

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації**

«На правах рукопису»
УДК 004.722.2+004.716

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Надія БУРАУ
«__» _____ 20__ р

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно - інтегровані технології
та системи навігації і керування»**

зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Розробка структури взаємодії елементів системи Smart-home»

Виконав:

студент VI курсу, групи ПГ-91мп

Білоус Олександр Юрійович _____

Науковий керівник:

Доцент каф. ПСОН, к.т.н., доц.,

Павловський Олексій Михайлович _____

Консультант з розробки стартапу:

Доцент каф. менеджменту, д.е.н., доц.,

Бояринова Катерина Олександрівна _____

Рецензент:

Доцент каф. ПБ, к.т.н., доц.,

Андрєєва Олена Вікторівна _____

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

Студент _____

Київ – 2020 року

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

**Приладобудівний факультет
Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітньо-професійна програма - Комп'ютерно - інтегровані технології та системи навігації і керування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«___» _____ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Білоусу Олександрю Юрійовичу**

1. Тема дисертації «Розробка структури взаємодії елементів системи Smart-home», науковий керівник дисертації Павловський Олексій Михайлович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження Розумний дім.
4. Предмет дослідження Створення алгоритму взаємодії екосистеми пристроїв Розумного будинку.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити
 - 1) Огляд протоколів взаємодії пристроїв у межах Розумного будинку та існуючих на їх підставі рішень;
 - 2) Огляд існуючих алгоритмів взаємодії пристроїв у Розумному будинку;
 - 3) Розробка алгоритму створення та модернізації мережі Розумного будинку;
 - 4) Створення макетного зразку Розумного будинку;
 - 5) Розробка апаратно-програмного комплексу для тестування створеного алгоритму;
 - 6) Оцінка отриманого алгоритму виходячи з результатів, отриманих на макеті.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу Ілюстративні матеріали, що розкривають суть дослідження

7. Орієнтовний перелік публікацій 2 матеріали науково-технічних конференцій у наукових збірниках

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проект	доц. Бояринова К. О.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка

Студент

(підпис)

Олександр БІЛОУС
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Олексій ПАВЛОВСЬКИЙ
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація за темою «Алгоритми взаємодії екосистеми пристроїв типу Smart Home» містить: 38 ілюстрацій, 28 таблиць, 2 додатки, 32 джерела.

В даній роботі розглядається алгоритм маршрутизації мережі Розумного будинку, що опирається на технологію «mesh» та алгоритм двійкового прошитого дерева, і призначений для домашньої автоматизації.

Автоматизація навколишнього середовища відіграє велику роль у житті сучасної людини. Пристрої можуть самі контролювати параметри навколишнього середовища людини, без необхідності втручання у їх роботу. Останні роки особливо актуальною стала домашня автоматизація, а саме принципи розумного будинку – автоматизованого середовища, яке складається з безлічі пристроїв – блоків, яка взаємодіють одне з одним і людиною-користувачем. Щорічний темп приросту доходу у цій області рівний 16%, а до 2025 року загальний дохід від технологій Розумного будинку має скласти 19525 млн. дол. США.

Одним з найважливіших питань при розробці Розумного будинку є взаємодія усіх його пристроїв один з одним. Наразі немає універсального рішення цього питання. Усі сучасні протоколи зв'язку мають певні недоліки, серед яких можна виділити такі, як мала надійність та не можливість підключення дуже великої кількості пристроїв до мереж типу «зірка», мала пропускна здатність та велика складність реалізації мереж типу «mesh».

Існує багато способів вдосконалення технологій маршрутизації, але треба враховувати декілька основних обмежень, які накладаються на ці технології, для використання їх на кінцевих пристроях Розумного будинку. Більшість пристроїв Розумного будинку, такі як вимикачі, термометри, пристрої пожежної та звичайної сигналізації, це пристрої з малою потужністю, які можуть працювати від одного акумулятору роками.

Алгоритм маршрутизації має бути енергоефективним. Користувач може змінювати набір пристроїв у будинку, щось купувати, щось прибирати, а отже мережа має бути досить гнучкою та бездротовою. Також мережа має бути досить надійною та не мати збоїв у критичних ситуаціях.

Швидкість та надійність передачі даних важлива тема не лише для Розумних будинків, а й взагалі для людства в цілому. З кожним роком з'являються нові технології та стандарти, що пришвидшують передачу інформації, а деякі види бездротових мереж навчилися це робити так само швидко та надійно, як дротові варіанти. Висока швидкість передачі даних дозволяє обробляти більше інформації, що може надати системі більше даних про людину та розробляти складні реакції на нетривіальні події, що трапляються у автоматизованому середовищі, такі як виявлення стану здоров'я людини та автоматичний виклик швидкої допомоги додому.

Підвищення швидкості та надійності передачі даних бездротових мереж – тема, яка не втрачає своєї актуальності з часом. Це допомагає створювати більш складні та інтелектуальні рішення під час автоматизації домашнього середовища людини. Більш того, ці результати можна використовувати і в інших областях, таких як інтернет речей, зокрема інтернет роботизованих речей.

Метою дисертаційного дослідження є проектування алгоритму створення та модернізації мережі РД враховуючи планування кімнат, бар'єри та наявні виконавчі пристрої та датчики на основі протоколів Wi-Fi та ZigBee.

Для досягнення цієї мети необхідно сформулювати і вирішити наступні завдання:

- Огляд існуючих алгоритмів взаємодії пристроїв у Розумному будинку;
- Розробка алгоритму створення та модернізації мережі Розумного будинку на основі протоколів Wi-Fi та ZigBee;

- Створення макетного зразку Розумного будинку;
- Розробка апаратно-програмного комплексу для тестування створеного алгоритму;
- Оцінка отриманого алгоритму виходячи з результатів, отриманих на макеті. Оцінка надійності, затримок та швидкодії отриманої мережі.

Об'єктом дослідження є екосистема пристроїв РД.

Предметом дослідження є створення алгоритму взаємодії екосистеми пристроїв РД.

Методи дослідження та досягнення позитивного результату базуються на функціональному тестуванні та тестуванні методом навантаження, а саме вимірюванні швидкості передачі пакетів від одного пристрою мережі макетного зразку до іншого. Також проводиться стрес-тестування для того щоб зрозуміти, скільки пакетів втрачає мережа при максимальному навантаженні. Додатково до цього проводиться моделювання у середовищі симуляції мереж щоб зрозуміти, як поводить себе мережа з багатьма пристроями.

Наукова новизна: Вдосконалено алгоритм маршрутизації mesh за рахунок використання двійкового прошитого дерева та різних типів маршрутизації для кімнат з різною архітектурою.

Практичне значення одержаних результатів. Наведені рекомендації щодо вдосконалення маршрутизації мережі ZigBee, які не потребують значної зміни стандарту і пришвидшують швидкість передачі пакетів та збільшення надійності мережі. Надано рекомендації щодо подальших напрямків розробки по даній тематиці.

Апробація результатів дисертації:

Результати магістерської дисертації були оприлюднені на XIII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» та XVI Науково-

практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні» (Київ, 2020 р.).

Публікації.

1. Білоус, О. Ю. Алгоритми та протоколи взаємодії пристроїв системи Smart Home / О. Ю. Білоус, О. М. Павловський // XIII Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 13-14 травня 2020 р., м. Київ, Україна : збірник праць конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 18–20.

2. Білоус О.Ю. Структура мережі пристроїв системи Smart Home на основі протоколу Zigbee/ О. Ю. Білоус, О. М. Павловський. // XVI Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні». 2020.

Ключові слова: *алгоритми маршрутизації, mesh, сітчаста мережа, Розумний Дім, ZigBee, AODV, прошите двійкове дерево, моделювання NS2, інтернет речей, інтернет робото-технічних речей, маршрутизація, бездротові технології, наднизька потужність.*

ABSTRACT

The master's dissertation on "Interaction Algorithm of Smart Home's devices ecosystem" contains 38 illustrations, 28 tables, 2 applications, 32 sources.

This paper considers the routing algorithm of the Smart Home network, which is based on "mesh" technology and the algorithm of binary threatened tree. It is designed for home automation.

Automation of environment plays an important role in the life of modern human. Devices can control the parameters of environment of the human, and don't have the need to interfere with their activities. In recent years, home automation has become especially relevant, and especially principles of a Smart Home - an automated environment consisting of many devices - units that interact with each other and the human user. The annual revenue growth rate in this area is 16%, and by 2025 the total revenue from Smart Home technologies should be \$ 19,525 million. USA.

One of the most important issues in the development of a Smart Home is the interaction of all its devices with each other. There is currently no universal solution to this issue. All modern communication protocols have certain disadvantages, among which are such as low reliability and inability to connect a very large number of devices to "star" networks and low bandwidth and high complexity of mesh networks.

There are many ways to improve routing technology, but there are a few basic limitations to these technologies to use on Smart Home End devices. Most Smart Home devices, such as switches, thermometers, fire and conventional alarm devices, are low-power devices that can run on a single battery for years. The routing algorithm must be energy efficient. The user can change the set of devices in the house, buy something, erase something, and therefore the network should be quite flexible and wireless. Also, the network must be reliable and don't fail in critical situations.

Speed and reliability of data transfer is an important topic not only for Smart Homes, but also for humanity as a whole. New technologies and standards are emerging every year to speed up the transfer of information, and some types of wireless networks have learned to do so as quickly and reliably as wired options. High data rates allow more information to be processed, which can provide the system with more human data and develop complex responses to non-trivial events that occur in an automated environment, such as detecting a person's health and automatically calling an ambulance home.

Improving the speed and reliability of wireless data transmission is a topic that does not lose its relevance over time. This helps to create more complex and intelligent solutions while automating a person's home environment. Moreover, these results can be used in other areas, such as the Internet of Things, in particular the Internet of Robotic Things.

The aim of the study is to design an algorithm for the creation and modernization of the Smart Home network taking into account the layout of rooms, barriers and existing actuators and sensors based on Wi-Fi and ZigBee protocols.

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

- Review of existing algorithms for device interaction in the Smart Home;
- Development of an algorithm for creating and upgrading the Smart Home network based on Wi-Fi and ZigBee protocols;
- Creating a model of a Smart Home;
- Development of hardware and software for testing the created algorithm;
- Evaluation of the obtained algorithm based on the results obtained on the layout. Estimation of reliability, delays and speed of the received network.

The object of the study is the ecosystem of Smart Home devices.

The subject of the study the creation of an algorithm for the interaction of the ecosystem of Smart Home devices.

Methods of research and achievement of a positive result are based on functional testing and stress testing, namely measuring the transmission rate of packets from one device of the model network to another. Stress testing is also performed to understand how many packets the network loses at maximum load. In addition, simulations are performed in a network simulation environment to understand how a network behaves with many devices.

Scientific novelty: Improved mesh routing algorithm by using threatened binary tree and different types of routing for rooms with different architecture.

The practical significance of the results obtained. This paper has recommendations for improving the routing of the ZigBee network, which do not require significant changes in the standard and speed up packet transmission and increase network reliability. Recommendations for further directions of development on this topic are given.

Approbation of dissertation results:

The results of the master's dissertation were published at the XIII All-Ukrainian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists «Look into the future of instrument making» (Kyiv, 2020) and XVI scientific-practical conferences of students, graduate students and young scientists «Efficiency and automation of engineering solutions in instrument making» (Kyiv, 2020).

Publications.

1. Belous, O. Yu. Algorithms and protocols of interaction of devices of the Smart Home system / O. Yu. Belous, OM Pavlovsky // XIII Scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists "Look into the future of instrument making", 13- May 14, 2020, Kyiv, Ukraine: Proceedings of the conference. - Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, 2020. - P. 18–20.

2. Bilous O.Yu. The structure of the network of devices of the Smart Home system based on the Zigbee protocol / O. Yu. Bilous, OM Pavlovsky. // XVI

Scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists
"Efficiency and automation of engineering solutions in instrument making". 2020

Keywords: *routing algorithms, mesh, network, Smart Home, ZigBee, AODV, threatened binary tree, NS2 simulation, Internet of Things, Internet of Robotic Things, wireless technology, ultra-low power*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	14
ВСТУП	15
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ.....	17
1.1 Загальний огляд технології Розумного Будинку	17
1.1.1 Визначення та історія поняття Розумного Будинку	17
1.1.2 Актуальність РД	18
1.2 Огляд основних протоколів зв'язку	20
1.2.1 Wi-Fi.....	21
1.2.2 Bluetooth.....	23
1.2.3 ZigBee.....	25
1.2.4 Thread	26
1.3 Огляд раніше виконаних робіт за напрямком дослідження	27
1.3.1 Роботи здійснені на основі протоколу Wi-Fi.....	27
1.3.2 Роботи здійснені на основі протоколу Bluetooth.....	29
1.3.3 Роботи здійснені на основі протоколу ZigBee.....	31
1.3.4 Роботи здійснені на основі протоколу Thread	33
1.4 Мета і задачі наукових досліджень	33
РОЗДІЛ 2. маршрутизація бездротових мереж розумного будинку.....	36
2.1 Загальні поняття архітектури мережі для різних протоколів.....	36
Архітектура мережі Wi-Fi.....	36
Архітектура мережі ZigBee.....	38
Архітектура мережі Thread	42
2.2 Алгоритми маршрутизації MESH	45
Cluster-Tree	45

AODVjr.....	46
Поєднання Cluster-Tree та AODVjr.....	46
2.3 Розробка власного алгоритму маршрутизації MESH.....	48
2.4 Висновок до розділу	56
РОЗДІЛ 3. Розробка макетного зразка Розумного Будинку	57
3.1 Технічні вимога до макетного зразка.....	57
3.2 Структурна схема МЗ	59
Вибір складових для реалізації МЗ.....	63
Процес збирання МЗ.....	65
3.3 Опис хабу OpenHub	66
3.4 Кластери ZigBee	68
3.5 Висновки до розділу	73
РОЗДІЛ 4. Тестування пропонованого алгоритму маршрутизації	74
4.1 Тестування на макеті	74
4.2 Моделювання на NS2.....	78
4.3 Порівняння з результатами існуючих робіт	84
4.4 Висновки до розділу	85
РОЗДІЛ 5. Розробка стартап-проекту «ZigBeeHome».....	87
5.1 Розробка стартап-проекту «ZigBeeHome».....	87
5.2 Опис ідеї.....	87
5.3 Технологічний аудит ідеї проекту.....	91
5.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	92
5.5 Розроблення ринкової стратегії проекту	101
5.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	105

5.7 Висновки до розділу	108
ВИСНОВКИ.....	110
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	112
ДОДАТОК А.....	116
ДОДАТОК Б	120

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

РД – Розумний Дім

КП – контролюючий пристрій

IoT – Internet of Things (Інтернет речей)

MAC – media access control (Управління доступом до середовища)

PHY – фізичний рівень мережі (Physical layer)

ED – Кінцевий пристрій

FTD – Пристрій Full Thread

REED – Пристрій, що відповідає вибору маршрутизатора

FED – Повний кінцевий пристрій

MED – Мінімальний кінцевий пристрій

SED – Сонний кінцевий пристрій

M3 – макетний зразок

AODVjr - Ad hoc On-Demand Distance Vector junior

NS-2 – Network Simulator 2

NS-3 – Network Simulator 3

ZCL – ZigBee Cluster Language

ОС – операційна система

OPNET – Optimum Network Performance

ВСТУП

Технології, якими люди користуються в повсякденному житті стрімко змінюються та вдосконалюються. Велика кількість людей користується розумною побутовою технікою, такою як сучасні системи клімат-контролю, роботи-пилососи, телевізори, розумні холодильники та пральні машини, системи відстеження закриття дверей та вікон, системи виявлення затоплення у будинку. Усі ці підсистеми можливо об'єднати в єдину систему Розумного Будинку.

Однією з актуальних проблем, що має вирішувати Розумний будинок, це спілкування пристроїв одне з одним. У людини може бути багато розумної техніки, яку досить складно об'єднати в єдину систему. На сьогоднішній день нема універсальної, дешевої, швидкої та надійної технології, що могла би впоратися з поставленою задачею.

На сьогоднішній день актуальною є розробка систем з топологією mesh, де усі пристрої можуть бути одночасно і комутаторами і передавачами сигналу. Подібні мережі відрізняються високою надійністю, якщо центральних маршрутизатор вийшов з ладу, великою гнучкістю та низькими витратами енергії. Але також подібні мережі відрізняє ряд недоліків, таких як складність реалізації маршрутизації, складні топології, дорогі комплектуючі.

Головними показниками, що визначають якість мережі, є її швидкість, гнучкість та надійність, що визначається стійкістю до великої кількості запитів та відсутністю можливості побудови топологічних структур типу занадто глибоких дерев чи mesh, де усі пристрої зв'язані з усіма іншими пристроями.

Метою дисертаційного дослідження є проектування алгоритму створення та модернізації мережі РД враховуючи планування кімнат, бар'єри та наявні виконавчі пристрої та датчики на основі протоколів Wi-Fi та ZigBee.

Для досягнення цієї мети необхідно сформулювати і вирішити наступні завдання:

- Огляд існуючих алгоритмів взаємодії пристроїв у Розумному будинку;
- Розробка алгоритму створення та модернізації мережі Розумного будинку на основі протоколів Wi-Fi та ZigBee;
- Створення макетного зразку Розумного будинку;
- Розробка апаратно-програмного комплексу для тестування створеного алгоритму;
- Оцінка отриманого алгоритму виходячи з результатів, отриманих на макеті. Оцінка надійності, затримок та швидкодії отриманої мережі.

Об'єктом дослідження є екосистема пристроїв РД.

Предметом дослідження є створення алгоритму взаємодії екосистеми пристроїв РД.

Методи дослідження та досягнення позитивного результату базуються на функціональному тестуванні та тестуванні методом навантаження, а саме вимірюванні швидкості передачі пакетів від одного пристрою мережі макетного зразку до іншого. Також проводиться стрес-тестування для того щоб зрозуміти, скільки пакетів втрачає мережа при максимальному навантаженні.

Наукова новизна: Вдосконалено алгоритм маршрутизації mesh за рахунок використання двійкового прошитого дерева та різних типів маршрутизації для кімнат з різною архітектурою.

Практичне значення одержаних результатів. Наведені рекомендації щодо вдосконалення маршрутизації мережі ZigBee, які не потребують значної зміни стандарту і пришвидшують швидкість передачі пакетів та збільшення надійності мережі. Надано рекомендації щодо подальших напрямків розробки по даній тематиці.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1 Загальний огляд технології Розумного Будинку

1.1.1 *Визначення та історія поняття Розумного Будинку*

Люди взаємодіють із навколишнім середовищем безліччю способів. Перебуваючи під впливом різних факторів навколишнього середовища, вони діють, реагують та пристосовуються у відповідності до цих факторів. Але можна змінити підхід і розглянути цю проблему навпаки, коли не людина пристосовується до свого навколишнього середовища, а навколишнє середовище пристосовується до людини [1]. Це може бути досягнуто шляхом автоматизації різних завдань, які люди виконують вручну, та за допомогою передбачення наступних дій людини-користувача. Також це призведе до необхідності надавати нових послуг та створення нових способів взаємодії людини та її навколишнього середовища. Розумний дім (РД) - це домашнє середовище, функціонування якого автоматично контролюється за допомогою штучного інтелекту, що дозволяє йому реагувати на поведінку своїх мешканців, роблячи їхнє життя зручнішим [2].

Стандартним підходом створення РД є їх комп'ютеризація. При цьому набір датчиків збирає дані про мешканців та про споживання ресурсів. Комп'ютери чи будь-які інші контролюючі пристрої (КП) з обчислювальною потужністю (наприклад мікроконтролери) аналізують ці дані та передбачають/виявляють дії мешканців та стан, у якому перебуває будинок. Потім КП реагують на ці дії та стани контролюючи сервіси, які вбудовані в будинок. Простим прикладом такої розумної поведінки є увімкнення світла, коли людина заходить у кімнату. Однак на меті ставиться реакція і на більш складні події, такі як виявлення, чи самотній літній мешканець будинку і чи погано він себе почуває (при цьому відбувається автоматичний виклик лікаря/родича літньої людини) [3].

У вересні 2003 р. Housing Learning & Improvement Network (Мережа навчання та вдосконалення житла) опублікувала визначення РД,

запропоноване Intertek, яке здійснило проект під назвою DTI Smart Homes Project. На думку Intertek, розумний дім - це "житло, що включає мережу зв'язку, яка з'єднує ключові електричні прилади та сервіси, і дозволяє їм дистанційно керувати, контролювати або здійснювати доступ до інших пристроїв та сервісів будинку" [2]. Це означає, що керування відбувається "віддалено" як усередині житла, так і зовні. Відповідно, розумний дім повинен містити три основні системи - це внутрішня мережа, інтелектуальне управління та автоматизований будинок [4]. Внутрішня мережа є основою розумного будинку, і вона може бути дротовою, кабельною та бездротовою. Інтелектуальне управління охоплює шлюзи для управління системами. Автоматизований будинок – це безпосередньо пристрої, вбудовані в будинок. Також домашні системи мають можливість використовувати сервіси та системи поза домом.

1.1.2 Актуальність РД

Крім вище написаного, тема РД досить актуальна з економічної точки зору. Економічний інформаційний ресурс statista надає наступні дані [5]:

- За прогнозами, дохід на ринку розумних будинків досягне 92 744 млн. доларів США у 2020 році;
- Очікується, що річний темп приросту доходу (CAGR 2020-2025) складе 16,1%, що призведе до прогнозованого обсягу ринку до 19525 млн. Дол. США до 2025 року;
- Проникність домогосподарств становитиме 9,1% у 2020 році, і до 2025 року, як очікується, досягне 21,3%;
- Очікується, що середній дохід від встановленого Розумного будинку в даний час складе 489,70 доларів США;
- Глобальне порівняння виявляє, що найбільше доходу приносять Сполучені Штати (25 246 млн. Доларів США у 2020 році).

На рис. 1.1 зображений прогнозований дохід від РД з плином часу

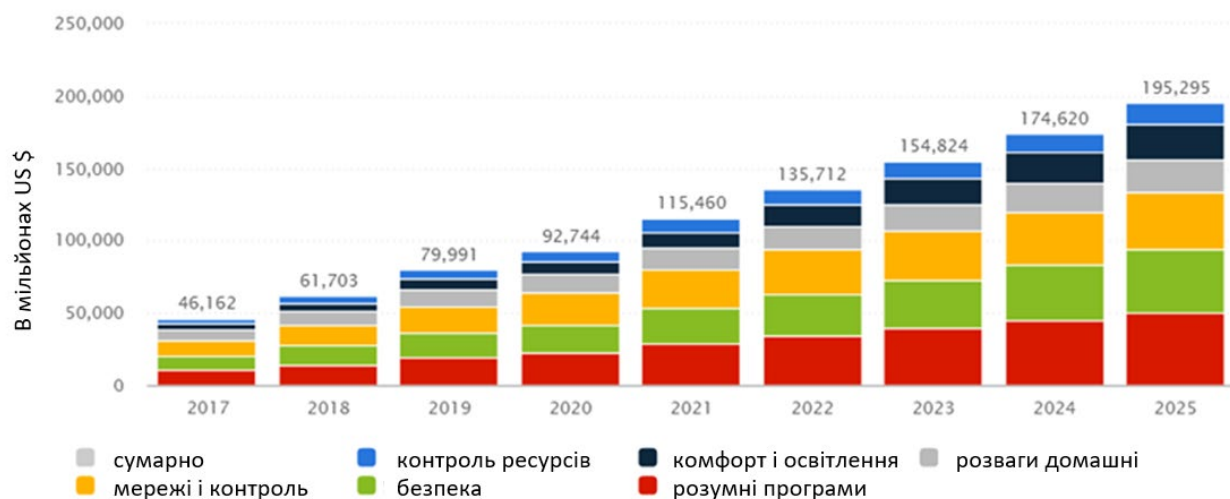


Рис. 1.1 Дохід від РД та його підсистем

Зацікавленість користувачів у темі РД також збільшується з часом, як це видно на рис. 1.2, що ілюструє кількість пошукових запитів за ключовим словосполученням «Smart House» у пошуковій системі Google на протязі останніх семи років [6].

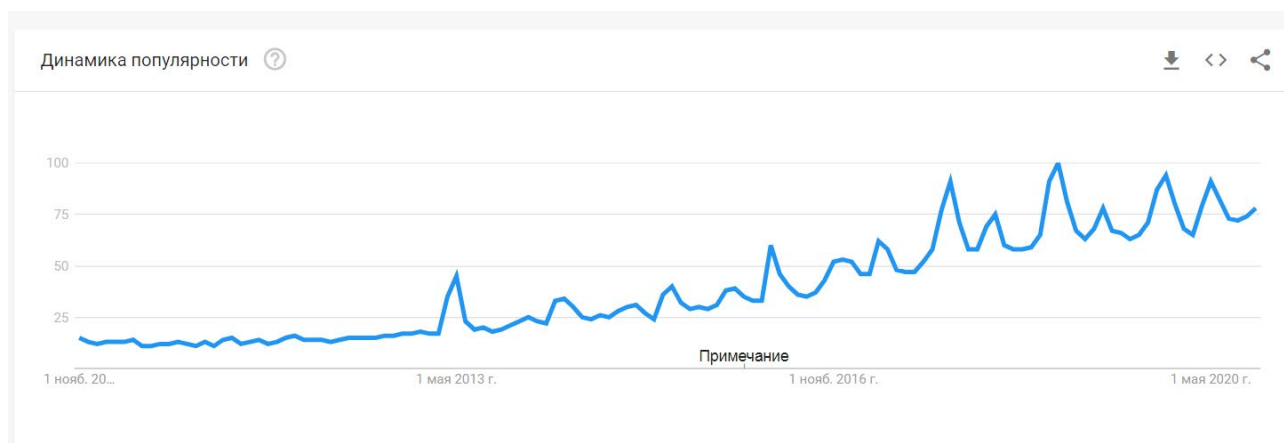


Рис. 1.2 Кількість пошукових запитів за словосполученням «Smart House»

У дослідницькому середовищі тема РД є досить популярною, що демонструє її актуальність з наукової точки зору. Кількість публікацій на тему РД з 2010 до 2016 року по заданим пошуковим запитам представлена у таблиці 1.1 [4].

Над концепцією РД працює велика кількість дослідницьких груп, таких як MIT, Siemens, Cisco, IBM, Xerox, Microsoft та ін. Даними дослідницькими

групами створено майже 20 домашніх лабораторій. Лише для них створено понад 5 мережевих протоколів і використано більше 7 методів штучного інтелекту [2].

Таблиця 1.1 Наукові роботи за пошуковими запитами у системі Google Scholar

Запит	Терм 1	Терм 2	Терм 3	Кількість результатів
Запит 1	Wireless Sensor Network	Smart Home	Smart Grid	919
Запит 2	Wireless Sensor Network	Home Automation	Smart Grid	775
Запит 3	Internet of Things	Smart Home	Smart Grid	1430
Запит 4	Internet of Things	Home Automation	Smart Grid	1000
Запит 5	IoT	Smart Home	Smart Grid	1050
Запит 6	IoT	Home Automation	Smart Grid	747

1.2 Огляд основних протоколів зв'язку

Розумний будинок забезпечує взаємозв'язок багатьох приладів, наприклад побутової техніки, датчиків, системи освітлення і т.д. У розвитку РД беруть участь багато різних технологій, які зазвичай ділять на три основні рівні: рівень додатків, рівень мережі та рівень сприйняття. Рівень сприйняття відповідає за збір інформації з оточення і служить інтерфейсом для взаємодії людей з об'єктами, що пов'язані між собою. Прагнення до більш зручного користування інтерфейсом призвело до розробки нових методів зондування. Рівень додатків включає у себе всю комп'ютерну логіку будинку [9].

У цій роботі буде розглядатися рівень мережі, а саме взаємодія різних приладів між собою, протоколи взаємодії та технічна реалізація цього процесу. Розгадатися будуть здебільшого бездротові мережі у зв'язку з тим,

що вони є більш поширеними для організації мережевого рівня саме розумного будинку. Бездротові мережі мають кілька переваг в порівнянні дротовими мережами, а саме [10]:

- Мобільність

Користувачі таких мереж можуть пересуватися, в свою чергу усі їх дані зберігаються централізовано. Якщо хочеться пересунути чи додати новий пристрій, не треба проводити додаткову проводку, чи прибирати стару. Також у бездротовій мережі немає портів, а сама мережа може бути розроблена навколо ідентифікації користувача [11].

- Простота та швидкість розгортання

В багатьох місяцях важко розгорнути традиційну дротову локальну мережу

- Гнучкість

Відсутність кабелів означає відсутність повторного підключення. Бездротові мережі дозволяють користувачам швидко формувати невеликі аморфні мережі [10,12]. Не виконуючи ніяких ремонтних робіт можна перенести мережу пристроїв з одного будинку до іншого. Додавання нового пристрою до мережі просте через відсутність кабелів.

- Вартість

У деяких випадках за допомогою бездротової технології можна значно зменшити витрати на її встановлення.

1.2.1 Wi-Fi

Загальні відомості

Wi-Fi - це сімейство мережевих протоколів на базі сім'ї стандартів IEEE 802.11. Здебільшого ця технологія використовується для локальних мереж з доступом до Інтернету [10].

Wi-Fi використовує різні частини протоколів IEEE 802 і була, у першу чергу, розроблена як аналог дротової мережі Ethernet. Ці технології мають повну взаємну сумісність. Здебільшого пристрої можуть приєднатися до однієї мережі як через технології Wi-Fi, так і через Ethernet, без додаткових доопрацювань в архітектурі мережі та капіталовкладень у неї. Різні версії Wi-Fi регулюються різними протоколами сімейства IEEE 802.11 і мають різні радіодіапазони, опорні частоти та швидкості передачі сигналу. Найчастіше технологія Wi-Fi використовує радіочастоти у 2,4 ГГц UHF та 5 ГГц. Вони діляться на деяку кількість каналів, які розподіляються між різними мережами. При цьому деякий фіксований момент часу одним каналом може користуватися єдина мережа [13].

Сучасні точки доступу можуть передавати сигнал на відстані від 20 метрів до 3 кілометрів. Здебільшого радіус сигналу досягає 100-150 метрів. Швидкість сучасної мережі може перевищити 1 Гб/с, що відповідає швидкості дротової мережі Ethernet.

Серед недоліків мережі Wi-Fi можна виділити [10]:

- Здебільшого високе поглинання сигналу Wi-Fi. Отже найкраще цю мережу використовувати у межах прямої видимості. Такі перешкоди як стіна, стовпи, побутова техніка і навіть сама людина можуть відчутно зменшити дальність дії мережі. Але в цього недоліку є один плюс – дана особливість дає можливість максимально відділяти сусідні мережі, щоб вони не створювали одна одній перешкод;
- Wi-Fi більш вразлива до атак технологія, ніж дротові мережі. Усі, хто знаходяться у межі сигналу мережі може спробувати отримати доступ до неї. Зазвичай для вирішення цієї проблеми мережі використовують імена та паролі, які необхідні для шифрування пакетів, що передає мережа. Це допомагає запобігати

підслуховуванню. Найчастіше під час підключення використовується захищений доступ WPA;

- Високе споживання енергії;
- Висока популярність частоти 2,4 ГГц, що призводить до виникнення перешкод та нестабільності сигналу. Тому рекомендовано використовувати частотний діапазон 5 ГГц, який є більш перспективним, через перевантаженість частоти 2,4 ГГц.

1.2.2 Bluetooth

Загальні відомості

Bluetooth - це стандарт бездротової технології передачі даних між пристроями за допомогою дециметрових радіохвиль (радіохвиль ультрависоких частот) в промислових, медичних, наукових радіодіапазонах (від 2.402 ГГц до 2.480 ГГц). Створений він був як альтернатива індустріальним кабелям RS-232 [14].

Bluetooth - це мережева технологія, спрямована на пристрої з високою енергетичною ефективністю та малим радіусом дії. Він був розроблений компанією Ericsson, але наразі регулюється як відкрита специфікація Bluetooth Special Interest Group. Спочатку Bluetooth розглядався лише як технологія заміни дроту на невеликих відстанях для мобільних пристроїв. Випадок використання, що описувався найчастіше, це так званий "бездротовий комп'ютер", що складається з декількох пристроїв, включаючи персональний комп'ютер, можливо, ноутбук, клавіатуру, мишу, джойстик, принтер, сканер, які оснащені картою Bluetooth. Між цими пристроями немає кабельних з'єднань, і Bluetooth має забезпечити безперебійний зв'язок між усіма ними, по суті замінюючи те, що до цього досягалося поєднанням послідовних і паралельних кабелів, та інфрачервоних ліній зв'язку. Однак наразі це не єдине можливе використання технології Bluetooth. Через те, що вона має низьке споживання енергії та потенційно низьку вартість, цей

стандарт є привабливим для створення мереж мобільних пристроїв з низькою потужністю акумулятора [12].

Пристрої Bluetooth діляться на 3 класи, як показано у таблиці 1.2 [14].

Таблиця 1.2. Класи пристроїв Bluetooth

Клас	Максимальна потужність (мВ)	Радіус дії (м)
1	100	100
1.5	10	20
2	2.5	10
3	1	1
4	0.5	0.5

До мінусів технології можна віднести наступні [14]:

- Швидкість

Bluetooth 3.0 та Bluetooth 4.0 мають швидкість передачі даних 25 Мбіт/с. Оскільки Bluetooth є енергоефективною технологією, механізм передачі даних тут повільніший. Через це Bluetooth не використовується для передачі файлів великого розміру, таких як аудіо та відео. Зазвичай передаються лише невеликі зображення та документи [15].

- Діапазон

Максимальний діапазон, який можна досягти за допомогою з'єднання Bluetooth, становить 100 метрів. Як правило, Bluetooth має діапазон зв'язку у 10 метрів.

- Безпека

У Bluetooth досить низький рівень безпеки, навіть порівняно з Wi-Fi.

- Сумісність

Незважаючи на те, що більшість реалізацій Bluetooth засновані на єдиному стандарті, все ще існують проблеми сумісності пристроїв Bluetooth.

Це пояснюється багатьма причинами, такими як профілі, драйвери та версії. Це особливо стосується Bluetooth 4.0.

- Перебої

Популярність Bluetooth призводить до нестабільності сигналу та створенні перешкод для Bluetooth мереж, що знаходяться в одній зоні покриття. Це відчутно значно більше, ніж при використанні протоколу Wi-Fi.

1.2.3 ZigBee

Загальні відомості

ZigBee - це стандарт, який визначає набір протоколів зв'язку для бездротових мереж з невеликим діапазоном дії та з низькою швидкістю передачі даних. Бездротові пристрої на основі ZigBee працюють в діапазонах частот 868 МГц, 915 МГц і 2,4 ГГц. Максимальна швидкість передачі даних становить 250 Кбіт на секунду. ZigBee орієнтована на пристрої, що працюють від акумуляторів, де основними вимогами є низька швидкість передачі даних, низька вартість та тривалий час автономної роботи. У багатьох випадках при використанні ZigBee загальний час, коли бездротовий пристрій займається будь-яким видом діяльності, дуже обмежений; пристрій проводить більшу частину часу в енергозберігаючому режимі, також відомому як сплячий режим. Як результат, пристрої з підтримкою ZigBee можуть працювати протягом декількох років, перш ніж їх батареї потрібно буде замінити [16].

Стандарт ZigBee розроблений Альянсом ZigBee, який має сотні компаній-членів, починаючи від промисловості та розробників програмного забезпечення, закінчуючи виробниками обладнання. Альянс ZigBee був утворений в 2002 році як некомерційна організація, відкрита для всіх, хто хоче приєднатися. Стандарт ZigBee прийняв IEEE 802.15.4 як протоколи фізичного рівня (PHY) та контролю доступу до середовища (MAC). Тому пристрій, сумісний із ZigBee, також відповідає стандарту IEEE 802.15.4 [17].

1.2.4 Thread

Загальні відомості

Thread - це мережевий протокол на основі IPv6, розроблений для малопотужних пристроїв Інтернету речей (IoT) у бездротовій сітчастій мережі IEEE 802.15.4-2006, яку зазвичай називають бездротовою персональною мережею (WPAN). Потік не залежить від інших мережевих протоколів 802.15, таких як ZigBee, Z-Wave та Bluetooth LE [18].

Специфікація IEEE 802.15.4-2006 - це стандарт для бездротового зв'язку, який визначає рівні бездротового управління MAC та РНУ. Thread працює зі швидкістю 250 Кбіт/с в діапазоні 2,4 ГГц. Розроблений цей стандарт з для пристроїв з низькою потужністю, 802.15.4 підходить для мереж, які зазвичай включають велику кількість вузлів. Рівень MAC 802.15.4 використовується для базової обробки повідомлень та контролю заторів [19].

Основні функції Thread включають [18]:

- Просте встановлення, запуск та експлуатацію мережі: стек Thread підтримує кілька мережевих топологій. Мережу легко встановити за допомогою смартфона, планшета або комп'ютера. Коди встановлення використовуються для того, щоб забезпечити приєднання до мережі лише авторизованих пристроїв. Прості протоколи формування мережі та приєднання до мережі дозволяють системам самостійно налаштовувати та виправляти проблеми з маршрутизацією в міру їх виникнення;
- Захищеність: пристрої не приєднуються до мережі, якщо їм це не дозволено. Всі зв'язки зашифровані та захищені. Безпека забезпечується на мережевому рівні. Усі мережі Thread мають автентифікацію та шифрування Advanced Encryption Standard (AES); Захист, що використовується в мережах Thread кращий за ніж наявний у інших стандартах бездротового зв'язку (за оцінкою групи Thread).
- Малі та великі домашні мережі: домашні мережі варіюються від кількох до сотень пристроїв. Мережевий рівень

призначений для оптимізації роботи мережі на основі очікуваного використання;

- Великі комерційні мережі: Для великих комерційних установок однієї мережі Thread недостатньо. Модель Thread Domain [19] дозволяє використовувати до 10000 Thread пристроїв за одне розгортання, використовуючи комбінацію різних технологій підключення (Thread, Ethernet, Wi-Fi тощо);

- Діапазон: Типові пристрої Thread забезпечують достатній діапазон, щоб покрити звичайний дім. Для комерційних установок модель Thread Domain [19] дозволяє безлічі мереж Thread взаємодіяти між собою через магістраль, розширюючи, таким чином, діапазон, щоб охопити безліч підмереж сітки;

- Немає жодної точки відмови: Стек Thread призначений для забезпечення надійності навіть при відмові або втраті окремих пристроїв;

- Низьке енергоспоживання: пристрої ефективно спілкуються, Пристрої можуть працювати протягом декількох років на батареях типу AA, використовуючи відповідні робочі цикли;

- Економічно вигідне рішення: сумісні набори мікросхем та стеки програмного забезпечення від багатьох постачальників.

1.3 Огляд раніше виконаних робіт за напрямком дослідження

1.3.1 Роботи здійснені на основі протоколу Wi-Fi

Wi-Fi є однією з ключових технологій, що забезпечують підключення до послуг РД. Окрім основного використання як технології для зв'язку, сигнал Wi-Fi зараз широко використовується для різних задач зондування у РД, таких як розпізнавання жестів, виявлення падіння предметів, переміщення людини по квартирі. Це досягається завдяки чутливості сигналу до динаміки навколишнього середовища. Побудова розумного будинку на основі зондування Wi-Fi є економічно вигідним, неінвазивним та зручним

для розгортання методом. Результати використання даного підходу наведені у таблиці 1.3 [13].

Таблиця 1.3. Точність розпізнавання об'єктів за допомогою технології Wi-Fi

Робота	Тип сигналу	Що розпізнавалось	Точність, %	Кількість маршрутизаторів
CARM	CSI	Повсякденна активність	96	1
E-eyes	CSI	Внутрішні активності	92	1
WiAG	CSI	Дії	91	1
WiHear	CSI	Рух губ	91	1
WiFinger	CSI	Рух пальців	90	1
WiKey	CSI	Паролі за рухами рук	77	1
WeGuest	RSSI	Рухи – елементи спілкування	96	1
WiDance	CSI	Напрявленні рухів	92	2
WiDraw	CSI	Ручне письмо	91	20

У роботі [20] показана практична реалізація на макеті (рис. 1.3) мережі розумного будинку за допомогою технології Wi-Fi. Автори використали топологію зірка. До недоліків проведеної роботи можна віднести те, що автори не врахували проблеми з проходженням сигналу Wi-Fi через стіни та не розглянули можливість відмови Wi-Fi роутеру.

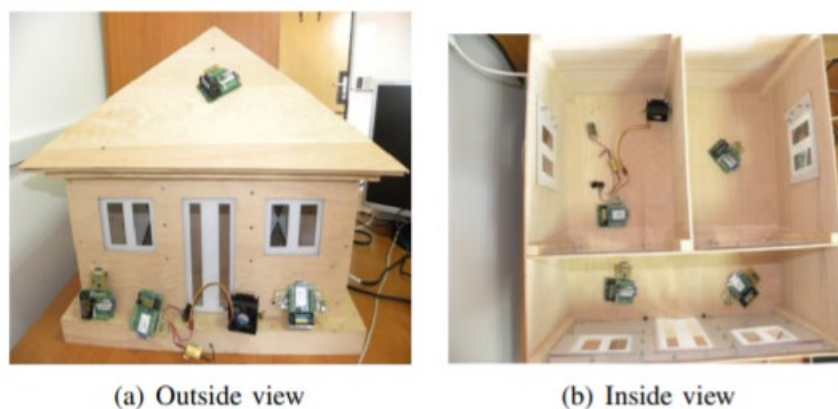


Рисунок 1.3. Макет РД

Автори роботи [21] пропонують використовувати мережу Wi-Fi як частину Інтернету Речей, який інтегрований у розумний будинок (Рис 1.4), хоча зазвичай Інтернет речей будується за допомогою топології mesh. До переваг цієї роботи можна віднести її орієнтованість на Інтернет речей, для

якого наразі створюються свої протоколи зв'язку, які можна використовувати в подальшому. Недоліком роботи є відсутність макету та практичної реалізації підходу на реальному об'єкті.

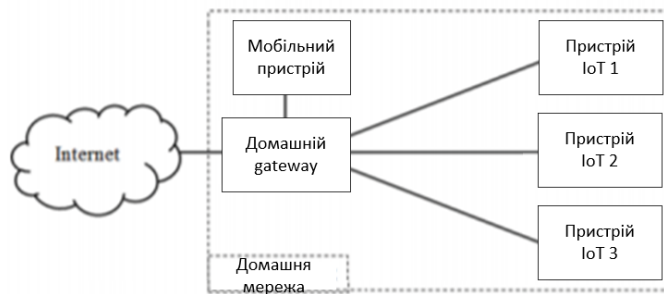


Рисунок 1.4. РД з використанням концепції Інтернету речей та мережі Wi-Fi

1.3.2 Роботи здійснені на основі протоколу Bluetooth

У роботі [15] вказана була використана нетипова структура мережі Bluetooth для РД. При цьому класичну «зірку» замінили на мережу типу «mesh» (рис. 1.5).

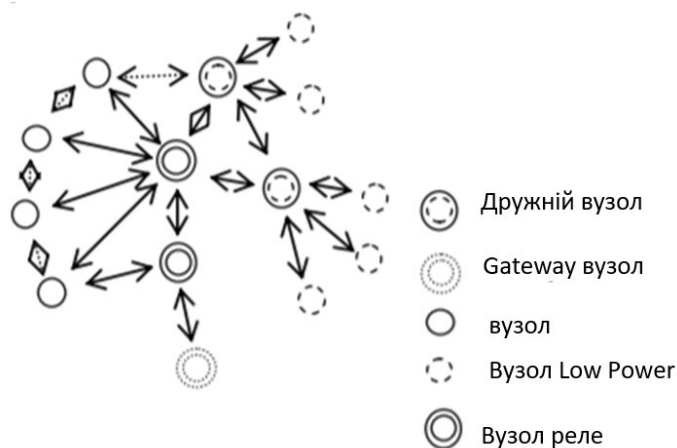


Рис. 1.5. Мережа Bluetooth з топологією «mesh»

У такій мережі типи вузлів поділяються на: вузли ретрансляції, вузли малої потужності, вузли, дружні вузли та вузли-шлюзи. Використовуючи вузли низької потужності як вузли моніторингу навколишнього середовища в приміщеннях, їм потрібна лише літій-іонна батарея для роботи протягом декількох років. Зовнішні датчики температури та вологості, датчики освітленості і т.д. можуть контролювати температуру, вологість та параметри

світла в приміщенні. Вузол низької потужності підключений до мережі через дружній вузол. Вузол підключається до мережі «mesh» лише за допомогою носія GATT. Вузол ретрансляції має можливість приймати та повторно передавати повідомлення через «рекламний» канал, щоб зв'язуватися з іншими частинами мережі. Вузол-шлюз - це вузол, який здатний перекладати повідомлення між мережею «mesh» та технологією, що не сумісна з Bluetooth. Вузол може мати можливість надсилати та отримувати mesh-повідомлення через mesh-шлюз, не перебуваючи в діапазоні будь-якого вузла ретрансляції.

Ця робота показує безперспективність технології Bluetooth при використанні топології «mesh» через складну реалізацію архітектури мережі (порівняно з іншими технологіями, що можуть використовувати дану топологію).

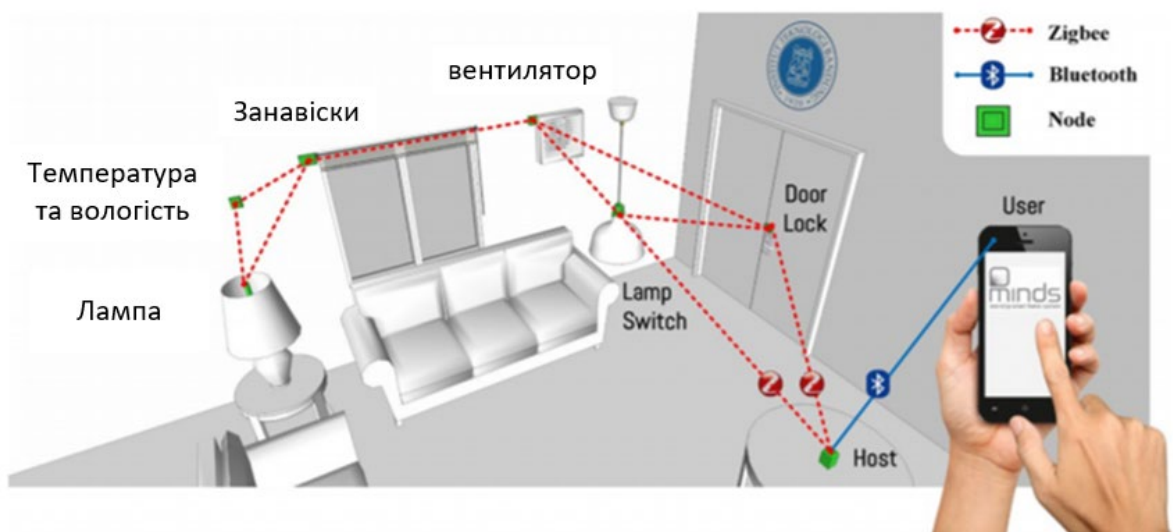


Рис. 1.6 Структурна схема РД при використанні технології Bluetooth при підключенні за смартфоном

У роботах [22] та [11] було фактично реалізоване з'єднання з телефоном з хостом РД за допомогою технології Bluetooth. На рисунку 1.6 видно структурну схему підключення телефону до розумного будинку з роботи [22].

До переваг цих робіт можна віднести фактичну реалізацію елементів мережі Bluetooth у реальному РД. Недоліком є те, що у цих роботах мережа Bluetooth використовується лише як лінія передачі між телефоном та іншими мережами РД. Враховуючи розвиток Хмарних технологій та присутність Wi-Fi у кожному сучасному будинку, цей зв'язок легко замінити більш безпечним та простим з'єднанням смартфону з мережею Wi-Fi.

1.3.3 Роботи здійснені на основі протоколу ZigBee

В роботі [23] був створений макет мережі розумного будинку на основі ZigBee, як показано на рисунку 1.7. Програмне забезпечення, що працює з мережею, назвали Infopods.

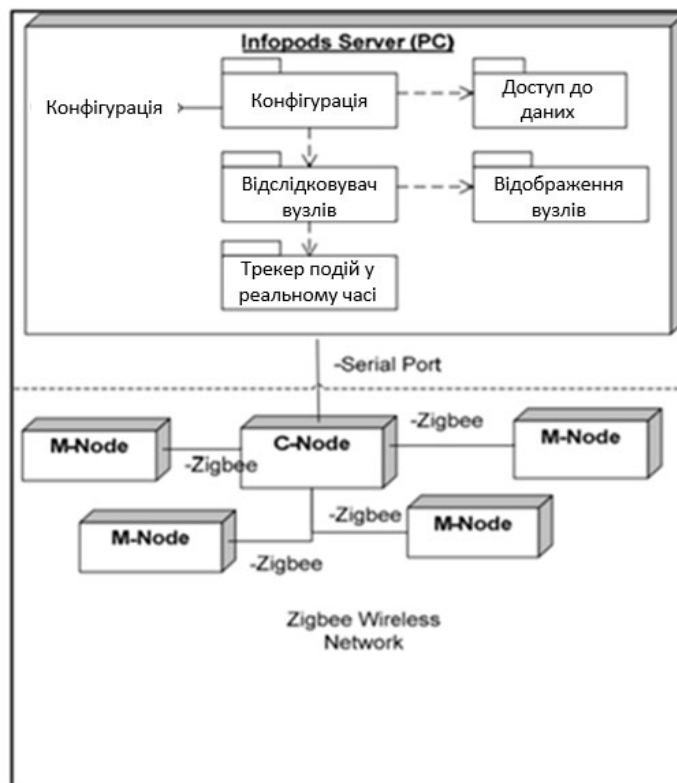


Рис. 1.7 Архітектура програмного забезпечення Infopods

Архітектура програмного забезпечення Infopods розділена на три основні блоки:

- Програмне забезпечення моніторингових вузлів (M-Node);
- програмне забезпечення вузла координатора (C-Node);
- програмне забезпечення Infopods Server (ISS).

ISS має доступ до Інтернету через місцевого постачальника послуг. Крім того, ISS підключений до вузла координатора Zigbee (С-вузол) за допомогою інтерфейсу RS-232. Схема на рис. показує, що С-вузли розміщені на рівні координатора, М-вузли на рівні моніторингу, а ISS на рівні ПК.

У цій роботі було створене програмне забезпечення, яке повністю відповідальне за створення мережі для пристроїв РБ. До недоліків цього програмного забезпечення можна віднести неможливість чітко вказувати бажану топологію мережі для окремих її пристроїв.

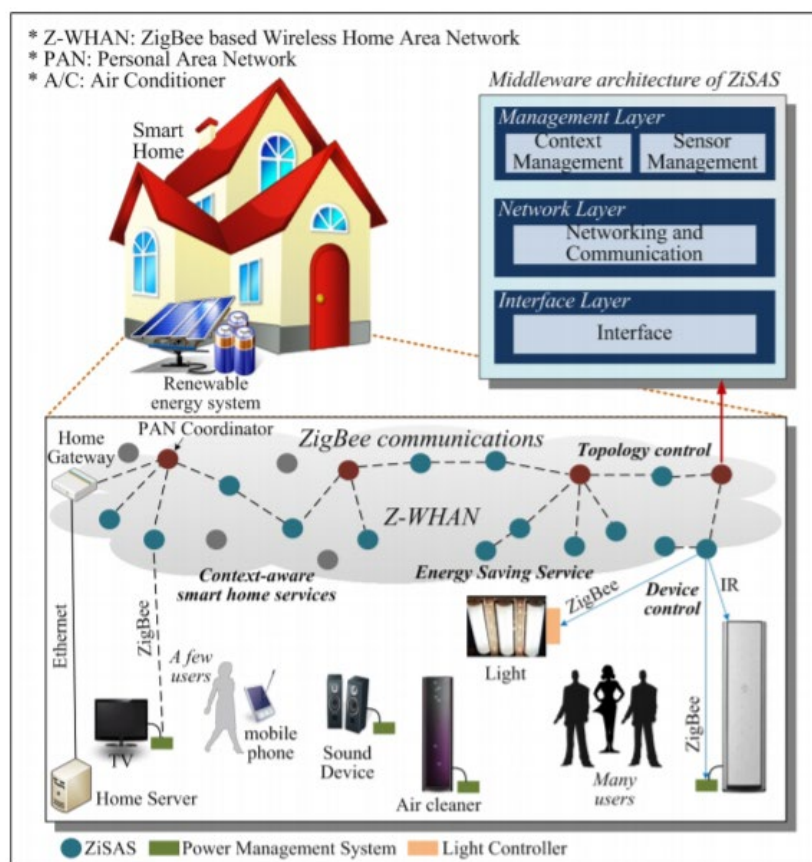


Рис. 1.8. Схема прототипу мережі Zigbee на рівні однієї кімнати

У роботі [24] був створений прототип системи на рівні однієї кімнати. У роботі вказана структурна схема, наведена на рис. 1.8. До недоліків роботи можна віднести відсутність рішень для кімнат «специфічної» форми, таких як коридори чи сходи на кухню. Також мережа не може працювати з даними камер, що можуть знаходитися у різних кімнатах для спостереження за людьми-користувачами.

1.3.4 Роботи здійснені на основі протоколу Thread

В роботі [25] симулювали затримки між елементами мережі у багатокімнатному готельному комплексі за допомогою середовища Matcad (рис. 1.9). Недоліком роботи є відсутність фактичної реалізації мережі Thread та тестування лише топології «дерево», а не топології «сітки» в загальному вигляді.

В роботі [8] тестували наведену нижче топологію для розрахунку надійності мережі. За результатами, надійність різко падає через 40 годин використання. Це означає, що мережу треба періодично оновлювати.

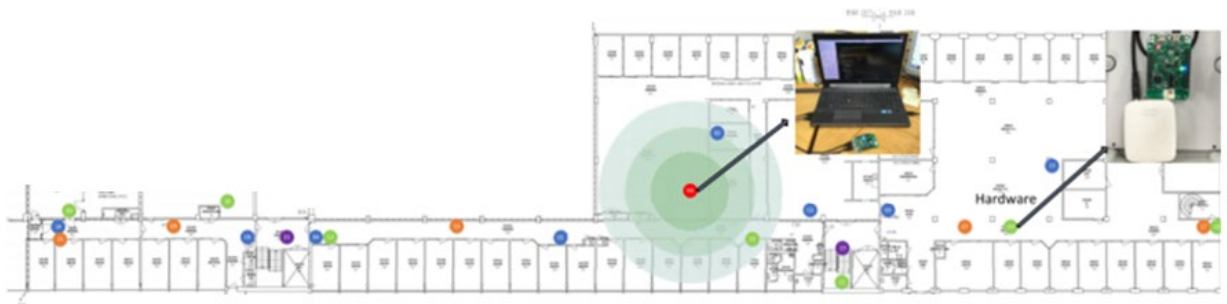


Рис. 1.9 Топологія мережі Thread у середовищі Matcad

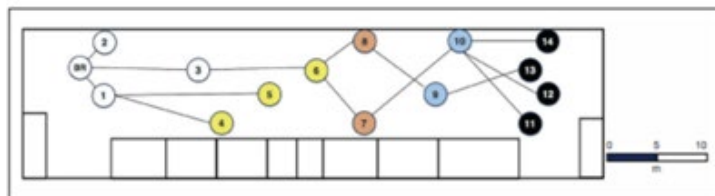


Рис. 1.10 Топологія мережі Thread у середовищі Matcad

До загального недоліку робіт по темі Thread можна віднести малу кількість практичних реалізацій. Частіше автори віддають перевагу комп'ютерному моделюванню.

1.4 Мета і задачі наукових досліджень

Отже, враховуючи розглянуті вище протоколи зв'язку РД, їх технічні характеристики, типові архітектури мереж та практичні реалізації мереж у РД, можна дійти наступних висновків:

1. У РД зазвичай використовується одразу декілька протоколів зв'язку. Зазвичай це Wi-Fi і мережевий протокол, сумісний з топологією mesh;

2. Використання топології mesh підвищує надійність мережі, але знижує швидкість передачі даних. Це пояснюється тим, що відмова одного пристрою не призведе до відмови мережі, як це може статися у топології зірка. Але через те, що дані передаються через багато пристроїв, які відіграють роль шлюзів, з'являється затримка у передачі. Як показали дослідження, у межах житлового будинку ці затримки не є суттєвими;

3. Технологія Bluetooth не є перспективною для РД, бо її функції легко замінюються мережею Wi-Fi, сама Bluetooth складніша в реалізації, ніж ZigBee та Thread і має найслабший захист даних;

4. Архітектура мережі значною мірою залежить від планування кімнат. У коридорах здебільшого використовується топологія дерево, у кімнатах – mesh;

5. Під час проектування мережі треба враховувати бар'єри, такі як стіни, люди і т.д;

6. Для побудови задовільної архітектури мережі РД доцільна розробка спеціальних програмних засобів, які не прив'язуються до КП РД;

7. Технологія ZigBee є більш гнучкою у плані додавання та усунення приладів з мережі РД.

Метою дисертаційного дослідження є проектування алгоритму створення та модернізації мережі РД враховуючи планування кімнат, бар'єри та наявні виконавчі пристрої та датчики на основі протоколів Wi-Fi та ZigBee.

Для досягнення цієї мети необхідно сформулювати і вирішити наступні завдання:

- Огляд існуючих алгоритмів взаємодії пристроїв у Розумному будинку;

- Розробка алгоритму створення та модернізації мережі Розумного будинку на основі протоколів Wi-Fi та ZigBee;
- Створення макетного зразку Розумного будинку;
- Розробка апаратно-програмного комплексу для тестування створеного алгоритму;
- Оцінка отриманого алгоритму виходячи з результатів, отриманих на макеті. Оцінка надійності, затримок та швидкодії отриманої мережі.

Об'єктом дослідження є екосистема пристроїв РД.

Предметом дослідження є створення алгоритму взаємодії екосистеми пристроїв РД.

РОЗДІЛ 2. МАРШРУТИЗАЦІЯ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ РОЗУМНОГО БУДИНКУ

2.1 Загальні поняття архітектури мережі для різних протоколів

Архітектура мережі Wi-Fi

Основні компоненти мережі Wi-Fi представлені на рис. 2.1 [9].



Рис. 2.1 Компоненти мережі Wi-Fi

Основними компонентами мережі, як видно вище є:

- Станції - це обчислювальні пристрої з бездротовими мережевими інтерфейсами. Як правило, станції - це портативні комп'ютери та смартфони, що працюють від акумулятора. У випадку розумного будинку це може бути будь-який прилад та датчик, що містить необхідний мережевий інтерфейс;
- Точки доступу - Пристрої, що називаються точками доступу, виконують функцію бездротового з'єднання з дротовим мостом;
- Бездротовий носій – використовується для переміщення інформації від станції до станції стандарт використовує бездротовий носій (радіосигнал);
- Система розподілу [13]. Коли кілька точок доступу підключені до великої зони покриття, вони повинні взаємодіяти між собою та відстежувати рух мобільних станцій. Система розподілу є логічним компонентом 802.11, який використовується для переадресації інформації між станціями через різні точки доступу. У стандарті

802.11 не визначається жодною конкретною технологією для системи розподілу.

Архітектура взаємодії станцій між собою може відрізнятися. Основним будівельним блоком мережі 802.11 є basic service set (BSS), який являє собою просто групу станцій, які взаємодіють між собою [9]. Зв'язок відбувається в дещо розмитій зоні, яка називається базовою зоною обслуговування, що визначається характеристиками поширення радіосигналу. Коли станція знаходиться в базовій зоні обслуговування, вона може зв'язуватися з іншими членами BSS. BSS мають два варіанти архітектури, обидва з яких проілюстровані на рисунку 2.2.

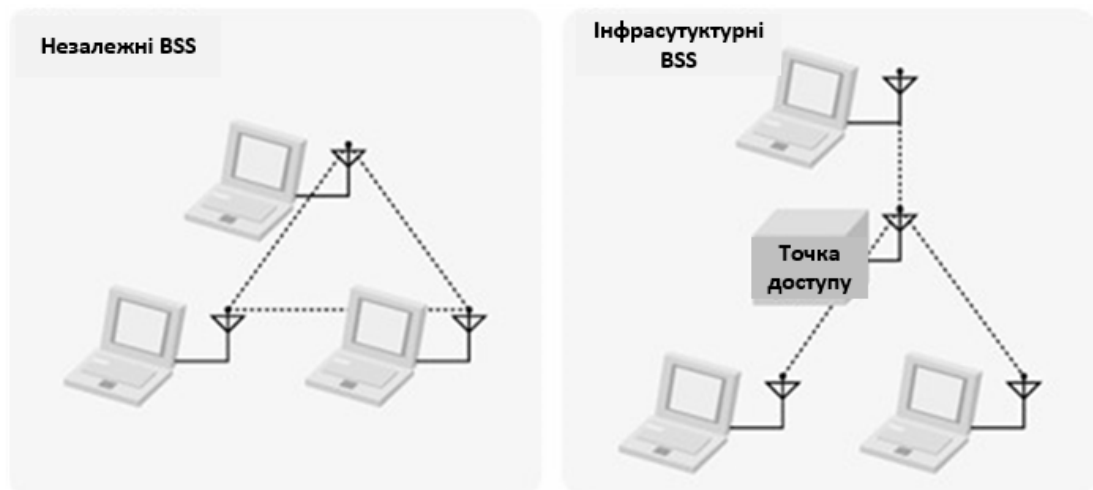


Рис. 2.2 Компоненти мережі Wi-Fi

- Незалежні мережі

На рис. 2.2 ліворуч представлена незалежна BSS (IBSS) [13]. Станції в IBSS взаємодіють безпосередньо одна з одною а, отже, повинні знаходитися в межах прямого зв'язку. Найменшою можливою мережею 802.11 є IBSS з двома станціями. Зазвичай IBSS складаються з невеликої кількості станцій, створених з певною метою та на короткий проміжок часу.

- Інфраструктурні мережі

Праворуч на рис. 2.2 знаходиться інфраструктурний BSS (для уникнення перевантаження аббревіатури, інфраструктурна BSS ніколи не

називається IBSS). Інфраструктурні мережі відрізняються використанням точки доступу. Точки доступу використовуються для всіх комунікацій в інфраструктурних мережах, включаючи зв'язок між мобільними вузлами в одній і тій же зоні обслуговування. Якщо одній мобільній станції в інфраструктурному BSS потрібно зв'язатися з іншою мобільною станцією, зв'язок повинен виконуватися в два стрибки. По-перше, вихідна мобільна станція передає данні до точки доступу. По-друге, точка доступу передає данні станції призначення. Це являє собою класичну топологію мережі «зірка». Плюси такого підходу [9]:

- 1) Інфраструктурна BSS визначається відстанню від точки доступу. Усі мобільні станції повинні знаходитися в межах досяжності точки доступу, але ніяких обмежень щодо відстані між самими мобільними станціями не встановлюється. Дозвіл на прямий зв'язок між мобільними станціями дозволить заощадити пропускну спроможність, але ціною збільшення складності фізичного рівня, оскільки мобільним станціям потрібно буде підтримувати сусідні зв'язки з усіма іншими мобільними станціями в зоні обслуговування;
- 2) Точки доступу в інфраструктурних мережах можуть допомогти станціям, які намагаються економити електроенергію. Станції, що працюють від акумулятора, можуть вимкнути бездротовий приймач і увімкнути його лише для передачі та отримання буферизованих даних з точки доступу.

Архітектура мережі ZigBee

У мережі IEEE 802.15.4 пристрій може виконувати три різні ролі [16]: координатор, координатор PAN і пристрій. Координатор - це пристрій, який здатний передавати повідомлення. Якщо координатор одночасно є головним контролером персональної мережі, він називається координатором PAN. Якщо пристрій не виконує роль координатора, його просто називають пристроєм.

Стандарт ZigBee використовує дещо іншу термінологію (рис. 2.3) [17]. Координатором ZigBee є координатор IEEE 802.15.4 PAN. Маршрутизатор ZigBee - це пристрій, який може виконувати роль координатора IEEE 802.15.4. Нарешті, кінцевий пристрій ZigBee - це пристрій, який не є ні координатором, ні маршрутизатором. Кінцевий пристрій ZigBee має найменший обсяг пам'яті та найменшу кількість можливостей та функцій обробки. Він, як правило, є найменш дорогим пристроєм у мережі.

Формуванням мережі керує мережевий рівень ZigBee. Мережа повинна бути в одній з двох мережевих топологій, зазначених у IEEE 802.15.4: зірка та однорангова (peer-to-peer) мережа.

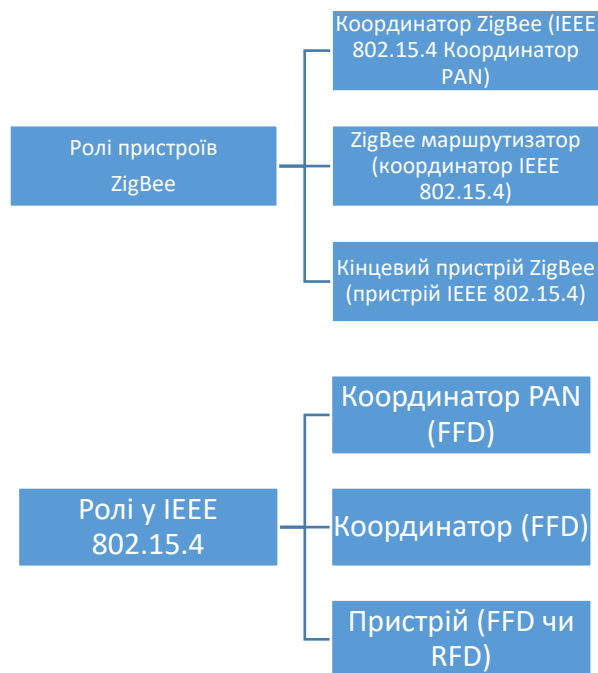


Рис. 2.3 .Пристрої у ZigBee та IEEE 802.15.4:

У топології зірка, показаній на рис 2.4[17], кожен пристрій у мережі може спілкуватися лише з координатором PAN. Типовим сценарієм формування мережі «зірка» є те, коли пристрій, запрограмований як координатор PAN, активується і починає встановлювати свою мережу. Перше, що робить цей координатор PAN, це вибір унікального ідентифікатора PAN, який не використовується жодною іншою мережею у його радіотехнічній сфері впливу (області навколо пристрою, в якій його

радіосигнал може перекриватися іншими пристроями). Іншими словами, це гарантує, що ідентифікатор PAN не використовується жодною іншою сусідньою мережею.

У одноранговій топології кожен пристрій може здійснювати прямий зв'язок з будь-яким іншим пристроєм, якщо пристрої розташовані досить близько один до одного.

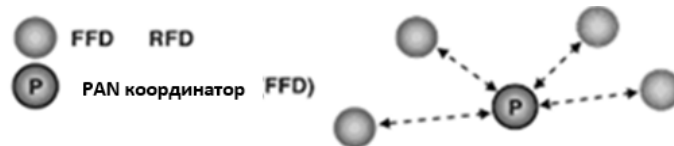


Рис. 2.4. Однорангова топологія ZigBee

Будь-який пристрій в одноранговій мережі може виконувати роль координатора PAN. Одним із способів вирішити, який пристрій буде координатором PAN, є вибір першого пристрою, який починає спілкуватися як координатор PAN.

Однорангова мережа може приймати різні форми, зважаючи на обмеження для пристроїв, які можуть взаємодіяти між собою [11]. Якщо обмеження відсутнє, однорангова мережа відома як сітчаста топологія (рис. 2.5).

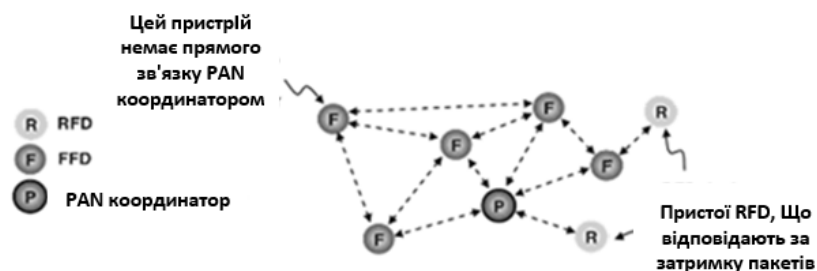


Рис. 2.5 Сітчаста топологія ZigBee

Іншою формою однорангової мережі, яку підтримує ZigBee, є топологія дерева (рис. 2.6).

У цьому випадку координатор ZigBee (координатор PAN) встановлює початкову мережу. Маршрутизатори ZigBee формують гілки та передають повідомлення. Кінцеві пристрої ZigBee виконують роль листя дерева і не беруть участі в маршрутизації повідомлень.

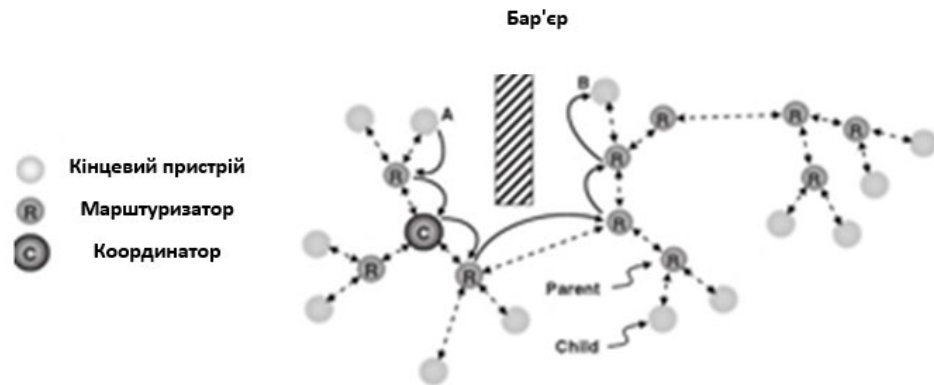


Рис. 2.6. Топологія дерева ZigBee

Рис. 2.6 також показує приклад того, як передача повідомлення може допомогти розширити діапазон мережі і навіть обійти бар'єри. Наприклад, пристрій А повинен надіслати повідомлення на пристрій В, але між ними є бар'єр, через який важко проникати сигнал. Топологія дерева допомагає у цьому випадку, передаючи повідомлення навколо бар'єру та досягаючи пристрою В. Це іноді називають як мультипробіг [17], оскільки повідомлення перескакує від одного вузла до іншого, поки не досягне місця призначення. Таке більш високе охоплення відбувається за рахунок потенційно високої затримки повідомлення.

У мережі IEEE 802.15.4, незалежно від її топології, завжди створюється координатор PAN. Координатор PAN контролює мережу та виконує такі мінімальні обов'язки:

- виділяє унікальну адресу (16-бітну або 64-бітну) кожному пристрою в мережі;
- ініціює, завершує та направляє повідомлення по всій мережі.

Архітектура мережі Thread

У мережі Thread вузли поділяються на дві основні ролі [18] (рис. 2.7):

1) Маршрутизатор

Маршрутизатор - це вузол, який:

- Пересилає пакети для мережевих пристроїв;
- Надає послуги безпечного введення в експлуатацію пристроїв, які намагаються приєднатися до мережі;
- Постійно підтримує свій трансивер.

2) Кінцевий пристрій

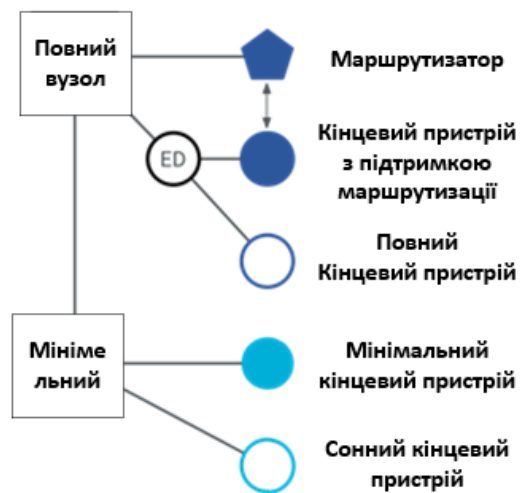


Рис. 2.7. Вузли Thread

Кінцевий пристрій (ED) - це вузол, який:

- Спілкується переважно з одним маршрутизатором;
- Не пересилає пакети для інших мережевих пристроїв;
- Може вимкнути свій трансивер, щоб зменшити потужність.

Крім того, вузли мають ряд типів, як зображено на рис. 2.9.

Пристрій із повним зв'язком:

Пристрій Full Thread (FTD) [8] завжди має увімкнений передавач, підписується на адреси всіх маршрутизаторів та підтримує відображення адрес IPv6. Існує три типи FTD:

- Маршрутизатор;
- Пристрій, що відповідає вибору маршрутизатора (REED) - може бути підвищений до маршрутизатора;
- Повний кінцевий пристрій (FED) - не може бути підвищений до маршрутизатора.

FTD може працювати як маршрутизатор (батьківський) або кінцевий пристрій (дочірній).

Пристрій з мінімальним зв'язком:

Пристрій з мінімальним зв'язком не підписується на адреси всіх маршрутизаторів і пересилає всі повідомлення батьківському пристрою. Існує два типи MTD [19]:

- Мінімальний кінцевий пристрій (MED) - трансивер завжди увімкнений, не потрібно опитувати повідомлення батьків
- Сонний кінцевий пристрій (SED) - зазвичай вимкнений, пробуджується при нагоді для опитування повідомлень батьків

MTD може працювати лише як Кінцевий пристрій (дочірній).

Коли REED - це єдиний вузол, який охоплює новий ED, що бажає приєднатися до мережі Thread, він може оновити себе і працювати як маршрутизатор (рис. 2.8) [18]:

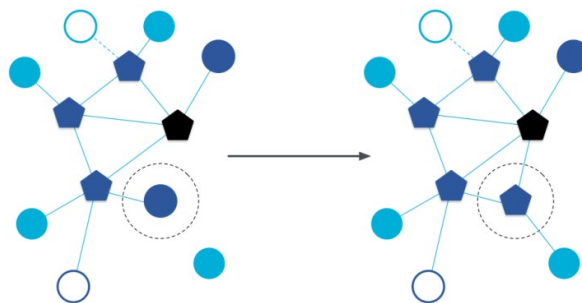


Рис. 2.8. Оновлення вузлів Thread. Додавання зв'язку

І навпаки, коли маршрутизатор не має дітей, він може перейти на нижчий рівень і працювати як Кінцевий пристрій:

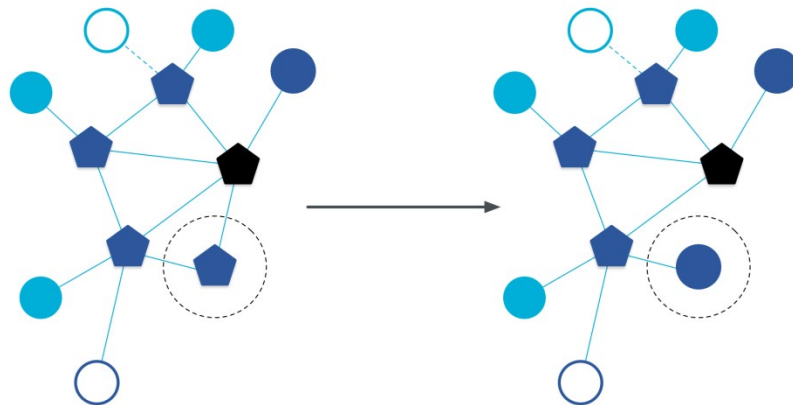


Рис. 2.9. Оновлення вузлів Thread. Зниження зв'язку

Thread Leader - це маршрутизатор, який відповідає за управління набором маршрутизаторів у мережі Thread. Він динамічно самостійно обирається і об'єднує та розповсюджує інформацію про конфігурацію в мережі. У кожному розділі мережі Thread завжди є один лідер.

Прикордонний маршрутизатор [18]

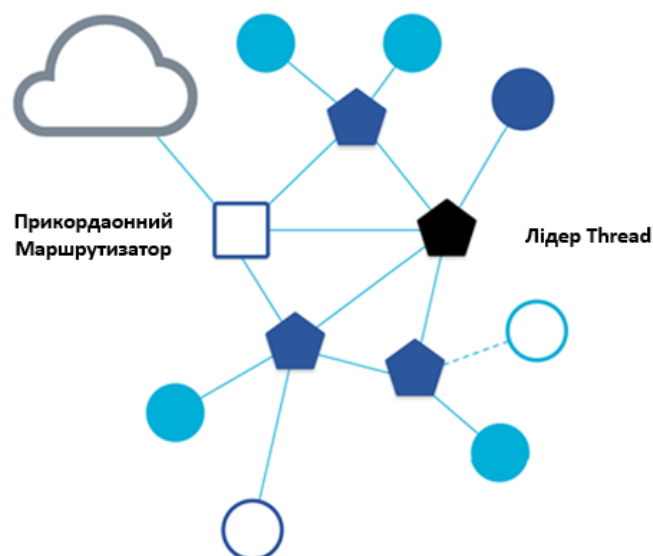


Рис. 2.10 Лідер зв'язків Thread

Прикордонний маршрутизатор - це пристрій, який може пересилати інформацію між мережею Thread та мережею, що не є Thread (наприклад, Wi-

Fі). Він також налаштовує мережу Thread для зовнішнього підключення. Будь-який пристрій може служити прикордонним маршрутизатором.

2.2 Алгоритми маршрутизації MESH

Cluster-Tree

При використанні протоколів Thread та ZigBee кожен вузол має 2 адреси: 64-бітна розширена адреса IEEE, що вшита у мікросхему вузла та коротка 16-бітна адреса PAN, що виступає у ролі унікального ідентифікатора мережі.

Коли виникає необхідність додати у мережу новий вузол, вузол-координатор призначає йому новий ідентифікатор PAN. Коли одному з вузлів мережі необхідно встановити зв'язок з іншим вузлом, то спочатку він звертається до найближчого батьківського вузла, який має функцію маршрутизації. Потім повідомлення передається батьківським вузлом на необхідну адресу (одному з дочірніх вузлів чи своєму батьківському вузлу) [26].

Отже спочатку повідомлення пересилаються батьківським вузлам, які вже потім самі вирішують, куди їх перенаправляти.

Алгоритм Cluster-Tree допомагає встановлювати логічні зв'язки між батьківськими та дочірніми вузлами, що пришвидшує маршрутизацію у мережі. Відповідно до нього адреса кожного вузла в мережі призначається батьківським вузлом за допомогою схеми розподіленого розподілу адрес. Спочатку батьківський вузол обчислює параметр адреси вузла відповідно до рівняння 2.1 [26]:

$$Cskip(d) = \begin{cases} 1 + Cm(Lm - d - 1), Rm = 1 \\ \frac{1 + Cm - Rm - Cm \times Rm^{Lm-d-1}}{1 - Rm}, otherwise \end{cases} \quad (2.1)$$

Де

$Cskip(d)$ — параметр адреси вузла

Cm — максимальна кількість дочірніх вузлів батьківського вузла

R_m — максимум маршрутизаційних вузлів батьківського вузла

L_m — довжина мережі

d — поточна довжина вузла

Якщо новий вузол i є кінцевим вузлом, то він не виконує функцію маршрутизації. Такий вузол є n -им дочірнім вузлом свого координатору. Кого батьківський вузол, що має індекс j , визначить йому наступну адресу:

$$A_i = A_j + Cskip(d) \times |Rm + n, 1 \leq n \leq (Cm - Rm) \quad (2.2)$$

Якщо новий вузол i не є кінцевим вузлом, то його адреса визначається за наступною формулою:

$$A_i = A_j + Cskip(d) \times (n - 1), 1 \leq n \leq Rm \quad (2.3)$$

AODVjr

Алгоритм AODVjr, що використовує протокол Zigbee - це спрощена версія алгоритму AODV. Процес виявлення шляху у алгоритмі AODVjr наступний [29]:

Припустимо, що вузлу 1 необхідно зв'язатися з вузлом 4, до якого в нього не має прямого шляху, виходячи з інформації у таблиці маршрутизації вузлу 1. Тоді вузол 1 виконає запит маршруту (який називається RREQ) у своїх сусідніх вузлів для того, щоб дізнатися, чи є вузол 4 у їх таблиці маршрутизації. Вони оновлюють інформацію щодо вузла 1 у своїй таблиці маршрутизації та пересилають RREQ далі, поки потрібний вузол не буде знайдений. Вузол 4 може отримати пакети RREQ від декількох вузлів. Він обчислює та обирає найменш витратний маршрут, зберігає його у своїй таблиці маршрутизації і надсилає пакет RREP у відповідь вузлу 1. Отримуючи цей пакет вузол 1 оновлює свою таблицю маршрутизації.

Поєднання Cluster-Tree та AODVjr

Нажаль, в обох вище описаних алгоритмів є свої недоліки. Для Cluster-Tree це [27]:

- 1) Мережа Cluster-Tree не є мережею Mesh, коли батьківський вузол виходить з ладу, то доступ втрачається до всіх дітей
- 2) Якщо два пристрої знаходяться в зоні доступу одне одного, але не є «батьком» та «дитиною», то зв'язок між ними буде виконуватись через посередників, що збільшує затримки у мережі.
- 3) Під час додавання нових кластерів до дерева може виникнути ситуація, що дерево стає завеликим у «глибину» і його треба переорієнтувати
- 4) Вузли, що знаходяться ближче до вершини дерева, як і сама вершина дерева, можуть бути перевантажені

Проблемами AODVjr є [28]:

- 1) Можливість виникнення «штормів», коли забагато пристроїв одночасно шукають маршрут до потрібного вузлу і мережа не може ефективно справитися з усіма запитами
- 2) Необхідність проходження подвійного шляху між вузлами (і туди і назад, а не тільки з везла, що передає пакет до вузла, що його приймає)
- 3) Маршрут з одного вузла до іншого може бути оптимальним, а такий самий маршрут назад – навпаки. Це залежить від бар'єрів, що знаходяться між цими вузлами.

Зазвичай, щоб вирішити ці проблеми обидва ці алгоритми поєднуються. Можливі такі варіанти поєднання [27]:

- 1) Критичні та найбільш використовувані у розумному будинку пристрої приєднуються до мережі за допомогою Cluster-Tree, інші використовують AODVjr. Для швидкої передачі даних використовують Cluster-Tree, для знаходження нових оптимальних маршрутів – AODVjr.
- 2) Використовують ротації вершини дерева, коли воно стає завеликим у глибину.

- 3) Різні алгоритми використовуються для різних «мап». Наприклад у коридорах та для спілкування між кімнатами використовується більш швидкий Cluster-Tree, а для спілкування у межах однієї кімнати, у якій нема бартерів – AODVjr.
- 4) AODVjr використовують лише пристрої, які можуть витримати навантаження під час «штормів», коли багато вузлів шукають для себе оптимальну маршрутизацію. Також для цих пристроїв не критична енергоефективність. Cluster-Tree використовується для кінцевих пристроїв та пристроїв з високою енергоефективністю та невеликою обчислювальною потужністю.
- 5) Уся мережа є Cluster-Tree, у якій AODVjr періодично оновлює її таблиці маршрутизації.
- 6) Уся мережа є Cluster-Tree, але при маршрутизації перевіряється чи є шуканий пристрій у таблицях маршрутизації AODVjr вузлу, і якщо він є, то алгоритм Cluster-Tree припиняє свою роботу, а алгоритм AODVjr починає.

2.3 Розробка власного алгоритму маршрутизації MESH

Пропонується сумістити класичний підхід Cluster-Tree та AODVjr, при цьому використовувати додатково прошите двійкове дерево та піти по третьому варіанту об'єднання, який наведено в п. 2.2.

У класичному підході маршрутизації по дереву (ClusterTree) можна виділити такі недоліки:

- Кінцеві вузли ні на що не вказують, хоча містять виділену пам'ять для двох посилок;
- Швидкість передачі даних з кінцевих вузлів мала;
- Механізм проходу для виходу на сусідні гілки через mesh для кінцевих вузлів ускладнений, бо у підході, який реалізує ZigBee неможливо зв'язати сусідні кінцеві пристрої за допомогою мережі mesh (алгоритму

AODV). Один кінцевий пристрій не буде спілкуватися з іншим напряму, а тільки через батьківські маршрутизатори.

Для вирішення цих проблем у даній роботі пропонується замість класичного підходу ClusterTree використати прошите двійкове дерево.

Прошите двійкове дерево це така модернізація двійкового дерева, яка дозволяє робити швидкий обхід. У ньому кінцеві вузли мають пряме посилення до найближчого «лівого» та найближчого «правого» батьківського вузла. При цьому для «правої» дитини батьківським вузлом зліва буде його власний батько, а батьківським вузлом «праворуч» буде найперший вузол, який посиляється на одного з батьків цього вузла, як на свій «лівий» вузол. Аналогічно для «лівої» дитини – прошитим вузол праворуч буде його власний батько, а зліва – такий батько, для якого один з батьків цього вузла містить його як «правий» вузол.

Цей підхід можна використати для пришвидшення передачі інформації по дереву [29].

Такий підхід вирішує усі вище зазначені проблеми таким чином:

- Пам'ять, виділена на покажчики, що вказують на дітей, використовується у кінцевих вузлах для більш ефективної маршрутизації.
- Швидкість передачі даних та обходу дерева для кінцевих вузлів стає навіть швидшою, за деякі звичайні батьківські вузли.
- Кінцеві вузли повністю використовують переваги алгоритмів «mesh», які до цього були їм не доступні.
- Кінцеві вузли не просто стають «mesh» вузлами, але й не мають проблеми «штормів» під час навантаження мережі, як у класичних «mesh» вузлів.

Рівняння 2.1 та 2.2 з п.2 описують присвоєння довгої адреси у алгоритмі ClusterTree. Ці ж формули можна використати і для запропонованого підходу. Рівняння 2.3 з п.2 не використовується, бо тепер

кінцеві вузли виконують функцію маршрутизації. При цьому вони «ліві» вузли обчислюють адреси своїх найближчих «правих» батьків, а «праві» вузли – адреси своїх найближчих «лівих» батьків. Цей механізм можна описати наступним псевдокодом:

```
алг ПОШУКВУЗЛА
поч
Обчислення рівняння (1)
Обчислення рівняння (2)
Обчислення рівняння (2) для батька
поки поточна довжина вузла більша за 0
    то шукати обчислення рівняння (2) для батька останнього
    перевіреного батька
    якщо батько «лівий», а кінцевий вузол правий чи навпаки
        то додати у таблицю маршрутизації даний батьківський
        вузол.
        Закінчити цикл «поки»
    інакше продовжити роботу алгоритму
якщо таблиця маршрутизації пуста
    то додати останній батьківський вузол
кін алг ПОШУКВУЗЛА
```

Обхід починається з самого лівого вузла, ми зберігаємо значення вузла, потім переходимо до його правого потоку (покажчика), зберігаємо значення нового вузла, а потім переходимо до його правого піддерева. Після обходу за правим покажчиком потоку ми переходимо до нового дерева. Для ілюстрації це пояснено на рисунку 2.13.

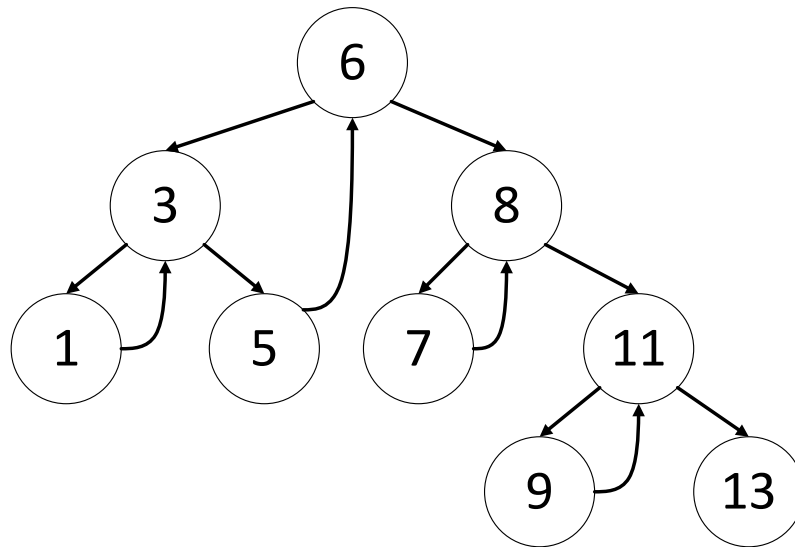


Рис. 2.11 Прошите дерево

Швидкість пошуку та ClusterTree та пропонованого алгоритму співпадають. Але операція маршрутизації не визначається швидкістю пошуку по дереву, а більш наближена до часткового обходу дерева.

Нажаль теоретичні способи для визначення не підходять для визначення виграшу в маршрутизації для даного конкретного випадку, бо обхід і швидкість проходу як бінарного, так і прошого бінарного дерева співпадають. Для визначення більш ефективного алгоритму був поставлений наступний експеримент:

- 1) Були згенеровані за законом нормального розподілу двійкові дерева.

```

import random

# Визначення початкової вершини та її ймовірних нащадків
tree = [[-1, -1]]
free_edges = [(0, 0), (0, 1)]

n = random(1000) # Визначення кількості вузлів

while len(tree) < n:
    e = random.choice(free_edges) # вибір одного з ймовірних нових
#вузлів
    node, child = e
    assert tree[node][child] == -1 # перевірка нового вузлу

```

```

k = len(tree) # створення індексу нового вузлу
tree.append([-1, -1]) # додавання вузлу

tree[node][child] = k # визначення нового вузлу як дитини
старого #батьківського
free_edges.extend([(k, 0), (k, 1)]) # створення двох нових
#ймовірних вузлів

free_edges.remove(e) # видалення нового вузлу з «нових
ймовірних #вузлів»

```

- 2) Кожному бінарному дереву у відповідність ставилося аналогічне двійкове прошите дерево.

За допомогою алгоритму ПОШУКВУЗЛА додаємо до всіх кінцевих вузлів посилання до тих, з якими вони «зшиті».

- 3) Були обрані 2 випадкові вузли дерева.
- 4) Рахувалося кількість кроків для проходження від одного вузла до іншого в двійковому дереві та подібному йому двійковому прошитому дереві. Перехід по прошитим вузлам – пріоритетний.
- 5) Знаходження коефіцієнту, який відповідає відношенню кількості кроків, потрібних для маршрутизації в двійковому бінарному дереві на кількість кроків у прошитому бінарному дереві.
- 6) Знаходження середнього арифметичного коефіцієнтів для однакової кількості кроків у звичайному двійковому дереві.

Результати проведеного на Python експерименту представлені на рис. 2.15.

Експеримент був проведений з використанням мови програмування Python.

Одним з найбільших недоліків технології ZigBee є погана передача сигналу через бар'єри, такі як стіни. За допомогою маршрутизації AODV і технології mesh пристрої мережі знаходяться у постійному пошуку найбільш швидкого маршруту від одного вузла до іншого, але при цьому виникають деякі проблеми, які наведені нижче, що знижують загальну надійність мережі.

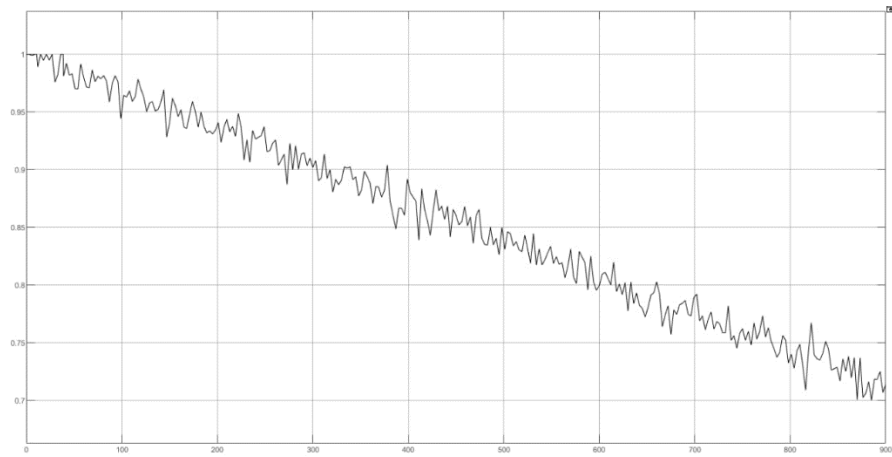


Рис. 2.12 Прошите дерево

Тепер конкретизуємо деякі мінуси алгоритму AODV:

- Навіть знаючи швидкий шлях до деякої точки, таблиця маршрутизації буде оновлюватися постійно, а це означає що багато вузлів які нам відомо, що мають «довгий» шлях все одно будуть використовуватися для передачі даних.
- Неможливо відділити «ідеологічні» групи пристроїв, які мають більше і швидше спілкуватися один з одним від інших пристроїв, які не актуальні.
- Підвищена вірогідність виникнення штормів при великій кількості пристроїв, що одночасно використовують AODV в одній підмережі.

Для вирішення наведених вище проблем пропонується накладати додаткові обмеження на можливість створення мережі mesh за допомогою алгоритму AODV, а саме розділити будинок на зони. При цьому ці «зони» будуть враховувати положення стін у будинку. Під час переходу з однієї зони в іншу треба здійснити «обхід бар'єру», для цього буде використана маршрутизація за допомогою дерева. У середині зони можлива передача даних за допомогою AODV.

Це вирішує наступні проблеми:

- Таблиця маршрутизації не оновлює свідомо погані маршрути, чим не перевантажує мережу.

- Пристрої згруповані за «групами» і AODV використовується лише найближчими пристроями. Це допомагає вирішувати проблеми ClusterTree не створюючи нових.
- Мала кількість пристроїв підмережі допомагає уникати штормів.

Для реалізації підходу необхідно додати пристроям до адреси додатковий параметр «зона».

На рис. 2.13 зображена топологія, яка може використовуватися у коридорах для обходу перешкод. При цьому між вузлами 1, 2, 3, 4, 5, 6 можуть бути додаткові зв'язки одне з одним, адже додаткові зв'язки між цими вузлами та вузлами 7,8,9 бути не можливі через те, що сигнал буде передаватися з затримкою через стіни коридору. Такі додаткові зв'язки будуть перевантажувати таблиці маршрутизації.

Це означає, що пристрої «1,2,3,4,5,6» будуть належати до зони «коридор 1», а пристрої «7,8,9» до деякої зони «коридор 2». При цьому стіна це те, що розділяє ці дві зони.

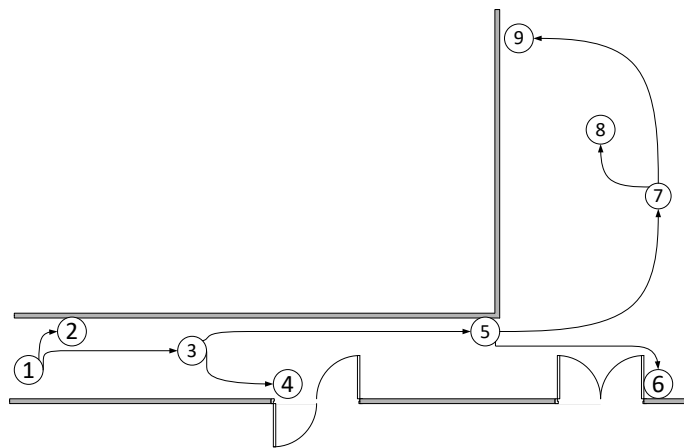


Рис. 2.13 Топологія для коридорів та обходу перешкод

Для стандартної прямокутної кімнати, чи кімнати, у якій нема бар'єрів, які заважають проходженню сигналу можна використовувати стандартний mesh та AODVjr, як показано на рис. 2.14. Зазвичай у межах однієї кімнати не буде багато пристроїв, отже передаючи сигнали за допомогою AODVjr не будуть створюватися так звані «шторми».

Зони перевіряє та видає координатор, бо його роль це надати пристроям мережі короткі адреси, які використовуються алгоритмом AODVjr для створення таблиць маршрутизації.

Кожен пристрій мережу ZigBee має так званий identify cluster, що зберігає в собі такі дані, як місцезнаходження приладу (Office 1, Toilet, Bedroom і тд.). Цю інформацію можна використовувати для модернізованої побудови таблиць маршрутизації.

До identify cluster треба додати такий параметр, як зона. Наприклад, на рис. 2.13 зображений коридор. Усі пристрої належать до місця «коридор», як наведено вище. Це місце зберігається у identify cluster приладу ZigBee. Також додається новий параметр, zone. Він є масивом і може зберігати декілька значень, якщо пристрій знаходиться на перетині зон. Пристрої 1,2,3,4,5,6 належатимуть до зони 1, а пристрої 5,6, 7,8,9 до зони 2.

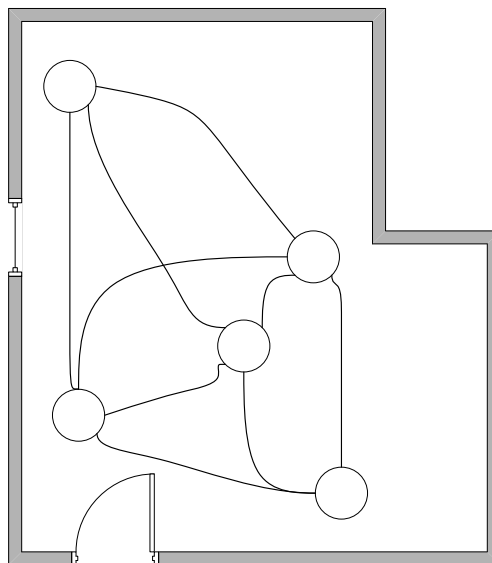


Рис. 2.14 Топологія у кімнаті

У якості псевдокоду можна ввести таку додаткову функцію, для побудови таблиці маршрутизації пристроїв:

алг ПЕРЕВІТКАБУФЕРУ

поч

читання буферу


```
читання інформації з буферу про identify cluster
якщо читання пройшло успішно
    то якщо пристрої належать до однієї зони
        то продовжити передачу пакету
        інакше припинити передачу пакету
кін алг ПЕРЕВІТКАБУФЕРУ
```

2.4 Висновок до розділу

У даному розділі були розглянуті основні поняття та можливості, які надають різні протоколи бездротового зв'язку. Була розглянута архітектура мереж Wi-Fi, Thread та ZigBee, визначені їх слабкі та сильні сторони. Для Wi-Fi та Bluetooth це, у першу чергу, топологія «зірка» та складність роботи одночасно з великою кількістю пристроїв. Основним мінусом мережі Thread є не тривіальна архітектура, яку досить тяжко розробляти.

Були розглянуті основні два алгоритми маршрутизації mesh, які використовує протокол ZigBee, а саме Cluster-Tree та AODVjr визначені їх основні недоліки, плюси та способи покращення. Також був запропонований власний алгоритм маршрутизації, який модернізує алгоритм Cluster-Tree за допомогою двійкового прошитого дерева та вибирає алгоритм маршрутизації поміж новим Cluster-Tree та AODVjr в залежності від архітектури кімнати, у якій знаходиться пристрій.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАКЕТНОГО ЗРАЗКА РОЗУМНОГО БУДИНКУ

3.1 Технічні вимога до макетного зразка

Для тестування пропонованого алгоритму можливі два основних підходи: моделювання у програмному середовищі та тестування на макетному зразку (МЗ). Щоб провести останнє необхідно розробити МЗ, що підходить для даної задачі.

Ціль створення МЗ - полегшити тестування інфраструктури мережі Розумного будинку.

Можна виділити два основні види мережі Розумного будинку, а саме «зірка» та mesh. Мережа типу «дерево» це частковий випадок мережі mesh. Хоча «зірку» також можна вважати частковим випадком мережі mesh, але її використовують окремі протоколи, такі як Wi-Fi чи Bluetooth, а от «дерево» використовується лише як частковий випадок у протоколах, що підтримують mesh. Отже для досягнення поставленої цілі необхідно створити макет, що підтримує два види протоколів. Були обрані Wi-Fi та ZigBee.

Для інформативного тестування на МЗ він має задовільнити наступні умови:

- 1) Макет має демонструвати деякий мінімальний функціонал розумного будинку, а саме взаємодію пристроїв у межах однієї підсистеми та декількох підсистем. Ця умова має задовольнятися для того, щоб показати, що розроблений метод універсальний і може реалізувати основні переваги mesh мережі, а саме можливість спілкування між різними пристроями без використання хабу/координатору і т.д., а також, щоб показати, що розроблений метод може бути використаний у якості частини вже існуючого розумного будинку;
- 2) Кількість пристроїв мережі mesh повинна бути достатня, для демонстрації базових властивостей цієї топології. Мінімальна

рекомендована кількість пристроїв – 7. Прокіл ZigBee використовує три види пристроїв: координатор, маршрутизатор, кінцевий пристрій. Для побудови повноцінної мережі необхідно використати хоча б один координатор, два маршрутизатори, що під'єднані до цього координатору, та по одному кінцевому пристрою для кожного з маршрутизаторів. При цьому усі пристрої мережі отримують коротку адресу від єдиного координатору. Для тестування взаємодії пристроїв, які не можуть спілкуватися одне з одним через короткі адреси потрібен ще один координатор та будь-який пристрій, що до нього під'єднаний;

- 3) Кількість пристроїв мережі Wi-Fi повинна бути більше, ніж 2, щоб продемонструвати топологію «зірка», а не можливість прямого підключення двох пристроїв один до одного. Отже у МЗ буде використовуватися три пристрої мережі Wi-Fi, один з яких є координатором;
- 4) Мережа розумного будинку має містити у собі деякий пристрій, що виконує роль «хабу» чи шлюзу. Цей пристрій необхідний для того, щоб мережа mesh мала можливість передавати дані у мережу «зірка» та навпаки, а також для того, щоб усі мережі Розумного будинку мали доступ до Хмарних сервісів;
- 5) Пристрої мережі mesh мають бути повністю автономними, не залежати один від одного і від інших пристроїв розумного будинку. Ця умова додана для того, щоб продемонструвати реальну взаємодію датчиків з низьким енергоспоживанням, для яких був створений протокол ZigBee;
- 6) Пристрої мережі mesh повинні мати велику енергоефективність. Вони працюють від батарейок, які, при ідеальних обставинах, ніколи не мають змінюватися. Отже кожен з кінцевих пристроїв по можливості має більшість свого часу проводити у режимі сну;

- 7) Має бути можливість змінювати функції кінцевих пристроїв у подальшому. Треба надати можливість виконувати подальші роботи на тему Розумного будинку на цьому МК;
- 8) Один з пристроїв мережі Wi-Fi має виконувати віддалену обробку даних, які отримав «хаб» від пристроїв мережі mesh. Ця умова необхідна, щоб продемонструвати можливість передавати дані з підмережі mesh у інші підмережі.

Для розробки МЗ необхідно виконати такі задачі:

- Створення структурної схеми МЗ;
- Визначення розміщення пристроїв у будинку;
- Визначення основних шляхів передачі інформації;
- Визначення пристроїв, в яких буде складатися МЗ;
- Створення схеми підключень та складання МЗ;
- Створення ПО для хабу;
- Створення ПО для усіх пристроїв мережі ZigBee;

3.2 Структурна схема МЗ

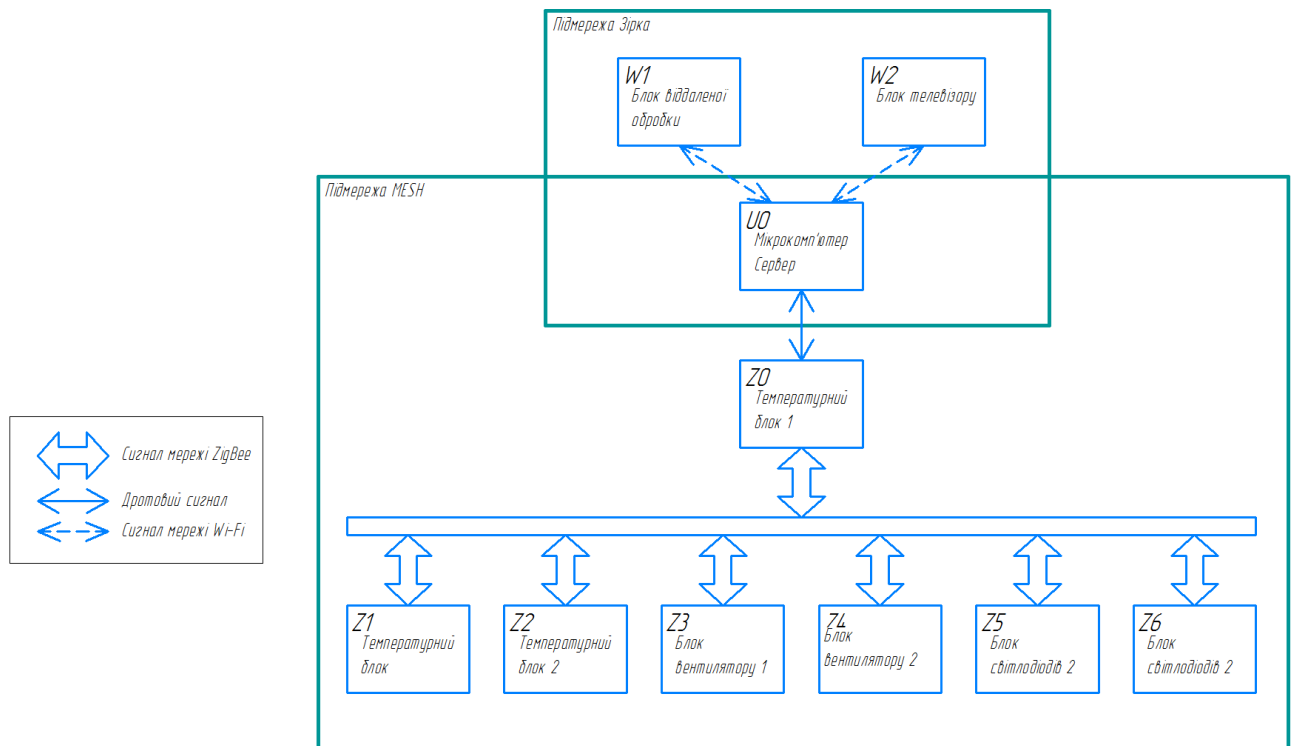


Рис.3.1 Структурна схема МЗ

Для того, щоб задовільнити усі умови, що вказані у пункті вище була розроблена наступна функціональна схема МЗ, зображена на рис. 3.1.

На рис. 3.1 за допомогою букви Z позначені блоки, що використовують для спілкування протокол ZigBee, буква W позначає блоки, що використовують Wi-Fi, буква U – позначає шлюз.

Температурні блоки Z0, Z1 та Z2 мають вбудовані функції симуляції температури та тиску за деяким законом розподілу, надані у стандартній бібліотеці пристроїв Nordic. Блок Z0 – це обов’язковий координатор, мережі ZigBee. По замовчуванню усі ці три блоки знаходяться у різних кімнатах. Також усі ці блоки можуть надсилати інформацію типу «температура» з зазначенням місця, де вона була отримана та ідентифікатором приладу.

Блоки Z3 та Z4 мають під’єднані до себе вентилятори. Вони можуть приймати два типи інформації – вимкнення/увімкнення вентилятору та температуру. Ці блоки також знаходяться у різних кімнатах: блок Z3 разом з блоком Z1, а блок Z4 разом з блоком Z2. Також при потребі ці два блоки можуть надсилати інформацію про те, у якому стані знаходиться вентилятор (увімкнений/вимкнений).

Блоки Z5 та Z6 імітують увімкнення та вимкнення світла у кімнаті. Вони по аналогії з блоками Z3 та Z4 можуть отримувати та надсилати пакети, що сигналізують про вимкнення та ввімкнення світлодіодів.

Блок U0 виконує роль шлюзу/хабу. До нього на дротовому рівні під’єднаний блок Z0. Крім того, блок U0 може виконувати роль Wi-Fi маршрутизатору та підключатися до інтернету.

Блоки W0 та W1 працюють на мережевому протоколі Wi-Fi та підключені як кінцеві вузли мережі Wi-Fi до блоку Z0.

Ідеологічно можна розмістити блоки у будинку так, як показано на рис. 3.2.

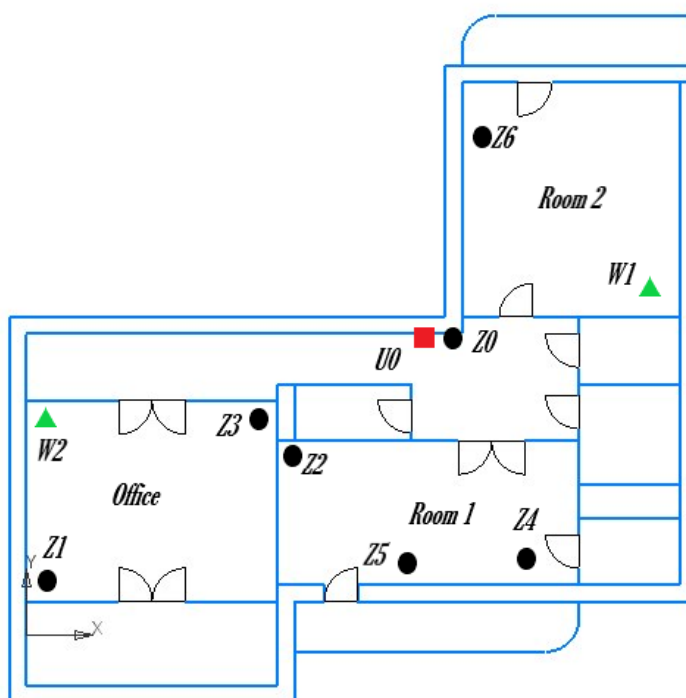


Рис. 3.2 Розміщення пристроїв у будинку

Можливі ролі вузлів ZigBee вказані у табл. 3.1:

Табл. 3.1. Можливі ролі вузлів ZigBee

Вузол	Координатор (К)	Маршрутизатор (М)	Кінцевий пристрій (КП)
Z0	+	-	-
Z1	-	+	+ коли Z3 М
Z2	-	+	+ коли Z4 М
Z3	-	+	+ коли Z1 М
Z4	-	+	+ коли Z2 М
Z5	+ коли Z6 не К	+	+ коли Z6 К
Z6	+ коли Z5 не К	+	+ коли Z5 К

Як видно з таблиці Z0 завжди має бути координатором, бо це пристрій, що роздає короткі адреси. У мережі mesh має бути хоча б один такий пристрій.

Z1...Z4 координаторами бути не можуть, бо знаходяться близько одне до одного і ідеологічно належать до єдиної групи пристроїв, які можуть спілкуватися одне з одним за допомогою топології mesh.

Пристрої Z1 та Z3 як і пристрої Z2 та Z4 не можуть одночасно бути двома кінцевими пристроями через те, що тоді вони не зможуть передавати дані одне одному з використанням можливостей мережі mesh, бо кінцеві пристрої не можуть спілкуватися одне з одним, лише з батьківським маршрутизатором.

Пристрій Z6 чи Z5 можуть бути координаторами, але для того, щоб показати функціонал мережі потрібно, щоб у них був хоча б один дочірній вузол, а отже одночасно координаторами вони бути не можуть. Так само, вони можуть бути кінцевими пристроями, але тоді в цілях тестування Z0 не буде мати можливість надати їм короткі адреси.

На рис. 3.4 зображена пропонована схема передачі інформації між кінцевими пристроями МЗ. На ній зображено кінцеві пункти призначення основних інформаційних пакетів та функції, що виконує кожен з приладів МЗ.

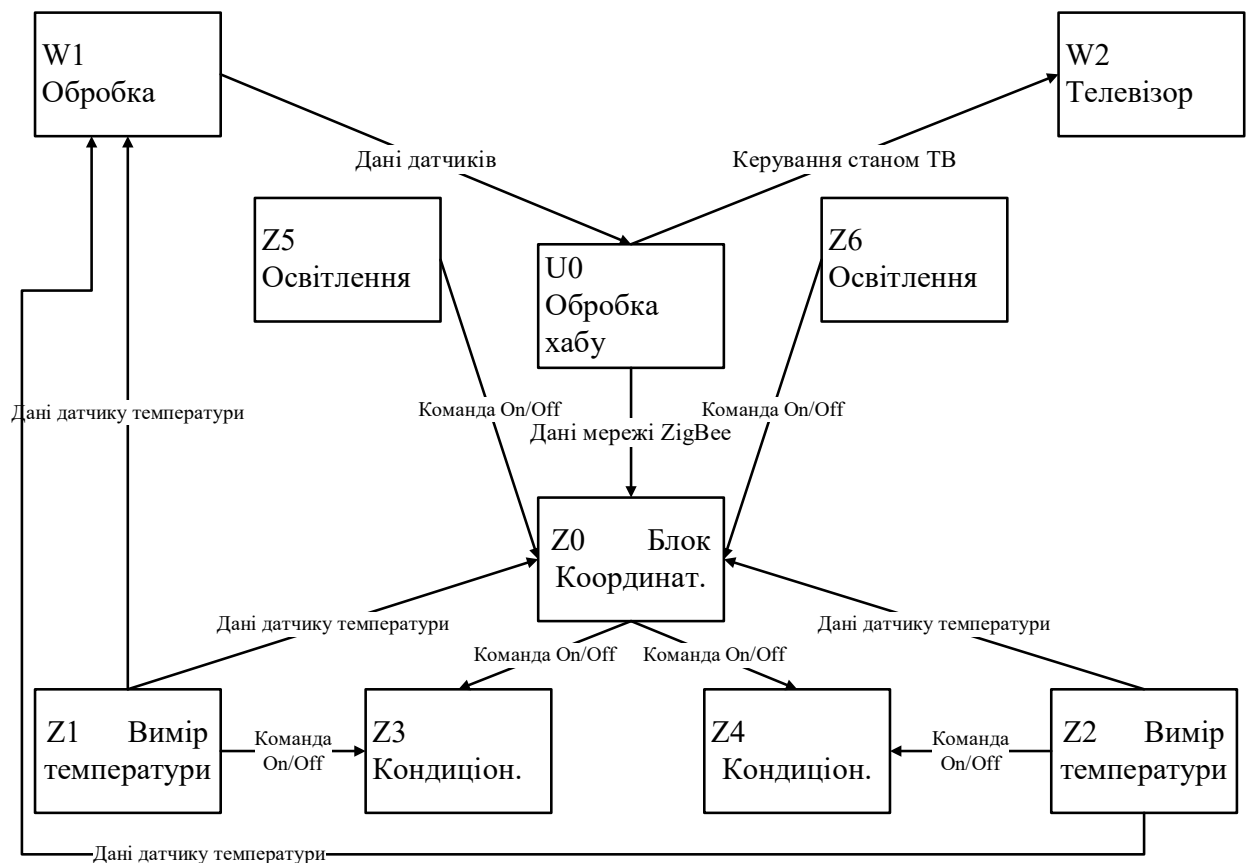


Рис. 3.4. Схема передачі інформації між кінцевими пристроями

На рисунку зображена не фактична передача пакетів інформації, а відправник та отримувач пакетів інформації. Направленість стрілок вказує на те, хто відправник пакету, а хто отримувач. Також вказано, якою самою інформацією будуть обмінюватися пристрої МЗ.

Вибір складових для реалізації МЗ

Мікрокомп'ютер Orange Pi Lite H3 512МБ.

Цей пристрій було обрано через його універсальність, простоту роботи з ним та невелику ціну. Orange Pi може виконувати роль серверу, хабу, шлюзу, маршрутизатору, на нього можна встановлювати операційну систему Ubuntu та програмне забезпечення Open Hub. У подальшому функціонал цього пристрою можна розширювати.

Якщо замість хабу використовувати стандартний esp8266, то виникнуть проблеми з розширенням мережі, бо цей пристрій має підтримку одночасної роботи лише з 5-ма іншими пристроями, що не є доцільним, коли основною

задачею є побудова топології mesh. Також немає простого способу підключення пристроїв, що підтримують протокол ZigBee та esp8266 чи Arduino. В свою чергу Orange Pi має декілька USB виходів, з якими можна працювати як з COM портами. Фото пристрою під час розробки для нього програмного забезпечення наведено на рис. 1 додатку А.

nRF52840 Dongle

nRF52840 Dongle – це контролер, що має можливість використання протоколів ZigBee, Bluetooth MESH, Thread Protocol. Також цей він підтримує розробку пристроїв з низьким енергоспоживанням, мають вбудований режим сну. Популярний серед розробників, які розробляють IoT системи та кінцеві пристрої, має потенціал працювати в полі від батареї багато років. До того ж, на відміну від конкурентів, продукція компанії Nordic має гарну документацію. Контролер компактний та підключається до комп'ютеру через USB порт. Може використовувати віртуальний COM порт для спілкування з іншими пристроями. nRF52840 Dongle був обраний через те, що він у три рази дешевший, ніж Arduino з модулем ZigBee.

До найбільшого мінусу цього пристрою можна віднести відсутність програматора та будь-якої можливості виконувати дебаг.

Фото пристрою наведено на рис. 2 додатку А. Також на цьому фото видно понижувач напруги 9 В DC до 5 В DC

Вентилятор 5 В

Вентилятор 5В при підключенні може житися напряду від nRF52840 Dongle. Фото пристрою наведено на рис. 3 додатку А

Пристрої мережі Wi-Fi

Контролер esp8266

Обраний як контролер, що підтримує Wi-Fi – має вбудований Wi-Fi та повністю сумісний з Arduino та його модулями. Він дешевий та легкий у

роботі за допомогою повної сумісності з середовищем розробки Arduino. Не підтримує протокол ZigBee.

Процес збирання МЗ

Загальна схема збору пристрою досить проста. Акцент ставиться на незалежну розподілену мережу ZigBee Принципова електрична схема Nordic NRF528210 вказана у додатку А рис. 4.

Кожен з пристроїв мережі ZigBee, як вказано у вимогах, повинен мати своє незалежне джерело живлення. Для цього було обрано використовувати батарейки «Крона», які мають постійну напругу 9 В.

Була розроблена принципова електрична схема пристроїв Z1, Z2, Z5, Z6, що вказана на рис. 5 у додатку А. На ній вказано, як Nordic NRF528210 підключається до понижувача постійної напруги з 9В до 5В через свій USB вихід. Понижувач напруги підключений до батарейки типу «корона» 9В. Для простоти роботи до Nordic NRF528210 були припаяні pls.

Була розроблена принципова електрична схема пристроїв Z3, Z3 вказана на рис. 6. Через ніжки VVD OUT та P0.10 підключений вентилятор, діаметром 5 см. (фотографію пристрою можна побачити на рис. 3.5).

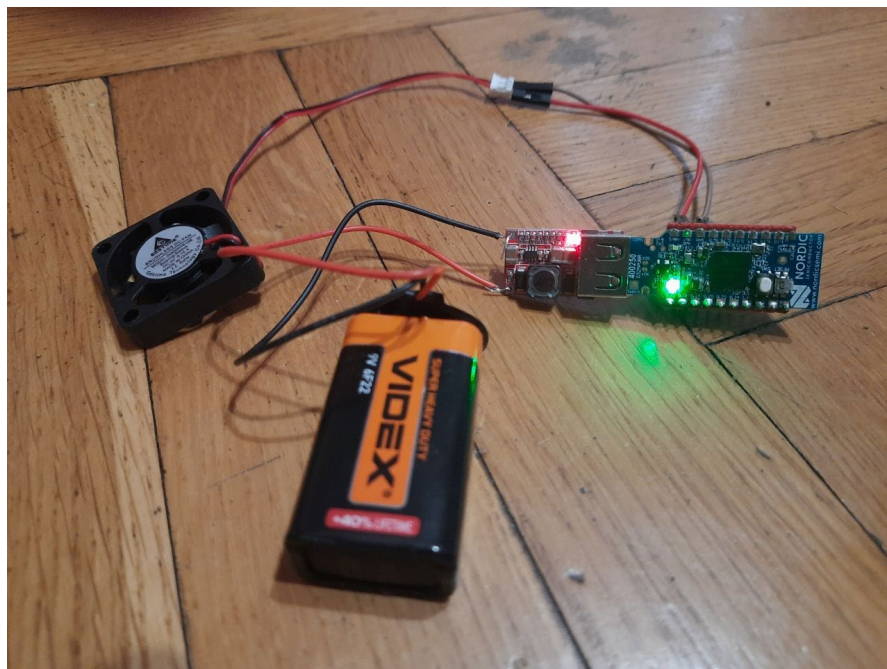


Рис. 3.5 Фото Z3

Фотографія хабу представлена на рис. 3.6. Через один з його USB входів до його підключений Nordic NRF528210 Dongle без ніжок. Для хабу використовується свій блок живлення на 5 В та 2А.

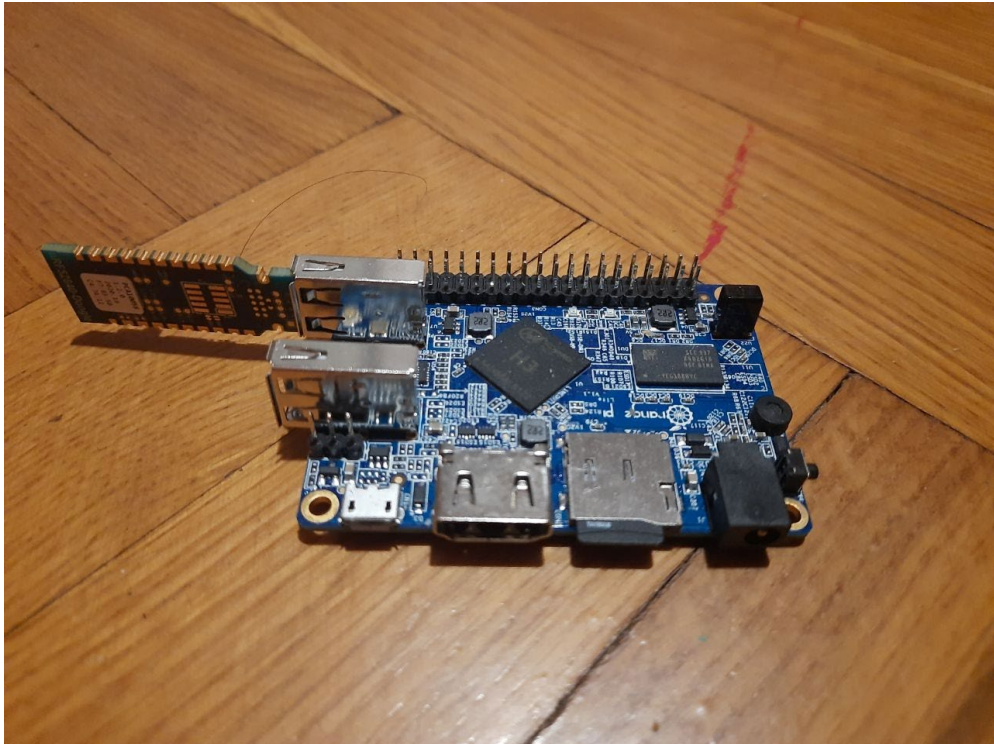


Рис. 3.6 Фото Z0 та U0

3.3 Опис хабу OpenHab

Одним з ключових елементів МЗ є хаб. Було прийняте рішення у якості програмного забезпечення хабу використовувати програмний продукт з відкритим кодом OpenHab.

OpenHub оперує наступними поняттями:

Прив'язка – це компонент openHAB, який забезпечує інтерфейс електронної взаємодії між пристроями.

Річ – це перше представлення ваших пристроїв із відкритим програмним забезпеченням.

Канал – це зв'язок програмного забезпечення openHAB між “Речами” та “Елементами”.

Елементи – це відкрите програмне забезпечення, що представляє собою інформацію на деякому пристрої.

Правила – це команди, які наказують виконувати деякі автоматичні дії (у найпростішій формі: якщо "це" трапиться, openHAB зробить "те").

Карта сайту – це користувальницький інтерфейс (веб-сайт), створений програмним забезпеченням openHAB, який представляє інформацію про стан Розумного будинку та дозволяє взаємодіяти з пристроями Розумного будинку.

У програмного забезпечення openHAB є можливість взаємодіяти з пристроями за допомогою великої кількості бездротових протоколів та за допомогою віртуальних COM портів.

У openHAB є вбудована підтримка протоколу ZigBee але нажаль, для цього йому необхідний власний розумний шлюз ZigBee. Розробка подібного шлюзу не є частиною даної роботи, отже з усіма пристроями мережі ZigBee ПЗ openHAB спілкується через віртуальний COM порт і ідентифікує усю мережу, як єдиний пристрій. Інформація, що надходить до openHAB з мережі достатня, щоб за допомогою не складної текстової обробки можна було ідентифікувати який саме пристрій надіслав пакет інформації, де він знаходиться та який інформаційний пакет треба надіслати у відповідь.

Приклад інформації, що виводиться з COM порту на openHAB:

```
Office nrf2 Temperature 34  
Room1 nrf3 On/Off True
```

У даному прикладі перше слово – це місцезнаходження приладу, що приймає інформацію. Друге слово це ідентифікатор приладу. Третє слово – назва кластеру, що надсилає інформацію. Четверте – фактична інформація, що надіслав деякий прилад, розташований у деякому місті з одного зі своїх кластерів (тема кластерів буде розглянута у підпункті 3.4).

Формат надсилання повідомлення з openHAB до будь-якого з пристроїв аналогічний. Внизу, як приклад, наведене правило для прийняття даних про температуру:

```
String Serial_string "Text [%s] " {serial="COM3"}

// створюємо правило, коли в залежності від тексту консолі надсилаємо команди
// в опен хаб
// ділимо строку на слова

String[] words = Serial_string.split(" ");

rule "Serial control" when Item Serial_string received update then

if (words[1]==" Room1") sendCommand(Livingroom_Temperature_TaretTempterture, words[4])

if (words[1]==" Office") sendCommand(Office_Temperature_TaretTempterture, words[4])
```

3.4 Кластери ZigBee

Стек ZigBee Nordic nRF52840 Dongle використовує ZBOSS 3.3.0 - портативний, високопродуктивний стек програмного забезпечення Zigbee, який допомагає подолати проблеми взаємодії, налаштування, тестування та оптимізації рішення на основі протоколу Zigbee.

Цей повнофункціональний стек Zigbee PRO забезпечує широкую підтримку протоколів, доступних у вигляді двійкових файлів, та пропонує інші ключові переваги, серед яких:

- Оптимізація для мінімального використання ресурсів, підвищеної надійності та високої продуктивності;
- Підтримка міжплатформних рішень, включаючи багато мікросхем, що відповідають стандарту IEEE 802.15.4, різних операційних системи, процесорів та платформи без ОС;
- Ретельно перевірена сумісність;
- Сертифікація Zigbee.

Під час програмування програм для Zigbee треба знати про існування таких сутностей:

Атрибут – сутність даних, яка представляє фізичну величину або стан. Ці дані передаються іншим пристроям за допомогою команд.

Кластер – це поняття, яке визначає один або кілька атрибутів, команд, поведінки або залежностей. Кластер підтримує незалежну утиліту або функцію програми на кінцевому пристрої.

Цей термін також може бути використаний для реалізації або специфікації кластера в кінцевій точці. Протокол ZigBee надсилає інформацію за допомогою кластерів. Вони – це опис стандартних пакетів, які можна надіслати за допомогою даного протоколу.

Стандартні кластери ZigBee містять майже все, що необхідно для автоматизації Розумного будинку. Додатково можна створювати свої користувацькі кластери, що будуть демонструвати один з пристроїв, які підключені до даного вузла мережі.

Пристрій – це поняття, яке визначає унікальний ідентифікатор пристрою та набір обов’язкових та необов’язкових кластерів, які мають бути реалізовані в одній кінцевій точці.

Кінцева точка - екземпляр пристрою на одному вузлі.

Вузол - тестована реалізація програми Zigbee в одному стеку з однією мережевою адресою та в одній мережі.

Додаток Zigbee реалізує вузол, який обробляє кінцеві точки. Кожна кінцева точка реалізує набір кластерів. Кластери реалізують функціональні можливості пристрою, такі як атрибути для зберігання стану та команди для різних операцій.

На найвищому рівні створення кінцевого продукту Zigbee складається з таких частин:

- Декларація структур даних пристрою Zigbee:
 - Оголошення атрибутів для кожного кластера (списки атрибутів);
 - Оголошення кластера (або Оголошення нестандартного кластера);

- Оголошення списку кластерів для пристрою;
- Оголошення кінцевої точки (включаючи контекст виконання).
- Виконуваний код пристрою Zigbee:
 - Реєстрація контексту пристрою (включаючи додаткову реалізацію функції обробника для користувацьких пакетів ZCL);
 - Налаштування перевизначення обробника команд ZCL за замовчуванням;
 - Реалізація зворотного виклику пристрою Zigbee (необов'язково);
 - Надсилання команд ZCL та розбір команд ZCL відповідно до логіки програми.

Наступним чином у програмному забезпеченні кінцевих пристроїв описані атрибути увімкнення/вимкнення:

```
ZB ZCL DECLARE ON OFF SWITCH CONFIGURATION ATTRIB LIST(switch_cfg_attr_list,
                                                         &attr_switch_type,
                                                         &attr_switch_actions);
```

`switch_cfg_attr_list` – це назва списку атрибутів,

`attr_switch_type` – вид перемикача,

`attr_switch_actions` – стан перемикача.

Далі треба об'явити кластери. SDK надає більше 30 реалізованих кластерів Zigbee, готових до користувацької програми.

Щоб використовувати кластер, програма повинна оголосити його частиною реалізованого пристрою Zigbee. Кожен опис кластера пов'язаний із пристроєм Zigbee і включає такі дані:

- Ідентифікатор кластера (відповідно до специфікації бібліотеки кластерів Zigbee);
- Список атрибутів;

- Роль кластера (згідно специфікації Бібліотеки кластерів Zigbee);
- Код виробника.

Дані опису кластера зберігаються за типом `zb_zcl_cluster_desc_t`. SDK надає кілька API для заповнення дескрипторів кластера під час створення декларації списку кластерів.

Кінцева точка або набір кінцевих точок повністю описує пристрій Zigbee. Оголошення кінцевої точки в програмі користувача завершує логічний опис пристрою Zigbee. Для реалізації функцій ZCL кожен пристрій Zigbee повинен мати принаймні одну кінцеву точку, крім вбудованої (зі значенням параметра `ep_id`, встановленим на 0). Ця оголошена кінцева точка буде збережена у списку кінцевих точок типу `zb_af_endpoint_desc_t`.

Кожен опис кінцевої точки включає такі дані:

- Ідентифікатор кінцевої точки;
- Ідентифікатор профілю;
- Кластерний список;
- Простий дескриптор;
- Внутрішні дані про час виконання.

Дані опису кінцевої точки зберігаються з використанням типу `zb_af_endpoint_desc_t`. SDK Nordic надає кілька API для заповнення дескрипторів кінцевих точок під час виконання декларації пристрою Zigbee для кожного підтримуваного пристрою Zigbee. Крім того, API оголошує простий дескриптор. API декларації списку кінцевих точок надається у вихідному коді і може бути змінений залежно від програми.

Під час реалізації МЗ були використані наступні кластери:

- Кластер мультисенсору (як приклад користувацького кластеру. Зберігає дані щодо температури та тиску).
 - Атрибути мультисенсору
 - Атрибути ідентифікації пристрою.

- Атрибути базового опису пристрою.
- Атрибути температури.
- Атрибути тиску
- Атрибути ввімкнення та вимкнення
- Кластер мультисенсору
- Кінцева точка мультисенсору
- Прилад мультисенсору
- Кластер On/Off.

Приклад об'яви кластера:

```
ZB_DECLARE_MULTI_SENSOR_CLUSTER_LIST(multi_sensor_clusters,
                                     basic_attr_list,
                                     identify_attr_list,
                                     temperature_attr_list,
                                     pressure_attr_list,
                                     on_off_led_attr_list);
```

Приклад оголошення кінцевого пристрою цього кластеру:

```
ZB_ZCL_DECLARE_MULTI_SENSOR_EP(multi_sensor_ep,
MULTI_SENSOR_ENDPOINT,
multi_sensor_clusters);
```

Діаграми станів пристроїв наведені у додатку «Б» рис. 2.

Після визначення кластерів програма починає обробку стеку за допомогою подій.

Визначення параметрів запуску та логування:

```
ZB_SET_TRACE_LEVEL(ZIGBEE_TRACE_LEVEL);
ZB_SET_TRACE_MASK(ZIGBEE_TRACE_MASK);
ZB_SET_TRACE_DUMP_OFF();
ZB_INIT("zc");
```

При цьому `ZIGBEE_TRACE_MASK` це номер каналу, який у даному МЗ виставлений як 16, але для роботи з мережами інших виробників треба виставляти 12.

Потім встановлюється довга адреса пристрою, за рівнянням 2.2

```
zb_set_long_address(ieee_addr);
```

Ініціюємо запуск обробки «подій» на пристрої:

```
ZB_ZCL_REGISTER_DEVICE_CB(zcl_device_cb);
```

`zcl_device_cb` викликається, коли пристрій отримав деяке повідомлення.

Запуск стеку ZigBee:

```
zboss_start_no_autostart();
```

Запуск петлі `zboss`:

```
while(1)
{
    zboss_main_loop_iteration();
    UNUSED_RETURN_VALUE(NRF_LOG_PROCESS());
}
}
```

Діаграма станів подій пристрою та стеку `zboss` наведена у додатку Б рис. 1 та рис. 2 відповідно.

3.5 Висновки до розділу

У даному розділі був розроблений МЗ, необхідний для тестування mesh мережі. Була створена структурна схема макетного зразку, розглянуті можливі схеми підключення пристроїв один до одного в межах мережі mesh, описані пакети, якими будуть обмінюватися пристрої у мережі ZigBee. Також був створений список необхідних для реалізації МЗ комплектуючих та програмного забезпечення.

РОЗДІЛ 4. ТЕСТУВАННЯ ПРОПОНОВАНОГО АЛГОРИМУ МАРШРУТИЗАЦІЇ

4.1 Тестування на макеті

Макет має вигляд, представлений на Рис. 4.1.



Рис. 4.1 Макет мережі розумного будинку

На даному МЗ виконувалося тестування методом «білого ящика». Код, за допомогою якого проводилось тестування, був вбудований в програму, тестувальник попередньо знав, як саме проходить маршрутизація.

Тестування підмережі ZigBee відбувалося окремо за допомогою середовища налагодження. При цьому координатор мережі був увімкнений не у хаб U0, а у комп'ютер з ОС Windows, що збирав дані з COM порту.

Спочатку мережа тестувалася за допомогою «тестування продуктивності». Параметром «продуктивності», який тестувався, була швидкість надсилання пакетів “On-Off”. На пристрої, що надсилав дані та отримував їх запускалося по таймеру. Таймер другого пристрою знімав дані про час після надходження кожних 200 пакетів у зберігав ці дані у своїй

пам'яті. Після отримання усіх цих пакетів, пристрій надсилав дані про час передачі пакетів на координатор Z0.

Це тестування показує нормальний режим роботи пристрою.

Під час самого тестування вимірювався час, який необхідний для передачі 1000 пакетів з одного вузла до іншого для найбільш «проблемних» вузлів попарно.

На рис. 4.2 вказані топології, що тестувалися. Для підмережі ZigBee.

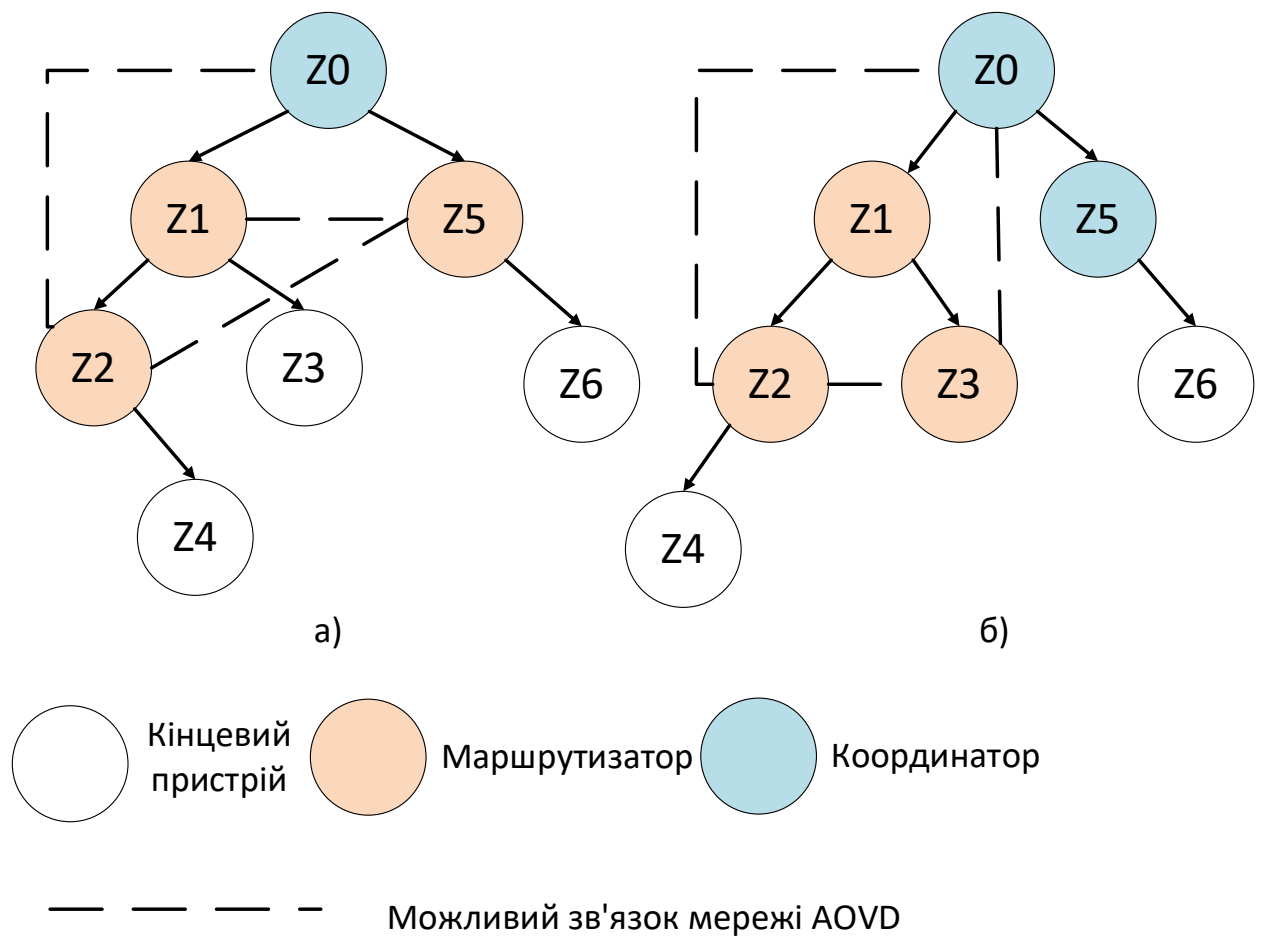


Рис. 4.2. Топології мережі ZigBee

На рис. 4.2 «а» обрані наступні проблемні вузли:

- 1) Координатор Z0 та кінцевий пристрій Z4. Він обраний, бо знаходиться на найбільшій відстані від координатора;
- 2) Кінцевий вузол Z4 та Z6, бо знаходяться на різних гілках, відносно координатора;

3) Вузли маршрутизатора Z1 та Z5, бо знаходяться поруч і мають спілкуватися за допомогою AODV.

На рис. 4.2 «б» обрані наступні проблемні вузли:

- 1) Координатор Z0 та кінцевий пристрій Z6. Він обраний, бо не належить координатору, який до нього звертається;
- 2) Маршрутизатор Z1 та Z5, бо належать до різних підмереж.

Результати тестування представлені на рис. 4.3 та рис. 4.4.

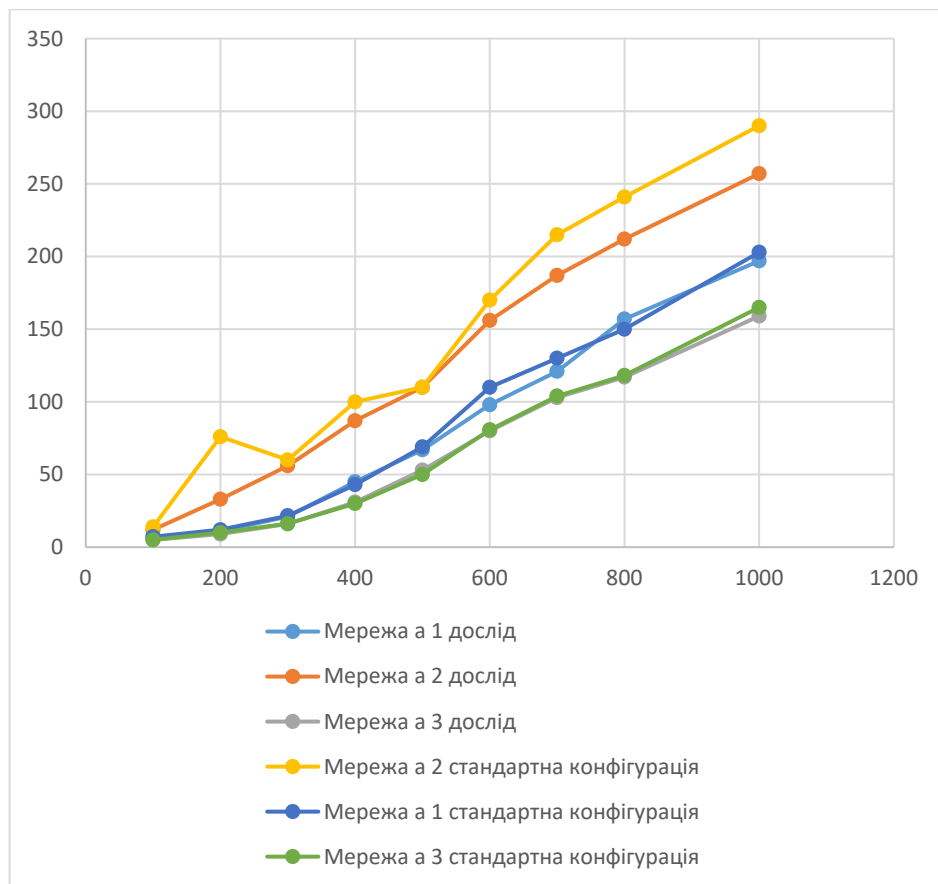


Рис. 4.3. Результати роботи мережі ZigBee з одним координатором

Якщо розрахувати середню швидкість передачі пакетів, то отримаємо, що для підмережі «а» у першому експерименті отримано середній приріст швидкості на 5.2%, у другому – на 11,5 %, а у третьому на 2%. Для підмережі «б» у першому досліді був отриманий приріст на 2%, а у другому на 3%.

Наступними тестами були «стрес тести» підмережі AODV. Найбільшою проблемою такої мережі є необхідність одночасної побудови

великої кількості таблиць маршрутизації у випадку, коли дуже багато різних пристроїв одночасно пересилають пакети. Кожен пакет йде одночасно максимальною кількістю шляхів і після кожної нової передачі кількість пакетів подвоюється (дублюються однакові пакети, які йдуть на різні пристрої шукаючи «найкоротший шлях»). Такий сценарій подій називається «шторм».

Для того, щоб ввести систему у подібну ситуацію необхідно, щоб усі пристрої мережі одночасно генерували і надсилали пакети у різні вузли мережі.

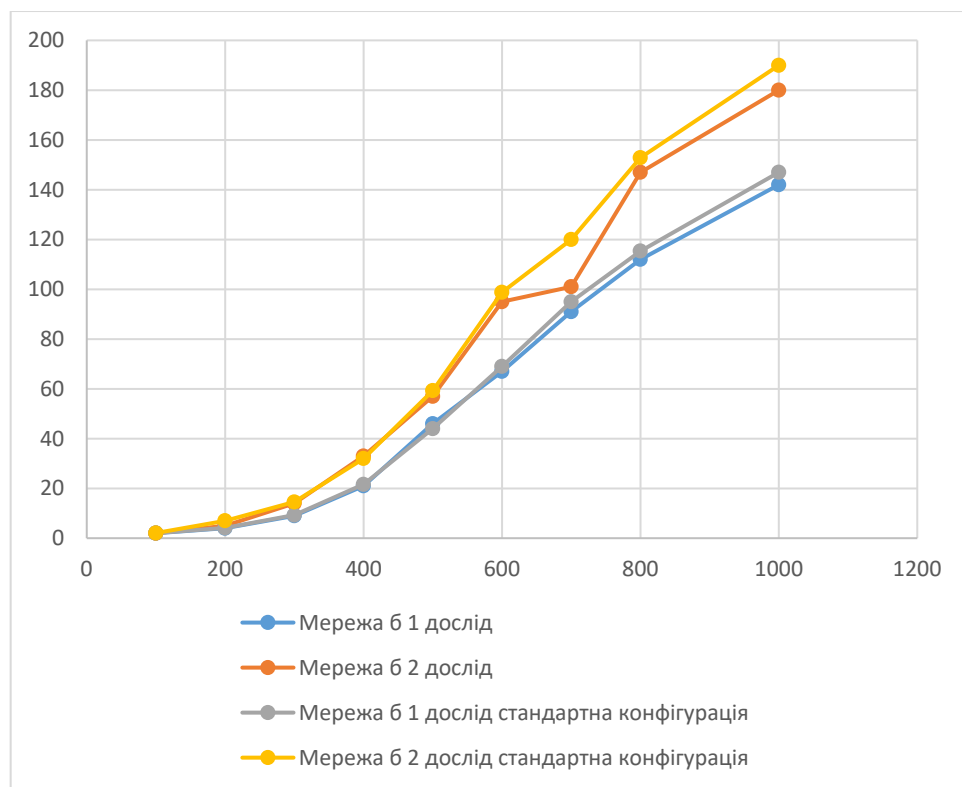


Рис. 4.4. Результати роботи мережі ZigBee з двома координаторами

Тож був проведений експеримент, що має на меті провести «шторми» у наведених вище топологіях. Для цього на топології, що представлена на рис. 4.2 «а» маршрутизатори будуть одночасно кидати пакети як найбільшій кількості інших маршрутизаторів. Буде розрахований коефіцієнт, який є результатом ділення кількості отриманих на кількість надісланих за 2с пакетів на кожному з пристроїв (табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Результати навантажень на AODV

Кількість надісланих пакетів - 500		
Вузол	Коефіцієнт пропонованого алгоритму	Коефіцієнт при стандартній роботі
Z1	0.744	0.718
Z2	0.886	0.840
Z3	0.878	0.852

З таблиці видно, що середній приріст надійності знаходиться в межах 7% відсотків.

Останніми були проведені «функціональні тести», що мали перевірити, чи виконує МЗ усі поставлені задачі, які були вказані у вимогах.

Задля можливості спілкування з хабом був проведений окремий експеримент, який вже не оперував швидкістю передачі даних та надійністю їх передачі, а перевіряв лише можливість передачі пакетів від хабу до вузлів мережі та навпаки.

Далі у списку наведені успішно виконані операції:

- 1) Запит температури з Z1 від U0 через Z0;
- 2) Періодичне надсилання температури з Z2 до U0 через Z0;
- 3) Вимкнення та увімкнення Z3 та Z4 в автоматичному режимі через скрипт U0;
- 4) Вимкнення та увімкнення Z3 та Z4 у ручному режимі;
- 5) Ввімкнення та увімкнення світла на Z5 та Z6;
- 6) Передача даних про температуру на блок W1;
- 7) Передача усієї доступної інформації на телефон W2 через localhost.

4.2 Моделювання на NS2

Макет може показати деякі можливості, що надає алгоритм, але створити на ньому велику мережу неможливо, у першу чергу через обмежений бюджет дипломної роботи. Тому задля демонстрації переваг

алгоритму на великих мережах пропонується виконати моделювання з використанням програмного забезпечення NS2.

Серед інших програм, які мають подібний до NS2 функціонал розглядалися OPNET, OMNET та NS3. Нажаль, не дивлячись на такі переваги як універсальність та мале використання ресурсів NS3 дуже складний в налагодженні та потребує додаткового програмування на мові Python та C++. OMNET та OPNET закладні для розуміння і мають багато зайвого функціоналу. Отже було прийнято рішення вибрати більш примітивну та легку програму NS2 задля економії часу [30].

Network Simulator 2 (NS-2) - це мережевий симулятор з відкритим кодом, який забезпечує підтримку моделювання основних протоколів, маршрутизації, багатоадресних протоколів для дротових та бездротових мереж. NS-2 – найбільш популярний симулятор серед дослідників і стає, де-факто, стандартом для тренажерів. Він був розроблений в 1989 році як варіант REAL Network Simulator. На основі C + і OTcl, NS-2 постійно доопрацьовувався до кінця 2011 року.

У мережі NS-2 є модуль підтримки Wireless Mesh, а також додатково є бібліотека WiMsh. Ще існує розширення Multi-routingprotocol Simulating Framework, запропонований дослідниками від Південно-Східного університету Китаю. NS-2 забезпечує підтримку шарів OSI, крім шарів презентації та сеансів. Симулятор має складну структуру, яка робить написання нових модулів важким завданням для дослідників, оскільки для цього потрібні хороші знання у архітектурі NS-2. Крім того, через застосування двох різних мов (C ++ та об'єктно-орієнтованого OTcl), створення навіть простого сценарію може стати складною роботою.

Не дивлячись на це, як вказано вище, існує велика кількість готових сценаріїв, що працюють з mesh і потребують невеликої модифікації.

NS-2 працює з файлами формату «.tcl», які містять у собі код на мові OTcl програмування OTcl за наступною структурою (з прикладами команд):

1) Створення об'єкту симуляції:

```
set ns [new Simulator]
```

2) Створення та відкриття файлу логування інформації:

```
set nf [open out.nam w]
```

3) Створення вузлів мережі:

```
set n0 [$ns node]
```

```
set n1 [$ns node]
```

4) Створення взаємозв'язків між вузлами мережі:

```
$ns duplex-link $n0 $n2 2Mb 10ms DropTail
```

5) Створення конкретних шляхів між вузлами мережі:

```
$ns duplex-link-op $n0 $n2 orient right-down
```

6) Опис протоколу:

```
set tcp [new Agent/TCP]
```

7) Опис запланованих дій (розкладу) симуляції:

```
$ns at 0.1 "$cbr start"
```

8) Опис пакетів:

```
puts "CBR packet size = [$cbr set packet_size_]"
```

9) Запуск симуляції:

```
$ns run
```

Маршрутизація в межах симуляції для ZigBee описана наступним чином:

1) Конфігурація топології:

```
set topo [new Topography]
```

```
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)
```

```
set god_ [create-god $val(nn)]
```

```
set chan_1_ [new $val(chan)]
```

2) Конфігурація вузлів:

```
$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \ вказується описаний алгоритм маршрутизації
```

```
-llType $val(ll) \ тип моделі  
-macType $val(mac) \ Стандарт 802_5_4  
-ifqType $val(ifq) \ Тип черги
```

```

        -ifqLen $val(ifqlen) \           Максимальна довжина черги
        -antType $val(ant) \             тип антени
        -propType $val(prop) \           тип моделі (зі стінами, з відлунням
і т.д.)
        -phyType $val(netif) \           фізичний рівень мережі (бездротовий)
        -topoInstance $topo \
        -agentTrace ON \
        -routerTrace ON \
        -macTrace ON \
        -movementTrace OFF \
            -energyModel "EnergyModel" \
            -initialEnergy 1000 \
            -rxPower 35.28e-3 \
            -txPower 31.32e-3 \
        -idlePower 712e-6 \
        -sleepPower 144e-9 \
        -channel $chan_1_                 канал 16-тий

```

При моделюванні мережі з невеликою кількістю вузлів можна спостерігати графічну демонстрацію передачі інформації, як зображено на рис. 4.5. Нажаль, графічної демонстрації для кількості вузлів, що тестуються у моделювання, нема через занадто велику кількість вузлів для відображення.

За допомогою утиліти Inet Topology Generator було створено файл з описом 1000 вузлів. Для цього використовується команда:

```
example% inet -n 100 -f debug -d .3 -s 16 -p 100> Inet.100
```

Вона створює файл з кількістю вузлів 100, які розташовані у просторі 100 на 100 умовних одиниць, при цьому 30% вузлів однонаправлені, а кількість розрядів мережі – 16.

Потім за допомогою утиліти Inet2Ns створюється файл з вузлами, який може використовувати симулятор NS-2.

У таблиці 4.1 вказані вхідні дані проведеної симуляції. Усі тести, які проводились на NS-2, це тести навантаженням, при яких кількість вузлів мережі збільшувалась

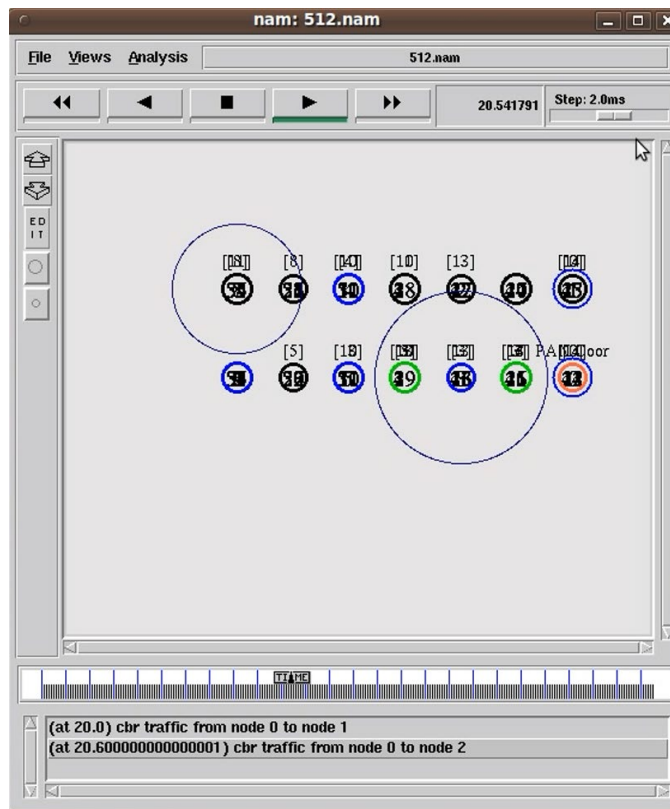


рис. 4.5 Інтерфейс NS-2

Під час проведення симуляції записувався файл логів цієї симуляції. ПО результатам файлів логування були побудовані наступні графіки залежності.

Табл. 4.2 Вхідні дані симуляції

Алгоритми	AODV, TREE, користувацький
Кількість вузлів	20,40,60,80,100
Час симуляції	2 с
Тип оточуючого середовища	Shadowing
Розмір пакетів	512 Кб/с
Розмір оточуючого середовища	100 м на 100 м
Кількість кінцевих вузлів	30%

Результати проведеного моделювання вказані на рис. 4.6-рис. 4.7.

Можна зробити висновки, що пропонований алгоритм швидший за AODV та TREE, але менш надійний за TREE через те, що як і у AODV при спробі передачі великої кількості інформації у мережі відбуваються так звані

«шторми», і деякі з вузлів не мають можливості обробляти усі отримані пакети.



Рис. 4.6 Результати симуляції 1

На щастя, подібна ситуація не часто відбувається у межах розумного будинку, бо датчики передають інформацію не постійно і не у один і той самий час.

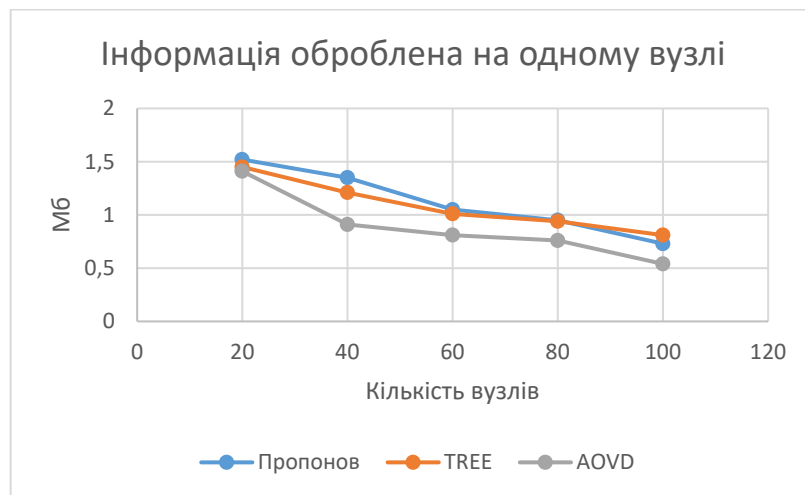


Рис. 4.7 Результати симуляції 2

Можна надати наступні рекомендації щодо подальшого вдосконалення алгоритму:

- Приділити увагу проблемі штормів у мережі AODV;

- Розглянути додаткові варіанти вдосконалення передачі даних по дереву;
- Провести симуляції, які б враховували стіни будинків;
- Провести симуляції з врахуванням існування єдиного хабу, а не лише обміну між вузлами мережі.

4.3 Порівняння з результатами існуючих робіт

У роботі [29] був протестований алгоритм прошитого дерева, який сумістили з алгоритмом Backpressure. Були отримані результати кращі, за отримані у даній роботі, що видно з рис. 4.8. Кількість втрачених пакетів у на 9,2% менша, ніж у методі, що представлений у даній роботі, але наведені у роботі результати майже в два рази краще, за звичайне ClusterTree. Однак реалізація алгоритму з роботи [29] на реальних мережах на багато складніша, ніж моделювання, що проведене у ній, а отже навряд подібний метод знайде застосування. Алгоритм представлений у дипломі простий і не вимагає великих опрацювань.

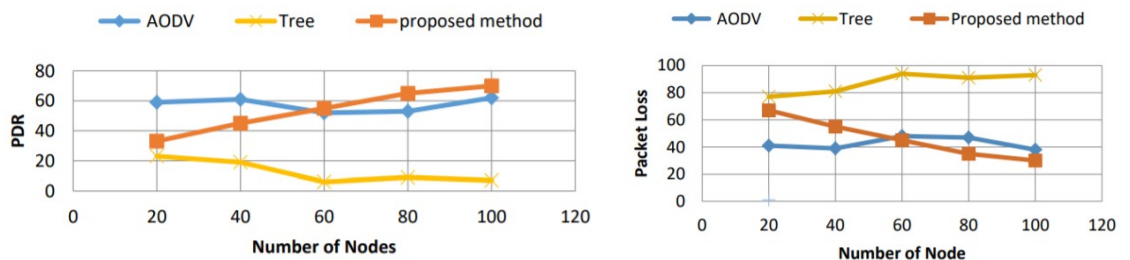


Рис. 4.8 Результати симуляцій роботи [29]

У роботі [28] базовий алгоритм модернізувався за допомогою періодичної переорієнтації дерева. Результати отриманих симуляцій наведені на рис. 4.9.

У роботі [28] отримана надійність передачі пакетів була вищою, ніж у цій роботі, але тестувалися лише зміни у підмережі «дерево» і на невеликій кількості вузлів.

На презентації плат, з яких було створено даний макет, а саме мережу mesh, був представлений [31] макет розумного будинку на основі технології

Thread. Найбільша його різниця з представленим – власне програмне забезпечення для хабу та відсутність взаємодії з іншими протоколами.

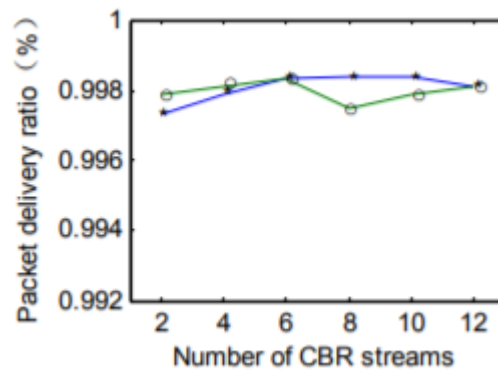


Рис. 4.8 Результати симуляцій роботи [28]

ESP представили робоче демо [32] Bluetooth Mesh. У показаній мережі було використано 100 пристроїв, які підключилися до неї в автоматичному режимі та мали можливість передачі пакетів з будь-якої точки мережі у будь-яку іншу точку мережі. На стійкість до «штормів» та швидкість передачі мережа на тестувалась.

4.4 Висновки до розділу

Було проведено тестування МЗ та пропонованого алгоритму маршрутизації.

З тестування на макеті показано, що:

- Швидкість передачі даних на запропонованому макеті вища, ніж при стандартному підході:
 - на 11,5 відсотків при передачі між кінцевими пристроями, що належать до різних кластерів
 - приріст швидкості між координатором та вузлами знаходиться в межах 5-7%;
 - приріст швидкості в єдиному кластері підмережі складає 2 - 3%;
 - Відношення отриманих пакетів до надісланих від час «штормів» збільшилося на 7%;

- За допомогою проведеного функціонального тестування показано, що МЗ відповідає поставленим у розділі 3 вимогам.

Тестування алгоритму за допомогою NS-2 показало, що він має кращі показники швидкодії за стандартні алгоритми, а саме на 21,7% за AODV та 1,7% за ClusterTree, але гірші на 7%, ніж наведені алгоритм Backpressure. Однак Backpressure має набагато більш складну реалізацію за пропонований алгоритм, що значною мірою ускладнює роботу з мережею.

Також на симуляції зазначено, що кількість втрачених пакетів у 1,43 рази краще, за використання лише алгоритму AODV, але все ще гірше за «чистий» ClusterTree. Також надійність менша на 9,2% ніж у роботі з алгоритмом Backpressure, але все ще більша за стандартний підхід і, як написано вище, Backpressure має за складну реалізацію на пристроях мережі.

Можна зробити загальний висновок, що пропонований алгоритм має вищу швидкодію та надійність за стандартні.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «ZIGBEEHOME»

5.1 Розробка стартап-проекту «ZigBeeHome»

Створення стартап проекту передбачає низку ризиків, з якими доводиться зіштовхуватися у процесі його реалізації. Даний розділ диплому передбачає покрокове планування структури стартапу, його реалізації та перспектив. Усі ці кроки необхідні для підвищення ефективності введення результатів диплому на ринок, а саме технології побудови мереж у Розумному Будинку, що заснована на протоколі ZigBee.

У цьому розділі наведена актуальність стартап проекту, що розробляється, його маркетинговий аналіз, базові елементи бізнес плану, ринкові можливості, ринок збуту і т.д. Також приводяться докази інноваційної та актуальності даної роботи для суспільства.

5.2 Опис ідеї

Останнім часом діяльність людини тісно пов'язана з автоматизацією її навколишнього середовища. Це стосується й безпосередньо будинку, у якому вона проживає. Уявіть описану нижче ситуацію.

Джон живе у своєму Розумному Будинку. О 6:30 у будинку вмикається система опалення, щоб прогріти будинок для комфортної температури. О 6:45 починає дзвонити будильник та вмикається світло у кімнаті Джона. В нього нема вибору, як піднятися, бо світло вже увімкнене і система не дає йому лягти спати. Він йде в душ, у якому до ранку була нагріта вода у бойлері, у цей час на кухні вмикається чайник (якщо там є вода). Потім Джон снідає і йде на роботу, опалення та зволожувач повітря вимикається. Система перевіряє стан ґрунту у вазонах і, при необхідності, проводить їх полив. Вона визначає відсутність молока та яєць у холодильнику та робить й оплачує замовлення в магазині. Його привезуть к поверненню Джона з роботи. Також система перевіряє прогноз погоди, дізнається, що вірогідність опадів 50% і починає полив газону. Розумний будинок визначає конкретне повернення до дому Джона за допомогою гугл-заторів та GPS-сигналу його телефону. Коли Джон рухається у напрямку будинку за пів години до його прибуття системи

клімат контролю починають працювати. Джон повертається, коли він йде спати, системи вмикають світло та знижують температуру будинку до комфортної для сну.

Задля досягнення цієї досить футуристичної мети необхідно створення багатьох інноваційних технологій, зокрема технології, за допомогою якої безліч кінцевих пристроїв та датчиків можуть спілкуватися між собою. При цьому ця технологія має надавати можливість додавати у систему велику кількість пристроїв, багато з яких живляться від батарейок, тож можуть «сісти» у будь який момент. Ще однією вимогою є можливість інтеграції з найпопулярнішими існуючими хабами існуючих Розумних будинків.

Предметом проекту є розробка автономної мережі Розумного будинку на основі протоколу ZigBee.

Основними задачами проекту є розробка алгоритму маршрутизації мережі пристроїв розумного будинку, що сумісна з протоколом ZigBee; підвищення швидкості передачі інформації між вузлами мережі; досягнення сумісності розробленої мережі зі вже створеними проектами Розумного будинку; можливість зміни топології та структури мережі у режимі реального часу.

Основною ідеєю проекту є зменшення витрат на створення розподіленої мережі кінцевих пристроїв у межах Розумного.

У таблиці 5.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Алгоритм маршрутизації mesh мережі на основі протоколу ZigBee для великої кількості кінцевих приладів	Побутове використання власниками Розумних Будинків	Універсальність, стійкість до відмов та мала ціна утворених систем датчиків та пристроїв
	Використання компаніями, що створюють Розумні будинки	
	Використання на виробництвах	

Пропонується алгоритм та mesh мережа, що заснована на протоколі ZigBee, що має високу універсальність (сумісність з іншими мережами та пристроями), високу стійкість до відмов та малу ціну.

У таблиці 5.2 проведено аналіз сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту. Для цього було виконане порівняння з ідеями популярних компаній-конкурентів. Хіаомі одна з небагатьох компаній, готова надати рішення для Розумного Будинку, що повністю засноване на технології ZigBee. Amazon наразі створив найпопулярніше рішення для Розумного будинку, особливо у розрізі IoT систем. Ажах розробляє український проект розумного будинку і є першим конкурентом на ринку, з яким зіштовхується даний стартап.

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту.

№ н/п	Техніко-Економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Xiaomi Home	Amazon Alexa	Ajах Smart Home			
1	Вартість одного пристрою мережі (у грн.)	400	500	500	700	-	-	+
2	Вартість хабу мережі (у грн.)	700	1000	4000	1200	-	-	+
3	Складність технічної реалізації	Середня	Мала	Велика	Середня	-	+	-
4	Гнучкість мережі	Висока	Висока	Висока	Мала	-	+	
5	Стійкість мережі	Висока	Висока	Висока	Мала	-	+	-
6	Сумісність з іншими хабами Розумного будинку	Сумісна	Не сумісна	Не сумісна	Не сумісна	-	-	+
7	Інтелектуальність мережі	Мала	Середня	Висока	Мала	+	-	-

Виходячи з вище наведеної таблиці стає зрозуміло, що найбільшими перевагами даного проекту є вартість та сумісність з хабами інших розумних будинків. Сумісність з іншими пристроями є однією з ключових переваг, бо це надає можливість користувачу збирати свій будинок як конструктор і використовувати пристрої, розроблені на технології стартапу, навіть при використанні інших хабів та мереж у Розумному будинку. Це додатково здешевшує пропонуване рішення, бо нема необхідності докупати додаткові пристрої, хаби, шлюзи, перехідники. Нейтральними сторонами є складність технічної реалізації, гнучкість та стійкість мережі. Гнучкість та стійкість мережі є ключовими параметрами, у більшості конкурентів вона є досить висока, бо це одна з переваг, що надає протокол ZigBee.

Нажаль, можна виділити слабку сторону – мережа зовсім не інтелектуальна. Вона не використовує передбачення дій користувача чи складні схеми управління пристроями. Не дивлячись на це, подібні речі

можна реалізовувати на хабах інших розумних будинків чи за допомогою хмарних сервісів, що надають інші виробники (таких як Amazon AWS).

5.3 Технологічний аудит ідеї проекту

Для проведення технологічного аудиту проекту необхідно провести аналіз технологій, що використовує проект і відповісти на наступні запитання:

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

В таблиці 5.3 були неведені відповіді на ці питання задля.

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Алгоритм маршрутизації mesh мережі на основі протоколу ZigBee для великої кількості кінцевих приладів	Розробка алгоритму маршрутизації на основі дерева без кінцевих вузлів та розподіленим управлінням	Нова технологія	Доступна технологія
2		Розробка алгоритму маршрутизації на основі простого дерева та mesh	Існуюча технологія	Доступна технологія
3		Розробка алгоритму маршрутизації при управлінні мережею з хабу	Існуюча технологія	Доступна технологія
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: за рахунок розробки алгоритму на основі дерева без кінцевих вузлів та розподіленим управлінням				

Після аналізу таблиці 5.3 було обрано перший пункт через наступні переваги: даний підвищує гнучкість та універсальність мережі, при цьому складність реалізації збільшується не суттєво. До того ж це нова технологія, яка ще не використовується конкурентами, а отже створений продукт – унікальний.

5.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту є необхідним та важливим етапом. Під час нього визначаються ринкові можливості, які можна використати під час впровадження проекту, ринкові загрози, пропозиції проектів-конкурентів і т.д.

Для початку необхідно визначити рентабельність стартапу. Рентабельність – поняття, що характеризує економічну ефективність виробництва, за якої за рахунок грошової виручки від реалізації продукції (робіт, послуг) повністю відшкодовує витрати на її виробництво й одержується прибуток як головне джерело розширеного відтворення [1].

Рівень рентабельності (R) визначається за формулою 5.1:

$$R = \frac{\Pi}{Вв} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

де Π — валовий прибуток від реалізації (робіт, послуг); $Вв$ — виробничі витрати на реалізовану продукцію (її виробнича собівартість).

Проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 5.4).

*Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку
стартап-проекту*

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	11
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	200-3000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Висока конкуренція
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідність стандартам ГОСТ 21.208-2013
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	51%

Після проведення аналізу попиту видно, що коефіцієнт рентабельності досить високий і складає 51%. Це набагато вигідніше за депозити у банку, що має привабити інвесторів. Сам ринок активно зростає, не дивлячись на високу конкуренцію. Специфічні вимоги до стандартизації досить нові і ще будуть доповнюватися в майбутньому.

Наступним необхідним кроком є визначення потенційних груп клієнтів, які можуть зацікавитися результатами сатрапу, те, чим вони відрізняються та їх специфічні вимоги до продукту. Усі забрані дані наведені у табл. 5.5.

Таблиця 5.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Необхідність доповнення Розумного будинку новим функціоналом	Власники Розумних будинків	Перевага надається готовим рішенням та кінцевим пристроям	Низька ціна, простота встановлення та висока сумісність кінцевого продукту
2	Зменшення витрат на розробку протоколів маршрутизації та кінцевих пристроїв	Виробники кінцевих пристроїв	Перевага надається комплектуючим	Низька ціна та висока стійкість

Потреби, що формують ринок є необхідність розширення існуючих Розумних будинків та створення нових кінцевих пристроїв для Розумних будинків. При цьому потенційні клієнти потребують нижчої ціни пристрою, простоти використання та високої стійкості продукту.

Ринкові можливості – це сприятливі обставини, які підприємство може використовувати для отримання переваг. Як приклад ринкових можливостей можна привести погіршення позицій конкурентів, різке зростання попиту, появу нових технологій виробництва продукції, зростання рівня доходів населення і т. п. Слід зазначити, що можливостями з погляду SWOT-аналізу є не всі можливості, які існують на ринку, а тільки ті, які можна використовувати [2].

Ринкові загрози - події, настання яких може несприятливо вплинути на підприємство. Приклади ринкових загроз: вихід на ринок нових конкурентів, зростання податків, зміна смаків покупців, зниження народжуваності і т. п. [2].

Проведемо аналіз факторів ринкового середовища, що сприяють ринковому впровадженню (табл. 5.6) проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 5.7).

Таблиця 5.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Велика кількість нових конкурентів	Конкуренцію складають не лише головні гравці ринку, але й безліч стартапів, деталі яких наразі не відомі	Моніторинг нових ідей, патентування своїх ідей, пошук більш дешевих комплектуючих
2	Необхідність «розумної» реакції систем на події	Необхідність системи розумного будинку вести себе «розумно», що не передбачається даним стартап-проектом	Співпраця з іншими стартап-проектами, замовлення послуг віддаленої обробки даних
3	Не сприятлива економічна ситуація у світі	У зв'язку з поганою епідеміологічною ситуацією у світі купівельна спроможність людей падає і вони не бачать сенсу купувати те, що не є необхідним для життя	Здешевлення технології, проведення маркетингової компанії, що зосереджена на можливості економії ресурсів, що відбувається після встановлення Розумного Будинку
4	Постійне оновлення регулюючого дані технології законодавства	Пристрої мають бути сертифіковані	Моніторинг законодавства, підлатування одразу під міжнародні, а не локальні стандарти

Отже, при виведені проект на ринок необхідно враховувати усі загрози та ризики. Основними ризиками даного проекту може бути велика кількість конкурентів на ринку та мала купівельна спроможність людей. Все це можна вирішити, якщо адекватно реагувати на проблеми.

Розглянемо можливості даного проекту (табл. 5.7)

Таблиця 5.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	«Мода» на Розумні рішення	У багатьох в будинках вже є багато Розумної техніки, що можна інтегрувати в рішення, що пропонує стартап.-	Дослідження вже існуючих рішень у будинках людей та підвищення сумісності з ними. Розробка доцільної маркетингової компанії
2	Популярність зелених технологій та зростання цін на комунальні послуги	Необхідність у дешевих пристроях високою енергоефективністю	Створення пристроїв з високою енергоефективністю, підрахунок економії на комунальні для користувача (економія перевищує ціну пристроїв)
3	Стрімкий розвиток технологій	Розвиток нових сучасних технологій	Перехід на сучасні технології

Видно, що найбільшими можливостями є популярність подібних рішень у сучасному світі та необхідність економити ресурси. Даний стартап може гарно підлаштовуватися під вище наведені можливості. Більш того, необхідність економити ресурси є можливістю, яка буде перспективна і в майбутньому.

Проведемо аналіз пропозиції (табл. 5.8) та визначимо загальні риси конкуренції на ринку:

Таблиця 5.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: Олігополія	Хоча конкурентів, які випускають часткові рішення багато, готовий для використання продукт продає мала кількість фірм	Необхідно слідкувати за якістю елементів пристрою, надійністю мережі та її сумісністю з пристроями інших компаній
2. За рівнем конкурентної боротьби: національний	Продукт актуальний на міжнародному ринку, доставка не є критичною	Необхідно розширювати сегмент користувачів, орієнтуватися одразу на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою: міжгалузева	Задіяні інформаційні технології, приладобудування, логістика і т.д.	Необхідно врахувати взаємодію з усіма основними галузями та компаніями, які надають послуги різних сервісів
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Спостерігається конкуренція між схожими алгоритмами	Підвищити швидкість та стійкість алгоритму
5. За характером конкурентних переваг: цінова	Ціни на дані пристрої завищені, а характеристики подібні	Необхідність зменшення ціни комплектуючих.
6. За інтенсивністю: марочна	Велику роль відіграє репутація компанії, що виготовляє пристрій	Збільшити просування товару, надавати розширену підтримку користувачу

З допомогою таблиці 5.8 можна провести ступеневий аналіз ринку. Хоча конкуренція висока, а ціни завищені це те, за допомогою чого якісно виграє даний стартап-проект – при використанні подібної технології та ідеї, ціна кінцевого продукту значно нижча, за представлену на ринку. До того ж алгоритм маршрутизації показує не гірші показники, ніж конкуренти.

Далі проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю п'яти сил М. Портера (табл. 5.9) [3].

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари замітники
	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку заміників
Висновки: ринок є достатньо заповнений, але можливість виходу на ринок існує, між конкурентоспроможними пристроями, конкуренція висока, не дивлячись на не дуже високий попит. Строки виходу на ринок малі, робота з постачальниками легка, має бути висока орієнтованість на клієнта та велика кількість різних типів пристроїв, що використовують стартап	Maxus Smart, Xiaomi, HOMMYN, ORVIBO, FIBAE0, Ajax, Google Home, Amazon MWS, Tervix, Huawei, Yandex Alice	Висока репутаційна конкуренція, дорога маркетингова компанія, необхідність проходження різних видів сертифікацій.	Зазвичай постачальники не диктують умови співпраці	Користувачам важлива низька ціна, висока сумісність та велика надійність роботи	Більш відомий користувачу замітник (можливість витратити більше коштів на маркетинг), ширша представленість на ринку

Провівши аналіз конкуренції в галузі за М. Портером видно, що є достатня кількість прямих конкурентів, що гарно зарекомендували себе на ринку, хоча через високу цінову пропозицію та малих охоптів датчиків єдиним конкурентом їх товар не є досить популярним у користувачів. Є необхідність слідкувати за новими датчиками, цінами та загальною якістю товару.

На основі аналізу конкуренції в галузі, що наведено в таблиці 5.9, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту, які були розглянуті в таблиці 5.2, вимог споживачів до товару (табл. 5.5.) та факторів

маркетингового середовища (табл. 5.6, 5.7) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз конкурентоспроможності представлено в таблиці 5.10.

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Великий перелік сумісних кінцевих пристроїв	Підтримка максимальної кількості видів датчиків та інших кінцевих пристроїв, що використовуються у розумному будинку
2	Цінова політика	Значне зменшення ціни продукту, порівняно з конкурентами
3	Універсальність пристроїв	Можливість роботи з великою кількістю різних хабів Розумного будинку
4	Зворотній зв'язок	Допомога користувачам у встановленні систем та їх подальшій підтримці. Цілодобова технічна консультація
5	Репутація	Репутація важлива, щоб не злитися з безліччю невідомих компаній, що представлені на ринку, але не мають високої популярності через ціну і сумніви у надійності їх приладів

Як можна побачити з таблиці було обґрунтовано основні п'ять факторів конкурентоспроможності, основними з яких стали: цінова політика, велика кількість сумісних пристроїв, зворотній зв'язок та репутація компанії.

Проведемо порівняльний аналіз сильних та слабих сторін факторів конкурентоспроможності (табл. 5.11).

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з власним пристроєм «ZigBeeHome»						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Великий перелік сумісних кінцевих пристроїв	18	3		1,2	5	4		
2	Цінова політика	20	1,2,4	3,5					
3	Універсальність пристроїв	19	1,3		2,5	4			
4	Зворотній зв'язок	15			1	2,5		3,4	
5	Репутація	12				2,5		3	1,4

1. Xiaomi 2. Maxus Smart 3. Ajax 4. Amazon MWS 5. FIBAEО

З таблиць 5.10 та 5.11 видно, що фактори конкурентоспроможності суттєві та мають великий позитивний внесок при впровадженні на ринок пристрою «ZigBeeHome». При цьому було проведено порівняльний аналіз з різноманітними конкурентами, які представляють основні стратегії подібних компаній на ринку.

Далі проведемо SWOT-аналіз стартап-проекту [4], що наведено в таблиці 5.12.

Таблиця 5.12. SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <p>1. Цінова політика;</p> <p>2. Універсальність пристроїв;</p> <p>3. Великий перелік сумісних кінцевих пристроїв.</p>	<p>Слабкі сторони:</p> <p>1. Низька репутація на початку;</p> <p>2. Складність організації зворотного зв'язку.</p>
<p>Можливості:</p> <p>1. Популярність подібних рішень;</p> <p>2. Зростання цін на комунальні послуги;</p> <p>3. Розвиток та здешевлення технологій виробництва</p>	<p>Загрози:</p> <p>1. Велика конкуренція, зокрема з іншими невідомими стартапами;</p> <p>2. Неповний функціонал;</p> <p>3. Подальша економічна ситуація та купівельна спроможність громадян;</p> <p>4. Невизначеність у законодавчому регулювання.</p>

Існує необхідність підвищеної уваги до ризиків та слабких сторін проекту. Видно, що слабких сторін мало, але вірогідних загроз для проекту

досить багато. Слабкі сторони можна намагатися компенсувати під час безпосередньої розробки проекту, за допомогою збільшення штату та проведення гарної маркетингової компанії. Для вирішення більшості загроз необхідно врахувати необхідність співпраці з іншими проектами та слідкувати за загальним станом ринку.

За допомогою SWOT-аналіз стартап-проекту можливо створити альтернативи ринково поведінки, що актуальні для даного стартап-проекту та аналіз орієнтованого часу виведення продукту на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.13).

Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Реалізувати проект на основі процесорів STM32 без обмотки	Доставка елементів займає мало часу	4 місяці
2	Створити проект на основі вже готових плат Nordic	Доставка елементів займає два тижні	20-30 днів

Краще за все використовувати підхід, що наведено у другому пункті, оскільки час його реалізації менший, не дивлячись на довшу доставку. Перший варіант значно ускладнює роботу та може привести до необхідності виконання додаткової роботи по створенню необхідної обмотки процесору. Також перший варіант набагато складніший при потоковому створенні пристроїв та їх тестуванні. З зазначених альтернатив обираємо стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями.

5.5 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Користувачі Розумних будинків	Висока	Середній	Інтенсивна	Середня складність
2	Підприємства-розробники кінцевих пристроїв	Висока	Високий	Не інтенсивна	Середня складність
2	Підприємства, що використовують IoT системи	Низька	Високий	Не інтенсивна	Висока складність
Обрана цільова група: Підприємства-розробники кінцевих пристроїв для розумного будинку. Мають високу готовність прийняти продукт, на відміну від підприємств, що використовують IoT системи, а також не інтенсивну конкуренцію й не гіршу за інших складність входу у сегмент					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів було обрано підприємства-розробники кінцевих пристроїв. Не дивлячись на це, є доцільним задовольняти деякі потреби користувачів Розумних будинків, щоб охопити більший ринок збуту і мати уявлення про потреби кінцевого користувача, які задовольняє обраний сегмент підприємств.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувані базову стратегію розвитку (табл. 5.15).

Таблиця 5.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Створення прототипу пристрою контролю на основі плат Nordic	Швидке налаштування виробництва	Закуповуються дешеві плати, які надають можливість швидкої імплементації алгоритму та високу гнучкість пристроїв	Стратегія лідерства по витратам

Визначена базова стратегія лідерства по витратах – стратегія яка передбачає, що компанія за рахунок чинників внутрішнього і/або зовнішнього середовища може забезпечити більшу, ніж у конкурентів маржу між собівартістю товару і середньоринковою ціною (або ж ціною головного конкурента). Зокрема, ця стратегія припускає, що за рахунок великих можливостей по об'ємах збуту товарів (портфеля укладених контрактів на постачання) і продуктивності підприємство може добитися менших витрат. Ця стратегія зазвичай тісно пов'язана з можливістю досягнення ефекту масштабу і досвіду. [3].

Низька вартість комплектуючих дозволяє встановити нижчу ціну і більшу маржу.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16).

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Ні	Компанія буде забирати шукати нових споживачів	Так, компанія буде копіювати можливості пристроїв конкурентів, щодо роботи з протоколом ZigBee, додаючи свої покращені функції	Стратегія вииклику лідера

На основі проведеного аналізу для вибору стратегії конкурентної поведінки була обрана наступна стратегія — стратегія виклику лідера. Стратегію виклику лідеріві найчастіше вибирають компанії, які є другими,

третіми на ринку, але бажають стати лідером ринку. Теоретично, ці компанії можуть прийняти два стратегічні рішення: атакувати лідера у боротьбі за частку ринку або ж йти за лідером [3]. Планується проводити флангові атаки, а саме атакувати слабкі сторони фірми-лідера.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробимо стратегію позиціонування (табл. 5.17).

Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Низька ціна	Стратегія лідерства по витратам	Низька ціна комплектуючих та вихідного товару	Дешевий, універсальний надійний
2	Обслуговування		Легке обслуговування, гарні супроводжуючі документи, інтуїтивне налагодження	
3	Універсальність		Можливість роботи з пристроями конкретних фірм	
4	Якість		Довгий строк служби рішень, мала кількість збоїв, відсутність критичних збоїв	

Отже, окрім універсальності рішення та низької ціни користувач також потребує якості та простоти у обслуговуванні.

5.6 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розробки маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці 5.18 підсумуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Дешеві комплектуючі	Доступність для масового виробництва	Кінцевий продукт має бути дешевший за аналоги
2	Універсальність	Можливість суміщати вже з готовими рішеннями	Кінцевий продукт має можливість працювати у єдиній мережі з аналогами

Очевидними вигодами даного товару є універсальність та дешевизна комплектуючих. Враховуючи, що орієнтація йде на підприємства, що розробляють пристрої для розумних будинків, це дає можливість їм заробити на товарі, а також не перейматися, що їх рішення не буде сумісним з популярними системами чи іншими їх рішеннями.

Наступним кроком є розробка трирівневої маркетингової моделі товару, де уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 5.19).

Таблиця 5.19. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Мережа дешевша за існуючі рішення. При цьому мережа сумісна з іншими, що представлені на ринку. Має малий процент відмов, високу швидкодію та надійність. Дає можливість для економії на розробці		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Н м	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Частота мікропроцесору	Нм	Вр/Тх
	2. Швидкість алгоритму маршрутизації	Нм	Тх
	3. Надійність	Нм	Тх
	4. Стійкість	Нм	Вр/Тх
	5. Габарити	Нм	Тх/Тл
	6. Універсальність	Нм	Вр/Тх
	7. Безпечність		
	Якість: патент на математичну модель, сертифікація.		
	Пакування відсутнє – продається сервіс, який розглядає можливість апаратних рішень на місці		
	Марка: ZigBeeHome		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: Розробник може за запитом розширювати кількість сумісних кінцевих пристроїв та габарити та масу кінцевого продукту		
	Після продажу: Розробник може проводити полегшену інтеграцію у нові хаби розумних будинків, а також допомагати з встановленням пристроїв та документацією.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: відповідно до державного та правового законодавства, за рахунок патентів.			

Далі визначимо цінові межі, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 5.20).

Таблиця 5.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	800-4000	400-3000	28000	300-500

Якщо збільшувати кількість користувачів, то можна трохи понизити ціну товару. Ціна менша за товари-аналоги та замінники.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 5.21):

Таблиця 5.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має Виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Орієнтація на дешеві комплектуючі та надійні рішення	Встановлення контактів із споживачами та підтримка їх. Формування попиту.	0 (без посередників)	Підприємства, що створюють IoT системи

У зв'язку з тим, що обслуговуються компанії, які самі виробляють прилади, доцільно використовувати прямий канал збуту (без посередників). Використання прямого каналу збуту дає можливість більш якісно контролювати ціни на ринку та не тратити доходи на оплату роботи посередників.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 5.22).

Таблиця 5.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Орієнтація на здешевлення виробництва	Формальне листування	Комплексний підхід; Доступність клієнтам; Точність вимірів; Універсальність; Можливість додаткового оснащення..	Донести потенційним клієнтам інформацію про переваги нашої системи перед іншими Встановлення зв'язків з компаніями, що пропонують аналогічні рішення	Найдешевший та найуніверсальніший продукт, що є на ринку

Було обрано ключові позиції: маркетингові дослідження, встановлення мети позиціонування, розробка стратегії позиціонування, розробка тактики позиціонування, розробка комплексу маркетингу, оцінка ефективності позиціонування. Розглянуто завдання рекламного повідомлення та концепцію рекламного звернення.

5.7 Висновки до розділу

Пропонується проект мережі розумного будинку на основі протоколу ZigBee з використанням друкованих плат Nordic nRF 5240 Dongle. Логічна частина пристрою буде використовувати алгоритму маршрутизації на основі дерева без кінцевих вузлів та mesh з розподіленим управлінням.

Потенційними клієнтами стартап проекту можуть бути підприємства-розробники кінцевих пристроїв для Розумних будинків. Їх наразі багато, між

ними велика конкуренція, а етап розробки мережі довгий та дорогий. Їх готовність сприйняти продукт досить висока, конкуренція серед постачальників плат з повністю розробленою підтримкою протоколу ZigBee невелика. Не дивлячись на це, складність виходу у сегмент середня.

Доцільно обрати варіант впровадження під час якого проект реалізується на основі готових плат Nordic. Їх ціна не значно більша, ніж ціна друку плат та купівлі процесорів на базі STM32, а швидкість розробки значно більша.

До сильних сторін проекту можна віднести цінову політику, універсальність отриманого пристрою та великий перелік сумісних систем. Кількість загроз для проекту досить велика, у першу чергу це конкуренція, неповний функціонал, невизначеність економічної ситуації та законодавчого регулювання.

Доцільно виконувати подальшу імплементацію проекту, особливо це стосується технічної та маркетингової сторін реалізації. Відомі аналогічні проекти, які дуже поступаються за ціною, функціоналам та якістю конкурентам, але при цьому мають великий успіх на ринку, через досить гарно проведену рекламну кампанію.

ВИСНОВКИ

Був проведений аналіз наукових робіт та досліджень у сфері Розумного дому та бездротових мереж Розумного дому. Завдяки цьому була доведена важливість обраної теми, поставлена мета дослідження, обраний об'єкт дослідження, визначені основні задачі, які треба вирішити для досягнення поставленої мети. Також було обрано основну технологію, а саме мережевий протокол ZigBee, на яку опирається всі подальші дослідження в межах цього дипломного проекту.

Розглянуті основні архітектурні особливості бездротових мереж на основі різних бездротових протоколів, зокрема ZigBee. Був визначений перелік основних типів вузлів, необхідних для функціонування топології та принципи розширення та зменшення мережі. Також були розглянуті топології, що підтримуються протоколом ZigBee. Були описані два основних алгоритми маршрутизації ZigBee, а саме алгоритм ClusterTree та AODVjr, основні плюси та недоліки у їх роботі та можливі варіанти їх об'єднання, які сприяють підвищенню швидкості передачі даних між вузлами та надійності мережі. Був запропонований та описаний власний алгоритм маршрутизації для ZigBee, що використовує прошите двійкове дерево та обирає топологію мережі в залежності від форми кімнати та присутності бар'єрів.

Був створений макетний зразок мережі для перевірки пропонованого підходу, а саме універсальності подібної мережі, швидкості передачі даних та стійкості до «штормів» у мережі AODVjr. Стенд надає можливість керування простим функціоналом підсистеми кліматичного контролю та підсистеми освітлення.

Було проведене тестування пропонованого алгоритму на макетному зразку та його моделювання у програмі симуляції бездротових та дротових мереж. Тестування показало, що макетний зразок справляється з поставленими задачами, запропонований метод дає результат кращий, за стандартні, але гірший, за більш складні варіанти алгоритмів маршрутизації.

Тестування показало, що швидкість передачі даних на макетному зразку вища за стандартний підхід на 2-11,5% в залежності від того, чи є вузли, що передають інформацію, кінцевими. Чим більша відстань між вузлами, тим кращий результат показує використаний у роботі підхід. Також під час використання маршрутизації AODV пропонується підхід показує на 7% більшу надійність, а саме відношення отриманих до надісланих пакетів.

Моделювання за допомогою середовища NS-2 показало, що пропонується алгоритм дієвий для мереж з великою кількістю вузлів та має вищу швидкодію за стандартні AODV (на 21,7%) та ClusterTree (на 1,7%), але поступається алгоритму Backpressure.

Задля апробації роботи були представлені та опубліковані на студентській конференції проміжні етапи роботи над даною темою.

Також був розроблений розділ розроблення стартап проекту і проведено аналіз доцільності імплементації проекту з економічної точки зору. Було обрано категорію споживачів, що можуть бути зацікавлені в даному стартапі, розглянуті фактори ризику і конкурентність на ринку. За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок, що комерційна реалізація проекту є доцільною.

В подальшому необхідно проводити додаткові дослідження на тему, а саме:

- Створення власного універсального шлюзу для мережевого протоколу ZigBee;
- Створення мобільного програмного додатку для можливості задання та зміни загальної топології мережі користувачем;
- Доопрацювання алгоритмів маршрутизації, а саме вирішення основних проблем з навантаженням мережі AODV

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Alex P. Pentland Smart Rooms *Scientific American* Vol. 274, No. 4 (APRIL 1996), pp. 68-76 (9 pages)
- 2) Li Jiang, Da-You Liu and Bo Yang, n.d. Smart home research. *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics (IEEE Cat. No.04EX826)*.
- 3) De Silva, L., Morikawa, C. and Petra, I., 2012. State of the art of smart homes. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(7), pp.1313-1321.
- 4) Risteska Stojkoska, B. and Trivodaliev, K., 2017. A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions. *Journal of Cleaner Production*, 140, pp.1454-1464.
- 5) Statista. 2020. *Smart Home - Worldwide | Statista Market Forecast*. [online] Available at: <<https://www.statista.com/outlook/283/100/smart-home/worldwide>> [Accessed 27 October 2020].
- 6) Google Trends 2020. *Smart Home statistics for last 7 years* [online] Available at: <<https://trends.google.com/trends/explore?date=2009-11-01%202020-10-20&q=smart%20home>> [Accessed 27 October 2020].
- 7) Teslyuk, V., Beregovskiy, V. and Pukach, A., 2013. Development of smart house system model based on colored Petri nets. In: *2013 XVIIIth International Seminar/Workshop on Smart Homes*. Kyiv.
- 8) H. Kim, S. Kumar and D. E. Culler, "Thread/OpenThread: A Compromise in Low-Power Wireless Multihop Network Architecture for the Internet of Things," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 7, pp. 55-61, July 2019, doi: 10.1109/MCOM.2019.1800788.
- 9) Lund, P., Mikkola, J. and Ypyä, J., 2015. Smart energy system design for large clean power schemes in urban areas. *Journal of Cleaner Production*, 103, pp.437-445.
- 10) Gast, M., 2002. *802.11 Wireless Networks*. Cambridge: O'Reilly Media, Inc, pp.10-25

- 11) Adiono, T., Anindya, S., Fuada, S., Afifah, K. and Purwanda, I., 2019. Efficient Android Software Development Using MIT App Inventor 2 for Bluetooth-Based Smart Home. *Wireless Personal Communications*, 105(1), pp.233-256.
- 12) Singh, M.P., Sharma, M., & Agrawal, M.S. *A Modern Study of Bluetooth Wireless Technology*. International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology (IJCSEIT), Vol.1, No.3, August 2011
- 13) H. Jiang, C. Cai, X. Ma, Y. Yang and J. Liu, "Smart Home Based on WiFi Sensing: A Survey," in IEEE Access, vol. 6, pp. 13317-13325, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2812887.
- 14) 2014. *Getting Started With Bluetooth Low Energy*. [Erscheinungsort nicht ermittelbar]: O'Reilly Media, Inc, USA, pp.15-36.
- 15) Wan, Q. and Liu, J., 2018. Smart-Home Architecture Based on Bluetooth mesh Technology. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 322, Issue 7. pp.1-6.
- 16) Zigbee Alliance. 2020. *Zigbee - Zigbee Alliance*. [online] Available at: <<https://zigbeealliance.org/solution/zigbee/>> [Accessed 27 October 2020].
- 17) Farahani, S., 2011. *Zigbee Wireless Networks And Transceivers*. Elsevier Science, pp.8-14.
- 18) OpenThread. 2020. *Openthread*. [online] Available at: <<https://openthread.io/>> [Accessed 27 October 2020].
- 19) Silabs.com. 2020. *UG103.11: Thread Fundamentals*. [online] Available at: <<https://www.silabs.com/documents/public/user-guides/ug103-11-fundamentals-thread.pdf>> [Accessed 27 October 2020].
- 20) S. Folea, D. Bordencea, C. Hotea and H. Valean, "Smart home automation system using Wi-Fi low power devices," Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing,

- Robotics, Cluj-Napoca, 2012, pp. 569-574, doi: 10.1109/AQTR.2012.6237775.
- 21) Silabs.com. 2020. *UG103.11: Thread Fundamentals*. [online] Available at: <<https://www.silabs.com/documents/public/user-guides/ug103-11-fundamentals-thread.pdf>> [Accessed 27 October 2020].
 - 22) S. Das, S. Ganguly, S. Ghosh, R. Sarker and D. Sengupta, "A bluetooth based sophisticated home automation system using smartphone," 2016 International Conference on Intelligent Control Power and Instrumentation (ICICPI), Kolkata, 2016, pp. 236-240, doi: 10.1109/ICICPI.2016.7859709.
 - 23) I. A. Zualkernan, A. R. Al-ali, M. A. Jabbar, I. Zabalawi and A. Wasfy, "InfoPods: Zigbee-based remote information monitoring devices for smart-homes," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 55, no. 3, pp. 1221-1226, August 2009, doi: 10.1109/TCE.2009.5277979.
 - 24) J. Byun, B. Jeon, J. Noh, Y. Kim and S. Park, "An intelligent self-adjusting sensor for smart home services based on ZigBee communications," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 58, no. 3, pp. 794-802, August 2012, doi: 10.1109/TCE.2012.6311320.
 - 25) D. Lan, Z. Pang, C. Fischione, Y. Liu, A. Taherkordi and F. Eliassen, "Latency Analysis of Wireless Networks for Proximity Services in Smart Home and Building Automation: The Case of Thread," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 4856-4867, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2888939.
 - 26) J. Li, X. Zhu, N. Tang and J. Sui, "Study on ZigBee network architecture and routing algorithm," 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems, Dalian, 2010, pp. V2-389-V2-393, doi: 10.1109/ICSPS.2010.5555486.
 - 27) YAN, W., WANG, Q. and GAO, Z., 2015. Smart Home Implementation Based on Internet and WiFi Technology. In: *34th Chinese Control Conference*. Hangzhou, pp.9072-9077.

- 28) H. Cho, M. Kang, J. Park, B. Park and H. Kim, "Performance Analysis of Location Estimation Algorithm in ZigBee Networks Using Received Signal Strength," 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (*AINAW'07*), Niagara Falls, Ont., 2007, pp. 302-306, doi: 10.1109/AINAW.2007.283.
- 29) Jadidkar, Negar & Samimi, Hossein. (2017). Improvement of ZigBee Using by Thread and Backpressure Algorithm. International Journal of Wireless and Microwave Technologies. 7. 1-13. 10.5815/ijwmt.2017.05.01.
- 30) Owczarek, Piotr & Zwierzykowski, Piotr. (2014). Review of Simulators for Wireless Mesh Networks. Journal of Telecommunications and Information Technology (JTIT). 14. 82-89.
- 31) Demo: Thread-powered Smart House with nRF52840. *Nordic Semiconductor official channel*. Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=qr_B_dvZego (дата звернення: 20.11.2020)
- 32) ESP BLE MESH Demo. *ESP official channel*. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=xLUy1-O7UJE> (дата звернення: 20.11.2020)

ДОДАТОК А



Рис. 1 Orange Pi Lite

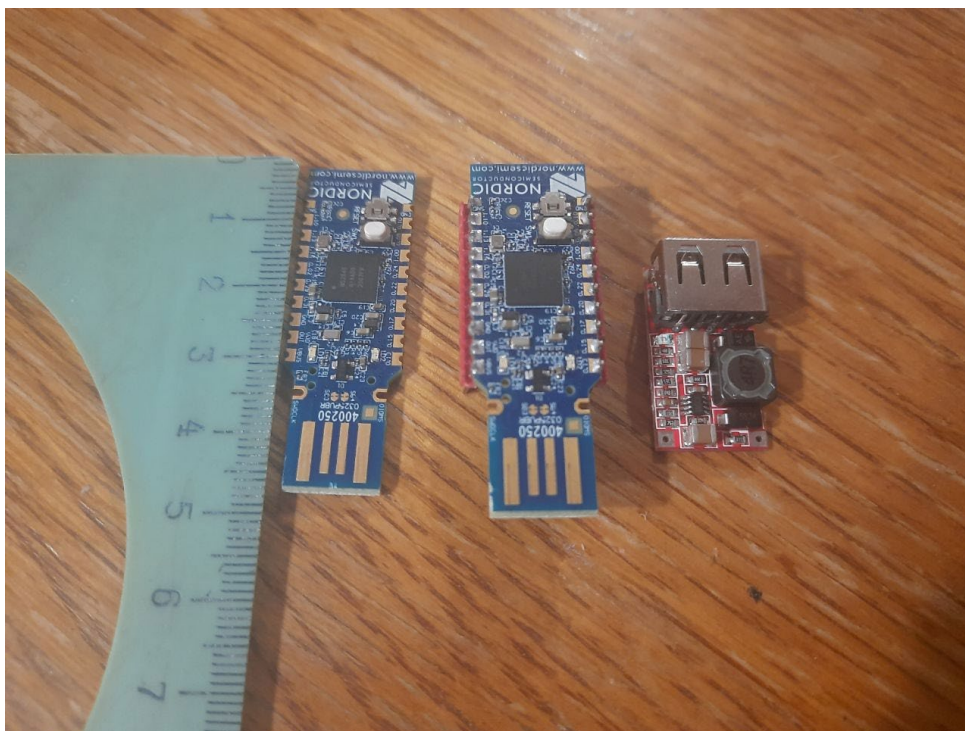


Рис. 2 Зліва Nordic nRF 52810 Dongle, праворуч понижувач напруги до 5В постійного струму

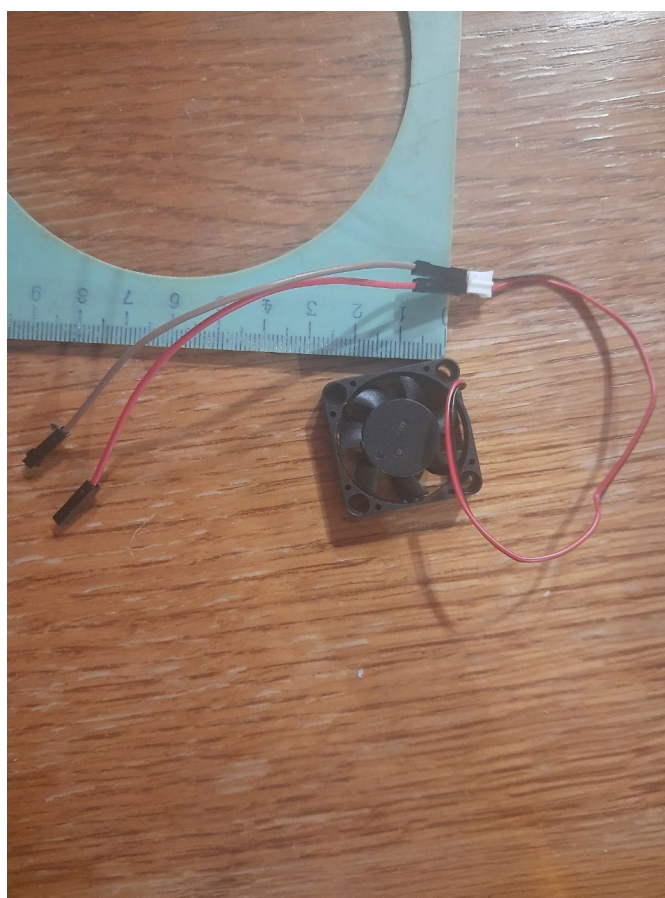


Рис. 2 Вентилятор

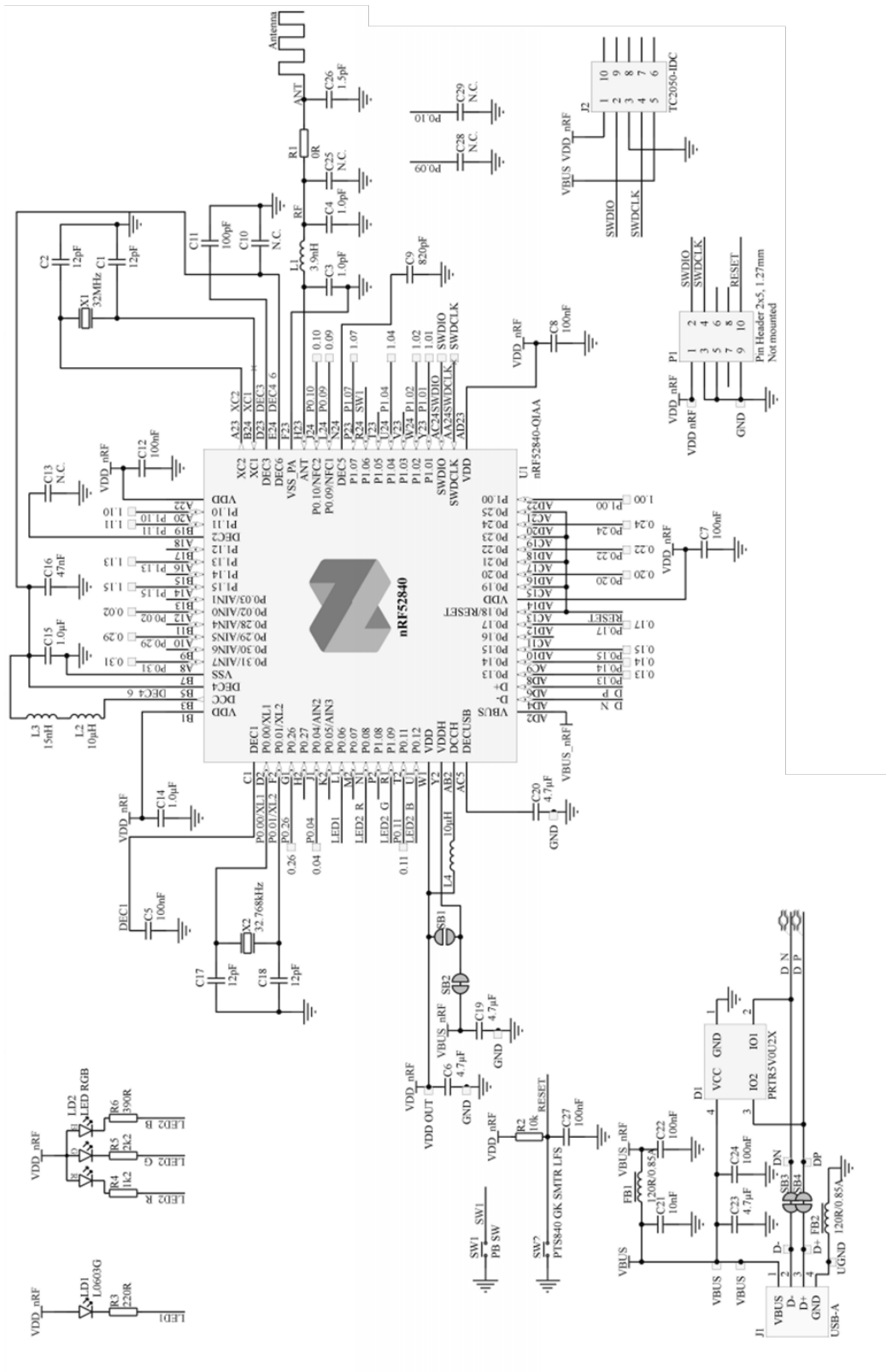


Рис. 3 Принципова схема NRF52810 Dongle

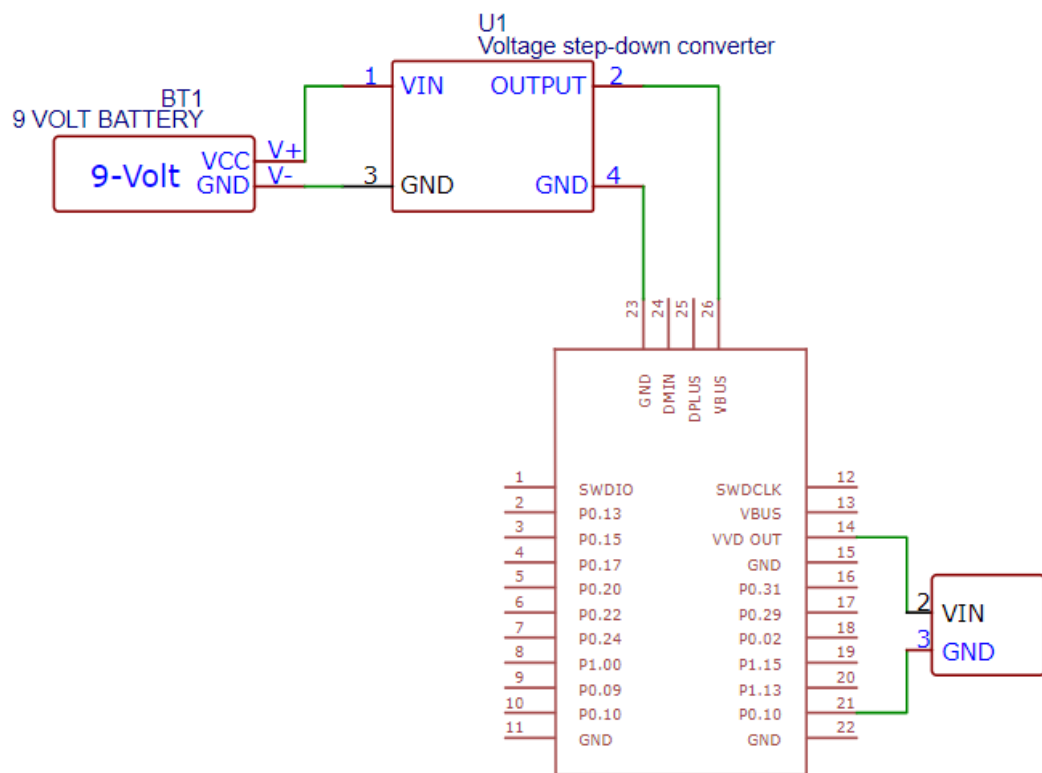


Рис. 4 Принципова схема Z1, Z2, Z5, Z6

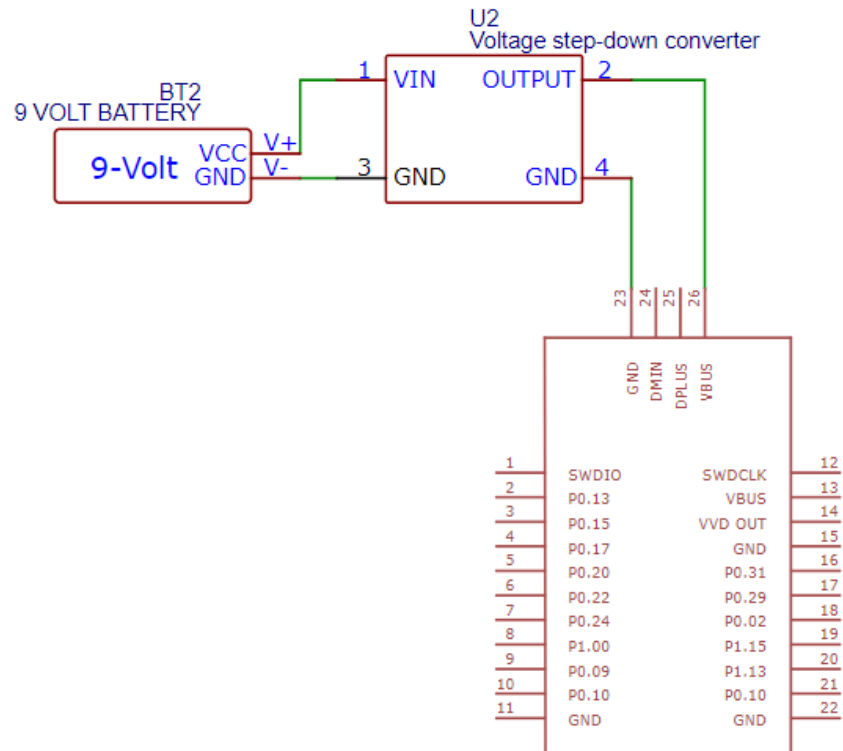


Рис. 5 Принципова схема Z3, Z4

ДОДАТОК Б

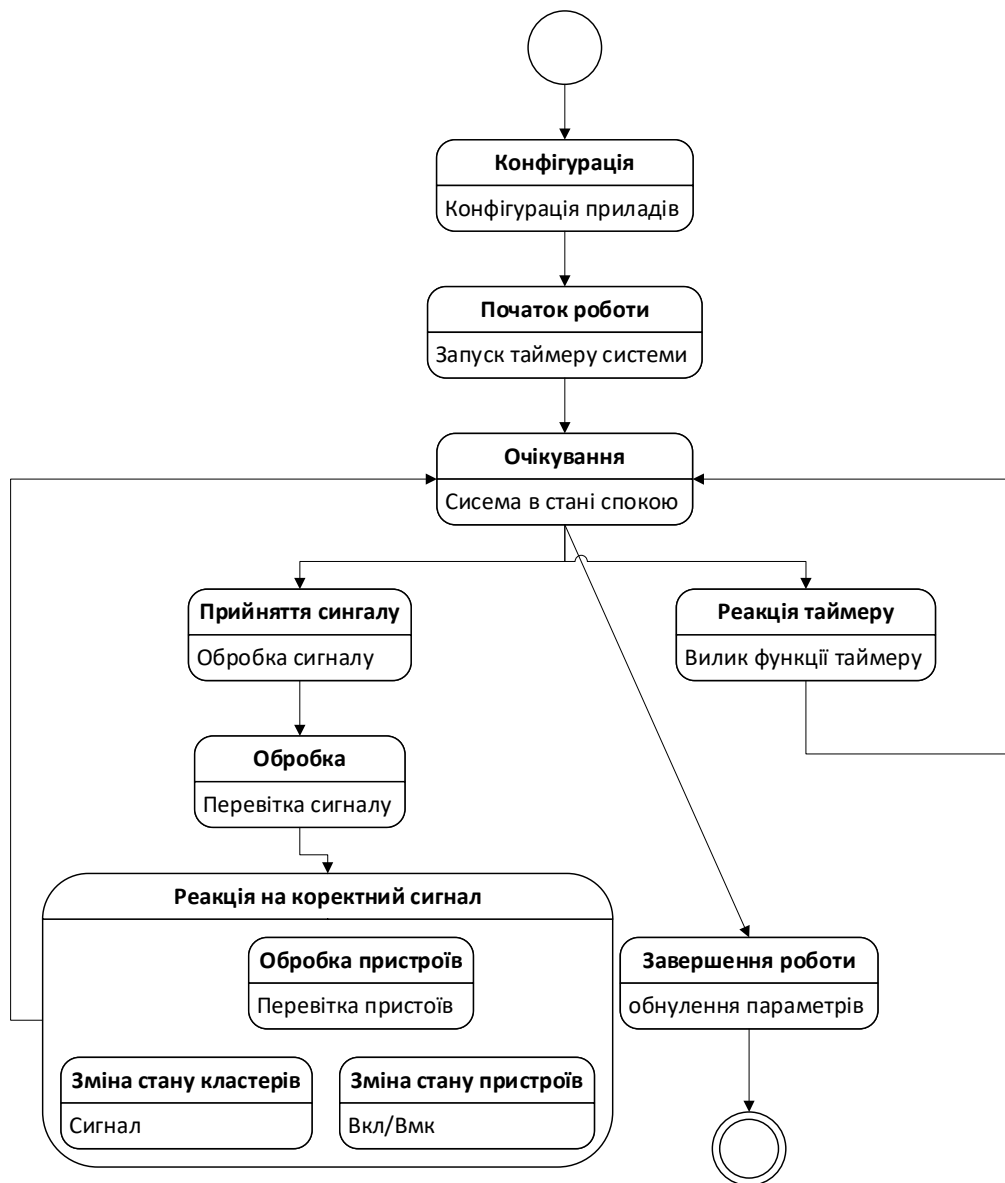


Рис. 1 Машина станів пристрою

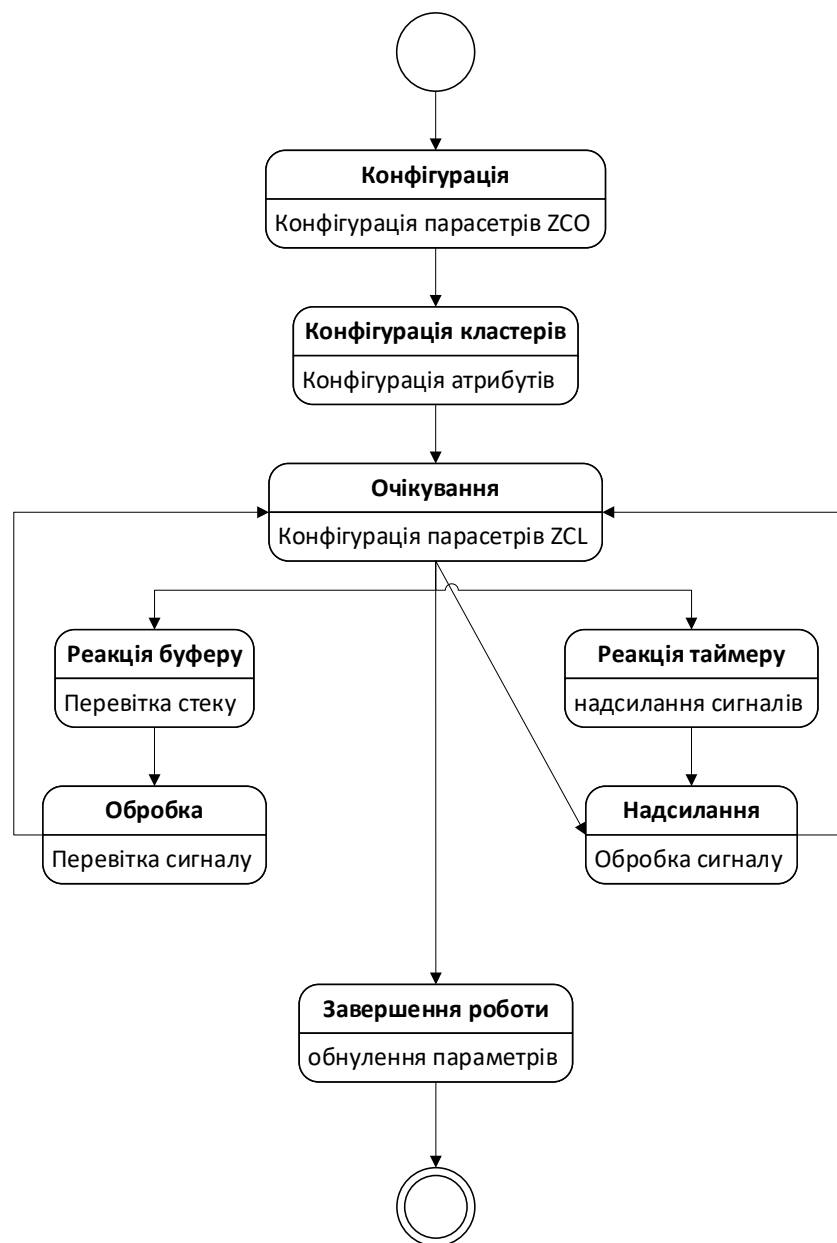


Рис. 2 Машина станів zboss