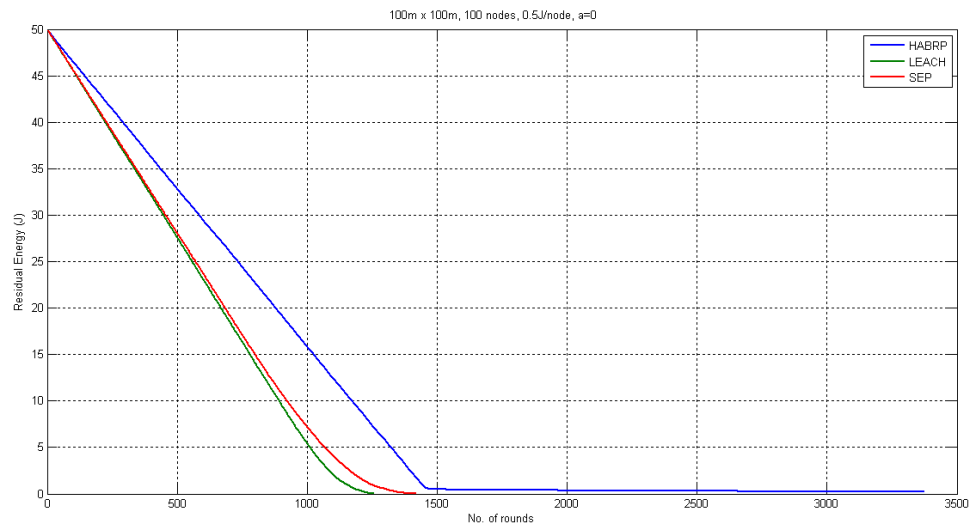


Рис. 4.1 Порівняння енергетичного аналізу HABRP, LEACH і SEP (100 x 100 м, 100 вузлів, 0,5 Дж/вузол,  $a = 0$  (гомогенні БСМ))

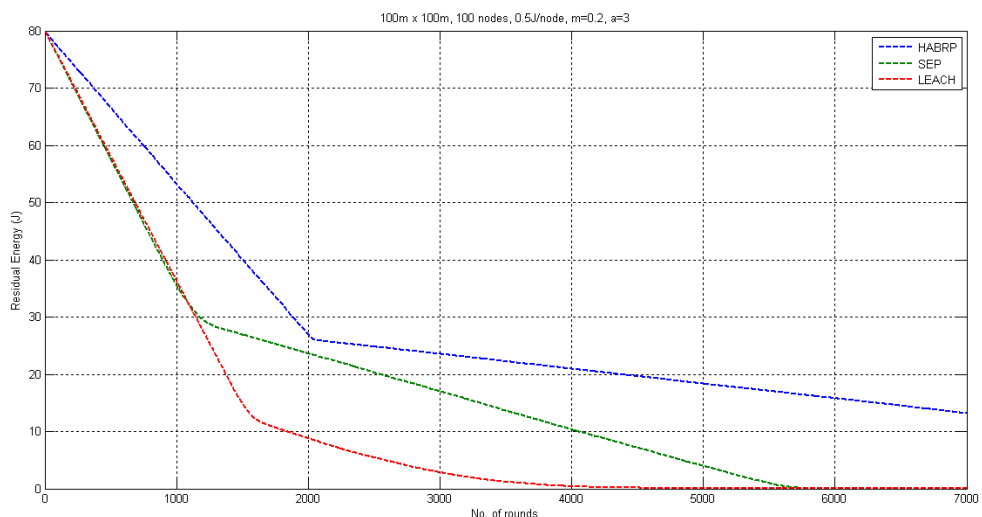


Рис. 4.2 Порівняння енергетичного аналізу HABRP, LEACH і SEP (100 x 100 м, 100 вузлів, 0,5 Дж/вузол,  $m = 0.2$ ,  $a = 3$  (гетерогенні БСМ))

#### 4.2.2 Час життя мережі

Спостерігається число вузлів діючих в кожному стрибку передачі даних для протоколу HABRP для оцінки часу життя мережі. На рис. 4.3 показана продуктивність HABRP в порівнянні з LEACH і SEP. Помічено, що HABRP

перевершує LEACH і SEP завдяки збалансованому розсіюванню енергії окремого вузла через мережу.

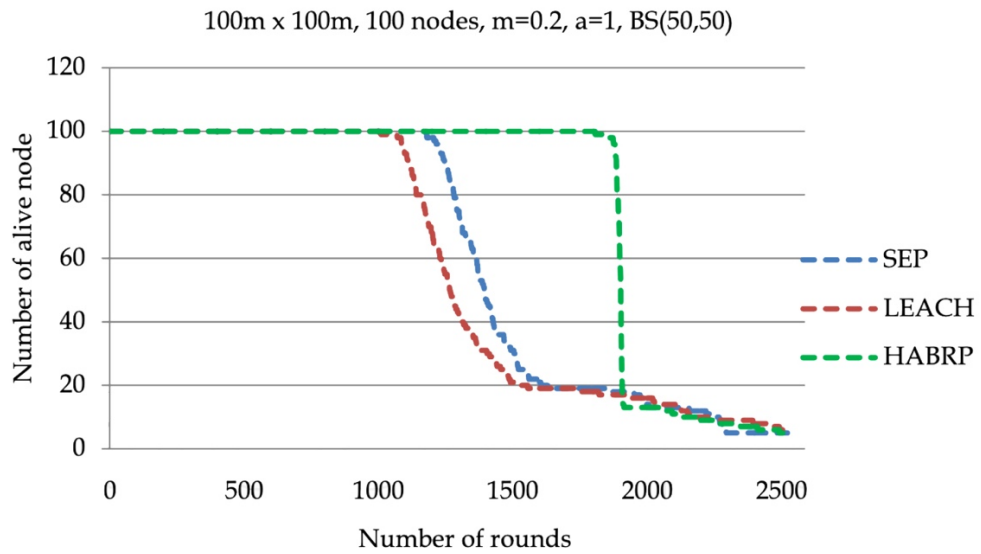


Рис. 4.3 Число живих вузлів за раунд з 100 x 100 м, 100 вузлів, 0,5 Дж/нормальний вузол, 1 Дж/розширений вузол  $m = 0.2$ ,  $a = 1$ , БС (50,50)

#### 4.2.3 Варіація розташування базової станції

Результати, представлені в попередньому розділі, показують, що HABRP є більш енергоефективним, ніж протоколи LEACH і SEP. Але, що станеться, якщо базова станція фактично знаходиться всередині мережі або дуже далеко від мережі? Щоб відповісти на це питання, було проведено моделювання, в якому було поступово змінено місце розташування базової станції з  $(x = 50, y = 50)$  до  $(x = 50, y = 200)$  та  $(x = 50, y = 300)$ .

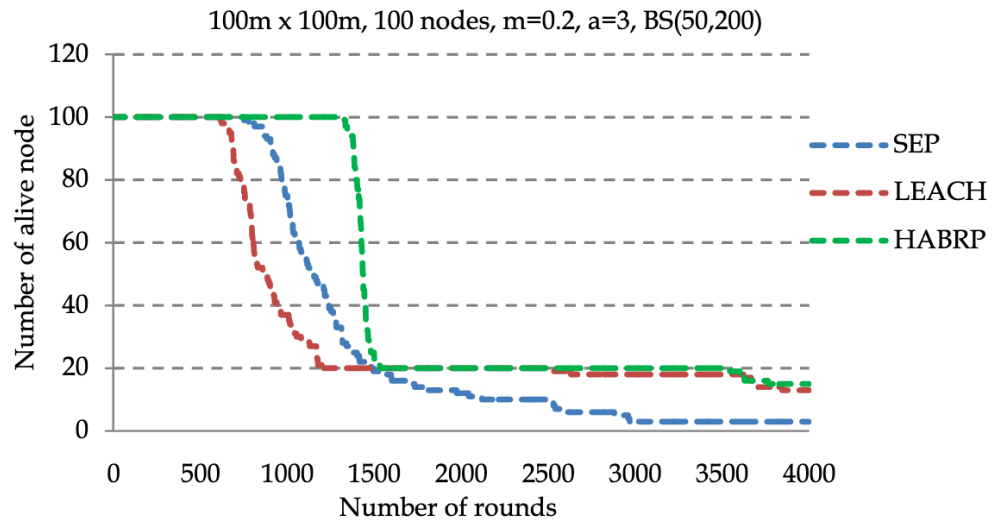


Рис. 4.4 Кількість живих вузлів за раунд з 100 x 100 м, 100 вузлів, 0,5 Дж/нормальний вузол, 2 Дж/розширений вузол,  $m = 0.2$ ,  $a = 3$ , БС (50, 200)

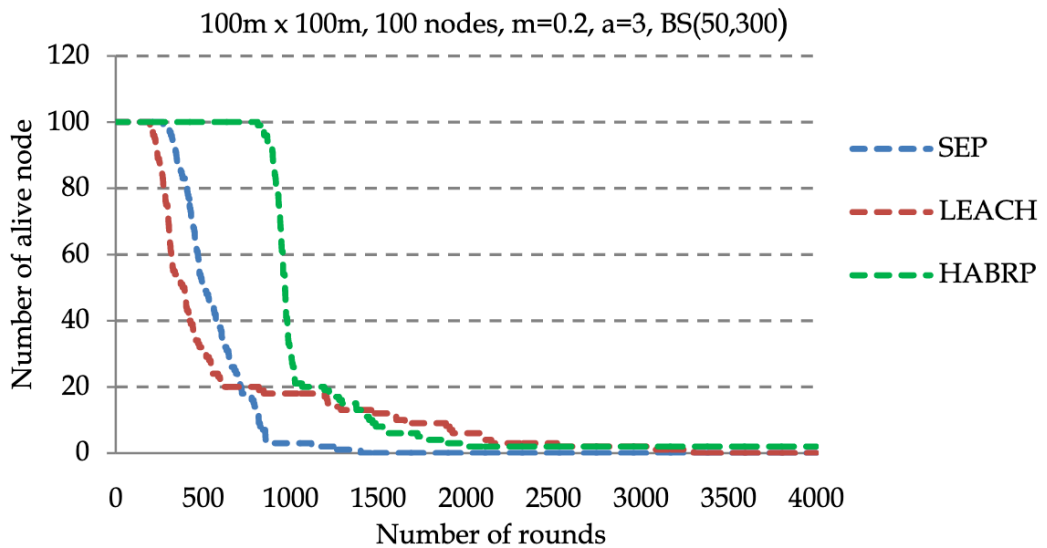


Рис. 4.5 Число живих вузлів за раунд з 100 x 100 м, 100 вузлів, 0,5 Дж/нормальний вузол, 2 Дж/розширений вузол,  $m = 0.2$ ,  $a = 3$ , БС (50, 300)

Для обох відстаней базової станції, які були змодультовані, коли базова станція переміщається далі від мережі, продуктивність HABRP виглядає ліпшою в порівнянні з LEACH і SEP.

#### 4.2.4 Відсоток відмов вузла

Змодульовано кількість стрибків для 1%, 20%, 50%, 80% відмов вузла для HABRP, LEACH і SEP на рис. 4.4 і рис. 4.5. Із результатів рис. 4.4 видно, що період стабільності протоколів LEACH і SEP обмежений приблизно 900 стрибками, а у протокола HABRP зростає до 1300 стрибків в однорідних БСС. У гетерогенних БСС HABRP забезпечує розширений час життя, який приблизно вдвічі перевищує протокол LEACH. HABRP має більш тривалий термін роботи, ніж LEACH і SEP.

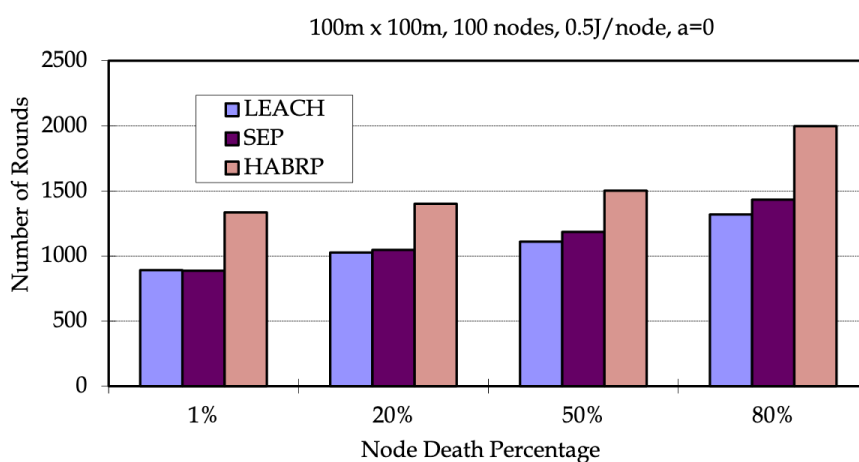


Рис. 4.6 Відсоток смерті вузла на кількість раундів з розміром 100 x 100 м, 100 вузлів, 0,5 Дж/вузол,  $a = 0$

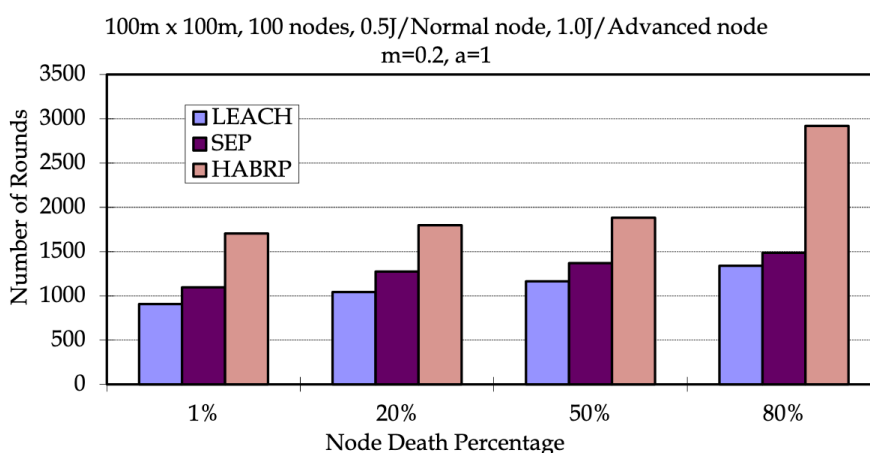


Рис. 4.7 Відсоток смерті вузла на кількість раундів з розміром 100 x 100 м, 100 вузлів, 0,5 Дж/нормальний вузол, 1,0 Дж/розширений вузол,  $m = 0.2, a = 1$

#### 4.2.5 Стабільний період в гетерогенних БСС

На рис. 4.6 змодельована довжина стабільної області для різних значень неоднорідності енергії, було помічено, що якщо ми збільшимо кількість вузлів  $NCG$   $a=1$ , то період стабільності збільшується приблизно вдвічі в порівнянні з протоколом LEACH. У гетерогенних БСМ HABRP має довшу стабільну область, ніж LEACH і SEP для різних значень неоднорідності енергії.

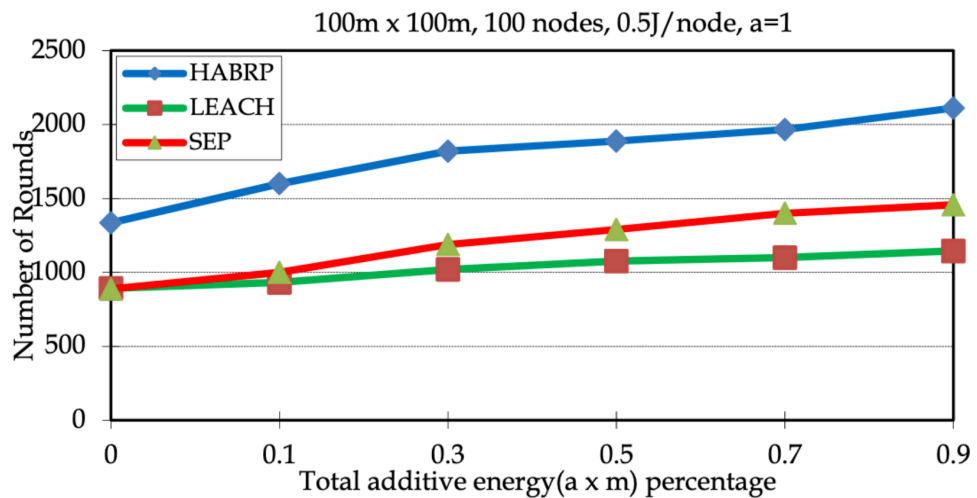


Рис. 4.8 Довжина стабільної області для різних значень неоднорідності енергії з 100 м x 100 м, 100 вузлів, 0,5 Дж/вузол,  $a = 1$

#### 4.2.6 Неоднорідність у великих мережах

Було змодельовано зміни продуктивності у великій мережі з 900 вузлами в області 300 x 300 м.

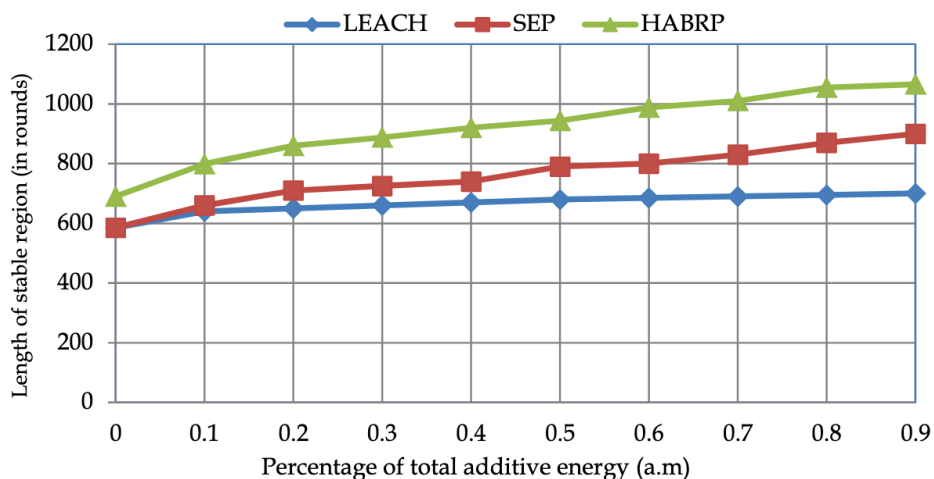


Рис. 4.9 Чутливість HABRP, LEACH і SEP до ступеня неоднорідності в великомасштабних мережах з 900 вузлами в області розміром 300 x 300 м.

На рис. 4.9. результат моделювання показує, що час життя мережі у великій мережі зменшується, і період появи першої відмови вузла настає раніше, ніж в попередніх випадках. Це явище викликане тим, що заголовки кластерів витрачають значну кількість енергії на передачу своїх даних на віддалену базову станцію. У HABRP заголовок кластера буде передавати дані на базову станцію через шлюз, щоб виключити те, що заголовок кластера далеко від базової станції розсіює свою енергію набагато швидше, ніж ті, які знаходяться ближче до БС. HABRP перевершує LEACH і SEP для різних значень сумарної адитивної енергії  $a^*m$ , тому що в LEACH і SEP всі заголовки кластера передають агреговані дані безпосередньо в БС.

#### 4.2.7 Поліпшення періоду стабільності

Результати порівняння наведені в таблиці 4. Вони показують, що HABRP більш енергоефективний і має більший період стабільності, ніж LEACH, як в гомогенних, так і в гетерогенних БСС.

Таблиця 4 Поліпшення HABRP в порівнянні з LEACH з  $a = 1$ 

	$a \times t$	LEACH	HABRP	Поліпшення
Відмова першого вузла	0	892	1335	49,66%
	0.1	908	1704	87,66%
	0.3	1020	1820	78,34%
	0.5	1076	1888	75,46%
	0.7	1100	1966	78,72%
	0.9	1145	2111	84,36%

### 4.3 Аналіз результатів

З виконаних моделювань можна спостерігати наступне:

- HABRP може досягти в два рази більшої економії енергії, ніж протоколи LEACH і SEP.
- HABRP перевершує LEACH і SEP завдяки збалансованому розсіюванню енергії окремого вузла по всій мережі і продовжує термін служби мережі.
- Для всіх базових станцій, які було змодельовано, коли базова станція переміщається далі від мережі, енергоефективність HABRP виглядає ліпше в порівнянні з LEACH і SEP.
- У гетерогенних БСС HABRP забезпечує розширений час життя, який приблизно вдвічі перевищує протокол LEACH, і період стабільності HABRP був продовжений в порівнянні з LEACH і SEP в гетерогенних умовах.
- Розсіювання енергії збалансовано між нормальними вузлами і розширеними вузлами в HABRP в порівнянні з LEACH і SEP.
- Балансування енергоспоживання, зменшує явище швидкої відмови головного вузла кластера, викликаного надмірним споживанням енергії, а також запобігання ситуації нестабільності, викликаній відмовою одного з головного вузла кластера, забезпечують нормальну роботу мережі.
- Використання шлюзу і головного вузла кластера, дає можливість зекономити надмірне енергоспоживання при передачі на великі відстані, що підвищує енергоспоживання всієї мережі.

Результати моделювання показують, що протокол HABRP може відповідним чином формувати кластери і ефективно продовжувати час роботи мережі.

#### Висновки до розділу 4

Енергоефективна маршрутизація має першорядне значення для збільшення стабільності і терміну служби бездротових сенсорних мереж. Маршрутизація в сенсорних мережах дуже складна через декілька характеристик, які відрізняють їх від традиційних мереж зв'язку та бездротових спеціальних мереж, оскільки існує кілька обмежень, наприклад, обмежене енергоспоживання, обчислювальна потужність і смуга пропускання бездротових ліній, що з'єднують вузли датчиків.

Основна відмінність між БСС і традиційною бездротовою мережею полягає в тому, що датчики дуже чутливі до споживання енергії. Введення кластеризації в топологію мереж має мету зменшити кількість повідомлень, які необхідно доставити в приймач в великих БСМ.

У цьому розділі було запропоновано ієрархічний адаптивний збалансований енергоефективний протокол маршрутизації (HABRP) для бездротових сенсорних мереж. Енергоефективність та простота розгортання роблять HABRP затребуваним і надійним протоколом для бездротових сенсорних мереж. Щоб збільшити термін служби і продуктивність мережі, маршрутизація в HABRP працює в кілька періодів, і кожен період ділиться на дві фази: фазу налаштування і фазу стійкого стану. На етапі налаштування деякі високоенергетичні вузли, звані вузли NCG, є обраними шлюзами, організовуються вибрані головні вузли кластерів і самі кластери. Під час фази стійкого стану дані передаються від вузлів кластера до головних вузлів кластера, щоб об'єднати дані і передати їх до базовій станції через обрані шлюзи, для яких потрібна мінімальна енергія зв'язку, щоб знизити енергоспоживання заголовка кластера і зменшити ймовірність відмови вузлів.



Результати моделювання показують, що HABRP покращує стабільну область ієрархії кластеризації і зменшує ймовірність відмов вузлів і збільшує термін служби мережі завдяки збалансованому розсіюванню енергії окремого вузла по всій мережі і продовжує термін служби мережі. Балансування енергоспоживання, зменшує явища швидкої відмови головного вузла кластера, викликаного надмірним споживанням енергії, а також запобігає ситуації нестабільності, викликаній відмовою одного з головного вузла кластера, забезпечуючи нормальну роботу мережі.

Нарешті, HABRP масштабується і досягає кращої продуктивності в порівнянні з SEP і LEACH як в гетерогенних, так і в однорідних середовищах.

## ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

У цій магістерській дисертації розглянуто розвиток методів маршрутизації у безпроводових сенсорних мережах.

Поставлена мета роботи досягнена, а отримані результати відповідають сформульованим завданням та задовольняють їх.

Для досягнення поставленої мети були вирішенні наступні задачі:

1) У першому розділі досліджена класифікація протоколів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах. Детально описаний алгоритм роботи таких протоколів, як SPIN, DD, RR, GBR, LEACH, PEGASIS, GAF, GEAR та інших. Усі розглянуті протоколи маршрутизації широко використовуються у БСМ і є базовими протоколами з можливістю подальшої оптимізації та модифікації. Проаналізована доцільність їх використання в залежності від специфічних особливостей конкретної мережі. Виконано порівняльний аналіз ефективності протоколів. Наведені переваги та недоліки кожного з розглянутих протоколів маршрутизації.

2) У другому розділі було розглянуто особливості функціонування та структуру БСМ, а також процес маршрутизації у безпроводових сенсорних мережах. Наведено параметри, покращення яких досягається вибором оптимального способу маршрутизації, з використанням доступних ресурсів мережі.

Основні задачі маршрутизації:

- завдання пошуку оптимальних маршрутів;
- завдання маршрутизації із забезпеченням максимальної тривалості життя мережі.

Маршрутизація дозволяє покращити тільки декілька необхідних показників, які безпосередньо впливають на якість і швидкість передачі інформації та ефективність використання обладнання, за рахунок погіршення менш значущих параметрів для даної конкретної мережі. Тому вибір способу

маршрутизації для кожної мережі є індивідуальним і залежить від її призначення, розмірів, розміщення вузлів та технічних можливостей обладнання.

3) У третьому розділі представлено ієрархічний адаптивний збалансований енергоефективний протокол маршрутизації HABRP на основі проведеної багатокритеріальної порівняльної оцінки основних існуючих протоколів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах з метою підвищення енергоефективності використання обладнання та продовження тривалості роботи мережі.

4) У четвертому розділі приведені результати моделювання запропонованого протоколу маршрутизації та проведено комплексний експериментальний аналіз тривалості роботи мережі при використанні двох фіксованих протоколів з тривалістю роботи мережі при використанні розробленого методу.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Шахнович И.А. Современные технологии беспроводной связи. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
2. Смелянский Р. Л. Компьютерные сети. В 2 томах. Том 1. Системы передачи данных. – М.: Академия, 2011. – 304 с
3. Ravi “Basics of Wireless Sensor Networks (WSN) | Classification, Topologies, Applications” / March 25, 2019 // Режим доступа до ресурсу: <https://www.electronicshub.org/wireless-sensor-networks-wsn>
4. Жук О.В. Управління енергоспоживанням в безпроводових сенсорних мережах / Жук О.В., Романюк В.А., Ткаченко Д.В. // Вісник НТУ „ХПІ”. – 2017. – No 20 (1242). – С. 53 – 60.
5. Y. Yao, „The cougar approach to in-network query processing in sensor networks”/ Y. Yao and J. Gehrke// in SIGMOD Record, September 2002.
6. F. Ye „A Two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks”, / F.Ye, H. Luo, J. Cheng, S. Lu, L. Zhang /, proceedings of ACM/IEEE MOBICOM, 2002.
7. Кучерявый Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. – Спб.: Наука и техника, 2004. – 336 с.
8. Миночкин А.И. Маршрутизация в мобильных радиосетях – проблема и пути ее решения / Миночкин А.И., Романюк В.А., // Зв’язок. – 2006. – No 7. – С. 49 – 55.
9. W. Heinzelman, „Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks” / W. Heinzelman, J. Kulik, and H. Balakrishnan // (MobiCom ’99), Seattle, WA, August, 1999. Pp. 174 – 185.
10. C. Intanagonwiwat „Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks”/ C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin // Proceedings of ACM MobiCom ’00, Boston, MA, 2000, pp. 56 – 67.

11. D. Braginsky „Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks”/ Braginsky and D. Estrin // in the Proceedings of the First Workshop on Sensor Networks and Applications (WSNA), Atlanta, GA, October 2002.
12. F. Ye „A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks”/ F. Ye, A. Chen, S. Liu, L. Zhang //, (ICCCN), pp. 304 – 309, 2001.
13. C. Schurgers „Energy efficient routing in wireless sensor networks” / C. Schurgers and M.B. Srivastava, //, in the MILCOM, McLean, VA, 2001.
14. M. Chu, „Scalable Information-Driven Sensor Querying and Routing for ad hoc Heterogeneous Sensor Networks” / M. Chu, H. Haussecker, and F. Zhao // The International Journal of High Performance Computing Applications, Vol. 16, No. 3, August 2002.
15. Y. Yao „The cougar approach to in-network query processing in sensor networks” / Y. Yao and J. Gehrke //, in SIGMOD Record, September 2002.
16. N. Sadagopan et al., The ACQUIRE mechanism for efficient querying in sensor networks, in the Proceedings of the First International Workshop on Sensor Network Protocol and Applications, Anchorage, Alaska, May 2003.
17. R.C. Shah „Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks” / R. C. Shah and J. Rabaey // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), March 17 – 21, 2002, Orlando, FL.
18. B. Bhuyan „AqoS aware routing protocol in wireless sensor networks with mobile base stations”/ B. Bhuyan and N. Sarma // in Proc. Int. Conf. Internet Things Cloud Comput., 2016, pp. 1 – 5.
19. J. Ben-Othman „Energy efficient and QoS based routing protocol for wireless sensor networks,” / J. Ben-Othman and B. Yahya // J. Parallel Distrib. Comput., vol. 70, no. 8, pp. 849\_857, 2010.
20. Романюк В.А. Иерархическая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв’язок. – 2002. – No 3. – С. 21 – 25.
21. W. Heinzelman „Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micsensor Networks” / W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan //,

Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS '00), January 2000.

22. A. Manjeshwar, „TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks” / A. Manjeshwar and D. P. Agarwal //, In 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing, April 2001.

23. A. Manjeshwar „APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks” / A. Manjeshwar and D. P. Agarwal //, Parallel and Distributed Processing Symposium., Proceedings International, IPDPS 2002, pp. 195 – 202.

24. V. Rodoplu „Minimum Energy Mobile Wireless Networks” / V. Rodoplu and T. H. Meng, // IEEE Journal Selected Areas in Communications, vol. 17, no. 8, Aug. 1999, pp. 1333-44.

25. L. Li „Minimum-Energy Mobile Wireless Networks Revisited” / L. Li, and J. Y. Halpern // IEEE International Conference on Communications (ICC) 2001. Vol. 1, pp. 278 – 283.

26. Jamal N. Al-Karaki, „Data Aggregation in Wireless Sensor Networks – Exact and Approximate Algorithms” / Jamal N. Al-Karaki, Raza Ul-Mustafa, Ahmed E. Kamal // Proceedings of IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing (HPSR) 2004, April 18 – 21, 2004, Phoenix, Arizona, USA

27. Q. Li „Hierarchical Power-aware Routing in Sensor Networks” / Q. Li and J. Aslam and D. Rus // In Proceedings of the DIMACS Workshop on Pervasive Networking, May, 2001.

28. F.Y „A Two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks” / F. Ye, H. Luo, J. Cheng, S. Lu, L. Zhang // proceedings of ACM/IEEE MOBICOM, 2002.

29. H. Shen, Z. Li, and L. Yu, „A P2P-based market-guided distributed routing mechanism for high-throughput hybrid wireless networks,” IEEE Trans. Mobile Comput., vol. 14, no. 2, pp. 245\_260, Feb. 2015.

30. J. R. Diaz „A QoS-based wireless multimedia sensor cluster protocol” / J. R. Diaz, J. Lloret, J. M. Jimenez, and J. J. P. C. Rodrigues // *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, vol. 2014, May 2014, Art. No. 480372.
31. H. P. Gupta „Geographic routing in clustered wireless sensor networks among obstacles,” / H. P. Gupta, S. V. Rao, A. K. Yadav, and T. Dutta // *IEEE Sensors J.*, vol. 15, no. 5, pp. 2984\_2992, May 2015.
32. A. Mahapatra „QoS and energy aware routing for real-time traf\_c in wireless sensor networks” / A. Mahapatra, K. Anand, and D. P. Agrawal // *Comput. Commun.*, vol. 29, no. 4, pp. 437\_445, 2006.
33. S-M. Jung „The concentric clustering scheme for efficient energy consumption in the PEGASIS,” / S-M. Jung, Y.-J. Han, and T.-M. Chung, // in *Proc. 9th Int. Conf. Adv. Commun. Technol.*, Gangwon-Do, Korea, Feb. 2007, pp. 260–265.
34. M. Ding „Aggregation tree construction in sensor networks,”/ M. Ding, X. Cheng, and G. Xue // in *Proc. IEEE 58th Veh. Technol. Conf.*, Oct. 2003, pp. 2168 – 2172.
35. Романюк В. А. Геомаршрутизация в мобильных радиосетях // *Зв’язок.* – 2001. – No 5. – С. 37 – 39.
36. Y. Xu „Geography-informed Energy Conservation for Ad-hoc Routing” / Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, // In *Proceedings of the Seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking 2001*, pp. 70 – 84.
37. Y.Yu. „Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks” / Y. Yu, D. Estrin, and R. Govindan // *UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR – 01 – 0023*, May 2001.
38. I. Stojmenovic „GEDIR: Loop-Free Location Based Routing in Wireless Networks” / I. Stojmenovic and X. Lin. // In *International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems*, Boston, MA, USA, Nov. 3 – 6. 1999.
39. F. Kuhn „Worst-Case optimal and average-case efficient geometric ad-hoc routing” / F. Kuhn, R. Wattenhofer, A. Zollinger // *Proceedings of the 4th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, Pages: 267 – 278, 2003.

40. B. Chen „SPAN: an energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks” / B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, R. Morris // *Wireless Networks*, Vol. 8, No. 5, Page(s): 481 – 494, September 2002.
41. J. Peng „A noble cross-layer protocol for QoS optimization in wireless sensor networks”/ J. Peng, J. Jingqi, S. Qiushuo, and Z. Songyang // in *Proc. 26th Chin. Control Decision Conf. (CCDC)*, 2014, pp. 2430\_2434.
42. Стрела Т.С., к.т.н. Жук О.В., Романюк А.В. “Аналіз методів маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах” // Режим доступу до ресурсу: [http://www.viti.edu.ua/files/zbk/2017/4/17\\_4\\_2017.pdf](http://www.viti.edu.ua/files/zbk/2017/4/17_4_2017.pdf)
43. Chang J.-H., Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks // *IEEE/ACM transactions on networking*. 2004. Vol. 12, no. 4. P. 609-619.
44. Лисенко О. І., Алексеева І.В., Козленко Н. Н. “ Вплив кількості та розміщення опорних вузлів на маршрутизацію трафіку по віртуальним координатам у БСМ”, 2014 // Режим доступу до ресурсу: [http://irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbu/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/Nvamu\\_teh\\_2014\\_1\\_12.pdf](http://irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Nvamu_teh_2014_1_12.pdf)
45. A. S. Raghuvanshi, S Tiwari, R Tripathi and N. Kishor “Optimal Number of Clusters in Wireless Sensor Networks: An FCM Approach”, 2011 // Режим доступу до ресурсу: [https://www.researchgate.net/publication/52006003\\_Optimal\\_Number\\_of\\_Clusters\\_in\\_Wireless\\_Sensor\\_Networks\\_An\\_FCM\\_Approach](https://www.researchgate.net/publication/52006003_Optimal_Number_of_Clusters_in_Wireless_Sensor_Networks_An_FCM_Approach)
46. W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan. (2000). Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. *Proceedings of HICSS*.
47. Alba Rozas and Alvaro Araujo “An Application-Aware Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks to Provide QoS Management”, 2019 // Режим доступу до ресурсу: <https://www.hindawi.com/journals/js/2019/8569326/>
48. Demoracski L., Avresky D. Performance analysis of fault-tolerant beacon vector routing for wireless sensor networks // *Proceedings of the 8th ACM international symposium on modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. Montreal (Canada), 2005. P. 40.



49. Donglin Li, and Suyuan Wei “Improvement of the SEP protocol based on community structure of node degree”, 2017 // Режим доступу до ресурсу: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4982583>.
50. Хижняк Є.П., Петрова В.М., «Як 5G, AI і IoT забезпечують інтелектуальний зв’язок» // Хижняк Є.П., Петрова В.М., - «Актуальні проблеми розвитку науки в контексті глобальних трансформацій інформаційного суспільства»: II Міжнародна науково-практична конференція 25-26 жовтня 2019 р., К.: с. 161...167.
51. Хижняк Є.П., Петрова В.М., «Проблеми IoT» // Хижняк Є.П., Петрова В.М., - «Ідеї академіка В.М. Глушкова і сучасні проблеми штучного інтелекту»: VIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Глушковські читання» 29 листопада 2019 р., К.: с. 145...147.
52. PLoS One «RCER: Reliable Cluster-based Energy-aware Routing protocol for heterogeneous Wireless Sensor Networks», 2019 // Режим доступу до ресурсу: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6752959/>.

## Додаток А. ЛІСТИНГ СКРИПТА ПРОГРАМУВАННЯ

```
%%%%%%%%%% PARAMETERS %%%%%%%%%%%  
%Field Dimensions - x and y maximum (in meters)  
xm=100;  
ym=100;  
  
%x and y Coordinates of the Sink  
sink.x=0.5*xm;  
sink.y=0.5*ym;  
  
%Number of Nodes in the field  
n=100;  
  
%Optimal Election Probability of a node  
%to become cluster head  
p=0.05;  
  
%Energy Model (all values in Joules)  
%Initial Energy  
Eo=5;  
%Eelec=ETx=Erx  
ETX=50*0.000000001;  
ERX=50*0.000000001;  
%Transmit Amplifier types  
Efs=10*0.000000000001;  
Emp=0.0013*0.000000000001;  
%Data Aggregation Energy  
EDA=5*0.000000001;  
  
%Values for Heterogeneity  
%Percentage of nodes than are advanced  
m=0.005;  
%\alpha
```

```

a=1;
%maximum number of rounds
%rmax=9999
rmax=1200

%%%%%%%%%% END OF PARAMETERS %%%%%%%%%%%

%Computation of do
do=sqrt(Efs/Emp);

%Creation of the random Sensor Network
figure(1);
for i=1:1:n
    S(i).xd=rand(1,1)*xm;
    XR(i)=S(i).xd;
    S(i).yd=rand(1,1)*ym;
    YR(i)=S(i).yd;
    S(i).G=0;
    %initially there are no cluster heads only nodes
    S(i).type='N';

    temp_rnd0=i;
    %Random Election of Normal Nodes
    if (temp_rnd0>=m*n+1)
        S(i).E=Eo;
        S(i).ENERGY=0;
        plot(S(i).xd,S(i).yd,'o');
        hold on;
    end
    %Random Election of Advanced Nodes
    if (temp_rnd0<m*n+1)
        S(i).E=Eo*(1+a)
        S(i).ENERGY=1;
        plot(S(i).xd,S(i).yd,'+');
        hold on;
    end
end

```

```

    end
end

S(n+1).xd=sink.x;
S(n+1).yd=sink.y;
plot(S(n+1).xd,S(n+1).yd,'x');

%First Iteration
figure(1);

%counter for CHs
countCHs=0;
%counter for CHs per round
rcountCHs=0;
cluster=1;

countCHs;
rcountCHs=rcountCHs+countCHs;
flag_first_dead=0;
    enrgy_res=zeros(n,rmax);
    energy_moy=zeros(n,rmax);

for r=0:1:rmax
    r

    %Operation for epoch
    if(mod(r, round(1/p) )==0)
        for i=1:1:n
            S(i).G=0;
            S(i).cl=0;
        end
    end
end

hold off;

```

```

%Number of dead nodes
dead=0;
%Number of dead Advanced Nodes
dead_a=0;
%Number of dead Normal Nodes
dead_n=0;
%Alive node
alive=0;

%counter for bit transmitted to Bases Station and to Cluster Heads
packets_TO_BS=0;
packets_TO_CH=0;
%counter for bit transmitted to Bases Station and to Cluster Heads
%per round
PACKETS_TO_CH(r+1)=0;
PACKETS_TO_BS(r+1)=0;

figure(1);

for i=1:1:n

    %checking if there is a dead node
    if (S(i).E<=0)
        plot(S(i).xd,S(i).yd,'red .');
        dead=dead+1;
        if(S(i).ENERGY==1)
            dead_a=dead_a+1;
        end
        if(S(i).ENERGY==0)
            dead_n=dead_n+1;
        end
        hold on;
    end
    if S(i).E>0
        S(i).type='N';
    end
end

```

```

    if (S(i).ENERGY==0)
    plot(S(i).xd,S(i).yd,'o');
    end
    if (S(i).ENERGY==1)
    plot(S(i).xd,S(i).yd,'+');
    end
    hold on;
end
end
plot(S(n+1).xd,S(n+1).yd,'blue x');

STATISTICS(r+1).DEAD=dead;
DEAD(r+1)=dead;
DEAD_N(r+1)=dead_n;
DEAD_A(r+1)=dead_a;
alive=n-dead;
ALIVE_NODE(r+1)=alive;

%When the first node dies
if (dead==1)
    if(flag_first_dead==0)
        first_dead=r
        flag_first_dead=1;
    end
end

countCHs=0;
cluster=1;

for i=1:1:n
    if(S(i).E>0)

        %average energy
        energy_moy(i,r+1)=(1/r)*sum(energy_res(i,1:(r+1)));
        % the random number is generated at the intervall [0 ,(Eaverage_energy(i)/Eo) ]

```

```

% generate a random number
temp_rand= ((energy_moy(i)/Eo).*rand(1,1));
if ( (S(i).G)<=0)
    %k = (a live node in the network * %c(number of cluster heads defined at the intiale time))
    k=ALIVE_NODE(r+1)*p;

%Election of Cluster Heads
if(temp_rand<= (n*(S(i).E / Eo) /(n-k*mod(r,round(n/k)))))
    countCHs=countCHs+1;
    packets_TO_BS=packets_TO_BS+1;
    PACKETS_TO_BS(r+1)=packets_TO_BS;

    S(i).type='C';
    S(i).G=round(1/k)-1;
    C(cluster).xd=S(i).xd;
    C(cluster).yd=S(i).yd;
    plot(S(i).xd,S(i).yd,'k*');

    distance=sqrt( (S(i).xd-(S(n+1).xd) )^2 + (S(i).yd-(S(n+1).yd) )^2 );
    C(cluster).distance=distance;
    C(cluster).id=i;
    X(cluster)=S(i).xd;
    Y(cluster)=S(i).yd;
    cluster=cluster+1;

%Calculation of Energy dissipated
distance;
if (distance>do)
    S(i).E=S(i).E- ( (ETX+EDA)*(4000) + Emp*4000*( distance*distance*distance*distance
));
    enrgy_res(i,r+1)= S(i).E;
end
if (distance<=do)
    S(i).E=S(i).E- ( (ETX+EDA)*(4000) + Efs*4000*( distance * distance ));
    enrgy_res(i,r+1)= S(i).E;

```

```

        end
    end

    end

    end

    end

STATISTICS(r+1).CLUSTERHEADS=cluster-1;
CLUSTERHS(r+1)=cluster-1;
%Election of Associated Cluster Head for Normal Nodes

for i=1:1:n
    if ( S(i).type=='N' && S(i).E>0 )
        if(cluster-1>=1)
            min_dis=sqrt( (S(i).xd-S(n+1).xd)^2 + (S(i).yd-S(n+1).yd)^2 );
            min_dis_cluster=1;
            for c=1:1:cluster-1
                temp=min(min_dis,sqrt( (S(i).xd-C(c).xd)^2 + (S(i).yd-C(c).yd)^2 ) );
                if ( temp<min_dis )
                    min_dis=temp;
                    min_dis_cluster=c;
                end
            end
        end
    end

    %Energy dissipated by associated Cluster Head
    min_dis;
    if (min_dis>do)
        S(i).E=S(i).E- ( ETX*(4000) + Emp*4000*( min_dis * min_dis * min_dis * min_dis));
        enrgy_res(i,r+1)= S(i).E;
    end
    if (min_dis<=do)
        S(i).E=S(i).E- ( ETX*(4000) + Efs*4000*( min_dis * min_dis));
        enrgy_res(i,r+1)= S(i).E;
    end
end

%Energy dissipated

```



```

if(min_dis>0)
    S(C(min_dis_cluster).id).E = S(C(min_dis_cluster).id).E- ( (ERX + EDA)*4000 );
    PACKETS_TO_CH(r+1)=n-dead-cluster+1;
end

S(i).min_dis=min_dis;
S(i).min_dis_cluster=min_dis_cluster;

end
end
end
hold on;

countCHs;
rcountCHs=rcountCHs+countCHs;

end

```