

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Інфокомунікацій _____
(повна назва)

Кафедра _____ Інформаційно-мережної інженерії _____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Методи підвищення швидкості побудови топології сенсорної мережі

_____ (тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ІМІм-21-1

Павліченко О.С.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми _____ освітньо-професійна

Освітня програма _____ Інформаційно-мережна інженерія

(повна назва освітньої програми)

Керівник _____ проф. Пустовойтов П.Є.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____

(підпис)

Безрук В.М.

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Не містить відомостей, заборонених до відкритого публікування

Студент

(підпис)

Павліченко О.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Пустовойтов П.Є.

(прізвище та ініціали)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Інфокомунікацій _____
Кафедра _____ Інформаційно-мережної інженерії _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 172 «Телекомунікації та радіотехніка» _____
Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(код і повна назва)
Освітня програма _____ Інформаційно-мережна інженерія _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Павліченку Олексію Сергійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ *Методи підвищення швидкості побудови топології сенсорної мережі*

затверджена наказом по університету від « 21 » жовтня 20 22 року № 1376 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 23 грудня 2022 р. _____

3. Вихідні дані до роботи _____ *Методи підвищення швидкості побудови топології сенсорної мережі*, аналіз роботи системи.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1. *Огляд принципів побудови сенсорних мереж.*

2. *Аналіз методів та особливостей роботи сенсорної мережі.*

3. *Вибір засобів для реалізації моделювання системи.*

4. *Проектування системи бездротової сенсорної мережі.*

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____

Слайди у форматі Power Point

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.</i>	<i>24.10.22</i>	<i>вик.</i>
2	<i>Підбір літератури за темою роботи</i>	<i>25.10.22 - 26.10.22</i>	<i>вик.</i>
3	<i>Огляд принципів побудови сенсорних мереж.</i>	<i>27.10.22– 11.11.22</i>	<i>вик.</i>
4	<i>Аналіз методів та особливостей роботи сенсорної мережі.</i>	<i>11.11.22 -23.11.22</i>	<i>вик.</i>
5	<i>Вибір засобів для реалізації моделювання системи.</i>	<i>23.11.22- 24.11.22</i>	<i>вик.</i>
6	<i>Проектування системи бездротової сенсорної мережі.</i>	<i>24.11.22 - 16.12.22</i>	<i>вик</i>
7	<i>Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту у ЕК.</i>	<i>16.12.22 - 23.12.22</i>	<i>вик.</i>

Дата видачі завдання 18 вересня 2022 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Пустовойтов П.Є.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 88 с., 27 рис., 5 табл., 3 додатки, 29 джерел.

Об'єкт дослідження – методи підвищення швидкості побудови топології сенсорної мережі.

Мета роботи – оцінити методи підвищення швидкості побудови топології сенсорної мережі.

Оглянуті робота сенсорної мережі, принципи побудови БСМ, методи та особливості роботи сенсорної мережі, методи побудови топології сенсорної мережі.

Запропоновані алгоритми отримання даних с датчику та роботи Arduino, модель бездротової сенсорної мережі у Tinkercad та структура WoT-додатку. Розроблено модель побудови сенсорної мережі з графічним інтерфейсом користувача для доступу з браузера.

**БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ, ТОПОЛОГІЯ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ,
МЕТОДИ ПОБУДОВИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ, САМООРГАНІЗАЦІЯ**

THE ABSTRACT

Explanatory slip 88 p., 27 fig., 5 tab., 29 sources.

The object of study - methods of increasing the speed of constructing a sensor network topology.

The purpose of the work is evaluate the methods of increasing the speed of construction of the sensor network topology.

The operation of the sensor network, principles of BSM construction, methods and features of the operation of the sensor network, methods of construction of the topology of the sensor network are reviewed.

Algorithms for obtaining data from the sensor and working with Arduino, a wireless sensor network model in Tinkercad and the structure of the WoT application are proposed. A sensor network construction model with a graphical user interface for browser access has been developed.

WIRELESS SENSOR NETWORKS, SENSOR NETWORK TOPOLOGY, SENSOR NETWORK CONSTRUCTION METHODS, SELF-ORGANIZATION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	10
1 ХАРАКТЕРИСТИКА БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ	11
1.1 Методи самоорганізації бездротових сенсорних мереж	12
1.2 Огляд сучасних бездротових технологій архітектури сенсорів	15
1.3 Застосування сенсорних мереж	17
1.4 Відмінність бездротових сенсорних мереж від традиційних комп'ютерних і телефонних мереж	19
1.5 Принципи побудови бездротових сенсорних мереж	26
1.5.1 Ієрархія мережевих технологій, що використовуються в IoT	26
1.5.2 Типи вузлів БСМ	32
2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ	36
2.1 Методи управління бездротовими мережами, що самоорганізуються	39
2.2 Аналіз перерозподілу потоків у самоорганізованих мережах та їх вплив на якість передавання потоків	45
2.3 Кластеризація і забезпечення параметрів QoS у мережах із самоорганізацією	50
2.4 Особливості передавання інформаційних потоків у вузлах бездротових самоорганізованих мереж	52
2.5 Висновки за розділом 2	55
3 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ	57
3.1 Установка ОС на Raspberry Pi 4	57
3.2 Установка Node.js на комп'ютер Raspberry Pi	61

3.3 Інсталяція середовища програмування Arduino IDE та моделювання роботи підсистеми	62
3.4 Створення серверної частини WoT-дodatка server.js із застосуванням фреймворку express	68
3.5 Висновки за розділом 3	71
ВИСНОВКИ	72
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	73
ДОДАТОК А ПРОГРАМНИЙ КОД АВТОМАТИЗАЦІЇ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ У TINKERCAD	77
ДОДАТОК Б ПРОГРАМНИЙ КОД САЙТУ ГРАФІЧНОГО ІНТЕРФЕЙСУ КОРИСТУВАЧА	79
ДОДАТОК В СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ	81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- БСМ – Бездротова сенсорна мережа
- БМПП – Бездротова мережа персонального радіусу
- БСПМ – Бездротова спеціалізована мережі
- GPIO – General-purpose input/output
- SCL – Serial CLock
- SDA – Serial DAta
- SSH – Secure SHell
- VNC – Virtual Network Computing
- SON – Self-organizing network
- WSN – Wireless Sensor Network
- WPAN – Wireless Personal Area Network
- TAN – Tiny Area Network

ВСТУП

На сьогоднішній день бездротові сенсорні мережі (БСМ – WSN – Wireless Sensor Networks) широко поширені в різноманітних областях, включаючи екологічний моніторинг, «розумні» домашні системи, пожежні датчики безпеки, додатки моніторингу здоров'я тощо. Вибір способу організації передавання інформації між сенсорним вузлом і шлюзами або базовими станціями є одним із вирішальних етапів при створенні БСМ.

Актуальність теми обумовлена тим, що Україна перебуває у стані військових дій і потребує інтенсивної розробки БСМ тактичної ланки, що забезпечуватимуть прийом і передачу розвідувальної інформації про супротивника та видачу її органам управління військами та зброєю адже досягнення інформаційної переваги в тактичній ланці управління військами представляється як об'єктивна необхідність успішного ходу бою (операції).

Бездротові сенсорні мережі – розподілені мережі (наземні, повітряні, підземні), що складаються з сенсорних вузлів (стаціонарні малогабаритні сенсори, мобільні роботи-сенсори, сенсорні аероплатформи), з інтегрованими функціями моніторингу навколишнього середовища, обробки і передачі даних. БСМ відносяться до класу радіомереж, що самоорганізуються.

Мета роботи – оцінити методи підвищення швидкості побудови топології сенсорної мережі.

Постановка завдання. Проаналізувати і систематизувати існуючі методи підвищення швидкості побудови топології сенсорної мережі; розробити модель побудови сенсорної мережі з графічним інтерфейсом користувача для доступу з браузера.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Бездротова сенсорна мережа (БСМ) – це розподілена, самоорганізована і стійка до відмови мережа з великою кількістю автономних вузлів, здатних обмінюватися повідомленнями і ретранслювати їх за допомогою бездротової технології.

Сенсорні та спеціалізовані бездротові мережі (бездротові мережі персонального радіусу – БМПР, бездротові спеціалізовані мережі – БСПМ та бездротові сенсорні мережі – БСМ) мають ряд характеристик (наприклад, здатність до масштабованості у БСМ разом із вимогою до низького енергоспоживання), що вимагають особливих алгоритмів роботи, методів побудови мережі та способів роботи елементів мережі. Самоорганізація всередині мережі може сприяти вирішенню цих питань. Термін самоорганізація вживають у контексті з іншими термінами [1]:

- самовідновлення – механізми, що дозволяють виявити, локалізувати та виправити помилки, автоматично вирізняючи при цьому типи помилок (втрата зв'язку, перевантаження);
- самоконфігурування – методи для генерації конфігурації відповідно до поточного стану зв'язку та його якості;
- самоуправління – здатність обслуговувати необхідні пристрої чи мережі в залежності від параметрів та вимог системи;
- самооптимізація – здатність обирати оптимальний спосіб самоуправління в залежності від поведінки системи;
- адаптація – адаптація до змін оточення, наприклад зміни кількості сусідніх вузлів.

Самоорганізація – процес, в якому поведінка моделі на глобальному рівні системи залежить виключно від численних сеансів взаємодії між елементами нижчого рівня системи.

1.1 Методи самоорганізації бездротових сенсорних мереж

Існує велика безліч різних протоколів маршрутизації БСМ. Ієрархічні протоколи (наприклад, LEACH, PEGASIS, TEEN and APTEEN, SOP) об'єднують вузли в кластери, з певною ієрархією. Вони спрямовані на збільшення енергозбереження мережі в поєднанні з оптимальною доставкою даних до базової станції, шляхом об'єднання вузлів в кластери (області).

Вона здатна без специфічного впливу ззовні формувати просторову, тимчасову або функціональну структуру, тобто самостійно змінює свої структуру і організацію на основі принципу структурно-функціональної єдності.

Можна виділити наступні принципи самоорганізації [2]:

- 1) Відсутність нав'язуючого, який диктує зовнішній вплив на систему;
- 2) Самостійний вибір дій з можливих варіантів елементами системи.

Застосування самоорганізації мережі дозволяє скоротити час, дії, енергію, що витрачаються для збору інформації від вузлів і їх подальшого конфігурації.

Самоорганізація у БСМ та БСПМ може бути визначена як співпраця вузлів мережі задля досягнення задачі, поставленої для всієї мережі, причому централізований контроль та відомості про всю систему відсутні. Такими задачами можуть бути, наприклад:

- своєчасна доставка пакета з вузла-джерела до вузла-приймача (забезпечення якості обслуговування) – характерно для БСПМ;
- забезпечення максимального часу життя мережі (мінімалізація енергоспоживання кожного з вузлів) – характерно для БСМ. Характеристики мережі, на які істотно впливає самоорганізація, подані у таблиці 1.1.

Захист інформації в мережах із самоорганізацією досягнути достатньо складно, оскільки необхідним стає обмін ключами та підтримка сесій. Це істотно впливає на кількість транзакцій між вузлами мережі, а отже і на параметри енергоспоживання, що є критичним для БСМ.

Таблиця 1.1 – Характеристики мережі, на які істотно впливає самоорганізація

Характеристика	Погіршується (↓) чи покращується (↑) внаслідок застосування самоорганізації
Масштабованість або здатність мережі до розширення	↑
Надійність з'єднання	↓
Доступність кожного елемента мережі в будь-який момент часу	↓
Можливість мобільності	↑
Швидкодія	↓
Покриття	↑
Захист інформації	↓
Узгодженість у функціонуванні	↓

Загалом здатність до самоорганізації означає, що пристрої використовують для роботи:

- а) локальну інформацію, оновлюючи її за допомогою різноманітних зворотних зв'язків і інтеракцій із сусідніми пристроями;
- б) використовують ймовірнісні методи для прийняття рішень.

Детермінованість та масштабованість [3]

Детермінованість мережі – постійна, передбачувана її робота з результатом, що повторюється. На рисунку 1.1 зображено розвиток способів контролю системи від класичного способу централізованого контролю до повної самоорганізації.

Мережа із самоорганізацією має найменшу детермінованість. Тобто нема ніякої гарантії забезпечення необхідної якості обслуговування. У мережі з централізованим контролем навпаки: робота такої мережі чітко визначена, але здатність до масштабування практично рівна нулю - це зовсім не підходить для БСМ та БСПМ. Причина цього – розмір «глобального знання», яке треба поширювати між всіма елементами системи, зростає із зростанням кількості елементів мережі.

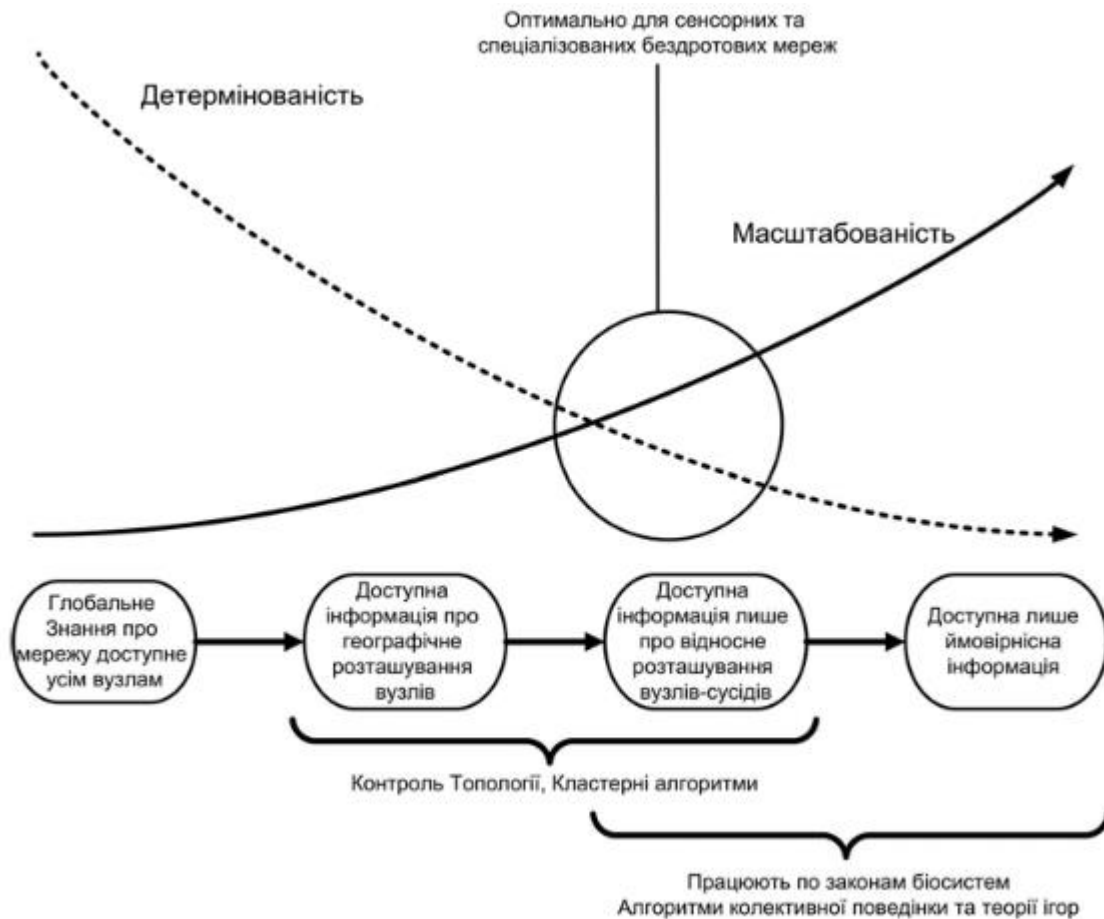


Рисунок 1.1 – Масштабованість та детермінованість в системах з різним типом управління

Класифікація механізмів самоорганізації

Розглянемо механізми самоорганізації. На рисунку 1.1 зображено діаграму, в якій необхідність у деякому глобальному знанні про мережу зменшується з рухом вправо.

При розробці БСМ та БСПМ необхідно уникати передачі якого-небудь глобального знання оскільки це впливає щонайменше на масштабованість.

Тому при класифікації способів самоорганізації вважають що інформація про всю мережу недоступна. Розрізняють наступні механізми самоорганізації в залежності від того, якого роду інформація доступна для кожного вузла зокрема:

а) ті, що базуються на даних про місце розташування. Відомі інформація про географічне розташування або приналежність до певної групи оточуючих

вузлів (багатоланкові кластери);

б) ті, що базуються на інформації про сусідні вузли. Кількість інформації зменшується – тепер відомі лише сусіди в кластері в радіусі однієї ланки (одноланкові кластери). Це дозволяє мати завжди актуальну конфігурацію всередині кластера;

в) ті, що базуються на ймовірнісних показниках. Деколи корисно взагалі не зберігати жодної інформації щодо конфігурації мережі (кластера), а приймати рішення на основі статистичної інформації, накопиченої раніше.

г) ті, що базуються на принципах роботи біосистем. Механізм поєднує два попередні. Робота базується на позитивних або негативних результатах по зворотних зв'язках. Позитивний відгук виступає стимулятором для передачі.

Кластер це множина вузлів, що розміщені географічно поряд один з одним і для обміну повідомленнями між ними витрачається мала енергія.

Контроль топології – керування множиною зв'язків між парами вузлів мережі для спрощення та взагалі забезпечення можливості одно- або двостороннього обміну повідомленнями між вузлами мережі [4].

1.2 Огляд сучасних бездротових технологій архітектури сенсорів

Сенсорний датчик складається з апаратної і програмної частини, як і будь-який інший телекомунікаційний вузол. У загальному випадку сенсор складається з наступних підсистем: сприйняття, обробки даних, моніторингу, комунікаційної і джерела живлення [5].

Підсистема сприйняття полягає, як правило, з аналогового пристрою, що знімає певну статистику і аналого-цифрового перетворювача. Підсистема обробки даних містить в собі центральний процесор і пам'ять, що дозволяють зберігати не тільки генеруються сенсором дані, але і службову інформацію, яка необхідна для коректного і повноцінного функціонування комунікаційної підсистеми. Підсистема моніторингу дозволяє сенсора збирати дані про навколишнє середовище, такі як вологість, температура, тиск, магнітне поле,

хімічний аналіз повітря тощо. Також сенсор може бути доповнений гіроскопом, акселерометром, що дає можливість для побудови системи позиціонування.

Прогрес в області бездротового зв'язку і мініатюризація мікросхем відкривають нові горизонти в інформаційно-комп'ютерних технологіях. Крім багатокрокових мереж існують більш складні протоколи маршрутизації, коли наступний вузол вибирається на основі аналізу його характеристик, наприклад, рівень енергії, надійність тощо. Ситуація ускладнюється у разі, коли вузли бездротової сенсорної мережі пересуваються – топологія мережі стає динамічною.

Для реалізації сенсора як телекомунікаційного пристрою малого розміру (не більше одного кубічного сантиметра) необхідно враховувати багато технічні аспекти. Частота центрального процесора повинна бути не менше 20МГц, обсяг оперативної пам'яті не менше 4 КБ, швидкість передачі не менше 20 Кбіт / с. Оптимізація апаратної частини дозволить знизити розміри сенсора, але спричинить за собою збільшення його ціни. Операційну систему (ОС) необхідно оптимізувати з урахуванням архітектури застосовуваного центрального процесора. Обмежені ресурси і малий розмір пам'яті стимулюють розміщення ОС в ПЗУ. В даний час широко поширена ОС з відкритим кодом Tiny OS, що дозволяє досить гнучко управляти сенсорами різних виробників. В області мережевої взаємодії, обмежений джерело живлення в сенсорах накладає суттєві обмеження на використання радіотехнологій, які можуть бути застосовані в сенсорних мережах. Також слід зазначити, що обмежена продуктивність центрального процесора не дозволяє застосування стандартних протоколів маршрутизації IP-мереж – висока складність розрахунку алгоритму оптимального шляху перевантажить центральний процесор. На сьогоднішній день розроблено велику кількість спеціальних протоколів маршрутизації для сенсорних мереж [6].

Розробка технології передачі даних в сенсорних мережах є однією з найважливіших задач при побудові сенсорної мережі, так як її специфічні архітектурні та системні характеристики накладають ціле безліч жорстких

обмежень, серед яких слід підкреслити наступні:

- обмежені запаси енергії, через що радіус дії обмежений;
- обмежена продуктивність процесора;
- одночасне функціонування великої кількості вузлів на обмеженому просторі;
- рівнозначність вузлів, архітектура «клієнт-сервер» не може бути застосована у зв'язку з характерною для неї затримками;
- функціонування в неліцензованому спектрі частот;
- низька вартість.

Нині розробка сенсорних мереж будується на стандарті IEEE 802.15.4 Zigbee, про який я згадувалося вище. Додатково зазначу, що альянсом Zigbee передбачається, що радіодоступ стандарту ZigBee буде застосовуватися в таких додатках, як моніторинг, автоматизація виробництва, сенсори, безпеку, контроль, побутова техніка та багато іншого. Таким чином, додатки сенсорних мереж можна розділити на кілька основних категорій:

- безпека, надзвичайні ситуації та військові операції;
- медицина і здоров'я;
- погода, навколишнє середовище та сільське господарство;
- фабрики, заводи, будинки, будівлі;
- Транспортні системи і автомобілі.

Розгляну випадки конкретного застосування сенсорних мереж в перерахованих вище категоріях. Сенсорні мережі можуть, як мінімум, використовуватися в наступних сценаріях.

1.3 Застосування сенсорних мереж

Бездротові сенсорні мережі мають унікальні характеристики легкого розгортання, самоорганізації та відмовостійкості. З'явившись як нова парадигма збору інформації, бездротові сенсорні мережі були використані в широких цілях пов'язаних з охороною здоров'я, контроль навколишнього середовища,

енергії, безпеки харчових продуктів і виробництва [7].

Протягом останніх декількох років, було багато передумов того, що сенсорні мережі стануть реальними. Було створено кілька прототипів сенсорних нодов, включаючи Motes в Berkeley, uAMPS в MIT (в Массачусетському технологічному інституті), і GNOMES в Rice. Елементарними функціями сенсорних мереж є позиціонування, виявлення, стеження і виявлення. Крім військових застосувань, також були цивільні застосування, засновані на елементарних функціях, які можна розділити на контроль довкілля, спостереження за навколишнім середовищем, охорони здоров'я та інших комерційних додатків.

Сенсорні мережі знайшли застосування в сфері спостереження та передбачення (припущення). Живий приклад подібного застосування є система Automated Local Evaluation in Real-Time (ALERT), розроблена Національною Службою Погоди з бездротовою мережею сенсорів. Забезпечені метеорологічними / гідрологічними сенсорними пристроями, сенсори в даних умовах зазвичай вимірюють кілька властивостей місцевої погоди, таких як рівень води, температуру, вітер. Дані передаються через пряму лінію радіопередачі (line-of-sight radio communication) через сенсори на базовій станції. Модель Прогнозу Повеней була пристосована для обробки даних і видачі автоматичного попередження. Система забезпечує важливу інформацію про опади та рівні води в реальному часі для оцінки можливості потенційного повені в будь-якій точці країни. Справжня (поточна) система ALERT встановлена по всьому західному узбережжю США і використовується для попередження повеней в Каліфорнії і Арізоні [8].

Останнім часом, системи сенсорів інтенсивно використовуються в сфері охорони здоров'я, що застосовуються пацієнтами і лікарями для відстеження та моніторингу рівня глюкози, детекторів раку і навіть штучних органів. Вчені припускають можливість імплантування біомедичних сенсорів в людське тіло для різних цілей. Ці сенсори передають інформацію на зовнішню комп'ютерну систему через бездротовий інтерфейс. Кілька біомедичних сенсорів об'єднані в

систему додатків для визначення діагнозу і лікування хвороби. Біомедичні сенсори віщують більш просунутий рівень медичної допомоги.

1.4 Відмінність бездротових сенсорних мереж від традиційних комп'ютерних і телефонних мереж

Головною відмінністю бездротових сенсорних мереж від традиційних комп'ютерних і телефонних мереж є відсутність постійної інфраструктури, яка належить певного оператора або провайдера. Кожен термінал в сенсорній мережі має можливість функціонувати не тільки як кінцевий пристрій, але, так, само як і транзитний вузол, як показано на рисунку 1.2.

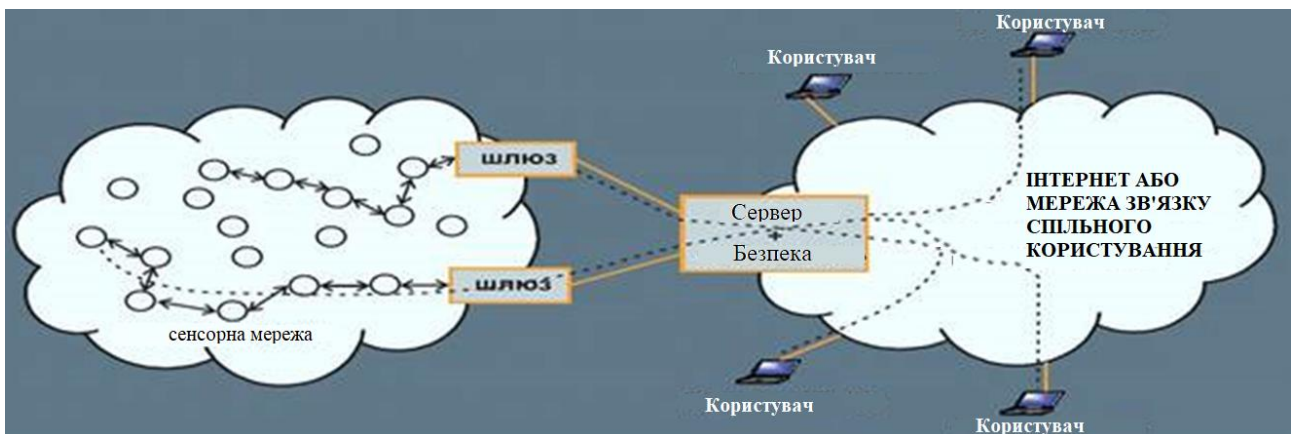


Рисунок 1.2 – Приклад підключення сенсорів мережі

Новітні технології бездротового зв'язку і прогрес в області виробництва мікросхем дозволили протягом останніх кількох років перейти до практичної розробки та впровадження нового класу розподілених комунікаційних систем – сенсорних мереж [9].

Бездротові сенсорні мережі (wireless sensor networks) складаються з мініатюрних обчислювально-комунікаційних пристроїв – марнотратів (від англ. motes – пилінки), або сенсорів. Мот являє собою плату розміром звичайно не більше одного кубічного дюйма. На платі розміщуються процесор, пам'ять – флеш і оперативна, цифроаналогові і аналого-цифрові перетворювачі,

радіочастотний приймач, джерело живлення і датчики. Датчики можуть бути найрізноманітнішими; вони підключаються через цифрові і аналогові конектори. Частіше за інших використовуються датчики температури, тиску, вологості, освітленості, вібрації, рідше – магнітоелектричні, хімічні (наприклад, що вимірюють вміст CO, CO₂), звукові і деякі інші. Набір застосовуваних датчиків залежить від функцій, які виконуються бездротовими сенсорними мережами. Харчування марнотратника здійснюється від невеликої батареї. Моти використовуються тільки для збору, первинної обробки та передачі сенсорних даних.

Основна функціональна обробка даних, зібраних мотами, здійснюється на вузлі, або шлюзі, який являє собою досить потужний комп'ютер. Але для того, щоб обробити дані, їх потрібно спочатку отримати. Для цієї мети вузол обов'язково оснащується антеною. Але в будь-якому випадку доступними для вузла виявляються тільки моти, що знаходяться досить близько від нього; іншими словами, вузол не отримує інформацію безпосередньо від кожного марнотратника. Проблема отримання сенсорної інформації, яка збирається мотами, вирішується таким чином. Моти можуть обмінюватися між собою інформацією за допомогою приймачів, що працюють в радіодіапазоні. Це, по-перше, сенсорна інформація, прочитується з датчиків, а по-друге, інформація про стан пристроїв і результати процесу передачі даних. Інформація передається від одних марнотратів іншим по ланцюжку, і в підсумку найближчі до шлюзу моти скидають йому всю акумульовану інформацію. Якщо частина марнотратів виходить з ладу, робота сенсорної мережі після реконфігурації повинна продовжуватися. Але в цьому випадку, природно, зменшується число джерел інформації.

Для виконання функцій на кожен марнотрат встановлюється спеціалізована операційна система. В даний час в більшості бездротових сенсорних мереж використовується TinyOS – ОС, розроблена в Університеті Берклі. TinyOS відноситься до програмного забезпечення з відкритим кодом; воно є за адресою: www.tinyos.net. TinyOS – це керована подіями операційна

система реального часу, розрахована на роботу в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Ця ОС дозволяє мотам автоматично встановлювати зв'язки з сусідами і формувати сенсорну мережу заданої топології. Останній реліз TinyOS 2.0 з'явився в 2006 році [10].

Найважливішим фактором при роботі бездротових сенсорних мереж є обмежена ємність батарей, що встановлюються на марнотрати. Слід враховувати, що замінити батареї найчастіше неможливо. У зв'язку з цим необхідно виконувати на мотах тільки найпростішу первинну обробку, орієнтовану на зменшення обсягу інформації, що передається, і, що найголовніше, мінімізувати число циклів прийому і передачі даних. Для вирішення цього завдання розроблені спеціальні комунікаційні протоколи, найбільш відомими з яких є протоколи альянсу ZigBee. Даний альянс (сайт www.zigbee.org) був створений в 2002 році саме для координації робіт в області бездротових сенсорних мереж. До нього увійшли найбільші розробники апаратних і програмних засобів: Philips, Ember, Samsung, IBM, Motorola, Freescale Semiconductor, Texas Instruments, NEC, LG, OKI та багато інших (всього більше 200 членів). Корпорація Intel в альянс не входить, хоча і підтримує його діяльність [11].

В принципі, для вироблення стандарту, в тому числі стека протоколів для бездротових сенсорних мереж, ZigBee використовував розроблений раніше стандарт IEEE 802.15.4, який описує фізичний рівень і рівень доступу до середовища для бездротових мереж передачі даних на невеликі відстані (до 75 м) з низьким енергоспоживанням, але з високим ступенем надійності.

На даний момент ZigBee розробив єдиний в цій області стандарт, який підкріплений наявністю виробництва повністю сумісних апаратних і програмних продуктів. Протоколи ZigBee дозволяють пристроям перебувати в сплячому режимі більшу частину часу, що значно подовжує термін служби батареї.

Очевидно, що розробити схеми обміну даними між сотнями і навіть тисячами марнотратів не так-то просто. Поряд з іншим необхідно врахувати той

факт, що сенсорні мережі працюють в неліцензованих частотних діапазонах, тому в ряді випадків можуть виникати перешкоди, створювані сторонніми джерелами радіосигналів. Бажано також уникати повторної передачі одних і тих же даних, а крім того, враховувати, що через недостатню енергоємності і зовнішніх впливів марнотрати будуть виходити з ладу назавжди або на якийсь час. У всіх таких випадках схеми обміну даними повинні модифікуватися. Оскільки однією з найважливіших функцій TinyOS є автоматичний вибір схеми організації мережі і маршрутів передачі даних, бездротові сенсорні мережі по суті є самоналагоджувальна [12].

Найчастіше мот повинен мати можливість самостійно визначити своє місце розташування, принаймні по відношенню до того іншому моту, якому він буде передавати дані. Тобто спочатку відбувається ідентифікація всіх марнотратників, а потім вже формується схема маршрутизації. Взагалі все марнотрати – пристрої стандарту ZigBee – за рівнем складності розбиваються на три класи. Вищий з них – координатор – управляє роботою мережі, зберігає дані про її топології та служить шлюзом для передачі даних, що збираються всією бездротовою сенсорною мережею, для подальшої обробки. У сенсорних мережах зазвичай використовується один координатор. Середній по складності марнотрат є маршрутизатором, тобто може приймати і передавати дані, а також визначати напрямки передачі. І нарешті, найпростіший мот може лише передавати дані найближчому маршрутизатору. Таким чином, виходить, що стандарт ZigBee підтримує мережу з кластерної архітектурою (рис. 1.3). Кластер утворюють маршрутизатор і найпростіші моти, у яких він запитує сенсорні дані. Маршрутизатор кластерів ретранслюють дані один одному, і в кінцевому рахунку дані передаються координаторові. Координатор зазвичай має зв'язок з IP-мережею, куди і прямують дані для остаточної обробки [1–3].

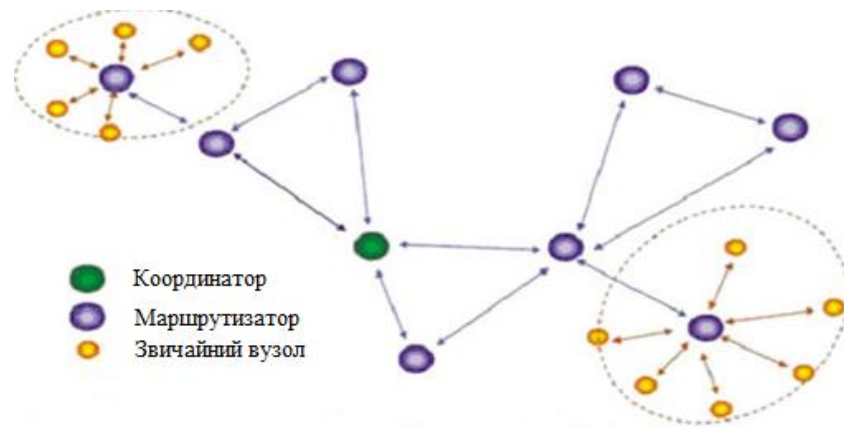


Рисунок 1.3 – Мережа з кластерної архітектурою

Спонтанно створювані мережі часто називають латинським терміном Ad Hoc, що означає «для конкретного випадку» (рис. 1.4).

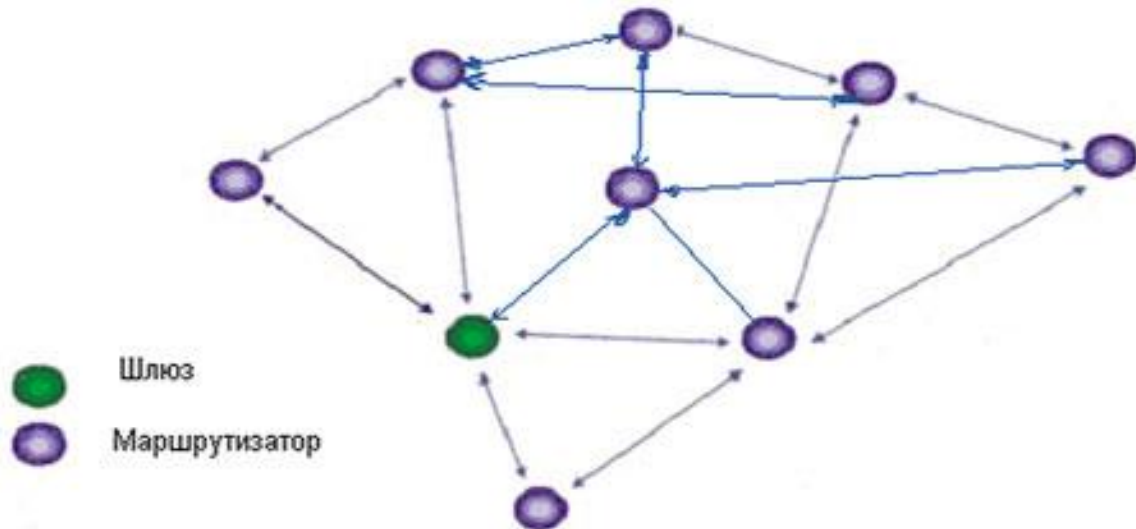


Рисунок 1.4 – Мережа «для конкретного випадку»

У мережах MeshLogic кожен ласун може виконувати ретрансляцію пакетів, тобто за своїми функціями нагадує маршрутизатор ZigBee. Мережі MeshLogic є в повній мірі самоорганізованою: ніякого вузла-координатора не передбачено. Як радіочастотних приймачів в MeshLogic можуть використовуватися різні пристрої, зокрема Cypress WirelessUSB, які так само, як і пристрої стандарту ZigBee, працюють в діапазоні частот 2,4 ... 2,4835 ГГц. Слід зазначити, що для платформи MeshLogic існують тільки нижні рівні стека протоколів. Вважається, що верхні рівні, зокрема мережевий і прикладної,

будуть створюватися під конкретні програми.

Зазначимо, що в першу чергу відрізняє бездротові сенсорні мережі від звичайних обчислювальних (дротових та бездротових) мереж [2]:

- повна відсутність яких би то ні було кабелів – електричних, комунікаційних і т.д.;
- можливість компактного розміщення або навіть інтеграції марнотратів в об'єкти навколишнього середовища;
- надійність як окремих елементів, так і, що більш важливо, всієї системи в цілому; в ряді випадків мережа може функціонувати при справності тільки 10–20% сенсорів (марнотратів);
- відсутність необхідності в персоналі для монтажу і технічного обслуговування.

Сенсорні мережі можуть бути використані в багатьох прикладних областях. Бездротові сенсорні мережі – це нова перспективна технологія, і всі пов'язані з нею проекти в основному знаходяться в стадії розробки. Зазначимо основні області застосування даної технології [3]:

- системи оборони і забезпечення безпеки;
- контроль навколишнього середовища;
- моніторинг промислового обладнання;
- охоронні системи;
- моніторинг стану сільськогосподарських угідь;
- управління енергопостачанням;
- контроль систем вентиляції, кондиціонування і освітлення;
- пожежна сигналізація;
- складський облік;
- стеження за транспортуванням вантажів;
- моніторинг фізіологічного стану людини;
- контроль персоналу.

З чималого числа прикладів використання бездротових сенсорних мереж виділимо два. Найбільш відомим є, мабуть, розгортання мережі на борту

нафтового танкера компанії BP. Там за допомогою мережі, побудованої на основі обладнання Intel, здійснювався моніторинг стану судна з метою організації його профілактичного обслуговування. Компанія BP проаналізувала, чи може сенсорна мережа працювати на борту судна в умовах екстремальних температур, високої вібрації та значний рівень радіочастотних перешкод, наявних в деяких приміщеннях судна. Експеримент пройшов успішно, кілька разів автоматично здійснювалися реконфігурація і відновлення працездатності мережі.

Прикладом ще одного реалізованого пілотного проекту є розгортання сенсорної мережі на базі військово-повітряних сил США у Флориді. Система продемонструвала хороші можливості по розпізнаванню різних металевих об'єктів, в тому числі рухомих. Застосування сенсорної мережі дозволило виявляти проникнення людей і автомобілів в контрольовану зону і відслідковувати їх переміщення. Для вирішення цих завдань використовувалися моти, оснащені магнітоелектричними і температурними датчиками. В даний час масштаби проекту розширюються, і бездротова сенсорна мережа встановлюється вже на полігоні розміром 10 000x500 м. Відповідне прикладне програмне забезпечення розробляється кількома американськими університетами.

Це буде концептуально новий тип комп'ютерної системи, що функціонує за допомогою бездротової сенсорної мережі. Таку мережу прийнято називати Ad-hoc Wireless Sensor Networks. Термін Ad-hoc запозичений з сучасних бездротових мереж, що діють, наприклад, в стандарті IEEE 802.11b. Такі бездротові мережі мають два режими взаємодії: режим Infrastructure і Ad-hoc. У режимі Infrastructure вузли мережі взаємодіють один з одним не безпосередньо, а через точку доступу (Access Point), яка виконує в бездротової мережі роль своєрідного концентратора (аналогічно тому, як це відбувається в традиційних кабельних мережах). У режимі Ad-hoc, який також називається Peer-to-Peer («точка-точка»), станції безпосередньо взаємодіють один з одним. Відповідно і в бездротових сенсорних мережах режим Ad-hoc означає, що всі сенсори

безпосередньо взаємодіють один з одним, створюючи своєрідну стільникову мережу

Бездротові сенсорні мережі – це своєрідний крок на шляху переходу в наступну епоху – коли комп'ютери будуть безпосередньо з'єднані з фізичним світом і зможуть вгадувати бажання користувачів, а також приймати за них рішення.

Використання сенсорних мереж для управління електропостачанням дозволить досягти неймовірної економії електроенергії. Наприклад керуюча мережа у квартирі. Відстежуючи місцезнаходження господаря квартири, датчики зможуть всюди вимикати за вами світло і включати його в міру необхідності. Ну а якщо використовувати такі мережі для контролю освітлення вулиць і доріг, то проблема нестачі електрики зникне сама собою [10].

Для того, щоб сенсорні мережі стали реальністю завтрашнього дня, дослідження в цьому напрямку ведуться вже сьогодні. І лідером в цій області є корпорація Intel, яка підтримує всі передові комп'ютерні технології майбутнього.

Деякі з цих пристроїв працюють під управлінням операційної системи TinyOS, код цієї операційної системи є відкритим і складається всього з 8.5 КБ.

Такі пристрої знайдуть застосування в принципово нових областях, наприклад в розробці інтелектуальних предметів одягу, підключених кодр, які будуть стежити за станом здоров'я новонародженого і повідомляти найважливіші показники його життєдіяльності, інтелектуальних фермерських господарств, в яких напівпровідникові датчики, встановлені в ґрунті, займуться управлінням іригаційної системою і внесенням добрив.

1.5 Принципи побудови бездротових сенсорних мереж

1.5.1 Ієрархія мережевих технологій, що використовуються в IoT

Одним із головних питань організації Інтернету речей є реалізація взаємодії між: інтернет-речами, користувачами та інтернет-речами, віддаленим

сервером та інтернет-речами. IoT використовує велику кількість варіантів мереж зв'язку для передачі даних, починаючи від мереж, які працюють на відстані кілька десятків сантиметрів, аж до всесвітньої мережі Інтернет [15].

Бездротові мережі малого радіусу дії, що використовуються в IoT, можна розділити на три види:

1. Бездротові персональні мережі WPAN (Wireless Personal Area Network). Радіус дії WPAN становить від кількох десятків сантиметрів до кількох метрів. Такі мережі використовуються як для об'єднання окремих пристроїв між собою, так і для зв'язку їх із мережами вищого рівня, наприклад, глобальною мережею Інтернет.

2. Бездротові сенсорні мережі WSN (Wireless Sensor Network) це розподілені мережі безлічі датчиків (сенсорів) та виконавчих пристроїв, об'єднаних між собою за допомогою радіоканалу. За розмірами фізичної зони розміщення БСМ належать до класу бездротових персональних обчислювальних мереж WPAN. Однак, за рахунок можливості ретрансляції повідомлень від одного елемента до іншого, область покриття подібних мереж може становити від кількох метрів до кількох кілометрів.

3. Малі локальні мережі TAN (Tiny Area Network). Обчислювальні мережі, що розгортаються у межах невеликого офісу або окремого житла. Їх часто називають домашніми мережами, оскільки вони поєднують комп'ютери, побутову електроніку та прилади сигналізації, що належать одній сім'ї.

Бездротові сенсорні мережі, по суті, є такими, що самоорганізуються, оскільки в них здійснюється автоматичний вибір схеми організації мережі та маршрутів передачі даних. Переваги бездротових сенсорних мереж [3]:

- здатність передавати інформацію на значні відстані при малій потужності передавачів (шляхом ретрансляції);
- низька вартість вузлів та їх малий розмір;
- низьке енергоспоживання та можливість електроживлення від автономних джерел;
- простота установки, відсутність необхідності у прокладанні кабелів

(завдяки бездротовій технології та живленню від батарейки);

- можливість встановлення таких мереж на вже існуючий та експлуатований об'єкт без проведення додаткових робіт;
- здатність до самовідновлення та самоорганізації;
- низька вартість технічного обслуговування.

Найчастіше сенсорний вузол повинен мати можливість самостійно визначити своє місцезнаходження, принаймні стосовно того іншого сенсора, якому він буде передавати дані. Тобто спочатку відбувається ідентифікація всіх сенсорів, а потім формується схема маршрутизації. Сенсорні вузли можуть закріплюватися стаціонарно, а також мати відносну мобільність, тобто довільно переміщуватися один щодо одного в деякому просторі, не порушуючи при цьому логічного зв'язку мережі. В останньому випадку сенсорна мережа не має фіксованої постійної топології, та її структура динамічно змінюється з часом.

У сенсорній мережі вузли зазвичай спілкуються за допомогою бездротового зв'язку. Зв'язок може здійснюватися за допомогою радіо, інфрачервоного випромінювання (ІЧ-порту) або оптичних сигналів. ІЧ-зв'язок доступний без ліцензії та захищений від перешкод електричних приладів. ІЧ передавачі дешевші та простіші у виробництві. Багато сьогоденних ноутбуків та мобільних телефонів використовують ІЧ-інтерфейс для передачі даних. Основним недоліком такого зв'язку є вимога прямої видимості між відправником та отримувачем. Одним з найпоширеніших варіантів радіозв'язку є використання смуг частот для промислових, наукових та медичних цілей ISM, які визначені Сектором радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку ITU-R та доступні без ліцензій у більшості країн. Основними перевагами використання радіочастот ISM є широкий спектр частот та доступність у всьому світі. Вони не прив'язані до конкретного стандарту, цим дають велику свободу для реалізації енергозберігаючих стратегій у сенсорних мережах [16].

Найважливішим чинником під час роботи бездротових сенсорних мереж є обмежена ємність батарей, що встановлені у сенсорному вузлі. Найбільш енерговитратною операцією для сенсорних вузлів є передача даних у

бездротове оточення. Тому енергозберігаючі форми передачі є ключовим чинником продовження терміну служби сенсорів, оскільки він майже повністю залежить від терміну служби батарей. Для вирішення цього завдання розроблено спеціальні комунікаційні протоколи. Для зменшення енергоспоживання зазвичай передбачається відключення передавачів сенсорних вузлів, коли не потрібно передачі інформації. На мережному рівні використовуються оптимальні шляхи передачі інформації від сенсорного вузла до координатора з огляду на кількість проміжних вузлів, необхідну енергію та доступну енергію. Окрім мережевого протоколу на споживання енергії впливає конструкція вузлів (наприклад, маленький розмір пам'яті, ефективність перемикачів між завданнями), програмне забезпечення, механізми захисту та навіть робочі додатки. У зв'язку з цим необхідно виконувати на сенсорному вузлі тільки найпростішу первинну обробку, орієнтовану на зменшення обсягу інформації, що передається, і, що найголовніше, мінімізувати число циклів прийому і передачі даних.

Залежно від того, яким чином відбувається збір даних, БСМ можна поділити на проактивні, реактивні та гібридні мережі.

Сенсорні вузли проактивної мережі періодично включають свої сенсори та передавачі, знімають показання та передають їх на базову станцію. Таким чином, вони роблять "моментальну фотографію" свого оточення з деякою періодичністю і використовуються зазвичай для регулярного моніторингу деяких значень.

Сенсорні вузли реактивних мереж з деякою періодичністю знімають показання, проте не передають їх, якщо отримані дані потрапляють до певної області припустимих показань. Водночас відомості про несподівані та різкі зміни у показаннях датчиків або їхньому виході за діапазон припустимих значень негайно передаються до координатора. Цей вид мережі призначений для роботи з вимірами у реальному часі. Сенсорні вузли гібридної мережі не тільки періодично відправляють зняті дані, але і реагують на різкі зміни в значеннях.

Енергію, що необхідної для роботи електронних схем, можливо отримати з навколишнього середовища. Існують чотири основні джерела енергії: механічна енергія (вібрації, деформації), теплова енергія (температурні перепади або зміни), енергія випромінювання (сонце, інфрачервоні промені, радіочастоти) та хімічна енергія [17]. Ці джерела характеризуються різними щільностями потужності (рис. 1.5). Рисунок показує, що значення вихідної потужності 10-100 мкВт є прийнятним при розмірах джерела 1 см² або 1 см³. Одержання енергії від сонця вважається найпотужнішим (навіть якщо значення, наведені на рисунку 1.5, мають бути помножені на вагові коефіцієнти із врахуванням того, що ККД рідко перевищує 20% для фотоелемента). Для живлення вузлів сенсорної мережі від навколишньої енергії необхідно знизити споживання енергії датчиками (сенсорами/актуаторами), мікроконтролером та радіопередавачем. В останні роки значний прогрес у цьому напрямку було досягнуто виробниками мікроконтролерів та радіочастотних чіпів (Atmel, Microchip, Texas Instruments та ін.). Приклад типового споживання енергії вузлом бездротових сенсорних мереж наведено на рисунку 1.6.

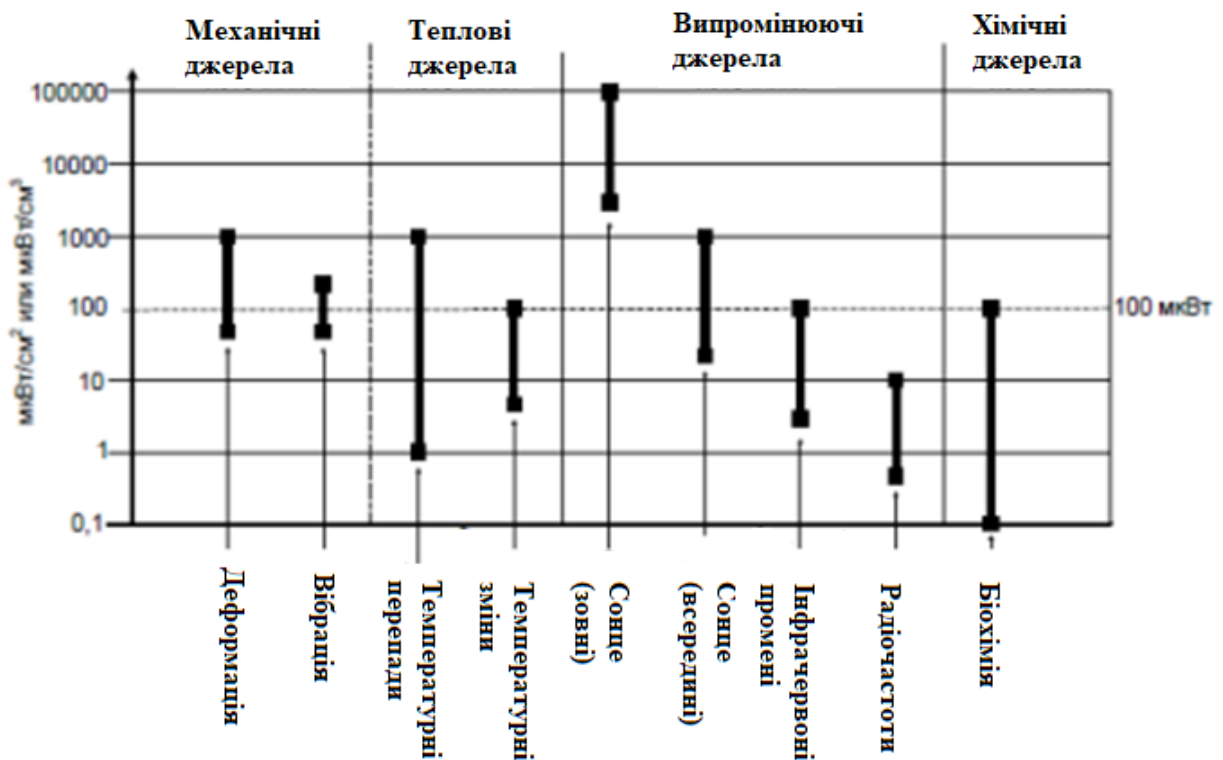


Рисунок 1.5 – Щільність потужності різних типів джерел енергії

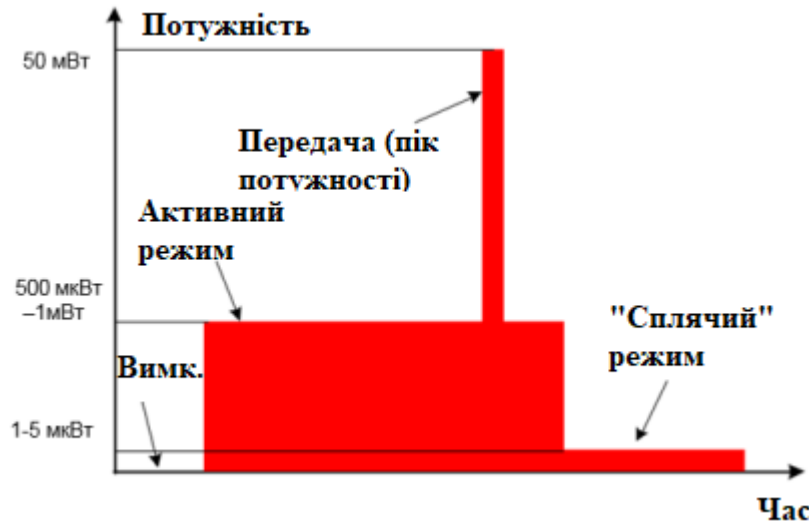


Рисунок 1.6 – Графік споживання енергії вузлом БСМ

Аналіз наведеної діаграми дозволяє зробити такі висновки. По-перше, мінімальна потужність джерела енергії із зовнішнього середовища для побудови життєздатних бездротових вузлів повинна бути близько 1–5 мкВт, що відповідає достатній величині для «сплячого» режиму мікропроцесора і радіочастотного чіпа. По-друге, сучасні джерела енергії із зовнішнього середовища не можуть забезпечувати бездротові сенсорні мережі енергією, достатньою для активного режиму (споживання енергії 500 мкВт – 1 мВт проти 10-100 мкВт для вихідної потужності таких джерел). Однак, завдяки ультранизькому споживанню енергії в режимі сну, бездротові сенсорні мережі, що живляться від зовнішнього середовища, можуть використовувати переривчастий робочий цикл. Енергія зберігається в буфері (а) (конденсатори, батареї) і використовується для виконання вимірювального циклу, як тільки енергії в буфері стає достатньо (б і в). Далі система знову повертається до сплячого режиму (г), очікуючи на новий вимірювальний цикл.

Таким чином, при використанні енергії зовнішнього середовища основною проблемою є адаптація частоти вимірювального циклу до енергії, що безперервно виробляється. Середнє енергоспоживання сенсорних вузлів (P) відповідає добутку загальної кількості енергії, що необхідна для одного вимірювального циклу (W), та частоти цієї дії (f) $P = W * f$. Віддалене

розташування сенсорів та їхня автоматична робота збільшує їх незахищеність від сторонніх вторгнень та атак. При бездротовому з'єднанні досить легко для порушника перехопити пакети, що передаються сенсорним вузлом. Наприклад, найбільша загроза здійснення атаки "відмови в обслуговуванні", мета якої порушити коректне функціонування сенсорної мережі. Це може бути досягнуто за допомогою різних способів, наприклад, при подачі потужного сигналу, який заважає сенсорним вузлам обмінюватися інформацією. Отже, сенсорні бездротові мережі вимагають нових рішень для створення ключів, їх розповсюдження, ідентифікації та захисту вузлів. Комунікації малої дальності використовують такі технології, як RFID, NFC, Bluetooth, ZigBee, Z-Wave, 6LoWPAN та ін. Реалізація бездротових персональних мереж WPAN великої ємності з низьким енергоспоживанням та низькою швидкістю передачі даних визначається стандартом IEEE 802.15.4.

1.5.2 Типи вузлів БСМ

Типова архітектура БСМ включає три типи вузлів (рис. 1.7).

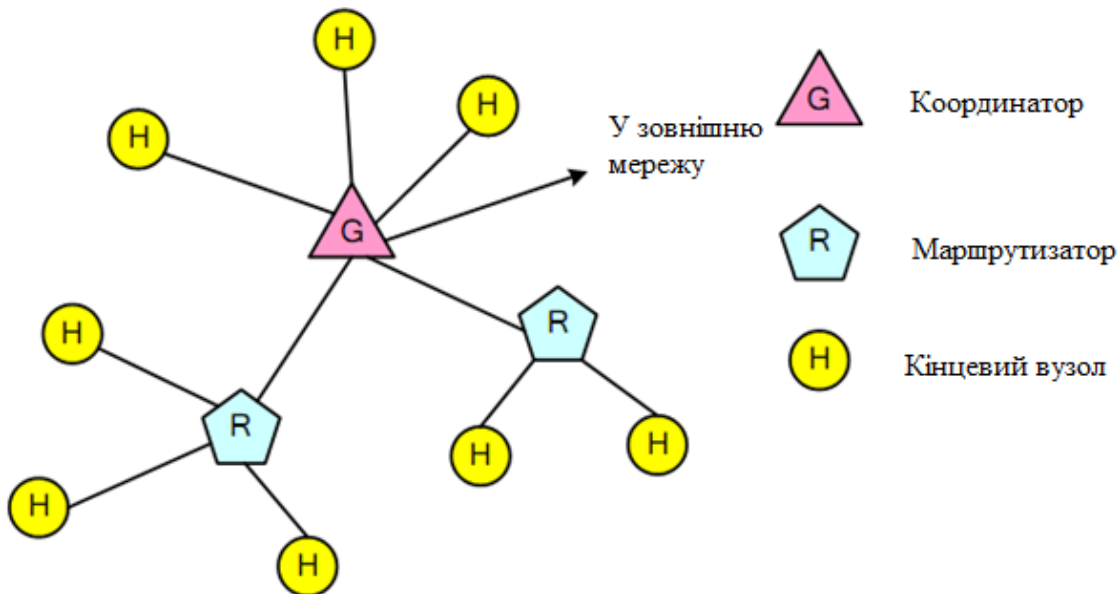


Рисунок 1.7 – Типи вузлів БСМ

1. Координатор – здійснює глобальну координацію, організацію та установку параметрів мережі, є найбільш складним пристроєм БСМ, вимагає найбільший об'єм пам'яті і найбільшу потужність джерела живлення. В одній мережі повинен бути присутнім тільки один координатор. З координатора здійснюється вихід в зовнішню мережу (він реалізує функцію шлюзу – gateway). Часто координатор називають базовою станцією (БС).

Координатор виконує наступні функції:

- визначає незадіяні канали з переліку каналів, доступних для організації мережі і визначаються розробником і організовує мережу;
- передає мережеві сигнальні пакети з інформацією про існуючої мережі;
- управляє мережевими підлеглими пристроями, встановлює параметри мережі – визначає максимальну глибину вкладених підмереж, число мережевих маршрутизаторів і число підлеглих пристроїв;
- забезпечує маршрутизацію інформації між підлеглими пристроями;
- більшу частину часу перебуває в режимі прийому;
- забезпечує організацію таблиць маршрутизації;
- дозволяє маршрутизаторів і кінцевим пристроям входити в мережу.

2. Маршрутизатор – приймає, буферизує і передає дані від інших вузлів БСМ, а також визначає напрямок передачі.

Маршрутизатор виконує наступні функції:

- визначає активні канали, підключається до мережі і дозволяє кінцевим пристроям входити в мережу – використовує додаткові, визначені додатком, списки активних каналів;
- ретранслює сигнальні мережеві пакети з параметрами мережі від координатора;
- адмініструє мережеві адреси підключених до маршрутизатора підлеглих пристроїв;
- підтримує наступні класи пристроїв маршрутизації: пристрій з таблицею маршрутизації і з функцією деревовидної маршрутизації, пристрій тільки з функцією деревовидної маршрутизації, підтримка функції аварійної

деревовидної маршрутизації;

- підтримує два режими роботи пристроїв: без переходу в «сплячий режим» і з переходом в «сплячий» режим в періоди, які визначаються координатором мережі і параметрами мережевої синхронізації;
- підтримує функції маршрутизації багато чарункових мереж: створює таблиці сусідніх мережевих вузлів з параметром якості зв'язку з кожним з них, створює таблиці мережевої маршрутизації, ретранслює пакети запиту і підтвердження визначення маршрутів між пристроями;
- підтримує функції маршрутизації по деревовидному принципу – транслює повідомлення вгору і вниз по ієрархічній структурі дерева гілки в залежності від адреси одержувача повідомлення.

3. Кінцевий пристрій (сенсорний вузол) – виконує тільки прикладні дії (збір інформації та управління віддаленим об'єктом) і не здійснює ретрансляцію даних. Сенсорний вузол має такі особливості:

- завжди шукає і намагається увійти в існуючу мережу - використовує додаткові, визначені додатком, списки активних каналів і сигнальні пакети синхронізації існуючої мережі для визначення параметрів мережі та маршрутизатора для входу в мережу;
- живиться від автономного джерела (батареї);
- з пакетів синхронізації визначає наявність даних від координатора;
- запрошує дані від координатора;
- здатний знаходитися тривалий час в «сплячому» режимі (до 99,99% від всього часу роботи).

По виконуваних наборах функцій все вузли БСМ можна віднести до двох видів [17]:

1. Пристрій з повним набором функцій FFD (Fully Function Device):

- підтримка стандарту IEEE 802.15.4;
- додаткова пам'ять і енергоспоживання дозволяють виконувати роль координатора мережі;
- підтримка всіх типів топологій («точка-точка», «зірка», «дерево»,

«чарункова мережа»);

- здатність виконувати роль координатора мережі;
- здатність звертатися до інших пристроїв в мережі.

2. Пристрій з обмеженим набором функцій RFD (Reduced Function Device):

- підтримує обмежений набір функцій стандарту IEEE 802.15.4;
- підтримка топології «точка-точка», «зірка»;
- не виконує функції координатора;
- звертається до координатора мережі і маршрутизатора.

Координатори та маршрутизатори завжди відносяться до пристроями FFD, кінцеві пристрої можуть бути FFD або RFD.

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

У розділі розглядаються бездротові мережі з самоорганізованою архітектурою – бездротові самоорганізовані мережі.

Під самоорганізованою (SON – self-organised) мережею розуміється бездротова мережа, для якої характерно [18]:

- відсутність визначеної структури розміщення вузлів (динамічно мінлива структура мережі);
- розподіл функцій між вузлами, у тому числі при появі нового вузла чи виходу з ладу існуючого вузла;
- адаптація до зміни її параметрів: кількості користувачів, рівня сигналу, рівня зовнішніх перешкод тощо;
- висока швидкість розгортання (масштабування).

До класу SON мереж відносяться мережі, які представлені на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Види SON мереж

Розглянемо дані види SON мереж. *MANET мережа* – бездротова мережа з самоорганізованою архітектурою, яка складається з мобільних пристроїв, кожен з яких може довільно змінювати своє місцезнаходження. MANET мережа реалізує маршрутизацію з декількома переходами – це тип зв'язку в радіосистемах, у яких зона покриття мережі більша, ніж радіус дії одиночних

вузлів. Таким чином, для передачі інформації до вузла- отримувача вузол може використовувати інші вузли.

Бездротова сенсорна мережа (WSN) – це мережа, яка утворена великою кількістю вузлів датчиків, де кожен вузол оснащений датчиком для виявлення фізичних явищ, таких як світло, тепло, тиск і тощо.

Потужність вузлів сенсорної мережі, як правило, забезпечується акумуляторами, тому дальність передачі вузлів WSN невелика. Дальність передачі може складати від 800 до 1 000 метрів у відкритому середовищі за межами приміщення з прямою видимістю. Вона істотно зменшується в разі закритого навколишнього середовища. Мережа датчиків для розширення охоплення мережі використовує режим багатокрокової передачі, тобто кожен вузол сенсорної мережі є одночасно передавачем і приймачем [18].

Основними перевагами LR-WPAN є:

- простота встановлення;
- надійна передача даних;
- низька в порівнянні з аналогами ціна;
- тривалий час роботи від батареї.

Відповідно до стандарту WSN складається з декількох компонентів.

Основними компонентами є два типи пристроїв:

1. FFD-пристрої (full function device), які можуть бути в якості:

– PAN-координатора (personal area network coordinator). Найбільш дорогий тип пристроїв, оскільки він повинен містити всю інформацію про мережеві з'єднання, мати великий обсяг пам'яті і високу продуктивність;

– координатор, може реалізовувати функції ретранслятора, моста, маршрутизатора і шлюзу;

– кінцевий пристрій.

2. RFD-пристрої (reduced function device), які можуть виступати тільки в ролі кінцевого пристрою та взаємодіяти тільки з FFD-пристроями. Застосовуються в простих додатках, таких як управління світлом. RFD-пристроєм не потрібно передавати великий обсяг інформації і вони можуть

комунікувати лише з одним FFD-пристроєм в певний момент часу.

Бездротові mesh мережі (WMN) являють собою однорангову багатокрокову мережу з комірковою топологією, вузли якої автоматично встановлюють та підтримують мережеві з'єднання. WMN забезпечує високу мобільність (у випадку недоступності або перевантаженості одного з вузлів мережі топологія мережі реконфігурується), низьку вартість, просте підключення до мережі нових користувачів тощо [19].

У WMN використовуються такі архітектури: плоску, ієрархічну та змішану. При плоскій архітектурі всі пристрої в мережі мають однакові можливості, вони координуються для забезпечення передавання даних. Ця архітектура є найбільш простою, відповідно основною її перевагою є просте розгортання. Оскільки всі вузли є мобільні, то недоліком є жорсткі вимоги щодо їх енергоспоживання. При ієрархічній архітектурі є декілька рівнів, причому клієнтські вузли утворюють нижній рівень. Такі вузли здатні обмінюватися даними з «основою» мережі – маршрутизаторами, які не змінюють своє місцезнаходження. Недоліком цієї топології порівняно з плоскою є необхідність планування такої мережі. При змішаній архітектурі для обміну інформацією в мережі використовуються інші види бездротових мереж: WiMAX, супутникові системи тощо.

Таким чином, враховуючи можливість збільшення площі зони покриття і щільності вузлів в режимі самоорганізації та стійкість до втрати окремих вузлів, використання WMN має величезний потенціал у різних сферах.

Мережа VANET – це вид SON бездротових мереж, який підвищує ефективність та безпеку дорожнього руху шляхом використання автомобілів в якості вузлів зв'язку для визначення позиціонування і переміщення транспортних засобів, що включені в мережу. VANET дозволяє використовувати транспортні засоби для управління трафіком. Така мережа являє собою бездротову мережу, яка складається з вузлів – транспортних засобів, що здатні комунікувати між собою. Завдяки цьому забезпечується безпека дорожнього руху. У частині доповнень щодо забезпечення підвищеного

комфорту можна виділити наступні: інформація про поточний трафік на дорогах, погода, можливості прийому повідомлень, ігри в режимі on-line, інформація від придорожньої мережі про готелі, станції заправки, меню в ресторанах тощо. Таким чином, основне завдання VANET – це забезпечення комфортного пересування учасників дорожнього руху, підвищення їх безпеки, захист транспортних засобів [20].

2.1 Методи управління бездротовими мережами, що самоорганізуються

Одним з основних завдань оперативного управління БСМ є управління її топологією. Під топологією мережі розуміють сукупність вузлів на місцевості і каналів, що сполучають їх, у взаємному розташуванні. Топологія визначає потенційні можливості сенсорної мережі зі спостереження та доставці інформації моніторингу базовим станціям [21]. На даний час існує велика кількість методів управління топологією, одні з них направлені на побудову топології для отримання покриття, інші для отримання зв'язності (рис. 2.2).

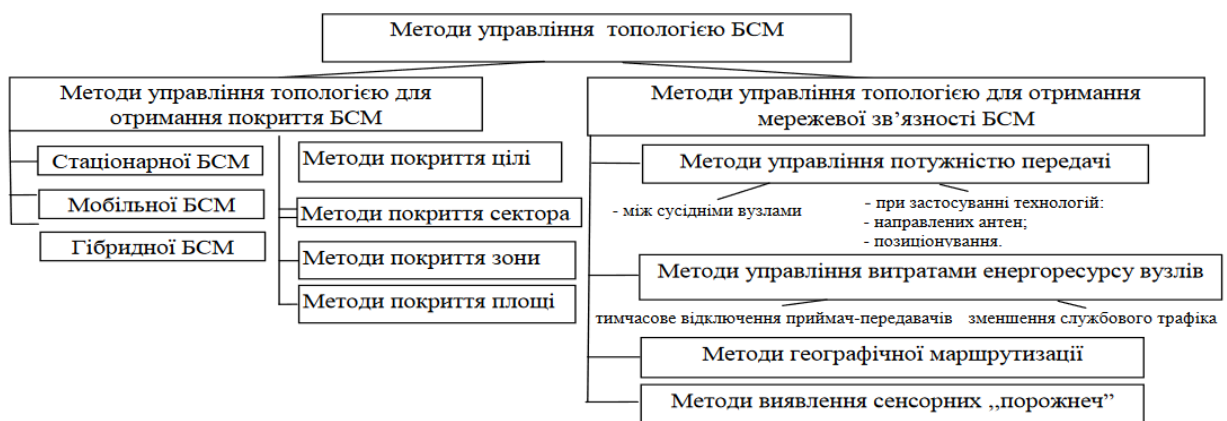


Рисунок 2.2 – Методи управління топологією в БСМ

1. *Методи управління топологією для отримання покриття* – забезпечують вимоги якості спостереження за цілями при використанні мінімуму енергії батарей вузлів (табл. 2.1).

Стационарні мережі. Побудова топології для покриття зони: метод PEAS

[22] планує в часі необхідну кількість сенсорних вузлів для свого функціонування. Метод запускає два алгоритми: Probing Environment та Adaptive Sleeping.

Таблиця 2.1 – Методи управління топологією для отримання покриття

№	Категорія	Завдання	Рішення	Механізм реалізації	Особливості функціонування
1	2	3	4	5	6
1	Стационарні мережі	Покриття зони	PEAS	Динамічне регулювання потужності	Планування вкл/викл вузлів
			Rotating coverage	Часова синхронізація, радіус моніторингу	Планування вкл/викл вузлів, гарантована кінцевий кордон затримки
		Покриття цілі, сектору	OGDC	Координати, часова синхронізація	Розрахунок остаточної енергії
			Sponsored Area	Координати	Розрахунок сектора покриття
			Extended-Sponsored Area	Координати, часова синхронізація	Фіксована модель дикого покриття
		Покриття площі	CCP	Координати	Реконфігуруємий рівень покриття
			k-UC, k-NC	Координати	Не одиночна дискова модель покриття
			Differentiated	Координати, часова синхронізація	Жадібний, змінюється до рівня покриття
		2	Мобільні мережі	Покриття площі	VEC, VOR, Minmax
Покриття площі	Potential Fields			Діапазон, поведінка	Масштабований, розподілений, відсутня локальна передача
	DSS			Координати	Масштабований, розподілений, остаточно енергія

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6
3	Гібридні мережі	Покриття площі (Один мобільний сенсор)	Single Robot	Координати	Розподілений, немає передачі з ретрансляціями
		Покриття площі (Множина мобільних сенсорів)	Bidding Protocol	Координати	Переміщення для ліквідування порожнеч покриття, діаграми Вороного

Метод Rotating coverage [23] – удосконалює детерміновану дискову модель покриття (вузли сусіди синхронізуються та знають радіус моніторингу). Побудова топології для покриття цілей: задачею методу Optimal Geographical Density Control (OGDC) [24] є мінімізація частково співпадаючих радіусів моніторингу (перекриття) всіх сенсорних вузлів. Побудова топології для покриття площі спостереження: Coverage Configuration (CCP метод забезпечує гнучкість в побудові топології БСМ с різними ступенями покриття (з використанням координат вузлів). Метод k-UC, k-NC використовує поліноміально-часовий алгоритм покриття кожної зони спостереження необхідною кількістю вузлів. Інформація про непокриті сегменти (зони) збирається центральним контролером. Недолік: централізоване управління, неможливість масштабування. Метод Differentiated використовує розподілений алгоритм контролю щільності вузлів заснований на часовій синхронізації (рішення приймається з врахуванням необхідного ступеня покриття).

Мобільні мережі. Розподілений самоорганізуючий метод, який спочатку розраховує наявність непокритих зон (за допомогою діаграм Вороного) на площі спостереження, а потім вираховує позиції цілей та переміщує сенсорні вузли (VEC, VOR та Minimax) для зменшення непокритих зон. Методи Potential Fields та Distributed Self-Spreading (DSS) використовують інформацію моніторингу для прийняття рішення з переміщення вузлів (щільність

розміщення та відстань між сусідами).

Гібридні мережі. Особлива увага приділяється розробці методів на основі застосування мобільних сенсорів – роботів, які використовуються для проведення розвідувальних операцій або відновлення мережі після бойових дій. Аналіз методів побудови топології показав відсутність єдиного методу побудови (перебудови) топології, який би задовільнив вимоги що пред’являються до БСМ тактичної ланки управління військами. Так як в умовах бойових дій розміщення сенсорних вузлів БСМ здійснюється випадковим чином тому актуальним постає питання побудови (перебудови) топології мережі для максимізації тривалості функціонування мережі при задоволення вимог покриття та маршрутизації.

2. Методи (протоколи) управління топологією для отримання зв’язності

2.1. Методи управління потужністю передачі. Передбачається, що кожен вузол може змінювати потужність передачі з певним кроком дискретизації рД. Методи управління потужністю передачі фундаментальні в досягненні мережевої енергоефективності.

2.2. Методи управління енергоресурсом (табл. 2.2). В GAF методі [21] вузли використовують координати свого розміщення для поділу площі спостереження на фіксовані квадрати. Використовується схема сну всередині кожного квадрата (вузол координатор).

Таблиця 2.2 – Енергозберігаючі методи управління топологією для отримання зв’язності

№	Протоколи	Механізм реалізації	Мобільність	Синхронізація	Інформація про місце розташування	Розподілений
1	2	3	4	5	6	7
1	SPAN	Управління витратами енергоресурсу	Стаціонарні	Ні	Ні	Так

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7
2	Asynchronous Wakeup protocol	Управління витратами енергоресурсу	Стаціонарні	Ні	Ні	Ні
3	Power saving protocol	Управління витратами енергоресурсу	Мобільні	Ні	Ні	Так
4	GAF	Управління витратами енергоресурсу	Мобільні	Ні	Так	Так
5	STEM	Управління витратами енергоресурсу	Стаціонарні	Ні	Ні	Так
6	S-MAC	Управління витратами енергоресурсу	Стаціонарні	Так	Ні	Так

В режимі «передача» передаються тільки дані, в режимі «моніторинг» передавачі відключаються та дані передаються тільки за подіями.

2.3. *Географічна маршрутизація* (табл. 2.3). Сенсорні вузли оснащені приймачами GPS (Global Position System), які дозволяють отримувати дані про своє місце розташування у вигляді: широта, довгота, висота. Маючи в своєму розпорядженні дану інформацією, сенсорні вузли мають можливість будувати та підтримувати маршрути передачі інформації, зокрема здійснювати географічну маршрутизацію.

Таблиця 2.3 – Методи географічної маршрутизації

№	Протоколи	Механізм реалізації	Характеристика
1	2	3	4
1	GPSR	Інформація про місце розташування або повний планарний граф	Правило правої руки в периметричному режимі навколо пустот
2	Compass Routing, GOAFR+	Інформація про місце розташування або повний планарний граф	Фасе-маршрутизація на планарних графах для запобігання маршрутних “дір”
3	INF	Інформація про місце розташування	Передача відправнику повідомлення про відмову

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4
4	Active Message Relay	Інформація про місце розташування	Для мобільного (переміщеного) вузла досягнути незв'язного сусіда
5	GEAR	Інформація про місце розташування, знання про коефіцієнт вартості	Знання та приблизна вартість для географічної маршрутизації та обмежена адресація в зоні.

Для мобільних БСМ запропоновано Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) метод [24], який починає роботу з виявлення місце розташування всіх вузлів мережі та здійснює обхід «пустот» за допомогою методу периметричної маршрутизації та правила правої руки (рис. 2.3).

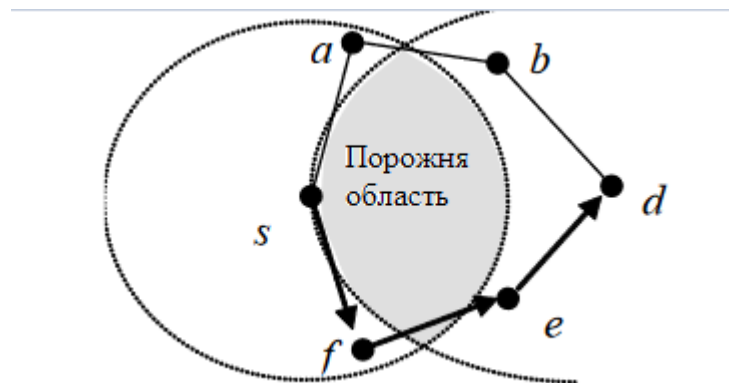


Рисунок 2.3 – Варіант обходу пустої області за допомогою GPSR

Методи *Compass Routing* та *FACE-1* [25] використовують метрику мінімальної відстані між сусідами. Протокол *FACE-2* здійснює маршрутизацію через границі Gabriel Graph (GG), які побудовані в кожному вузлі. Недолік: граничні вузли витрачають більше енергії. Для удосконалення вищезазначених методів пропонується *Compass Routing* протокол, який використовує механізм зворотної роботи (повернення в жадібний режим після режиму периметричної маршрутизації) [27].

Метод *Intermediate Node Forwarding (INF)* [28] пропонує механізм зворотного зв'язку до відправника про втрату пакета. Протокол *Active Message Relay* [29] для побудови маршруту в незв'язній мобільній мережі використовує мобільних агентів. *Geographic and Energy Aware Routing (GEAR)*, протокол здійснює передачу пакетів у відповідну зону мережі (висока ефективність, якщо регіон розбито на кластери, коефіцієнт ефективності швидко знижується при збільшенні площі). Недолік: використовується тільки для мереж малої розмірності.

2.4. *Виявлення сенсорних „порожнеч” (Sink, Black Holes, Worm holes).* Розглянуті методи географічної маршрутизації не використовують механізми виявлення та локалізації сенсорних „порожнеч”, які можуть виникати внаслідок атак на сенсорні вузли для попередження втрати пакетів.

2.2 Аналіз перерозподілу потоків у самоорганізованих мережах та їх вплив на якість передавання потоків

Кількість вузлів самоорганізованих мереж може змінюватись в різних межах: від десятків до тисяч, внаслідок чого топологія таких мереж є динамічною. З врахуванням того, що у БСМ немає достатніх ресурсів для зберігання та обробки даних маршрутизації всіх вузлів мережі, найбільш поширеними є децентралізовані локальні схеми маршрутизації, які дозволяють кожному вузлу приймати рішення про перенаправлення повідомлень на основі даних про його найближчих сусідів.

Враховуючи специфіку функціонування БСМ, класифікація методів маршрутизації здійснюється за багатьма ознаками. Розглянемо найбільш поширені з них.

По принципу роботи:

Проактивні. При цьому методі здійснюється періодичне розсилання службових повідомлень, які містять дані про зміни топології мережі. Внаслідок цього кожен вузол здійснює формування маршруту до інших вузлів та зберігає

їх у таблиці маршрутизації.

Реактивні. Цей метод працює за запитом, тобто формування маршрутів до певних вузлів відбувається тільки у випадку необхідності передачі даних, коли вузол-джерело розсилає по мережі ширококомовне повідомлення-запит. У відповідь на такий запит вузол-адресат надсилає повідомлення-підтвердження, з якого вузол-джерело отримує дані про потрібний маршрут, після чого виконується його запис у таблицю маршрутизації.

Гібридні (змішані). Цей метод комбінує проактивний і реактивний механізм. В загальному випадку мережа розбивається на множину підмереж, всередині кожної з них використовується проактивний протокол, взаємодія між ними забезпечується використанням реактивних протоколів. Це дозволяє зменшити обсяг службової інформації в мережі, оскільки її основна частина розсилається в підмережах.

По структурній організації мережі:

Плоскі. Характеризуються одноранговими вузлами, які мають однакові функції.

Ієрархічні. Характеризуються наявністю рівнів, кожен з яких має різні функції. Класичним прикладом ієрархічної організації в бездротових мережах є маршрутизація на основі кластеризації вузлів. В цьому випадку кластером вважається група вузлів, які розташовані на невеликій відстані одне від одного. Комунікація здійснюється наступним чином: вузли кластеру обмінюються даними з головним вузлом (центром) цього кластеру, який, в свою чергу, комунікує з головними вузлами інших кластерів.

По ознаці централізації збору даних:

З централізованим збором. Наявний один центр для збору, обробки і зберігання інформації вузлів мережі.

З багатьма центрами збору. Такі центри взаємодіють між собою та здійснюють розподіл оброблення інформації, синхронізацію тощо.

Децентралізовані. Зв'язок між будь-якими вузлами мережі здійснюється без обмежень.

По ознаці варіабельності топології мережі:

Для статичної топології. Мережа складається з вузлів, які є нерухомими, тобто, вони мають певну довготривалу позицію.

Для динамічної топології. Мережа містить вузли, які змінюють своє місцезнаходження у часі.

По врахуванню специфіки мережевого трафіку і забезпеченні якості послуг:

Без врахування. Не враховуються особливості трафіку мережі.

З врахуванням і з диференціацією схем маршрутизації для різних видів трафіку мережі. Враховуються особливості різних видів трафіку, таких як відео, аудіо, голос тощо.

В БСМ використовуються різні типи додатків, наприклад, деякі функціонують в реальному часі (online), інші – offline, тобто здійснюють збір даних при поступленні запиту. Методи ретрансляції різних типів трафіку мережі можуть базуватись на відстані між вузлами, кількості транзитних вузлів між вузлом-джерелом та вузлом-отримувачем, завантаженості маршрутів, мінімальній затримці передачі даних тощо [23].

Отже, для ефективного вирішення задач маршрутизації в БСМ потрібно враховувати різноманітні фактори, які впливають на процес передавання даних, а саме: адресація мережевих вузлів, синхронізація вузлів, усунення і мінімізація колізій тощо [24].

Розглянемо найбільш поширені протоколи маршрутизації.

AODV (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector) – це протокол, який забезпечує динамічну маршрутизацію для різних видів бездротових мереж шляхом створення маршруту на вимогу.

DSR (Dynamic Source Routing) – протокол динамічної маршрутизації, який застосовується для мобільних ad-hoc мереж. Цей протокол створює маршрут при необхідності шляхом використання широкомовного запиту, при цьому не потребує періодичної перевірки, оскільки дані про такий маршрут динамічно оновлюються.

OLSR (Optimized Link-State Routing) – протокол маршрутизації для різних видів бездротових мереж, який на основі обміну повідомленнями аналізує інформацію про топологію мережі. Кожен вузол мережі формує свою таблицю маршрутизації на основі такої інформації, яка передається службовими пакетами вибору маршруту.

HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol) – гібридний протокол маршрутизації для стандарту IEEE 802.11s, який функціонує на MAC-рівні, внаслідок чого він є ефективнішим, ніж AODV. Основою HWMP є два режими створення маршрутів: реактивний і проактивний. Для вибору кращих маршрутів використовуються різні метрики, які можуть містити інформацію про довжину маршруту (кількість переходів), пропускну здатність, надійність тощо.

В бездротовій mesh (multi-hop) мережі маршрутизатори можуть довільно змінювати своє місцезнаходження. Така мережа може функціонувати автономно або з'єднуватись з мережею Інтернет навіть у випадку втрати певного вузла, що свідчить про надійність її інфраструктури [25].

Для моделювання використовувались наступні умови: модель каналного рівня – IEEE 802.11g (Wi-Fi) з фіксованою пропускну здатність 20 Мбіт/с; робочий діапазон – 2,4 ГГц; кількість вузлів – 10, 20, 30, 40, 50 ; розмір пакету даних – 512 байт; інтенсивність відправлення – 20 пакетів за секунду; протокол транспортного рівня – UDP; час функціонування мережі – 300 с.

На рисунку 2.4 представлено результати моделювання, які демонструють залежність затримки передачі даних від збільшення кількості вузлів мережі (N) при використанні протоколів маршрутизації HWMP, OLSR та AODV.

Результати моделювання показують, що при використанні протоколу HWMP спостерігається найменша затримка передачі даних, при протоколі OLSR – найбільша.

Протокол OLSR при збільшенні кількості вузлів є неефективним, оскільки при великій кількості ретрансляторів динаміка роботи збільшується, записи в таблицях маршрутизації стають неактуальними, відповідно процес їх оновлення знижує корисну пропускну здатність.

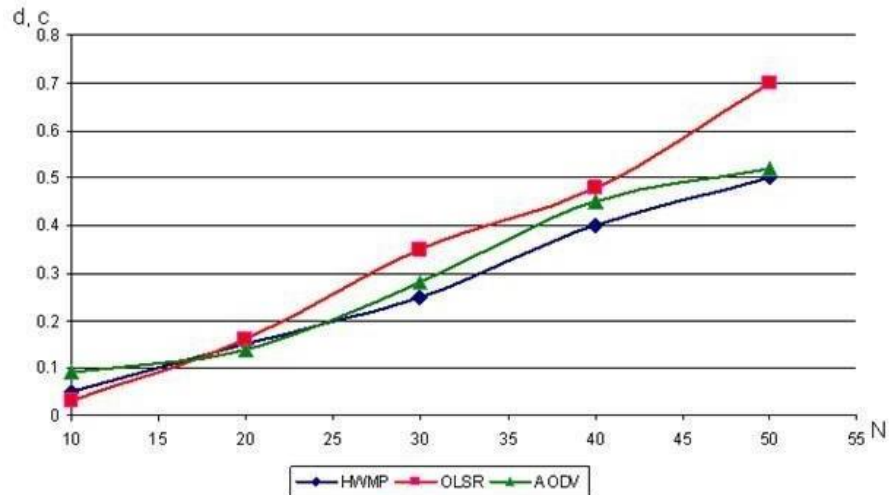


Рисунок 2.4 – Залежність затримки передачі даних від кількості вузлів мережі

Результати моделювання показують, що при використанні протоколу HWMP спостерігається найменша затримка передачі даних, при протоколі OLSR – найбільша.

Протокол AODV використовує тривалу процедуру ініціалізації з'єднання, проте він показує не найгірші результати.

Протокол OLSR при збільшенні кількості вузлів є неефективним, оскільки при великій кількості ретрансляторів динаміка роботи збільшується, записи в таблицях маршрутизації стають неактуальними, відповідно процес їх оновлення знижує корисну пропускну здатність.

Ефективність використання протоколу HWMP пояснюється тим, що при створенні маршруту він володіє найновішою інформацією про стан мережі. Цей гібридний протокол використовує метрику ALM (Airtime link metric), яка враховує умови доступу до середовища передачі даних, внаслідок чого дозволяє визначити найкращий маршрут.

AODV забезпечує кращий коефіцієнт доставки пакетів, ніж OLSR, проте при цьому час доставки пакетів більший, внаслідок чого передана інформація може бути не актуальною. Таким чином, протокол OLSR доцільно використовувати у невеликих мережах, тоді як для мереж великого розміру – протокол HWMP.

2.3 Кластеризація і забезпечення параметрів QoS у мережах із самоорганізацією

Дослідження в області самоорганізованих мереж активно розвиваються, у зв'язку з цим виникає багато нових напрямків досліджень, одним з основних яких є кластеризація, використання якої дозволяє збільшити термін життя мережі та зменшити її енергоспоживання. Для підвищення ефективності кластеризації використовуються різні підходи [26]: метод нечіткої логіки, колективний, графовий, на основі штучного інтелекту тощо.

Важливе значення для надання послуг користувачам в самоорганізованих мережах має параметр QoS.

Механізм забезпечення необхідного рівня QoS реалізується за допомогою інструментів, що дозволяють управляти певними параметрами, які безпосередньо впливають на якість послуг, що надаються в само організованій бездротової мережі. Найпоширенішими з них є: ширина смуги пропускання, затримка передачі пакетів, фазове тремтіння цифрового сигналу (джитер), імовірність втрати пакетів тощо.

Загальновідомі три базових моделі QoS [26], які зазвичай реалізуються в режимі «точка-точка» :

1. Best Effort – абсолютна відсутність механізмів QoS. Використовуються всі доступні ресурси мережі без будь-якого виділення окремих класів трафіку і регулювання. Забезпечується автоматичне мінімальне управління параметрами мережі, при цьому немає гарантії доставки даних. Прикладом забезпечення QoS на цьому рівні є черги FIFO (First in First out).

2. Soft QoS (Differentiated service) – модель диференційованого обслуговування. Розділяє трафік на класи, вводячи кілька рівнів QoS, забезпечує пріоритезацію трафіку і використання різних механізмів організації черг. Архітектура DiffServ припускає наявність класифікаторів і формувачів трафіку на кордоні мережі, а також підтримку функції розподілу ресурсів в ядрі мережі.

3. Hard QoS (Guaranteed service) – модель інтегрованого обслуговування.

Забезпечує наскрізну (End-to-End) якість обслуговування, гарантуючи необхідну пропускну здатність за рахунок абсолютного резервування мережевих ресурсів, використання спеціального протоколу сигналізації та більш ефективних алгоритмів управління розподілом трафіку.

Реалізація QoS в мобільних само організованих системах на рівнях вище, ніж Best Effort є комплексною проблемою, так як здатність мережі гарантувати надання деяких мережевих ресурсів в рамках заданого QoS залежить від характеристик всіх мережевих компонентів від транспортного до канального рівнів.

Бездротові канали передачі інформації можуть мати різні рівні сигналів, при цьому втрати пакетів можуть бути значними, а топологія мережі вкрай нестабільною і характеризуватиметься постійними обривами існуючих з'єднань.

Модель Soft QoS передбачає наявність певної кількості заздалегідь визначених класів даних, які диференціюються бітами TOS (Type of Service) в заголовку IP пакета і правилами пересилання пакетів на вузлах. Дана модель може бути досить просто реалізована на вузлах самоорганізованих мереж, проте для її ефективного використання всі вузли мережі повинні володіти функціоналом граничних маршрутизаторів.

Відзначимо ряд факторів, що характеризують мережі:

– відповідність принципу «наскрізної» мережі (англ. "End-to-end" principle). Принцип наскрізної якості обслуговування – це здатність мережі доставляти послуги, запитувані окремим мережним трафіком, з однієї точки мережі в іншу [27]. Мережі, побудовані за таким принципом, є нейтральними і орієнтовані лише на перенесення інформації без змін;

– інтерактивність (англ. Interaction) - це принцип організації системи, при якому основна мета її функціонального призначення досягається за рахунок інформаційного обміну елементів цієї системи. Це поняття розкриває

характер і ступінь взаємодії об'єктів не тільки всередині самої системи, але і всі комунікаційні процеси з іншою системою / користувачем;

– толерантність до затримок. Одні додатки мереж в стані функціонувати тільки при суворому виконанні режиму своєчасної доставки даних за призначенням (режим реального часу). Інші додатки успішно функціонують в умовах, коли час доставки даних за призначенням не регламентується часовими рамками.

Таким чином, незважаючи на те, що можливості БСМ дозволяють організувати зв'язок в умовах випадкових переміщень вузлів, застосування adhoc-мережі для забезпечення ефективного інформаційного обміну пов'язане з рядом складнощів (зниженням оперативності та обсягів доставки даних). З метою їх подолання необхідно детально проаналізувати особливості передачі інформаційних потоків в мережі з динамічною топологією і здійснити пошук методів, орієнтованих на підвищення в ній ефективності інформаційного обміну.

2.4 Особливості передавання інформаційних потоків у вузлах бездротових самоорганізованих мереж

Специфіка функціонування БСМ полягає в тому, що в ній, на відміну від мережі з фіксованою топологією, можливі різні групи подій (рис. 2.5).

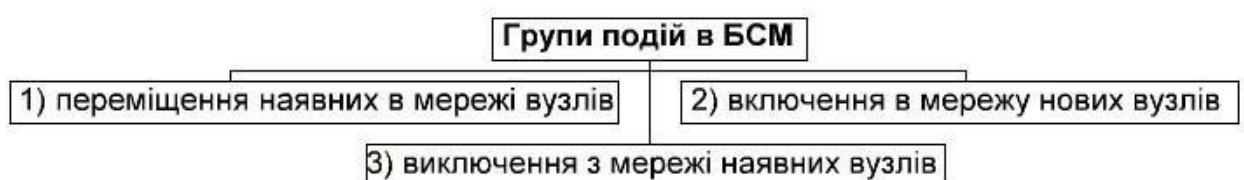


Рисунок 2.5 – Групи подій в БСМ

Події першої групи є можливими в БСМ завдяки мобільності її абонентів. Деструктивні чинники є причиною подій другої групи. Події третьої групи можуть бути викликані, наприклад, переміщенням в зону покриття БСМ

додаткових абонентів тощо. Все це впливає на передачу інформаційних потоків по каналах БСМ.

Специфіка пакетної передачі даних, в першу чергу, визначається наступними процесами:

- вибір значень параметрів повторних передач;
- вибір значень параметрів відправки даних вузлами-джерелами;
- вибір значень параметрів відкидання пакетів в транзитних вузлах;
- вибір значень параметрів відправки підтверджень вузлами-отримувачами.

З формуванням потоків даних в БСМ безпосередньо пов'язані такі процеси [27]:

- відправка даних вузлами-джерелами;
- повторні передачі, викликані необхідністю повторної передачі втраченої інформації (через перевантаження і перешкоди в радіоканалах);
- відкидання пакетів в транзитних вузлах для попередження перевантажень;
- відправка підтверджень вузлами-отримувачами для контролю достовірності доставки даних.

Функціонування БСМ супроводжується втратами пакетів внаслідок передчасних розривів з'єднань, викликаних динамічністю мережевої топології і впливами деструктивних чинників. Крім того, втрати пакетів, можуть бути викликані спотвореннями даних внаслідок перешкод в радіоканалах мережі. Динамічність топології і зовнішні деструктивні впливи призводять до випадкової зміни мережевого трафіку, що також є важливою особливістю БСМ.

Доставка інформації в MANET заснована на комутації пакетів, і абоненти БСМ мають можливість передавати по мережі різні види пакетного трафіку. Інформаційні повідомлення, що передаються в мережі, утворюють мультимедійний трафік (мовні повідомлення, відео) і трафік даних (керуючі команди і сигнали, відомості про вимірювання і спостереження, текстові

повідомлення, різні зображення, інша графічна і таблична інформація).

Інтенсивність передачі інформації, ініційованої роботою будь-якого мультимедійного застосування, досить висока і близька до постійного значення, тому такий вид трафіку часто називають потоковим трафіком [28]. Для якісної передачі потокового трафіку необхідно мінімізувати затримку пакетів і її дисперсію (джитер), при цьому допускаються незначні втрати пакетів. При передачі даних, навпаки, затримки окремих пакетів на якість передачі не впливають, проте потрібна гарантована безпомилкова доставка кожного пакету, тобто повинна бути забезпечена достовірність доставки даних при заданому рівні оперативності. Доставка даних без помилок і втрат досягається за допомогою підтвердження приймачем успішно доставлених пакетів і повторних передач втраченої інформації, що істотно ускладнює процес передачі даних і збільшує час доставки повідомлень.

У мережах Wi-Fi базовим методом доступу до каналу є випадковий (режим розподіленого управління DCF, в основі якого лежить метод CSMA / CA). Випадковий вибір моменту початку передачі пакету є причиною можливих колізій – одночасної передачі пакетів декількома станціями, що призводить до того, що приймач не може правильно декодувати сигнал і не отримує жоден з переданих пакетів. Якщо приймач отримує пакет, він підтверджує отримання пакету за допомогою кадру АСК. Якщо станція відправник не одержує АСК, вона повторює передачу пакета до тих пір, поки не отримає АСК або не буде досягнутий допустимий поріг спроб передачі.

У мережах, де всі станції (вузли) знаходяться в зоні радіоприйому один одного, ймовірність колізій мала, і такий метод дозволяє ефективно боротися з їх наслідками. Проте в багатокрокових мережах ймовірність колізій значно зростає через ефект прихованих станцій.

Для підвищення надійності передачі пакетів в багатокрокових мережах стандарт IEEE 802.11s вводить додатковий детермінований метод доступу – МССА (Mesh coordination function Coordinated Channel Access), заснований на попередньому резервуванні інтервалів часу, протягом яких можлива

безконкурентна передача даних станцією-власником резервування [29].

Оскільки навіть резервування середовища не дозволяє гарантувати успішну передачу пакета, наприклад, через шуми в каналі.

Для скорочення накладних витрат МССА резервує не поодинокий інтервал часу, а безліч інтервалів часу, які визначається трьома параметрами: 1) тривалістю кожного зарезервованого інтервалу; 2) періодичністю – числом зарезервованих інтервалів протягом одиниці часу, що називається DTIM інтервалом; 3) зміщенням першого зарезервованого інтервалу від початку DTIM-інтервалу.

Метод МССА використовується для підвищення надійності передачі користувацьких даних. Однак в мережах WMN присутній ще один механізм резервування середовища – МВСА (Mesh Beacon Collision Avoidness), який використовується для підвищення надійності передачі біконів – кадрів, в яких передається службова інформація і які також служать для виявлення станціями один одного. Бікони посилаються кожною станцією строго періодично, 1 раз в бікон-інтервал. Для запобігання колізій біконів і підвищення надійності їх передачі МВСА забороняє станції вести будь-яку передачу в той час, як хоча б 1 станція з її двокрокового оточення передає бікон. Специфікація IEEE 802.11s детально описує механізм МВСА.

2.5 Висновки за розділом 2

За результатами проведеного аналізу методів та особливостей роботи сенсорної мережі показано, що в даний час моделювання та проектування бездротових сенсорних мереж є дуже актуальною темою для досліджень у всьому світі.

Через складність та тривалість налаштування БСМ широке застосування отримали різні системи імітаційного моделювання мереж, які дозволяють користувачам ізолювати різні фактори за допомогою налаштування параметрів.

У існуючих умовах можна вказати кілька програмних засобів, які дозволяють моделювати бездротові сенсорні мережі з урахуванням багатьох факторів. Найбільш відомі Anylogic, TOSSIM, OPNET Modeler, Нетворк Simulator (NS, NS-2, NS-3), GloMoSim, Worldsens, NetSim, OMNeT++, Castalia. Але ці програми комерційні та малодоступні.

Перед створенням та впровадженням такої складної системи, як БСМ, доцільно проведення її моделювання в різних режимах роботи та оцінки основних параметрів.

3 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ БЕЗДРОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Доступ до WSN може бути реалізований у вигляді веб-інтерфейсу. В якості базової станції обрано одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 Model B на основі ОС Debian Linux. До неї під'єднано бездротовий модуль nRF24L01 по шині I2C. В якості сховища зберігання – карту пам'яті формату SD на 16Гб відформатовану як FAT32. Офіційною операційною системою для всіх моделей Raspberry Pi є Raspbian (дистрибутив Debian Linux).

В якості сенсорного вузла використовується Arduino Uno з бездротовим модулем nRF24L01 підключеним по шині I2C.

3.1 Установка ОС на Raspberry Pi 4

Для установки ОС на Raspberry Pi спочатку необхідно вибрати один з офіційних дистрибутивів Raspbian. Виробник надає на вибір три варіанти:

- Raspberry Pi OS Lite — дистрибутив який не містить ніяких встановлених додатків, крім тих, які необхідні для роботи пристрою або встановлених в самому ядрі Linux. Також не має встановленого графічного інтерфейсу;
- Raspberry Pi OS with desktop – те ж саме, що і попередній пункт, але вже має в своєму розпорядженні встановлений графічний інтерфейс і невеликий пакет необхідних додатків;
- Raspberry Pi OS with desktop and recommended software – найбільший на сьогоднішній день офіційний дистрибутив. Крім графічного інтерфейсу має на борту велику кількість додатків для розробки і навчання.

У нашому випадку використовується третій варіант, оскільки в ньому були встановлені всі необхідні мені для зручності додатки.

Наступним пунктом необхідно записати образ обраного дистрибутива на карту пам'яті формату SD. Для забезпечення продуктивності необхідно мати достатню швидкість читання записи, а також обсяг не менше 8 Гб. Для установки образу використовується програма Win32DiskImager (рис. 3.1), оскільки вона проста у використанні, має всі необхідні для функції і безкоштовною.

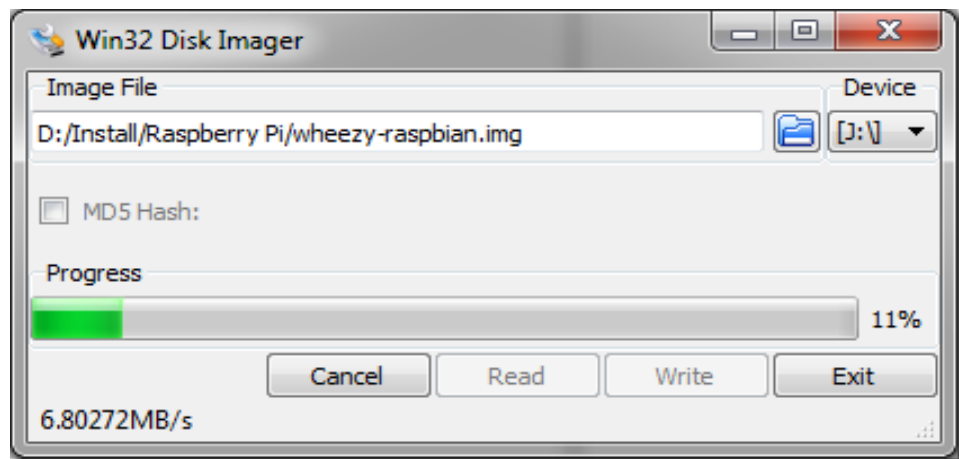


Рисунок 3.1 – Інтерфейс програми Win32DiskImager

В поле Image File необхідно вказати шлях в скачані образу Raspbian. В меню Device вибрати змонтоване пристрій і натиснути клавішу Write. Після залишиться тільки дочекатися завантаження і витягти карту пам'яті.

При першому завантаженні виконується первинне налаштування пристрою (рис. 3.2). Для цього необхідно запустити термінал і виконати команду

```
$ Sudo raspi – config
```

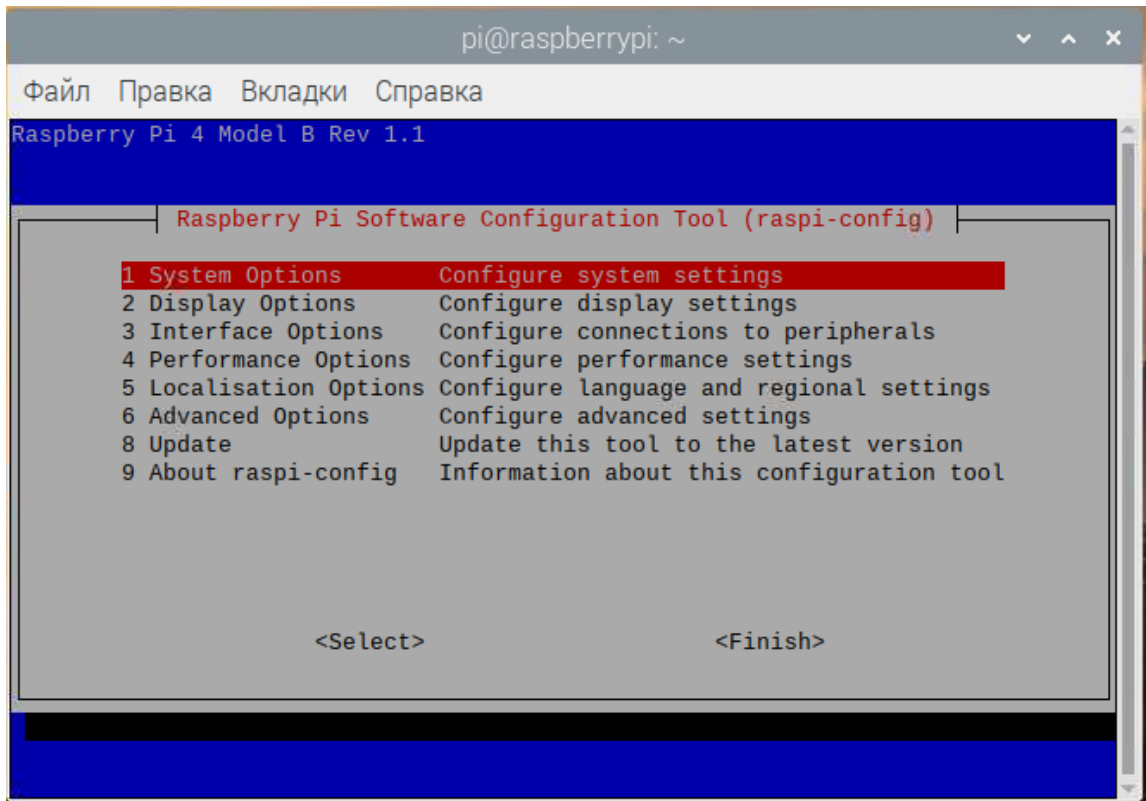


Рисунок 3.2 – Меню налаштування Raspberry pi

Після потрапляння в меню налаштувань треба виконати наступні дії:

- Зайти в пункт System options, і підключитися до своєї wifi мережі і змінив пароль для зручності використання;
- У пункті Display Options вибрати необхідний дозвіл екрана;
- У пункті Interface Options включити SSH (Secure SHell), VNC (Virtual Network Computing) і I2C.

Після зберігти налаштування, перезавантажити мікрокомп'ютер і відключити HDMI кабель.

Далі треба підключитися до Raspberry pi по SSH (рис. 3.3). Тк в Windows 10 вже встановлена відповідна утиліта, то вона і використовується. Для цього запусив командний рядок на своєму робочому ПК і виконуємо команду:

```
ssh pi@192.168.1.107
```

Потім вводимо пароль і підключаємось до мікрокомп'ютеру.

```

C:\Users\creep\Desktop>ssh pi@192.168.1.107
pi@192.168.1.107's password:

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
Last login: Wed May 26 18:18:11 2021 from 192.168.1.101
pi@raspberrypi:~$

```

Рисунок 3.3 – Процес підключення до Raspberry pi використовуючи SSH

Далі для віддаленого використання графічного інтерфейсу виконується наступні команди:

- \$ Sudo apt update - для поновлення репозиторіїв;
- \$ Sudo apt - get install realvnc - vnc - server realvnc - vnc - viewer - установка VNC для віддаленого управління;
- \$ Vncserver - для запуску VNC сервера.

У вікні показаному на рисунку 3.4 дізнаємось адресу і порт, після встановлюєм на ПК VNC Viewer, запустив його і ввів дані для підключення.

```

pi@raspberrypi:~$ vncserver

Copyright (C) 2002-2020 RealVNC Ltd.
RealVNC and VNC are trademarks of RealVNC Ltd and are protected by trademark
registrations and/or pending trademark applications in the European Union,
United States of America and other jurisdictions.
Protected by UK patent 2481870; US patent 8760366; EU patent 2652951.
See https://www.realvnc.com for information on VNC.
For third party acknowledgements see:
https://www.realvnc.com/docs/6/foss.html
OS: Raspbian GNU/Linux 10, Linux 5.4.83, armv7l

On some distributions (in particular Red Hat), you may get a better experience
by running vncserver-virtual in conjunction with the system Xorg server, rather
than the old version built-in to Xvnc. More desktop environments and
applications will likely be compatible. For more information on this alternative
implementation, please see: https://www.realvnc.com/doclink/kb-546

Running applications in /etc/vnc/xstartup

VNC Server catchphrase: "India think courage. Action junior school."
signature: f6-b4-fd-1c-0b-b7-fe-65

Log file is /home/pi/.vnc/raspberrypi:1.log
New desktop is raspberrypi:1 (192.168.1.107:1)
pi@raspberrypi:~$

```

Рисунок 3.4 – Процес запуску VNC серверу

3.2 Установка Node.js на комп'ютер Raspberry Pi

Для установки nodejs необхідно включити репозиторій NodeSource виконав наступну команду:

- `$ Curl – sL https://deb.nodesource.com/setup_1 2.x | sudo bash –`
- А далі встановити сам nodejs:
- `$ Sudo apt install nodejs`

Після установки треба перевірити правильність виконаних дій і виконати команду: `$ Node – version`.

Далі щоб мати можливість компілювати і встановлювати власні доробки з реєстру npm, необхідно встановити інструменти розробки: `$ Sudo apt install build-essential`.

Тепер необхідно встановити express фреймворк. Для його установки створюється нова директорія, відкрити її в терміналі і використати команду для створення файлу package.json:

```
$ Npm init
```

Після треба встановити express наступною командою:

```
$ Npm install express – save
```

Також для роботи з I2C необхідний відповідний модуль – RaspI I2C. Він володіє необхідним функціоналом і досить простий в освоєнні. Для роботи даного модуля необхідний RaspI. Команда для їх установки:

```
$ Npm install raspi
```

```
$ Npm install raspi-i2c
```

Після цього створюється файл app.js. У ньому буде знаходитись основний код WoT-додатку.

І отримуємо структуру додатку зазначеному на рисунку 3.5.

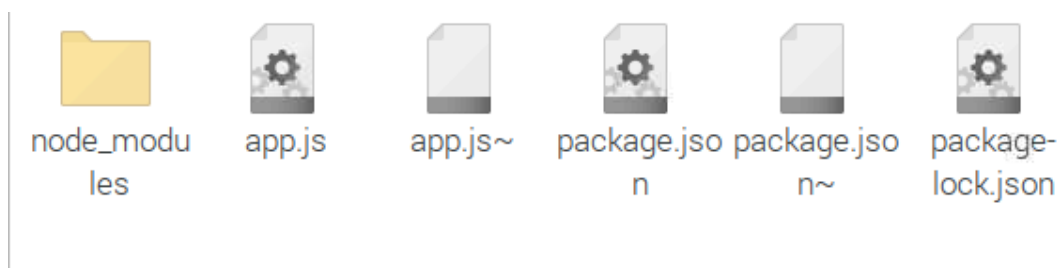


Рисунок 3.5 – Структура WoT-додатку

3.3 Інсталяція середовища програмування Arduino IDE та моделювання роботи підсистеми

Arduino IDE повністю безкоштовна, та доступна на офіційному сайті, встановлюється автоматично та дуже легко. Після інсталяції необхідно провести базові налаштування. Спочатку необхідно встановити драйвер для USB-TTL контролер. На офіційних платах у цьому немає необхідності, але на копіях необхідно, бо не буде працювати USB інтерфейс. У цьому випадку це був CH340. Далі необхідно налаштувати само середовище Arduino.

У вкладці Інструменти необхідно вибрати плату (рис. 3.6).

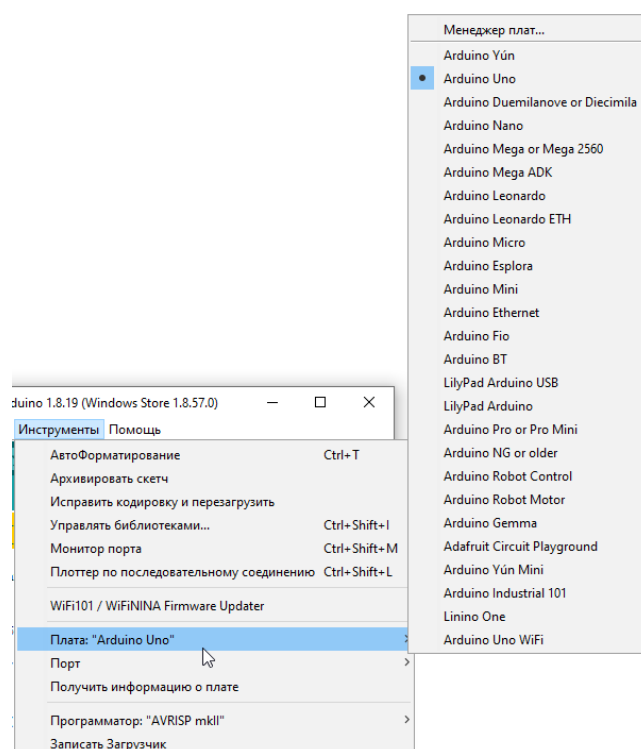


Рисунок 3.6 – Вкладка «Інструменти» в Arduino IDE

Після цих дій для завантаження прошивки на плату необхідно вибрати її COM порт (рис. 3.7).

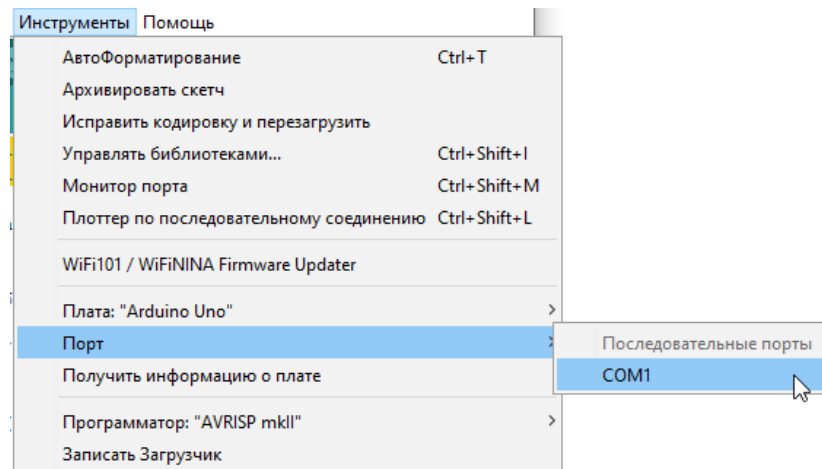


Рисунок 3.7 – Вкладка «Порт» в Arduino IDE

Після цих дій необхідно натиснути кнопку завантаження (рис. 3.8).

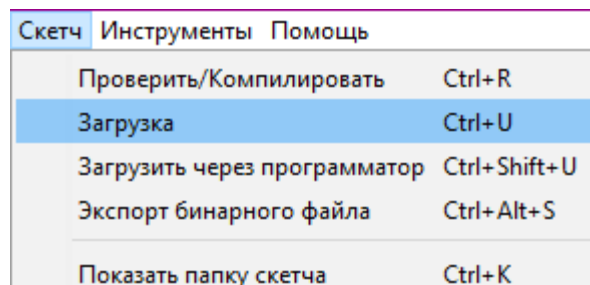


Рисунок 3.8 – Кнопка завантаження в Arduino IDE

Далі треба перейти до програмної реалізації в середовищі програмування Arduino. В нашому випадку використовується 3 бібліотеки та 2 функції:

- AM2320 library – бібліотека призначена для роботи з датчиком температури і вологості AM 2320;
- Wire – бібліотека для роботи по протоколу I2C.

У програмному середовищі Arduino за замовчуванням використовується дві функції:

- Setup – функція ініціалізації, виконується при включенні мікроконтролера;

- Loop – функція викликає в нескінченному циклі.
- LiquidCrystal.h – забезпечує зв'язок із буквено-цифровими рідкокристалічними дисплеями (ЖК-дисплеями).

У setup функції ініціалізується мікроконтролер як ведений I2C пристрій, ініціалізується Serial port для налагодження, створюємо об'єкти для роботи з датчиком і світлодіодними індикаторами.

Далі в функції loop перевіряється доступність датчика і зчитується значення температури і вологості. Ці значення записуються в масиви, які виступають буферами для фільтрації показань. Фільтр для цих цілей був обраний «наскрізне середнє» з розміром буфера рівному п'яти. Алгоритм отримання даних з датчика наведено на рисунку 3.9.



Рисунок 3.9 – Алгоритм отримання даних з датчику

Для налагодження використовується serial port і вбудований в середу розробки плоттер як показано на рисунку 3.10.

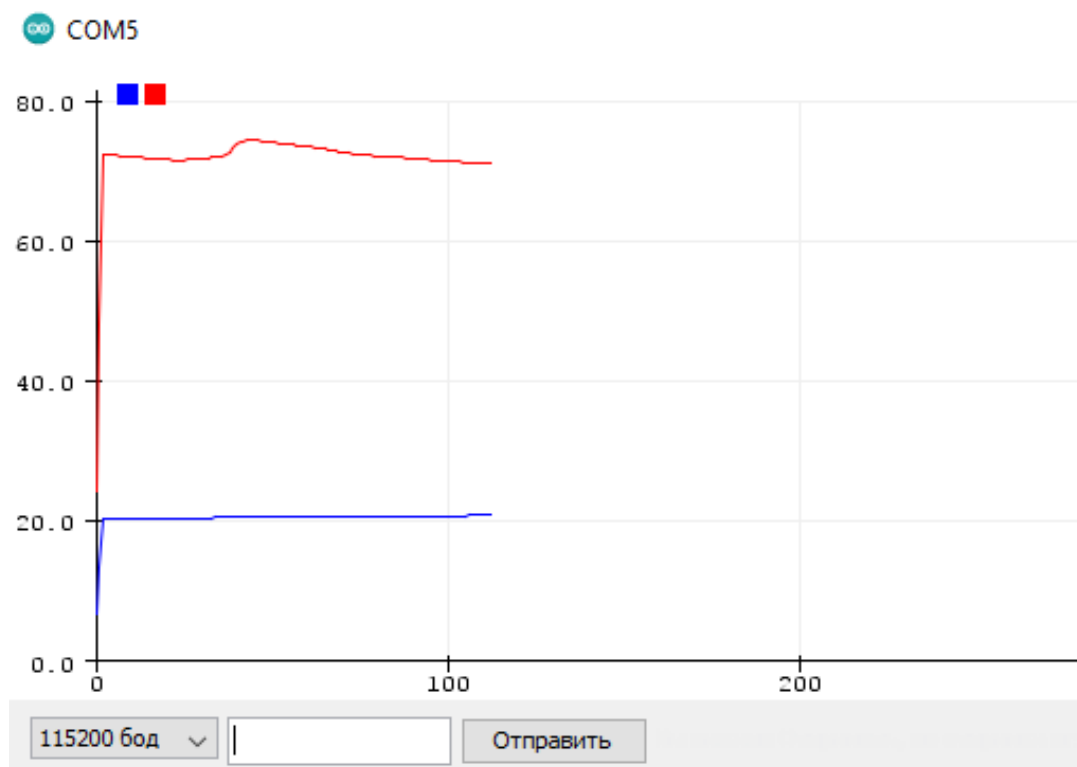


Рисунок 3.10 – Графік отриманих даних

Отримуємо такий результат. На графіку червоною лінією позначена відносна вологість, а синьою температура.

Також кожному із пристроїв у цій мережі необхідно надати унікальний код, за допомогою якого буде здійснюватися зв'язок між пристроями.

На рисунку 3.11 показаний увесь алгоритм роботи Arduino.

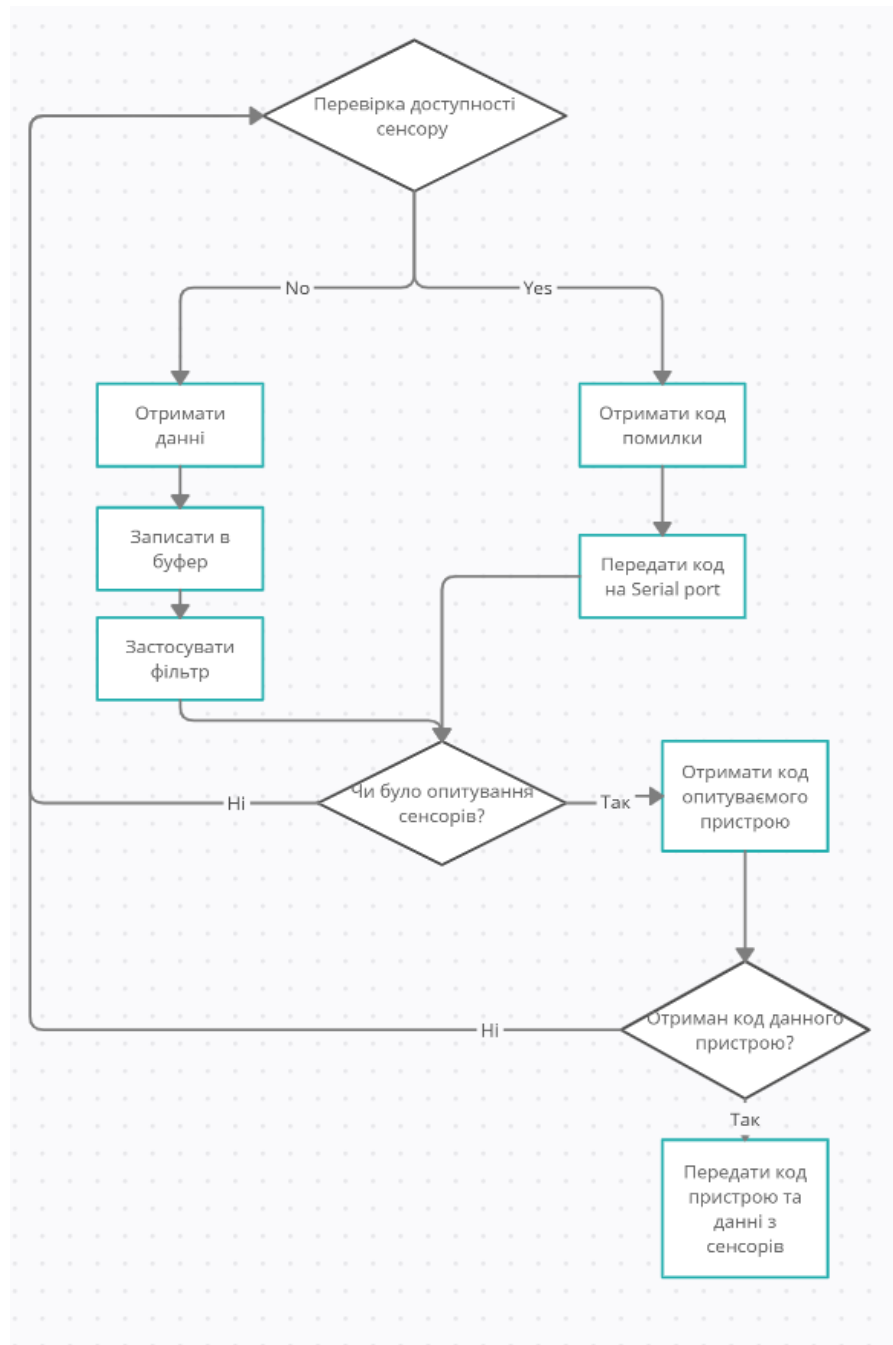


Рисунок 3.11 – Алгоритм роботи Arduino

Далі переходимо до моделювання схеми бездротової сенсорної мережі. Для моделювання була обрана веб-програма Tinkercad. Нижче на рис. 3.12 наведена розроблена модель системи.

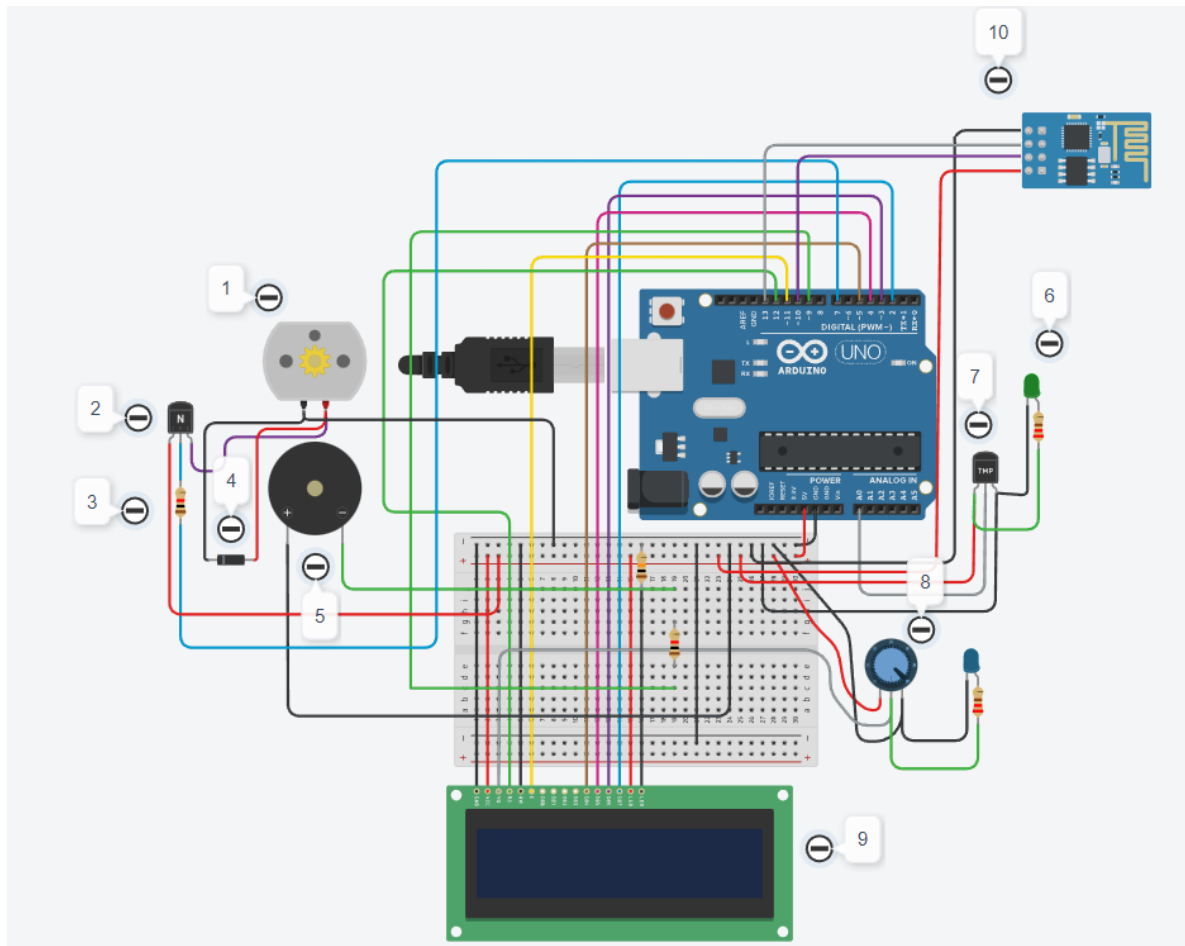


Рисунок 3.12 – Модель бездротової сенсорної мережі у Tinkercad

- 1 – Електродвигун постійного струму;
- 2 – NPN-транзистор;
- 3 – Резистори;
- 4 – Діод;
- 5 – Зумер;
- 6 – Світлодіоди;
- 7 – Датчик вологості та температури - RHT03;
- 8 – Потенціометр;
- 9 – Рідко-кристалічний дисплей;
- 10 – Радіомодуль.

У таблиці 3.1 наведено опис функціонального призначення кожного датчика.

Таблиця 3.1 Опис функцій датчиків системи

№	Назва датчика	Опис
1	Електродвигун постійного струму	Використовується для автоматичного включення/відключення кондиціонера. Спрацьовує при перевищенні в приміщенні заданої температури і автоматично вимикається при досягненні заданої нам температури.
5	Зумер	Видає звуковий сигнал при підвищенні температури до рівня вище оптимального у приміщенні.
6	Світлодіоди	Використовується для візуалізації функціонування приладу.
7	Датчик вологості та температури - RHT03	Вимірює температуру та відносну вологість повітря в приміщенні.
9	РК-дисплей	Видає всю потрібну інформацію, що надходить з інших датчиків. Служить візуальним моніторингом датчиків системи.
10	Радіомодуль nRF24L01	Радіомодуль, що поєднує в собі передавач та приймач, що працюють на частоті 2,4 ГГц. Використовується для обміну даними між різними пристроями.

Програмний код автоматизації цієї підсистеми приведено у додатку А.

3.4 Створення серверної частини WoT-додатка server.js із застосуванням фреймворку express

Завдяки express можна швидко і легко запустити сервер і передавати необхідні дані клієнта. Тк буде проходити моніторинг через браузер, необхідно створити веб-сторінку. Express надає на вибір 2 підходи — статичний і динамічний. Перевагою статичного підходу є відносна простота і зручність, проте необхідність змінювати деякі блоки на видимій частині сайті автоматично може викликати труднощі. Динамічний же тип навпаки має трохи складніший, куди менш зручний, але дозволяє з легкістю змінювати абсолютно будь-які параметри на відображається сторінці. Також ці підходи можна поєднувати один з одним. Оскільки у нашому випадку достатньо всього однієї

сторінки, і не планується використовувати складні анімації і скрипти, був обран динамічний підход.

У файл `app.js`, потрібно підключити пакети `express`, `raspi` і `raspi-I2C`.

```
const express = require("express");
```

```
const raspi = require('raspi');
```

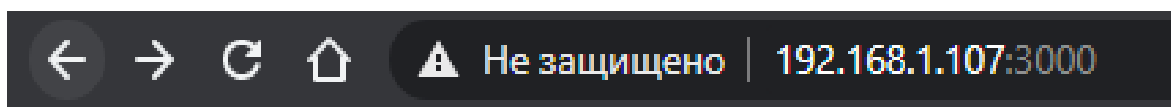
```
const I2C = require('raspi-i2c').I2C;
```

Також створюємо об'єкт додатку `express` та `raspi-I2C`.

```
const app = express();
```

```
const i2c = new I2C();
```

Далі створюємо функцію, яка буде викликатися при зверненні клієнта до `http` сервера по маршруту `«/»` за допомогою методу `Get`. Завдяки бібліотеці `raspi-I2C` не потрібно працювати з пінами `GPIO` у коді напряду, достатньо скористатися методом `readSync()`. Вона відправляє на вказану адресу (в нашому випадку `0x04`) запит, який містить у собі унікальний номер сенсору, а потім чекає на передачу даних. Також у ній можна вказати розмір буферу, щоб одразу записати усе в масив. У цій функції потрібно створити об'єкт `I2C` і у циклі передати по шині на адресу бездротового модулю запит з кодом сенсору, а після отримуються дані, які записуються в буфер. Дані з цього буфера відправляються разом зі сторінкою клієнту завдяки методу `send`. Ну і в самому кінці коду програми включається прослуховування на `3000` порт. Результат виконання програми зазначено на рисунку 3.13.



22 48

Рисунок 3.13 – Демонстрація роботи WoT-додатку

Алгоритм опитування дуже простий. В нас є `127` адрес, та по черзі їх треба опитати. Затримка між опитуваннями – `500мс`. Наша модель має усього `1`

сенсор. В залежності від потреб можна збільшити кількість сенсорів, але дальність цього модулю складає максимум 100 метрів на відкритій місцевості, тому це не має сенсу (рис. 3.14).



Рисунок 3.14 – Структура WoT-додатку

Далі приступаємо до оформлення сайту. Був обран темно-сірий і сірий кольори для оформлення сторінки. Фон буде темним, а сам текст – білим. Було вирішено зробити все в мінімалістичному стилі, що імітує термінал і символічний графічний інтерфейс. Програмний код приведено у додатку Б. Графічний інтерфейс показано на рисунку 3.15.

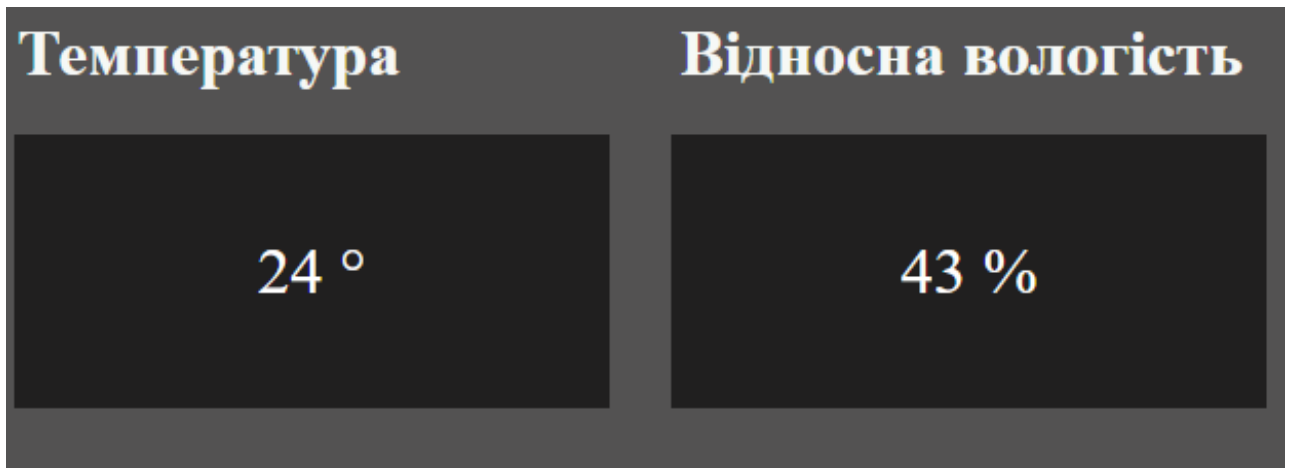


Рисунок 3.15 – Графічний інтерфейс користувача

3.5 Висновки за розділом 3

У розділі був приведений детальний опис створення додатку з етапу встановлення операційної системи на Raspberry Pi до моменту розгортання системи у мережі Internet. Були надані всі необхідні бібліотеки, був описаний увесь алгоритм роботи та схема підключення пристроїв. Також продемонстровано графічний веб-інтерфейс користувача. Ця система дуже гнучка, та за необхідністю можна легко підключити до 127 пристроїв навіть у процесі роботи.

У процесі даної роботи був створений додаток що збирає дані з пристроїв, та надає користувачу доступ по протоколу http у режимі реального часу.

ВИСНОВКИ

Під час написання кваліфікаційної магістерської роботи, були визначенні головні поняття дослідження: «бездротова сенсорна мережа», «топологія сенсорних мереж», «синхронізація».

Сенсорні мережі також можна описати їх логічною топологією - методом, який вони використовують для переміщення даних по мережі. Існує два типи логічної топології: спільні медіа та на основі маркерів. У топології спільного медіа всі вузли можуть отримати доступ до транспортного медіа, коли захочуть. Це може призвести до зіткнень, якими необхідно керувати за допомогою протоколу уникнення зіткнень.

Для досягнення мети роботи було:

1. Проведено аналіз методів та особливостей роботи сенсорної мережі показано, що в даний час моделювання та проектування бездротових сенсорних мереж є дуже актуальною темою для досліджень у всьому світі.

2. Визначено, що через складність та тривалість налаштування БСМ широке застосування отримали різні системи імітаційного моделювання мереж, які дозволяють користувачам ізолювати різні фактори за допомогою налаштування параметрів.

3. Приведено детальний опис створення додатку з етапу встановлення операційної системи на Raspberry Pi до моменту розгортання системи у мережі Internet. Були надані всі необхідні бібліотеки, був описаний увесь алгоритм роботи та схема підключення пристроїв. Також продемонстровано графічний веб-інтерфейс користувача. Ця система дуже гнучка, та за необхідністю можна легко підключити до 127 пристроїв навіть у процесі роботи. У процесі даної роботи був створений додаток що збирає дані з пристроїв, та надає користувачу доступ по протоколу http у режимі реального часу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб. : Любавич, 2011. 312 с.
2. Проскочило А.В., Воробьев А.В., Зряхов М.С., Кравчук А.С. Анализ состояния и перспективы развития самоорганизующихся сетей" Экономика. Информатика, vol. 36, no. 19 (216), 2015, pp. 177-186.
3. Зеляновський М.Ю. Методи самоорганізації у спеціалізованих та сенсорних мережах бездротового доступу – <http://dSPACE.nbuiv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/27770/22-Zeljanovskij.pdf?sequence=7>
4. Дніпровська А.М., Жук О.В., Сова О.Я. Метод динамічної побудови топології бездротової сенсорної мережі з мобільною базовою станцією / // Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО: X науково-практ.конфер. – 9 – 10 листопада 2017 р. – Київ, 2017. – С. 36–40.
5. <https://crashbox.ru/boot-disk/oblasti-primeneniya-besprovodnye-sensornye-seti-bss-realizaciya-peredovogo/>
6. Ye F. PEAS: A Robust Energy Conserving Protocol for Long-lived Sensor Networks / F. Ye, G. Zhong, S. Lu, L. Zhang // In proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). – 2003.
7. Ефименко М. С., Клымов С. И., Саткенов Р. Б. Беспроводные сенсорные сети // Молодой ученый.—2018.—№51.— С. 40-42. — URL <https://moluch.ru/archive/237/55115>
8. Zhang H. Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks / H. Zhang, J. Hou // Department of Computer Science, UIUC UIUCDCS-R-2003-2351. – 2003.
9. Балонін Н. А. Бездротові персональні мережі на основі ZigBee. Навчальний посібник / Н. А. Балонін, М. Б. Сергєєв. - Санкт-Петербург: ГУАП,

2014. - 58 с.

10. Плоскун, І. О. Оптимізація маршруту мобільного стоку у бездротових сенсорних мережах [Текст] / І. О. Плоскун, В. С. Марчук // Матеріали ХХ ювілейного міжнародного форуму «Радіoeлектроніка та молодь у ХХІ столітті». - 2016. - Т. 4. - С. 57-58.

11. Варгаузін В.А. Радіомережі для збору даних від сенсорів, моніторингу та управління на основі стандарту IEEE 802.15.4 // ТелеМультіМедіа. 2015. № 6. - С. 23-27.

12. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишневский, А. И. Ляхов, С. Л. Портной, И. В. Шахнович - М. : Техносфера, 2005. - 592 с.

13. Жук О.В. Аналіз методів управління топологією бездротових сенсорних мереж / Жук О.В., Романюк А.В., Ткаченко Д.В. // Збірн. наукових праць ВІПІ. – 2017. – № 2. – С. 41–47.

14. Мельнікова Л.І., Лінник О.В., Кривошопка М.В., Барсук В.О. Оптимізація маршруту мобільного стока в бездротовій сенсорній мережі // Проблеми телекомунікацій. - №1(24). - 2019. - С. 104-112.

15. Комаров М. М. Розробка і дослідження методу енергетичної балансування бездротової стаціонарної сенсорної мережі з автономними джерелами живлення / М.М. Комаров.-М .: 2012 р - 125 с.

16. Комаров М. М. Позіціонування датчиків бездротової мережі як спосіб енергозбереження / М.М. Комаров, Л.С. Восків.-М .: Датчики і системи. 2012 р - 305 с.

17. Вабищевич А. Н. Определение положения в пространстве элементов беспроводной сенсорной сети с помощью инерциальных сенсоров // Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ 2010. М.: МИЭМ, 2010. С. 151-152.

18. Narayanaswamy S. Power control in ad hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol / S. Narayanaswamy, V. Kawadia, R. Sreenivas, P. Kumar // In proceedings of European Wireless. – 2002.

19. Santi P. The Critical Transmitting Range for Connectivity in Sparse Wireless Ad Hoc Networks, / P. Santi, D. Blough // In proceedings of IEEE Trans. on Mobile Computing. – 2003.
20. Kirousis L. Power Consumption in Packet Radio Networks / L. Kirousis, E. Kranakis, D. Krizanc, A. Pelc // Theoret. Comput. Sci. – 2000. – P. 289 – 305.
21. D. Blough. On the Symmetric Range Assignment Problem in Wireless Ad Hoc Networks / D. Blough, M. Leoncini, G. Resta, P. Santi // In proceedings of the IFIP Conference on Theoretical Computer Science. – 2002.
22. V. Rodoplu. Minimum Energy Mobile Wireless Networks / V. Rodoplu, T. Meng // IEEE J. Select. Areas Comm. – 1999. – P. 1333 – 1344.
23. J.Pan. Topology Control for Wireless Sensor Networks / J. Pan, Y. T. Hou, L. Cai, Y. Shi, S. X. Shen // In proceedings of ACM Mobicom' 03. – 2003.
24. Основи теорії телекомунікаційних систем: підручник. Під ред. Поповського В.В. - Харків: ХНУРЕ, 2018. - 368 с.
25. Мельнікова Л.І., Лінник О.В.,Кривошاپка М.В., Барсук В.О. Застосування евристичної процедури багатокритеріальної оптимізації до вибору варіанта мовного кодеку в IP-мережі // Проблеми телекомунікацій. - 2020. – 1(26). – С.23-32.– Режим доступу: http://pt.nure.ua/wpcontent/uploads/2021/03/201_melnikova_codec.pdf.
26. Кривошاپка Н.В., Барсук В.А Пошук оптимального маршруту мобільного стоку в бездротовій сенсорній мережі за допомогою генетичного алгоритму // Матеріали шостої Міжнародної науково-технічної конференції "Информатика, управление и искусственный интеллект (ИУИИ-2019)», - Харків, НТУ "ХПИ". – 2019. – С. 37-38.
27. Мельникова Л.И., Барсук В.А., Кривошайпка Н.В Адаптивное управление мощностью передачи в сетях мобильной связи // Матеріали шостої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку ЕМС- 2020». – Харків, ХНУРЕ. Том 4. – 2020. – С. 38-41.
28. F. Kuhn. Geometric Ad-Hoc Routing: Of Theory and Practice / F. Kuhn, R.

Wattenhofer, Y. Zhong, A. Zollinger // In proceedings of ACM PODC. – 2003.

29. S. Douglas. Location proxies and intermediate node forwarding for practical geographic forwarding / S. Douglas, D. Couto, R. Morris // MIT Laboratory for Computer Science MIT-LCS-TR-824. – 2001.