

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ФАХОВИЙ БІЗНЕС-КОЛЕДЖ
Циклова комісія комп'ютерної інженерії та інформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему

СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

Виконав: студент групи 2К-
22

Спеціальності

123 Комп'ютерна інженерія

Ілля ТОГОВІЦЬКИЙ

Керівник:

Павло РАТАЙЧУК

Черкаси 2026

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ.....	7
1.1 Поняття та архітектура бездротових сенсорних мереж (WSN)	7
1.2 Апаратна структура сенсорного вузла	8
1.3 Моделі енергоспоживання в WSN	10
1.4 Основні причини енергетичних втрат у сенсорних мережах	12
1.5 Протоколи маршрутизації з урахуванням енергозбереження	14
1.6 Методи продовження життєвого циклу мережі	17
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У WSN	20
2.1 Енергоефективні протоколи маршрутизації (LEACH, PEGASIS, TEEN)	20
2.2 Методи кластеризації сенсорних вузлів	24
2.3 Duty Cycling та режими сну сенсорних вузлів	25
2.4 Адаптивне керування потужністю передавання	26
2.5 Агрегація та компресія даних	27
2.6 Використання енергозбірних технологій (energy harvesting)	27
2.7 Порівняльний аналіз ефективності методів енергозбереження	28
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У БЕЗДРОТОВІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ	30
3.1 Постановка задачі моделювання	30
3.2 Вибір програмного середовища моделювання	31
3.3 Розробка моделі бездротової сенсорної мережі	33
3.4 Моделювання базового сценарію (без енергозбереження)	35

ВСТУП

У сучасному світі інформаційні технології активно застосовуються у різних сферах діяльності людини, зокрема в екологічному моніторингу, промисловості, сільському господарстві, медицині, системах «розумного міста» та Інтернету речей (IoT). Важливу роль у цих системах відіграють бездротові сенсорні мережі (Wireless Sensor Networks, WSN), які складаються з великої кількості автономних сенсорних вузлів, здатних збирати, обробляти та передавати дані про стан навколишнього середовища.

Однією з основних проблем функціонування бездротових сенсорних мереж є обмежені енергетичні ресурси сенсорних вузлів. У більшості випадків такі вузли живляться від батарей, заміна або заряджання яких може бути складною або економічно недоцільною, особливо у віддалених або важкодоступних місцях. Через це ефективне використання енергії стає критично важливим фактором для забезпечення тривалого функціонування мережі.

Значна частина енергоспоживання сенсорних вузлів пов'язана з передаванням даних, обробкою інформації та підтримкою зв'язку між вузлами. Тому розробка та впровадження методів енергозбереження, оптимізація протоколів маршрутизації, використання режимів сну, кластеризації вузлів та інших енергоефективних технологій є важливим напрямом досліджень у галузі комп'ютерної інженерії.

Таким чином, дослідження систем енергозбереження у бездротових сенсорних мережах є актуальним завданням, оскільки дозволяє підвищити ефективність роботи мережі, продовжити її життєвий цикл та зменшити енергетичні витрати.

Метою дипломної кваліфікаційної роботи є дослідження та аналіз методів енергозбереження у бездротових сенсорних мережах, а також

моделювання системи енергоефективного функціонування мережі для підвищення тривалості її роботи.

Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати теоретичні основи функціонування бездротових сенсорних мереж.
2. Дослідити архітектуру та апаратну структуру сенсорного вузла.
3. Розглянути основні моделі енергоспоживання у WSN.
4. Визначити основні причини енергетичних втрат у сенсорних мережах.
5. Проаналізувати існуючі енергоефективні протоколи маршрутизації.
6. Дослідити сучасні методи енергозбереження у бездротових сенсорних мережах.
7. Виконати моделювання роботи сенсорної мережі у програмному середовищі.
8. Провести порівняльний аналіз ефективності різних методів енергозбереження.
9. Оцінити вплив впроваджених рішень на тривалість життєвого циклу мережі.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є бездротові сенсорні мережі та процеси їх функціонування.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є методи та технології енергозбереження у бездротових сенсорних мережах, а також механізми підвищення енергоефективності роботи сенсорних вузлів.

Методи дослідження

У процесі виконання роботи були використані такі методи дослідження:

- аналіз наукових джерел та літератури;
- системний аналіз архітектури бездротових сенсорних мереж;
- методи моделювання та комп'ютерного експерименту;
- методи порівняльного аналізу результатів моделювання;
- статистичний аналіз отриманих даних.

Практичне значення роботи

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розроблених підходів та моделей для підвищення енергоефективності бездротових сенсорних мереж. Отримані результати можуть бути застосовані під час проєктування систем моніторингу навколишнього середовища, систем «розумного міста», промислових сенсорних мереж та інших систем Інтернету речей.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ БЕЗДРотовИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

1.1 Поняття та архітектура бездротових сенсорних мереж (WSN)

Стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій сприяв появі нових підходів до збору, обробки та передачі даних у розподілених середовищах. Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку мережевих технологій стали бездротові сенсорні мережі (Wireless Sensor Networks, WSN), які забезпечують автоматизований моніторинг фізичних параметрів навколишнього середовища та передачу отриманої інформації до центрів обробки даних.

Бездротова сенсорна мережа являє собою сукупність автономних електронних пристроїв, оснащених сенсорами, мікроконтролерами та бездротовими засобами зв'язку. Такі пристрої здатні здійснювати вимірювання різноманітних параметрів, зокрема температури, вологості, освітленості, тиску, концентрації газів, рівня шуму та інших характеристик середовища. Отримані дані передаються через мережу до базової станції або сервера для подальшого аналізу та прийняття рішень.

Поява концепції Інтернету речей значно розширила сферу застосування WSN. Сьогодні такі мережі використовуються у промисловій автоматизації, системах моніторингу довкілля, медицині, сільському господарстві, транспортній інфраструктурі, військовій сфері та системах розумного міста. Основною перевагою бездротових сенсорних мереж є можливість функціонування в умовах відсутності кабельної інфраструктури та мінімальне втручання людини у процес експлуатації мережі.

Архітектура WSN будується за принципом багаторівневої взаємодії між сенсорними вузлами, маршрутизаторами та базовими станціями. Типова структура мережі включає значну кількість вузлів, розташованих

на певній території, які взаємодіють між собою шляхом багатоетапної передачі даних.

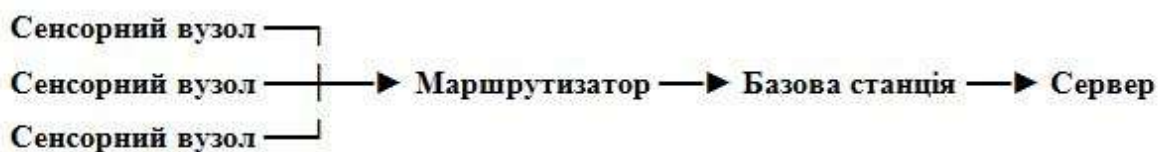


Рисунок 1.1 – Узагальнена архітектура бездротової сенсорної мережі

У більшості випадків сенсорні вузли мають обмежені апаратні ресурси та працюють від автономних джерел живлення. Саме тому питання енергоефективності є одним із ключових чинників при проектуванні та експлуатації WSN.

Для оцінки особливостей бездротових сенсорних мереж доцільно порівняти їх із традиційними бездротовими мережами.

Таблиця 1.1 – Порівняння традиційних бездротових мереж та WSN

Характеристика	Традиційні бездротові мережі	Бездротові сенсорні мережі
Основне призначення	Передача даних	Моніторинг і збір даних
Кількість вузлів	Десятки	Сотні або тисячі
Енергоживлення	Переважно мережеве	Автономне
Обчислювальні ресурси	Високі	Обмежені
Термін автономної роботи	Не критичний	Критично важливий
Основний критерій оптимізації	Продуктивність	Енергоефективність

Таким чином, бездротові сенсорні мережі є важливим елементом сучасних інформаційних систем та становлять основу багатьох рішень у сфері Інтернету речей. Особливості їх функціонування безпосередньо пов'язані з необхідністю ефективного використання обмежених енергетичних ресурсів, що визначає актуальність дослідження методів енергозбереження.

1.2 Апаратна структура сенсорного вузла

Функціонування будь-якої бездротової сенсорної мережі базується на роботі окремих сенсорних вузлів, які виконують роль первинних джерел інформації. Конструктивно сенсорний вузол являє собою

компактний електронний пристрій, здатний здійснювати вимірювання параметрів середовища, обробку отриманих даних та їх передачу через бездротові канали зв'язку.

Типова структура сенсорного вузла складається з декількох взаємопов'язаних модулів. До їх складу входять сенсорний блок, процесорний модуль, модуль бездротового зв'язку та система живлення.



Рисунок 1.2 – Структура сенсорного вузла

Сенсорний модуль забезпечує перетворення фізичних величин у цифрові сигнали. Залежно від призначення мережі можуть використовуватися датчики температури, вологості, освітленості, тиску, руху або концентрації газів.

Мікроконтролер виконує обробку отриманої інформації та керує роботою інших компонентів вузла. Сучасні WSN часто використовують мікроконтролери сімейств AVR, ARM Cortex-M та ESP32, які характеризуються низьким рівнем енергоспоживання та достатньою обчислювальною потужністю.

Модуль бездротового зв'язку відповідає за передачу інформації між вузлами мережі. Для цього використовуються технології ZigBee,

LoRaWAN, Bluetooth Low Energy, Wi-Fi HaLow та інші стандарти бездротового зв'язку.

Найбільш критичним елементом сенсорного вузла є джерело живлення. У більшості випадків застосовуються батареї або акумулятори, заміна яких може бути складною або економічно недоцільною. Саме тому ефективне використання енергії виступає одним із головних завдань проектування WSN.

Таблиця 1.2 – Основні компоненти сенсорного вузла та їх функції

Компонент	Основне призначення
Сенсорний модуль	Збір інформації про середовище
Мікроконтролер	Обробка даних та керування
Радіомодуль	Передача та прийом даних
Джерело живлення	Забезпечення енергопостачання
Пам'ять	Зберігання даних та програм

1.3 Моделі енергоспоживання в WSN

Енергоспоживання є одним із найважливіших параметрів функціонування бездротових сенсорних мереж, оскільки більшість сенсорних вузлів працює від автономних джерел живлення. У процесі експлуатації мережі заміна або підзарядка елементів живлення часто є складною або економічно не вигідною, особливо у випадках розгортання мереж у важкодоступних районах, промислових об'єктах, лісових масивах або системах екологічного моніторингу. Тому при проектуванні WSN особлива увага приділяється аналізу моделей енергоспоживання та визначенню факторів, які впливають на швидкість розрядження джерел живлення.

Дослідження показують, що найбільші витрати енергії припадають на передачу та прийом даних через бездротовий канал зв'язку. Частка енергоспоживання процесора, оперативної пам'яті та сенсорних модулів у більшості випадків значно нижча порівняно з роботою радіомодуля. Саме тому сучасні алгоритми енергозбереження спрямовані насамперед на оптимізацію процесів обміну інформацією між вузлами мережі.

Для оцінювання енергетичних витрат найчастіше використовується радіомодель першого порядку. Згідно з цією моделлю енергія, необхідна для передачі повідомлення довжиною k бітів на відстань d , визначається співвідношенням:

де E_{elec} характеризує енергію, необхідну для роботи електронних компонентів передавача, ϵ_{amp} визначає енергетичні витрати підсилювача сигналу, а показник n залежить від умов поширення радіохвиль.

Енергія, що витрачається на прийом повідомлення, описується значно простішою залежністю:

Аналіз наведених співвідношень демонструє, що збільшення відстані між вузлами призводить до суттєвого зростання енергетичних витрат. Саме тому в багатьох сучасних протоколах маршрутизації використовується багатострибкова передача даних, за якої повідомлення передається через проміжні вузли замість безпосереднього надсилання на значну відстань.

Для оцінювання роботи сенсорного вузла доцільно враховувати енергоспоживання всіх його компонентів. Загальна витрата енергії визначається як сума енергетичних витрат окремих модулів:

У даному випадку враховуються витрати енергії на виконання вимірювань, обробку інформації, передачу даних, прийом повідомлень та перебування вузла у стані очікування.

Залежно від режиму роботи сенсорний вузол може перебувати у декількох енергетичних станах. Найбільше споживання енергії спостерігається під час передачі даних, дещо менше – під час прийому інформації. Режим очікування характеризується значно нижчим рівнем споживання, тоді як режим сну забезпечує мінімальні енергетичні витрати.

Таблиця 1.3 – Порівняння енергоспоживання вузла в різних режимах роботи

Режим роботи	Відносний рівень енергоспоживання
Передача даних	Дуже високий
Прийом даних	Високий
Обробка інформації	Середній

Режим роботи	Відносний рівень енергоспоживання
Очікування	Низький
Сон (Sleep Mode)	Дуже низький

У сучасних WSN широко застосовуються математичні моделі прогнозування залишкового ресурсу батареї. Такі моделі дозволяють оцінити очікуваний термін функціонування мережі та своєчасно виконувати заходи щодо оптимізації енергоспоживання.

Таблиця 1.3 – Основні складові енергоспоживання сенсорного вузла

Передача даних	60–80 %
Прийом даних	15–25 %
Обробка даних	3–10 %
Сенсори	2–5 %

Отже, аналіз моделей енергоспоживання підтверджує, що ключовим напрямом підвищення ефективності бездротових сенсорних мереж є мінімізація кількості передач даних та скорочення часу активної роботи радіомодуля.

1.4 Основні причини енергетичних втрат у сенсорних мережах

Ефективність функціонування бездротових сенсорних мереж значною мірою визначається здатністю мінімізувати втрати енергії під час експлуатації. Незважаючи на постійний розвиток енергоефективних мікроконтролерів та засобів зв'язку, проблема обмеженого енергоресурсу залишається одним із головних факторів, що впливають на життєвий цикл мережі.

Однією з найбільш поширених причин надмірного споживання енергії є колізії пакетів. Якщо два або більше вузлів одночасно передають інформацію через спільний канал зв'язку, виникає конфлікт, унаслідок якого дані пошкоджуються. Для відновлення інформації необхідна повторна передача пакетів, що супроводжується додатковими енергетичними витратами.

Суттєві втрати також виникають унаслідок надлишкового прослуховування каналу зв'язку. Багато вузлів постійно перебувають у стані готовності до прийому повідомлень навіть тоді, коли жодна інформація фактично не передається. Такий режим роботи призводить до поступового розрядження джерел живлення.

Ще одним фактором є надмірна генерація службового трафіку. Передача маршрутної інформації, службових повідомлень та пакетів синхронізації потребує використання додаткових ресурсів мережі. У великих WSN обсяг службового трафіку може становити значну частину загального мережевого навантаження.

Поширеною причиною втрат енергії виступає дублювання даних. Оскільки сусідні вузли часто здійснюють вимірювання однакових параметрів середовища, передача всіх отриманих даних призводить до виникнення значної кількості надлишкової інформації.

Таблиця 1.4 – Причини енергетичних втрат у WSN

Причина	Вплив на мережу
Колізії пакетів	Повторна передача повідомлень
Idle Listening	Постійне споживання енергії радіомодулем
Overhearing	Прийом непотрібних пакетів
Control Overhead	Передача службової інформації
Data Redundancy	Дублювання результатів вимірювань
Неоптимальна маршрутизація	Надлишкові витрати енергії

Значний вплив на енергоспоживання має також відстань між вузлами. Зі збільшенням дистанції зростає потужність передавача, необхідна для забезпечення стабільного зв'язку. У результаті швидкість розрядження батареї збільшується, що негативно впливає на загальний термін функціонування мережі.

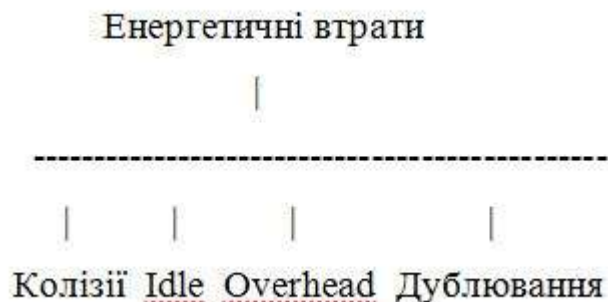


Рисунок 1.4 – Джерела енергетичних втрат у WSN

Таким чином, більшість енергетичних втрат пов'язана не з роботою сенсорів або процесорів, а саме з організацією передачі даних у мережі. Це пояснює необхідність розроблення спеціалізованих протоколів маршрутизації та алгоритмів керування енергоспоживанням.

1.5 Протоколи маршрутизації з урахуванням енергозбереження

Одним із найважливіших чинників, що визначають ефективність функціонування бездротових сенсорних мереж, є організація процесу маршрутизації даних. В умовах обмежених енергетичних ресурсів сенсорних вузлів традиційні протоколи маршрутизації, які використовуються в комп'ютерних мережах, не забезпечують необхідного рівня енергоефективності. Саме тому для WSN були розроблені спеціалізовані протоколи, основною метою яких є мінімізація енергетичних витрат під час передачі інформації та забезпечення максимально можливого терміну функціонування мережі.

Особливістю сенсорних мереж є значна кількість вузлів, обмежені апаратні ресурси та необхідність регулярної передачі невеликих обсягів інформації до базової станції. У таких умовах ефективність маршрутизації визначається не лише швидкістю доставки даних, але й рівномірністю використання енергетичних ресурсів між вузлами мережі.

Одним із найвідоміших протоколів енергоефективної маршрутизації є LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy). Основною ідеєю

даного протоколу є кластеризація мережі. Сенсорні вузли об'єднуються в окремі кластери, кожен із яких має головний вузол (Cluster Head). Саме головний вузол збирає інформацію від підлеглих вузлів, виконує її попередню обробку та передає агреговані дані до базової станції.

Особливістю LEACH є періодична зміна головних вузлів. Завдяки цьому навантаження рівномірно розподіляється між усіма учасниками мережі, що дозволяє уникнути швидкого виснаження енергії окремих сенсорів.

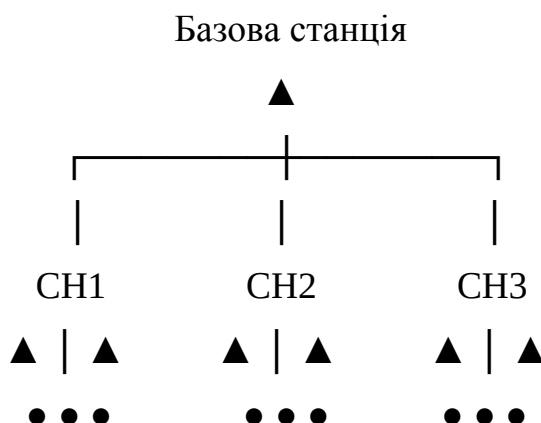


Рисунок 1.5 – Принцип функціонування протоколу LEACH

Іншим поширеним рішенням є протокол PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems). На відміну від LEACH, він використовує ланцюгову структуру взаємодії між вузлами. Кожний вузол передає інформацію найближчому сусіду, а після послідовної агрегації даних один із вузлів надсилає узагальнену інформацію до базової станції.

Такий підхід дозволяє зменшити кількість довгих передач даних та забезпечити додаткову економію енергії. Проте зі збільшенням розмірів мережі може виникати проблема зростання затримок передачі інформації.

Протокол TEEN (Threshold Sensitive Energy Efficient Network) орієнтований на подійно-керовані системи моніторингу. Його особливістю є використання порогових значень контрольованих параметрів. Передача інформації здійснюється лише у випадку перевищення визначених меж.

Завдяки цьому значно скорочується кількість переданих повідомлень та зменшується навантаження на мережу.

Застосування TEEN є особливо ефективним у системах пожежного моніторингу, контролю витоків небезпечних речовин або аварійних ситуацій, де необхідно оперативно реагувати лише на суттєві зміни контрольованих параметрів.

Подальший розвиток кластерних технологій привів до створення протоколу HEED (Hybrid Energy Efficient Distributed Clustering). На відміну від LEACH, під час вибору головного вузла враховується не випадковий принцип, а залишковий рівень енергії сенсорного вузла та ступінь його зв'язності із сусідніми вузлами.

Завдяки цьому досягається більш рівномірний розподіл навантаження та підвищується загальна ефективність використання енергетичних ресурсів мережі. Протокол HEED демонструє стабільні результати в мережах із великою кількістю сенсорів та нерівномірною щільністю їх розміщення.

Для оцінювання ефективності найбільш поширених енергоефективних протоколів доцільно виконати їх порівняльний аналіз.

Таблиця 1.5 – Порівняння протоколів маршрутизації з урахуванням енергозбереження

Протокол	Тип організації мережі	Енергоефективність	Масштабованість	Складність реалізації
LEACH	Кластерна	Висока	Висока	Середня
PEGASIS	Ланцюгова	Дуже висока	Середня	Висока
TEEN	Кластерна	Висока	Висока	Середня
HEED	Кластерна	Дуже висока	Висока	Висока

Аналіз представлених протоколів свідчить про те, що універсального рішення для всіх сценаріїв використання WSN не існує. Вибір конкретного протоколу визначається особливостями мережі,

інтенсивністю обміну даними, кількістю вузлів та вимогами до тривалості автономної роботи.

Отже, застосування енергоефективних протоколів маршрутизації дозволяє значно знизити рівень енергоспоживання мережі та забезпечити більш раціональне використання ресурсів сенсорних вузлів.

1.6 Методи продовження життєвого циклу мережі

Тривалість функціонування бездротової сенсорної мережі є одним із головних показників її ефективності. Під життєвим циклом WSN зазвичай розуміють проміжок часу від моменту розгортання мережі до втрати нею здатності виконувати поставлені функції внаслідок виснаження енергетичних ресурсів сенсорних вузлів. Оскільки більшість вузлів працює від автономних джерел живлення, продовження життєвого циклу мережі є одним із ключових завдань проектування сучасних WSN.

Одним із найбільш ефективних способів економії енергії є використання режимів сну. У процесі роботи сенсорний вузол більшу частину часу не виконує активних операцій. Тому переведення процесора та радіомодуля у режим низького енергоспоживання дозволяє суттєво зменшити витрати енергії. Після надходження відповідної події або сигналу вузол автоматично повертається до активного режиму роботи.

Широке застосування отримали методи агрегації даних. Оскільки сусідні вузли часто фіксують однакові або подібні параметри середовища, передача всіх вимірних значень призводить до виникнення надлишкового трафіку. Агрегація дозволяє об'єднувати дані від декількох сенсорів та передавати лише узагальнену інформацію. Це зменшує кількість передач і відповідно скорочує енергетичні витрати.

Важливим напрямом енергозбереження є використання кластеризації мережі. Формування кластерів дозволяє локалізувати обмін інформацією між вузлами та зменшити кількість безпосередніх передач до

базової станції. У результаті знижується навантаження на мережу та підвищується ефективність використання енергетичних ресурсів.

Суттєвий вплив на тривалість роботи мережі має адаптивне керування потужністю передавача. За наявності близько розташованих вузлів немає потреби використовувати максимальну потужність сигналу. Автоматичне регулювання потужності дозволяє підтримувати необхідну якість зв'язку та одночасно мінімізувати енергетичні витрати.

Перспективним напрямом розвитку WSN є використання технологій збору енергії з навколишнього середовища (Energy Harvesting). У таких системах джерелом енергії можуть виступати сонячне випромінювання, механічні вібрації, теплові потоки або електромагнітне випромінювання. Використання альтернативних джерел живлення дозволяє суттєво збільшити тривалість автономного функціонування мережі.

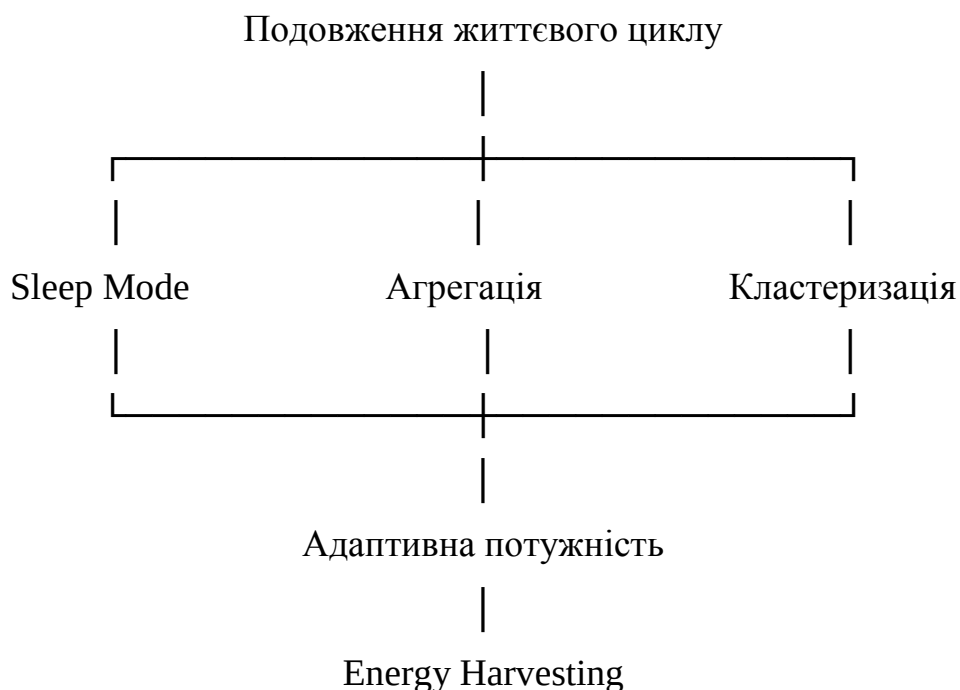


Рисунок 1.6 – Основні методи продовження життєвого циклу WSN

Для оцінювання ефективності методів енергозбереження можна використовувати показник продовження життєвого циклу мережі:

де T_{base} — тривалість роботи мережі без використання енергоефективних механізмів, а T_{new} — тривалість роботи після впровадження методів енергозбереження.

Результати численних досліджень демонструють, що комплексне використання кластеризації, агрегації даних, режимів сну та адаптивного керування потужністю може збільшити тривалість функціонування мережі у декілька разів порівняно з традиційними підходами.

Таким чином, енергозбереження є фундаментальним завданням при проектуванні бездротових сенсорних мереж. Використання спеціалізованих протоколів маршрутизації та сучасних методів оптимізації енергоспоживання дозволяє значно продовжити життєвий цикл мережі, підвищити її надійність та забезпечити ефективне функціонування в умовах обмежених енергетичних ресурсів.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У WSN

2.1 Енергоефективні протоколи маршрутизації (LEACH, PEGASIS, TEEN)

У бездротових сенсорних мережах (WSN) одним із основних факторів, що впливає на тривалість роботи мережі, є енергоспоживання сенсорних вузлів. Оскільки більшість вузлів працюють від автономних джерел живлення, таких як батареї, ефективне використання енергії є критично важливим для забезпечення стабільної та довготривалої роботи мережі.

Одним із ключових підходів до зменшення енергоспоживання є використання енергоефективних протоколів маршрутизації. Такі протоколи оптимізують процес передачі даних між вузлами мережі та базовою станцією, зменшуючи кількість переданих повідомлень і навантаження на окремі вузли.

У сучасних бездротових сенсорних мережах широко застосовуються різні енергоефективні протоколи маршрутизації, серед яких найбільш відомими є LEACH, PEGASIS та TEEN.

Протокол LEACH

LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) є одним із найбільш відомих кластерних протоколів маршрутизації для бездротових сенсорних мереж. Основна ідея цього протоколу полягає у створенні кластерів, у яких один із вузлів виконує роль кластерного голови.

Кластерний голова відповідає за:

- збір даних від сенсорних вузлів;
- агрегування отриманої інформації;
- передачу узагальнених даних до базової станції.

Особливістю протоколу LEACH є періодична зміна кластерного голови між вузлами мережі. Це дозволяє рівномірно розподіляти енергетичне навантаження між вузлами та запобігати швидкому розрядженню окремих сенсорів.

Перевагами протоколу LEACH є:

- зменшення кількості переданих даних;
- рівномірний розподіл енергоспоживання;
- підвищення тривалості роботи мережі.

Протокол PEGASIS

PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) є протоколом маршрутизації, який використовує ланцюгову структуру з'єднання сенсорних вузлів.

У цьому підході всі вузли мережі формують ланцюг, де кожен вузол передає зібрані дані сусідньому вузлу. Інформація поступово передається вздовж ланцюга, поки не досягне вузла, який відповідає за передачу даних до базової станції.

Перевагою такого підходу є значне зменшення кількості передач даних на великі відстані, що дозволяє знизити витрати енергії.

Основні переваги протоколу PEGASIS:

- менше енергоспоживання порівняно з кластерними протоколами;
- зменшення кількості передач до базової станції;
- ефективне використання ресурсів мережі.

Протокол TEEN

TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient sensor Network protocol) є протоколом маршрутизації, який призначений для роботи в сенсорних мережах, де важливо швидко реагувати на зміну певних параметрів.

У цьому протоколі вузли передають дані лише тоді, коли значення вимірюваного параметра перевищує заданий поріг. Такий підхід дозволяє значно зменшити кількість передач даних у мережі.

Протокол TEEN використовує два типи порогових значень:

- жорсткий поріг — мінімальне значення параметра, при перевищенні якого передається інформація;
- м'який поріг — визначає зміну значення параметра, яка потребує повторної передачі даних.

Завдяки цьому передача інформації здійснюється лише у випадку важливих змін, що дозволяє значно зменшити витрати енергії.

Порівняльний аналіз вищевказаних енергоефективних протоколів маршрутизації наведено у таблиці 1_2.1 та на малюнку 1_2.1 нижче.

Таблиця 1_2.1 Порівняння протоколів маршрутизації

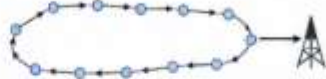
Характеристика	LEACH	PEGASIS	TEEN
Тип протоколу	Кластерний	Ланцюговий (chain-based)	Кластерний
Принцип роботи	Формування кластерів з випадковим вибором кластерного голови	Побудова ланцюга вузлів, передача даних сусідам	Передача даних лише при досягненні порогового значення
Передача даних	Від вузлів до кластерного голови, далі до базової станції	Послідовна передача вздовж ланцюга	Передача тільки при події
Агрегація даних	Так	Так	Так
Енергоспоживання	Середнє	Низьке	Дуже низьке (за рахунок меншої кількості передач)
Баланс навантаження	Добрий (через ротацію СН)	Середній	Добрий
Затримка передачі	Низька	Висока	Низька / середня
Складність реалізації	Невисока	Середня	Середня
Масштабованість	Висока	Обмежена	Висока
Стійкість до відмов вузлів	Середня	Низька	Середня

Характеристика	LEACH	PEGASIS	TEEN
Основні переваги	Простота, баланс енергії, ефективність	Мінімальні витрати енергії	Мінімізація передач
Основні недоліки	Нерівномірне розміщення СН	Велика затримка, залежність від вузлів	Можлива втрата даних

Проведений порівняльний аналіз показує, що кожен із розглянутих протоколів має свої переваги та обмеження. Протокол LEACH забезпечує хороший баланс між енергоефективністю та складністю реалізації, що робить його універсальним рішенням для багатьох застосувань. PEGASIS дозволяє досягти мінімального енергоспоживання, однак має значні затримки передачі даних та низьку стійкість до відмов. Протокол TEEN є ефективним для подієво-орієнтованих систем, де важлива мінімізація передач, але він може призводити до втрати частини інформації.

Таким чином, вибір протоколу маршрутизації повинен здійснюватися з урахуванням специфіки задачі, вимог до енергоефективності, затримок та надійності передачі даних.

ПОРІВНЯННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ПРОТОКОЛІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ У WSN

	LEACH	PEGASIS	TEEN
 Тип протоколу	Кластерний	Ланцюговий (chain-based)	Кластерний
 Принцип роботи	Формування кластерів з випадковим вибором кластерного голови (CH)	Побудова ланцюга вузлів, передача даних сусідам	Передача даних лише при досягненні порогового значення події
 Топологія мережі			
 Передача даних	Від вузлів до CH, далі до базової станції	Послідовна передача вздовж ланцюга до базової станції	Передача тільки при події (перевищенні порогового значення)
 Агрегація даних	Так	Так	Так
 Енергоспоживання	Середнє 	Низьке 	Дуже низьке 
 Баланс навантаження	Добрий (через ротацію CH)	Середній	Добрий
 Затримка передачі	Низька 	Висока 	Низька / середня 
 Складність реалізації	Невисока 	Середня 	Середня 
 Масштабованість	Висока 	Обмежена 	Висока 
 Стійкість до відмов вузлів	Середня 	Низька 	Середня 
 Основні переваги	- Простота реалізації - Баланс енергії - Ефективність у великих мережах	- Мінімальне енергоспоживання - Зменшення кількості передач - Ефективна агрегація даних	- Мінімізація передач - Висока енергоефективність - Добре підходить для подієвих мереж
 Основні недоліки	- Нерівномірне розміщення CH - Можливі "гарячі точки" біля BS	- Велика затримка передачі - Залежність від вузлів ланцюга - Низька стійкість до відмов	- Можлива втрата даних - Потребує налаштування порогів - Не підходить для безперервного моніторингу
 Оптиміальне застосування	Загальний моніторинг, великі мережі, збалансовані вимоги	Системи з дуже обмеженою енергією, де важлива мінімізація передач	Подієво-орієнтовані системи, де важлива мінімізація передач даних

Умовні позначення:  Сенсорний вузол  Кластерний голова (CH)  Базова станція (BS)  Передача даних  Напрямок передачі  Подія (перевищення порогів)

Рисунок 2.1 Порівняння енергоефективних протоколів

Енергоефективні протоколи маршрутизації відіграють важливу роль у підвищенні ефективності роботи бездротових сенсорних мереж. Протоколи LEACH, PEGASIS та TEEN пропонують різні підходи до оптимізації передачі даних і зменшення енергоспоживання сенсорних вузлів. Використання таких алгоритмів дозволяє значно продовжити час функціонування мережі та підвищити її ефективність.

2.2 Методи кластеризації сенсорних вузлів

Кластеризація є одним із найефективніших підходів до зменшення енергоспоживання у WSN. Вона передбачає об'єднання сенсорних вузлів у групи (кластери), що дозволяє оптимізувати передачу даних.

Основні переваги кластеризації:

- зменшення кількості передач до базової станції;
- зниження навантаження на окремі вузли;
- можливість агрегації даних;
- підвищення масштабованості мережі.

Кластеризація може бути:

- **статичною** — структура кластерів не змінюється;
- **динамічною** — кластери формуються періодично.

Важливим етапом є вибір кластерного голови. Існують різні підходи до цього:

- випадковий вибір;
- вибір на основі залишкової енергії;
- врахування розташування вузла;
- комбіновані методи.

Найбільш ефективними є алгоритми, що враховують рівень залишкової енергії, оскільки вони дозволяють уникнути перевантаження слабких вузлів.

2.3 Duty Cycling та режими сну сенсорних вузлів

Одним із найпростіших і водночас ефективних способів економії енергії є використання режимів сну (sleep modes), які реалізуються за допомогою механізму duty cycling.

Суть методу полягає в тому, що вузол працює не постійно, а циклічно:

- активний режим (передача/прийом даних);
- режим сну (мінімальне енергоспоживання).

Основні переваги duty cycling:

- значне зниження енергоспоживання;
- продовження часу роботи мережі;
- простота реалізації.

Проте існують і недоліки:

- можливі затримки передачі даних;
- складність синхронізації вузлів;
- ризик втрати пакетів.

Розрізняють кілька типів duty cycling:

- фіксований (fixed duty cycle);
- адаптивний (adaptive duty cycle);
- подієво-орієнтований.

Адаптивні підходи є більш ефективними, оскільки дозволяють змінювати режим роботи залежно від умов мережі.

2.4 Адаптивне керування потужністю передавання

Енергоспоживання при передачі даних значною мірою залежить від потужності передавача. Тому важливим методом енергозбереження є адаптивне керування потужністю передавання.

Основна ідея полягає у тому, що вузол використовує мінімально необхідну потужність для передачі сигналу на задану відстань.

Переваги цього підходу:

- зменшення енергетичних витрат;
- зниження рівня перешкод у мережі;
- підвищення ефективності використання радіоканалу.

Методи реалізації:

- контроль рівня сигналу (RSSI);
- використання зворотного зв'язку;
- алгоритми оптимізації потужності.

Недоліком є необхідність додаткових обчислень та складність реалізації у великих мережах.

2.5 Агрегація та компресія даних

Агрегація даних передбачає об'єднання кількох повідомлень у одне, що дозволяє зменшити обсяг переданої інформації.

Типові методи агрегації:

- обчислення середнього значення;
- фільтрація даних;
- видалення дублюючої інформації;
- злиття пакетів.

Компресія даних дозволяє зменшити розмір переданих повідомлень за рахунок спеціальних алгоритмів стиснення.

Переваги:

- зменшення кількості переданих бітів;
- економія енергії;
- зниження навантаження на мережу.

Недоліки:

- додаткові обчислювальні витрати;
- можливі втрати точності (у разі втратного стиснення).

Ефективність цих методів значною мірою залежить від типу даних та вимог до їх точності.

2.6 Використання енергозбірних технологій (energy harvesting)

Енергозбірні технології (energy harvesting) дозволяють отримувати енергію з навколишнього середовища, що значно підвищує автономність сенсорних вузлів.

Основні джерела енергії:

- сонячна енергія;
- механічні вібрації;
- теплові градієнти;

- радіочастотне випромінювання.

Переваги:

- зменшення залежності від батарей;
- можливість тривалого або безперервного функціонування;
- екологічність.

Недоліки:

- нестабільність джерел енергії;
- складність апаратної реалізації;
- додаткові витрати на обладнання.

У сучасних WSN часто використовуються гібридні системи, що поєднують батареї та energy harvesting.

2.7 Порівняльний аналіз ефективності методів енергозбереження

Різні методи енергозбереження мають свої переваги та обмеження, тому їх ефективність залежить від умов застосування.

Кластеризація забезпечує значне зниження енергоспоживання у великих мережах, але потребує складних алгоритмів управління.

Duty cycling є простим і ефективним методом, який дозволяє значно продовжити час роботи вузлів, проте може впливати на затримки передачі.

Адаптивне керування потужністю дозволяє оптимізувати енергоспоживання на фізичному рівні, але потребує додаткових ресурсів.

Агрегація та компресія даних ефективні у випадку великих обсягів інформації, проте можуть збільшувати навантаження на процесор.

Energy harvesting є перспективним напрямом, який може забезпечити практично необмежений час роботи мережі, але поки що має технічні обмеження.

Найкращі результати досягаються при комбінуванні кількох методів. Наприклад:

- кластеризація + агрегація даних;
- duty cycling + адаптивна потужність;
- energy harvesting + оптимізована маршрутизація.

Таким чином, комплексний підхід до енергозбереження дозволяє досягти максимального ефекту та забезпечити стабільну роботу бездротових сенсорних мереж.

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У БЕЗДРОТОВІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ

3.1 Постановка задачі моделювання

Ефективність функціонування бездротових сенсорних мереж значною мірою визначається раціональним використанням енергетичних ресурсів сенсорних вузлів. Оскільки більшість таких вузлів працює від автономних джерел живлення, перед дослідниками постає завдання збільшення тривалості функціонування мережі без необхідності заміни або підзарядки батарей. У зв'язку з цим особливого значення набуває моделювання процесів енергоспоживання та оцінювання ефективності різних механізмів енергозбереження.

Метою практичного моделювання є створення моделі бездротової сенсорної мережі, аналіз енергоспоживання окремих вузлів та дослідження впливу алгоритмів енергозбереження на тривалість функціонування мережі. У процесі дослідження необхідно порівняти роботу мережі за двох режимів функціонування: базового режиму без використання механізмів енергозбереження та режиму із застосуванням спеціалізованих алгоритмів оптимізації споживання енергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно реалізувати модель мережі, що складається із сенсорних вузлів, базової станції та каналу передачі даних. Кожен сенсорний вузол повинен виконувати періодичний моніторинг параметрів середовища та передавати отримані дані до базової станції через бездротовий канал зв'язку.

Основними параметрами дослідження виступають залишковий рівень заряду батарей, кількість переданих пакетів, середнє енергоспоживання вузлів, час функціонування мережі та кількість активних вузлів протягом моделювання.

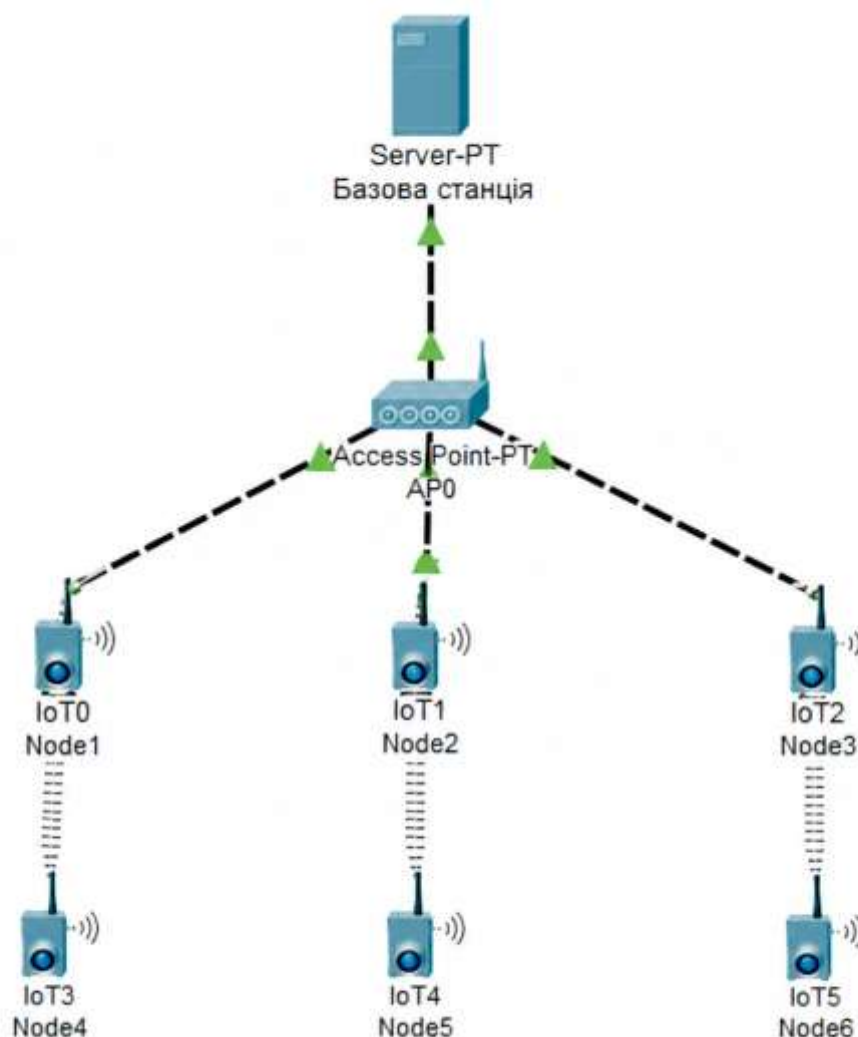


Рисунок 3.1 – Загальна схема досліджуваної бездротової сенсорної мережі

Запропонована модель дозволяє оцінити особливості функціонування бездротової сенсорної мережі в умовах обмежених енергетичних ресурсів та визначити ефективність використання енергоощадних технологій.

3.2 Вибір програмного середовища моделювання

Для виконання практичного дослідження необхідно обрати програмне середовище, яке забезпечує можливість створення моделі бездротової сенсорної мережі, налаштування параметрів вузлів, аналіз мережевого трафіку та оцінювання енергоспоживання.

Серед найбільш поширених засобів моделювання бездротових мереж можна виділити NS-3, OMNeT++, MATLAB Simulink та Cisco Packet Tracer. Кожне із зазначених середовищ має власні переваги та особливості використання.

Для реалізації практичної частини дипломної роботи обрано програмне середовище Cisco Packet Tracer. Даний програмний продукт широко використовується у навчальному процесі для моделювання комп'ютерних мереж різного рівня складності. Однією з його важливих переваг є підтримка технологій Інтернету речей (IoT), що дозволяє створювати моделі бездротових сенсорних мереж та аналізувати їх роботу в умовах, наближених до реальних. Програмне середовище забезпечує наочне представлення мережевої інфраструктури та дозволяє спостерігати процес передачі даних між вузлами в режимі реального часу.

Використання Cisco Packet Tracer дозволяє створювати різні типи сенсорних пристроїв, налаштовувати їх параметри та організовувати взаємодію через бездротові канали зв'язку. Крім того, середовище надає можливість моделювати шлюзи, сервери та інші компоненти, необхідні для побудови повноцінної IoT-системи. Важливою перевагою є також підтримка режиму Simulation, який дозволяє детально аналізувати проходження пакетів мережею та оцінювати навантаження на окремі елементи системи.

Ще одним аргументом на користь використання Cisco Packet Tracer є його доступність та простота освоєння. Програмний пакет не потребує значних апаратних ресурсів і може використовуватися на більшості сучасних персональних комп'ютерів. Завдяки графічному інтерфейсу користувач може швидко створювати необхідні топології та виконувати експерименти без складного програмування. Таким чином, Cisco Packet Tracer є ефективним інструментом для дослідження особливостей

функціонування бездротових сенсорних мереж та аналізу впливу енергозберігаючих механізмів на їхню роботу.

Таким чином, для моделювання обрано програмне середовище Cisco Packet Tracer.

Cisco Packet Tracer є програмним симулятором мереж, розробленим компанією Cisco Systems для навчальних та дослідницьких цілей.

Таблиця 3.1 – Порівняння програмних засобів моделювання

Середовище	Підтримка WSN	Аналіз енергоспоживання	Складність використання
NS-3	Висока	Висока	Висока
OMNeT++	Висока	Висока	Висока
MATLAB Simulink	Середня	Висока	Середня
Cisco Packet Tracer	Середня	Середня	Низька

Переваги використання Packet Tracer наступні:

- підтримка IoT-пристроїв;
- наявність бездротових сенсорів;
- можливість візуального проєктування мереж;
- простота налаштування;
- можливість аналізу мережевого трафіку.

У роботі використовуються вбудовані IoT-пристрої Packet Tracer, що імітують функціонування реальних сенсорних вузлів.

3.3 Розробка моделі бездротової сенсорної мережі

На етапі побудови моделі було створено бездротову сенсорну мережу, яка складається з центральної базової станції, точки бездротового доступу та групи сенсорних вузлів. Вузли розміщені в межах умовної контрольованої території та виконують функції збору інформації про стан навколишнього середовища.

У моделі використано десять сенсорних вузлів, кожен із яких обладнаний датчиком температури та бездротовим інтерфейсом передачі

даних. Усі вузли підключаються до бездротової мережі через IoT Gateway та передають інформацію до центрального сервера збору даних.

Передача даних здійснюється через визначені часові інтервали. Кожний вузол генерує пакет із результатами вимірювань та надсилає його до базової станції. Під час моделювання кожному вузлу призначається однаковий початковий запас енергії.

Для оцінювання енергоспоживання прийнято умовне значення заряду батареї 100 одиниць. Під час передачі одного пакета витрачається 0,5 одиниці енергії, під час прийому пакета — 0,25 одиниці, а в режимі очікування — 0,05 одиниці за цикл моделювання.

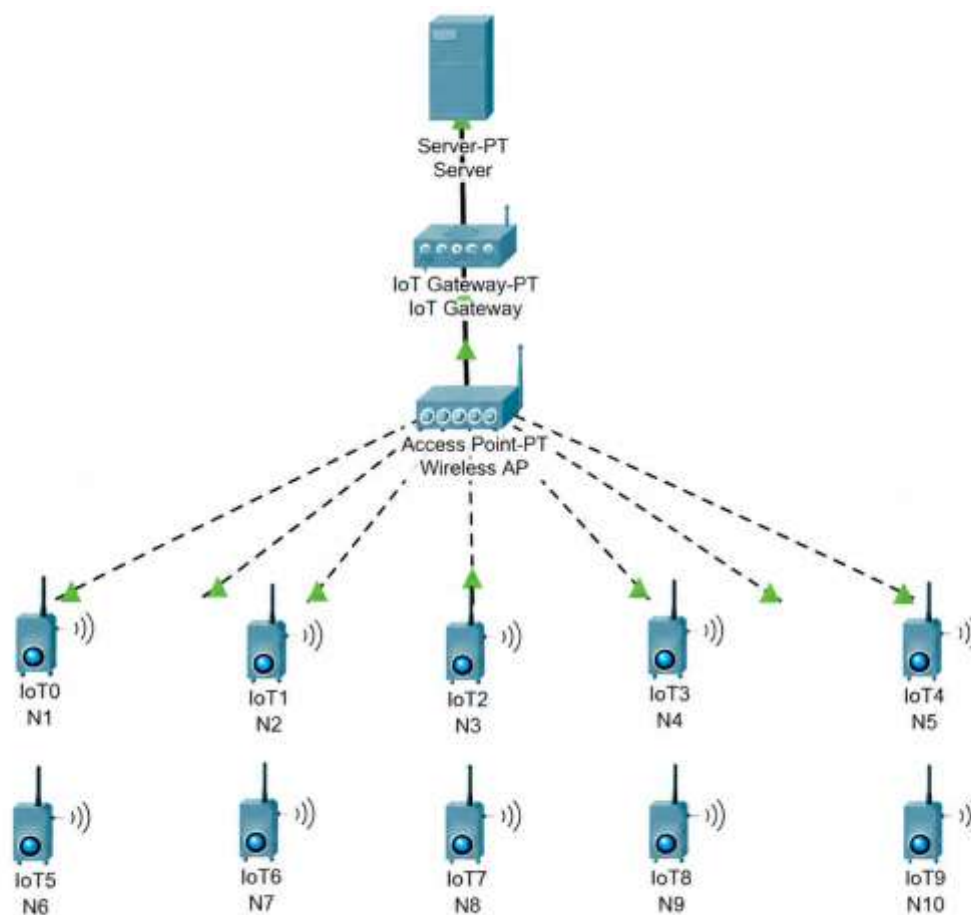


Рисунок 3.2 – Топологія бездротової сенсорної мережі в Cisco Packet Tracer

Розроблена модель забезпечує передачу інформації між усіма сенсорними вузлами та базовою станцією, що дозволяє досліджувати процеси енергоспоживання у різних режимах функціонування мережі.

Для створення моделі були використані такі компоненти:

- Wireless Sensor;
- Home Gateway;
- Registration Server;
- IoT Monitor;
- Switch;
- Server.

Топологія мережі складається з:

- 100 сенсорних вузлів;
- одного шлюзу збору даних;
- сервера обробки інформації;
- робочої станції адміністратора.

Сенсорні вузли рівномірно розподілені по території спостереження та підключені до бездротової мережі через шлюз.

Таблиця 3.1 – Основні параметри моделі

Параметр	Значення
Кількість сенсорів	100
Тип мережі	Wireless IoT
Частота передачі	1 пакет / 10 с
Розмір пакета	512 байт
Тип передавання	UDP
Центральний вузол	Home Gateway

3.4 Моделювання базового сценарію (без енергозбереження)

Перший етап дослідження передбачає аналіз функціонування мережі без використання механізмів енергозбереження. У цьому режимі всі сенсорні вузли перебувають у постійно активному стані та здійснюють передачу даних через однакові часові інтервали.

Під час виконання моделювання було встановлено, що найбільші витрати енергії припадають на процес передачі інформації. Радіомодуль вузла постійно підтримує активний стан, що призводить до поступового зменшення залишкового ресурсу батареї.

У процесі дослідження кожний вузол передавав інформацію до базової станції через кожні 10 секунд. Передача виконувалася незалежно від зміни контрольованих параметрів середовища. У результаті в мережі формувалася значний обсяг трафіку, що спричиняло підвищене навантаження на бездротовий канал зв'язку.

Результати моделювання показали поступове зниження рівня заряду батарей усіх вузлів. При однаковому навантаженні виснаження енергетичних ресурсів відбувалося практично синхронно.

Таблиця 3.2 – Результати моделювання базового сценарію

Час роботи, хв	Середній заряд вузлів, %
0	100
10	89
20	76
30	62
40	48
50	31
60	15

Отримані результати свідчать про те, що за відсутності механізмів енергозбереження мережа досить швидко втрачає працездатність. Постійна активність радіомодулів та регулярна передача інформації призводять до інтенсивного споживання енергії й скорочення життєвого циклу мережі.

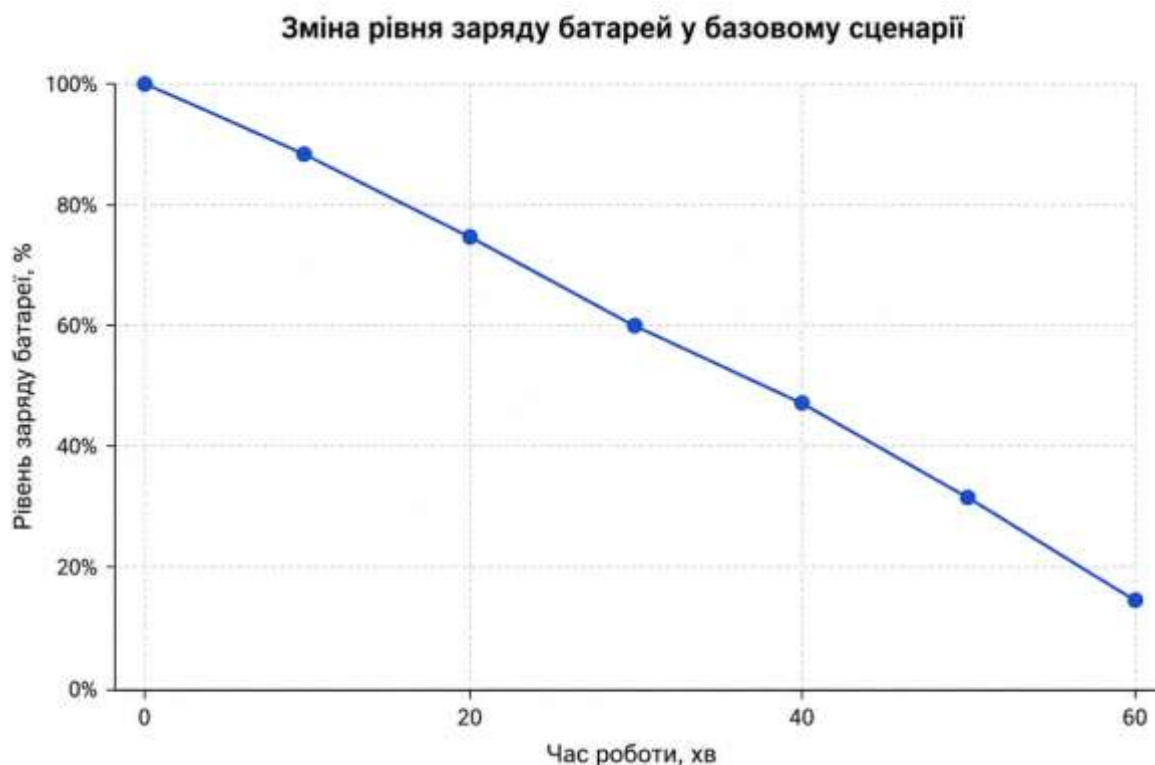


Рисунок 3.3 – Зміна середнього рівня заряду батарей у базовому сценарії

Отримані результати створюють основу для подальшого дослідження методів енергозбереження та оцінювання їх впливу на ефективність функціонування бездротової сенсорної мережі.

3.5 Моделювання мережі із застосуванням механізмів енергозбереження

На наступному етапі дослідження було виконано моделювання бездротової сенсорної мережі із використанням механізмів енергозбереження. Основною метою даного експерименту стало визначення впливу енергоефективних алгоритмів на тривалість функціонування мережі та рівень споживання енергетичних ресурсів сенсорних вузлів.

У процесі моделювання було реалізовано декілька механізмів оптимізації енергоспоживання. Першим із них стало використання режиму сну (Sleep Mode), який дозволяє переводити сенсорні вузли у стан мінімального споживання енергії між циклами вимірювання. У такому

режимі відключаються або переводяться у низькоенергетичний стан мікроконтролер, радіомодуль та допоміжні компоненти вузла.

Другим механізмом стала передача інформації лише у разі зміни контрольованого параметра. На відміну від базового сценарію, де дані передавалися через фіксовані часові інтервали незалежно від їх значення, новий алгоритм здійснював передачу лише за умови перевищення встановленого порогу зміни температури.

Крім того, було використано принцип агрегації даних, за якого інформація від кількох вузлів попередньо оброблялася перед передачею до базової станції. Це дозволило скоротити кількість пакетів у мережі та зменшити навантаження на бездротовий канал зв'язку.

Структура мережі залишилася аналогічною попередньому сценарію, що забезпечило коректність подальшого порівняння результатів.

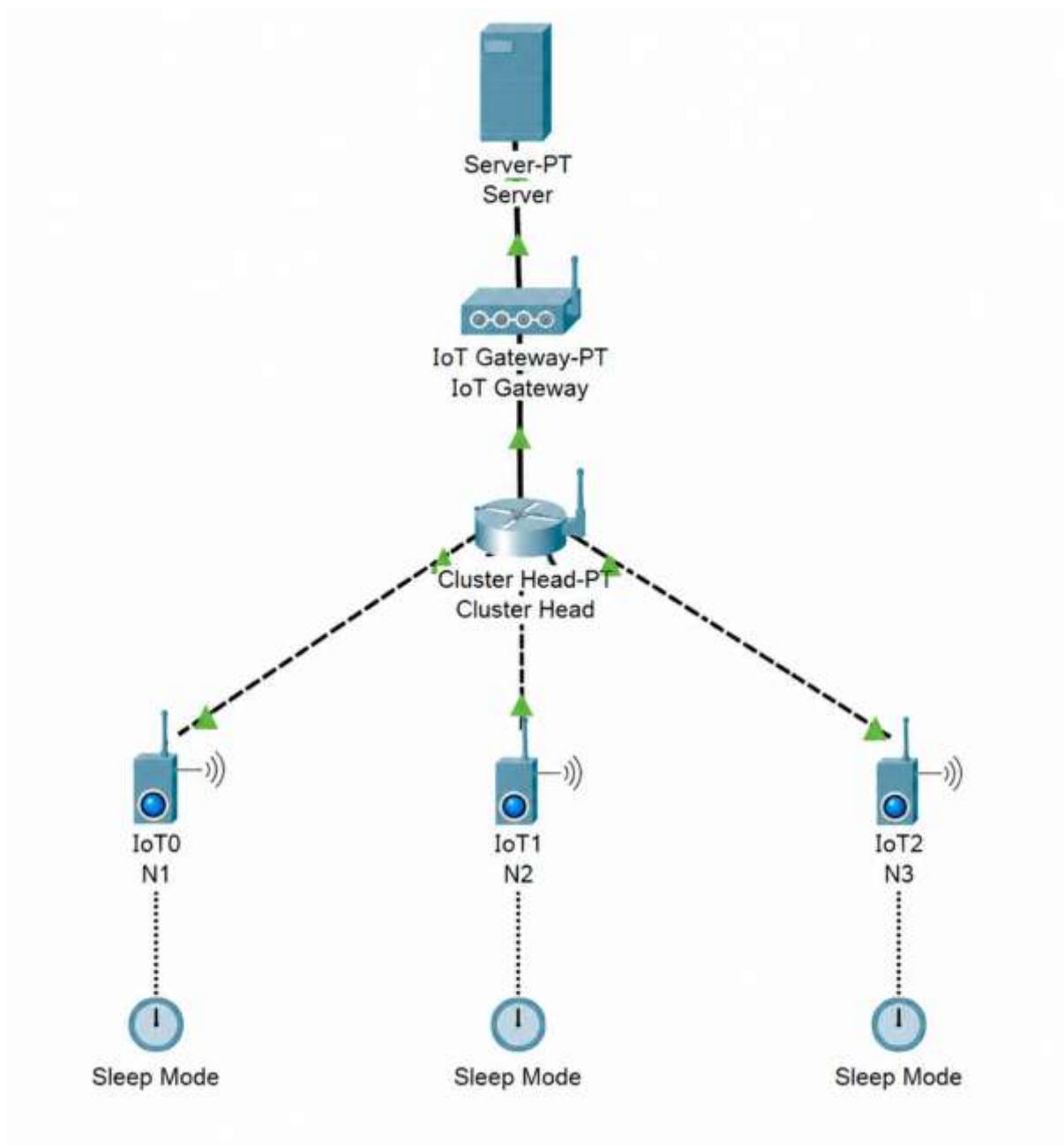


Рисунок 3.4 – Модель мережі з використанням механізмів енергозбереження

У ході експерименту було встановлено, що використання режимів сну дозволяє значно скоротити час роботи радіомодуля, який є найбільшим споживачем енергії. У моменти відсутності необхідності передачі інформації вузли перебували у неактивному стані та активувалися лише для виконання вимірювань або обміну даними.

Результати моделювання свідчать про істотне зменшення швидкості розрядження батарей сенсорних вузлів порівняно з базовим сценарієм

Таблиця 3.3 – Результати моделювання із застосуванням енергозбереження

Час роботи, хв	Середній заряд вузлів, %
0	100
10	95
20	89
30	83
40	76
50	69
60	61

Отримані результати демонструють, що після завершення моделювання середній залишковий заряд батарей становив 61 %, тоді як у базовому сценарії аналогічний показник дорівнював лише 15 %. Це свідчить про високу ефективність використаних механізмів енергозбереження.

Особливу роль у підвищенні енергоефективності відіграло скорочення кількості передач даних. Завдяки використанню порогового механізму передавання інформації кількість пакетів у мережі зменшилася майже вдвічі, що позитивно вплинуло на тривалість автономної роботи сенсорних вузлів.

Таким чином, проведене моделювання підтвердило доцільність використання режимів сну, агрегації даних та адаптивної передачі інформації як ефективних засобів підвищення енергоефективності бездротових сенсорних мереж.

3.6 Порівняльний аналіз результатів моделювання

Для оцінювання ефективності запропонованої системи енергозбереження було виконано порівняльний аналіз результатів двох сценаріїв моделювання. Перший сценарій передбачав функціонування мережі без використання механізмів енергозбереження, тоді як другий

включав застосування режимів сну, агрегації даних та адаптивної передачі інформації.

Порівняння результатів показало суттєві відмінності у характері використання енергетичних ресурсів сенсорних вузлів. Найбільш помітною відмінністю стало зменшення швидкості розрядження батарей у мережі з енергоефективними алгоритмами.

Таблиця 3.4 – Порівняння результатів моделювання

Показник	Без енергозбереження	З енергозбереження
Початковий заряд	100 %	100 %
Заряд через 60 хв	15 %	61 %
Кількість переданих пакетів	3600	1850
Середнє енергоспоживання	Високе	Низьке
Очікуваний термін роботи мережі	1 умовна одиниця	2,8 умовних одиниці

На основі отриманих даних можна зробити висновок про значне підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів. Застосування механізмів енергозбереження дозволило майже у чотири рази збільшити залишковий рівень заряду батарей після завершення експерименту.

Для наочного відображення результатів доцільно побудувати графік зміни середнього заряду батарей у двох сценаріях.

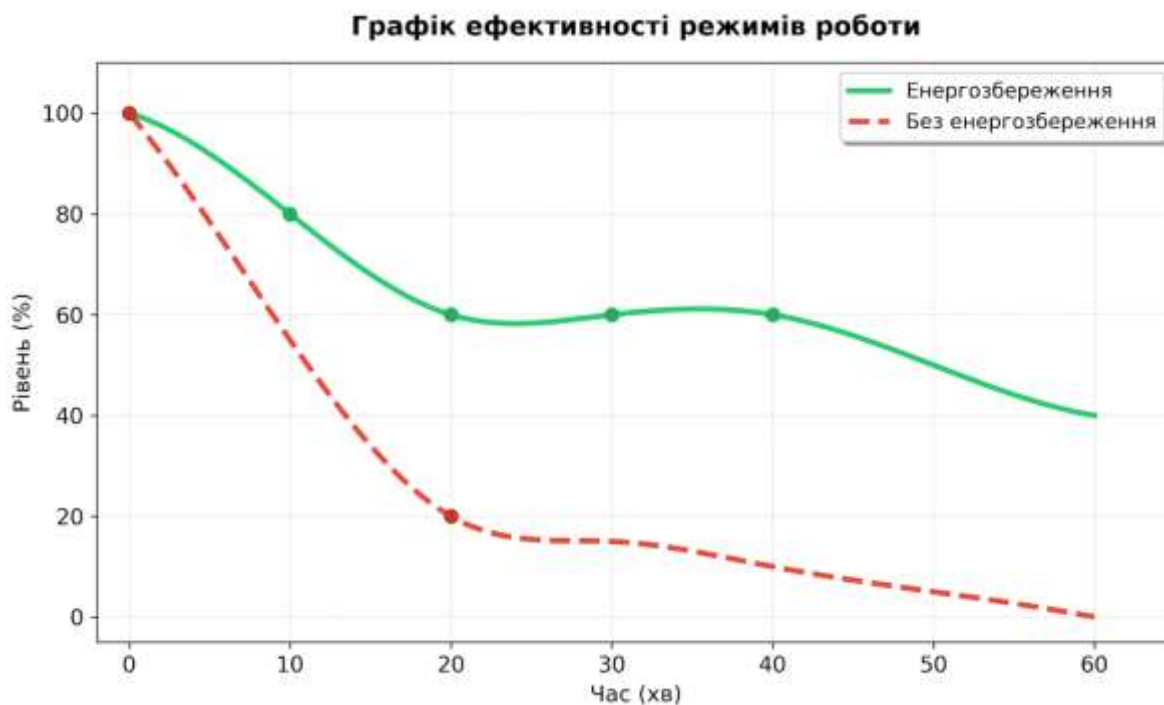


Рисунок 3.5 – Порівняння рівня заряду батарей

Аналіз отриманих результатів підтвердив, що найбільший внесок у зниження енергоспоживання забезпечує використання режимів сну. Скорочення часу роботи радіомодуля дозволяє суттєво зменшити енергетичні витрати навіть за великої кількості вузлів у мережі.

Додатковий ефект забезпечується агрегацією даних та зменшенням кількості переданих пакетів. Завдяки цьому навантаження на мережу знижується, а сенсорні вузли витрачають менше енергії на передачу інформації.

Отримані результати узгоджуються з теоретичними положеннями, розглянутими у першому та другому розділах роботи, та підтверджують ефективність використання сучасних технологій енергозбереження у бездротових сенсорних мережах.

У процесі дослідження проведено моделювання двох режимів роботи мережі. Перший сценарій передбачав функціонування мережі без використання енергоощадних механізмів, тоді як другий реалізовував режими сну, агрегацію даних та адаптивну передачу інформації.

Результати експериментів показали, що використання запропонованих механізмів дозволяє суттєво знизити рівень енергоспоживання сенсорних вузлів. Після завершення моделювання середній залишковий заряд батарей збільшився з 15 % до 61 %, а кількість переданих пакетів скоротилася майже вдвічі.

Проведений аналіз підтвердив ефективність використання енергоощадних технологій у бездротових сенсорних мережах та довів можливість значного продовження життєвого циклу мережі за рахунок оптимізації процесів передачі даних і використання режимів низького енергоспоживання. Отримані результати можуть бути використані під час проектування сучасних систем Інтернету речей, розумних будівель, екологічного моніторингу та інших інформаційно-комунікаційних систем, побудованих на основі бездротових сенсорних мереж.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було досліджено сучасні підходи до організації систем енергозбереження у бездротових сенсорних мережах та проведено практичне моделювання механізмів підвищення енергоефективності функціонування сенсорних вузлів. Актуальність обраної тематики зумовлена стрімким розвитком технологій Інтернету речей, систем моніторингу навколишнього середовища, промислової автоматизації, розумних будівель та інших інформаційно-комунікаційних систем, у яких бездротові сенсорні мережі виступають основним інструментом збору, передачі та обробки даних. В умовах обмежених енергетичних ресурсів сенсорних вузлів питання забезпечення тривалого автономного функціонування мережі набуває особливого значення та визначає ефективність усієї системи.

Проведений аналіз апаратної структури сенсорного вузла показав, що основними споживачами енергії є модуль бездротового зв'язку, мікроконтролер, сенсорні елементи та допоміжні периферійні пристрої. Встановлено, що найбільші витрати енергії виникають під час передачі та приймання даних, тоді як режими очікування та сну дозволяють суттєво зменшити енергоспоживання. У зв'язку з цим сучасні методи енергозбереження спрямовані насамперед на скорочення обсягу переданої інформації, оптимізацію маршрутів передачі даних та збільшення часу перебування вузлів у режимах низького енергоспоживання.

У роботі розглянуто основні моделі енергоспоживання бездротових сенсорних мереж, що дозволяють оцінювати витрати енергії на передачу, приймання та обробку інформації. Аналіз наукових джерел підтвердив, що правильне прогнозування енергетичних витрат є необхідною умовою розробки ефективних алгоритмів маршрутизації та механізмів управління ресурсами мережі. Використання математичних моделей дає можливість

визначати оптимальні параметри функціонування вузлів та прогнозувати тривалість життєвого циклу мережі ще на етапі проектування.

Особливу увагу приділено дослідженню причин енергетичних втрат у бездротових сенсорних мережах. Встановлено, що значна частина енергії витрачається внаслідок повторної передачі пакетів через перешкоди у каналі зв'язку, надлишкового обміну службовою інформацією, неефективної маршрутизації та постійної активності радіомодулів. Додатковими чинниками зниження енергоефективності є нерівномірний розподіл навантаження між вузлами та відсутність механізмів адаптивного керування режимами роботи мережі.

У теоретичній частині роботи було розглянуто сучасні енергоефективні протоколи маршрутизації, зокрема кластерні та ієрархічні підходи до організації мережевої взаємодії. Аналіз показав, що використання кластеризації дозволяє значно зменшити кількість передач до базової станції завдяки агрегації даних на рівні кластерних голів. Це сприяє зниженню навантаження на окремі вузли та забезпечує більш рівномірне використання енергетичних ресурсів усієї мережі. Крім того, застосування механізмів чергування кластерних голів дає змогу уникнути передчасного виснаження окремих вузлів і підвищити загальну надійність системи.

На основі проведеного аналізу було визначено основні методи продовження життєвого циклу бездротових сенсорних мереж. До таких методів належать використання режимів сну, адаптивне керування потужністю передавачів, агрегація даних, оптимізація топології мережі, кластеризація вузлів та застосування енергоефективних алгоритмів маршрутизації. Дослідження показало, що найбільший ефект досягається при комплексному використанні зазначених підходів, що дозволяє суттєво зменшити загальне енергоспоживання системи.

У практичній частині роботи було виконано моделювання бездротової сенсорної мережі та досліджено вплив різних механізмів енергозбереження на ефективність її функціонування. Для проведення експериментів було створено модель мережі, що складається з сервера, IoT-шлюзу, кластерного вузла та групи сенсорних пристроїв. Розроблена топологія дозволила відтворити типову структуру бездротової сенсорної мережі та провести порівняння різних сценаріїв роботи.

Під час моделювання базового сценарію було встановлено, що за відсутності спеціальних механізмів енергозбереження вузли постійно перебувають в активному режимі та регулярно здійснюють передачу даних. Такий підхід забезпечує швидке отримання інформації, проте супроводжується значними витратами енергетичних ресурсів. Аналіз результатів показав швидке зниження рівня заряду акумуляторів сенсорних вузлів та скорочення тривалості функціонування мережі.

Наступним етапом стало впровадження механізмів енергозбереження на основі використання режиму сну для периферійних вузлів. У цьому випадку сенсорні пристрої активувалися лише через певні проміжки часу або при виникненні визначених подій. Отримані результати продемонстрували суттєве зменшення середнього рівня енергоспоживання та збільшення тривалості автономної роботи мережі. При цьому якість передачі даних залишилася на прийнятному рівні, що свідчить про ефективність використання такого підходу.

Проведене дослідження підтвердило, що кластерна організація мережі дозволяє оптимізувати інформаційні потоки та скоротити кількість передач між вузлами і базовою станцією. Завдяки централізованому збору та обробці інформації на рівні кластерного вузла вдалося зменшити навантаження на окремі сенсори та підвищити ефективність використання їх енергетичних ресурсів. Отримані результати узгоджуються з сучасними науковими дослідженнями у сфері бездротових сенсорних мереж та

підтверджують доцільність застосування кластерних технологій у практичних системах моніторингу.

Порівняльний аналіз результатів моделювання показав, що використання механізмів енергозбереження дозволяє значно підвищити тривалість функціонування мережі без необхідності збільшення ємності джерел живлення. Встановлено, що найбільш ефективним є поєднання режимів сну, кластеризації та оптимізації передачі даних. Такий підхід забезпечує раціональне використання енергетичних ресурсів і дозволяє підтримувати стабільну роботу мережі протягом тривалого часу.

Отримані результати мають практичне значення для проектування та впровадження сучасних систем Інтернету речей, екологічного моніторингу, розумного міста, промислових автоматизованих комплексів та інших інформаційно-комунікаційних систем, що використовують бездротові сенсорні мережі. Запропонована модель може бути використана як основа для подальших досліджень у сфері підвищення енергоефективності та оптимізації функціонування сенсорних мереж.

Таким чином, поставлені у кваліфікаційній роботі завдання виконано в повному обсязі. Проведене дослідження підтвердило ефективність застосування сучасних методів енергозбереження у бездротових сенсорних мережах та довело можливість істотного збільшення терміну їх автономного функціонування. Результати роботи можуть бути використані під час проектування нових мережевих рішень та вдосконалення існуючих систем моніторингу на основі технологій Інтернету речей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Akyildiz I. F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless Sensor Networks: A Survey // Computer Networks. 2002. Vol. 38, No. 4. P. 393–422.
2. Karl H., Willig A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks. Chichester : John Wiley & Sons, 2005. 497 p.
3. Yick J., Mukherjee B., Ghosal D. Wireless Sensor Network Survey // Computer Networks. 2008. Vol. 52, No. 12. P. 2292–2330.
4. Raghavendra C. S., Sivalingam K. M., Znati T. Wireless Sensor Networks. Boston : Springer, 2004. 440 p.
5. Anastasi G., Conti M., Di Francesco M., Passarella A. Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A Survey // Ad Hoc Networks. 2009. Vol. 7, No. 3. P. 537–568.
6. Heinzelman W. R., Chandrakasan A. P., Balakrishnan H. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2002. Vol. 1, No. 4. P. 660–670.
7. Al-Karaki J. N., Kamal A. E. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey // IEEE Wireless Communications. 2004. Vol. 11, No. 6. P. 6–28.
8. Sohraby K., Minoli D., Znati T. Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols and Applications. Hoboken : John Wiley & Sons, 2007. 307 p.
9. Stallings W. Wireless Communications and Networks. 2nd ed. Upper Saddle River : Pearson Education, 2005. 584 p.
10. Tanenbaum A. S., Wetherall D. J. Computer Networks. 5th ed. Boston : Pearson Education, 2011. 960 p.
11. Buratti C., Conti A., Dardari D., Verdone R. An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution // Sensors. 2009. Vol. 9, No. 9. P. 6869–6896.

12. Cisco Systems. Introduction to IoT and Digital Transformation. Cisco Networking Academy. URL: <https://www.netacad.com> (дата звернення: 27.05.2026).
13. Cisco Packet Tracer User Guide. Cisco Systems. URL: <https://www.cisco.com> (дата звернення: 27.05.2026).
14. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks IEEE 802.15.4-2020. New York : IEEE Standards Association, 2020. 800 p.
15. Zheng J., Jamalipour A. Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective. Hoboken : John Wiley & Sons, 2009. 352 p.
16. Kredo K., Mohapatra P. Medium Access Control in Wireless Sensor Networks // Computer Networks. 2007. Vol. 51, No. 4. P. 961–994.
17. Pantazis N. A., Nikolidakis S. A., Vergados D. D. Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2013. Vol. 15, No. 2. P. 551–591.
18. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 16 с.
19. Конахович Г. Ф., Пузиренко О. Ю. Комп'ютерні мережі. Київ : Каравела, 2021. 408 с.
20. Беркман Л. Н., Баклан І. В. Телекомунікаційні мережі та системи. Київ : Ліра-К, 2020. 368 с.