

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМ. С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

**«РОЗРОБКА ІоТ СИСТЕМИ З АДАПТИВНОЮ СЕЛЕКЦІЄЮ
КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ»**

Виконав: здобувач групи Іт-62
спеціальності 126 «Інформаційні системи та
технології»

Михалюк Ю. Т.
(прізвище та ініціали)

Керівник: _____
Пташник В. В.
(прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ-2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМ. С. З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Другий (магістерський) рівень вищої освіти
Спеціальність 126 «Інформаційні системи та технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

д.т.н., професор, Тригуба А. М.

(вч. звання, прізвище, ініціали)

“ ” 202 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Михалюку Юрію Тарасовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка IoT системи з адаптивною селекцією каналів зв'язку»
керівник роботи к. т. н., доцент, Пташник В. В.

(наук. ступінь, вч. звання, прізвище, ініціали)

затверджені наказом Львівського НУП від 28.02.2025 року № 140/к-с.

2. Строк подання студентом роботи 8 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: технічні характеристики та документація до IoT-систем «розумний будинок» і радіоканалів у неліцензованих діапазонах; паспорти й специфікації апаратних компонентів прототипу (Arduino Mega 2560 / Arduino Nano, радіомодуль nRF24L01(+)); науково-технічна література та методики оцінювання якості радіоканалу й ефективності адаптивної селекції каналів (вимірювання завад, втрат пакетів і тестування сканування/перемикання частот).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

1. Теоретичні основи IoT-систем з адаптивною селекцією каналів зв'язку

2. Адаптивні методи вибору каналів зв'язку в системі «розумний будинок»

3. Апаратно-програмні засоби реалізації адаптивної селекції каналів зв'язку для розумного будинку

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Економічна ефективність

Висновки

Список використаних джерел

5. Перелік графічного матеріалу

Графічний матеріал подається у вигляді презентації

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 5	Пташник В. В., к.т.н., доцент			
4	Городецький І. М., к.т.н., доцент			

7. Дата видачі завдання 3 березня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Аналіз технології та протоколів бездротового зв'язку для IoT-систем «розумний будинок»	03.03.2025 – 15.04.2025	
2	Вибір принципів, методів та засобів адаптивного вибору каналів зв'язку в системі «розумний будинок»	16.04.2025 – 31.05.2025	
3	Програмна реалізація адаптивної селекції каналів зв'язку для розумного будинку	01.06.2025 – 30.09.2025	
4	Розгляд питань з охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях	01.10.2025 – 20.10.2025	
5	Оцінка економічної ефективності прийнятих рішень	21.10.2025 – 15.11.2025	
6	Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	16.11.2025 – 30.11.2025	
7	Завершення роботи в цілому. Підготовка до захисту кваліфікаційної роботи	01.06.2025 – 08.12.2025	

Здобувач

(підпис) Михалюк Ю. Т.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис) Пташник В. В.
(прізвище та ініціали)

УДК 681.521 / 681.518

Розробка IoT системи з адаптивною селекцією каналів зв'язку.
Михалюк Ю. Т. Кафедра інформаційних технологій – Дубляни,
Львівський НУВМБ ім. С.З. Гжицького, 2025.

Кваліфікаційна робота: 78 сторінок текстової частини, 31 рисунок, 13
таблиць, 19 джерел літератури, 3 додатки.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у створенні IoT-системи «Розумний будинок» з адаптивною селекцією каналів зв'язку, що забезпечує підвищення надійності передавання даних в умовах завад та змінної радіообстановки.

Об'єктом дослідження є процеси передавання та обміну даними між пристроями IoT-інфраструктури системи «Розумний будинок» у бездротовому середовищі.

Предмет дослідження вивчає методи й алгоритми адаптивної селекції каналу зв'язку на основі оцінювання параметрів якості радіоканалу (рівня сигналу, співвідношення сигнал/шум, імовірності помилок і втрат пакетів) для забезпечення стабільного функціонування системи.

У кваліфікаційній роботі розглянуто підходи до організації бездротових IoT-мереж у системах «Розумний будинок» та проаналізовано архітектуру сенсорних вузлів, виконавчих модулів, шлюзів і каналів зв'язку. Визначено вимоги до адаптивного вибору каналу й критерії оцінювання якості передавання за показниками RSSI, SNR, BER і PER. Запропоновано структурну та алгоритмічну модель адаптивної селекції каналу з урахуванням завад і динаміки радіоефіру, а також наведено результати оцінювання її ефективності та рекомендації щодо застосування в IoT-системах домашньої автоматизації.

Ключові слова: Інтернет речей, розумний будинок, бездротовий зв'язок, радіоканал, завади, адаптивна селекція каналів, вибір каналу, спектральний моніторинг, RSSI, SNR, BER, PER, надійність передавання даних, енергоефективність, IoT-мережа.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІoT-СИСТЕМ З АДАПТИВНОЮ СЕЛЕКЦІЄЮ КАНАЛІВ ЗВ’ЯЗКУ	8
1.1 Поняття, структура та класифікація ІoT-систем і систем «розумний будинок»	8
1.2 Технології та протоколи бездротового зв’язку для ІoT-систем «розумний будинок»	13
1.3 Перешкоди, завади та показники якості радіоканалів у бездротових ІoT-мережах.....	17
1.4 Огляд підходів до адаптивної селекції каналів зв’язку та постановка задачі дослідження	20
РОЗДІЛ 2 АДАПТИВНІ МЕТОДИ ВИБОРУ КАНАЛІВ ЗВ’ЯЗКУ В СИСТЕМІ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК».....	23
2.1 Технології розширення спектра та керування частотним ресурсом у системі «розумний будинок»	23
2.2 Обґрунтування вибору частотних діапазонів каналів зв’язку для розумного будинку	27
2.3 Опис адаптивного методу вибору каналу зв’язку для системи «розумний будинок»	29
РОЗДІЛ 3 АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ АДАПТИВНОЇ СЕЛЕКЦІЇ КАНАЛІВ ЗВ’ЯЗКУ ДЛЯ РОЗУМНОГО БУДИНКУ	34
3.1 Апаратно-програмна реалізація керуючого модуля системи «Розумний будинок» з адаптивною селекцією каналів зв’язку	34
3.2 Архітектура та склад модулів системи «розумний будинок» з адаптивною селекцією каналів зв’язку	43
3.3 Експериментальні дослідження методу адаптивної селекції каналів зв’язку	49

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗИВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	55
4.1 Охорона праці.....	55
4.2 Оцінка надійності захисту виробничого персоналу об'єкта у воєнний час	59
4.3 Організація протипожежного захисту та проведення протипожежної профілактики на промисловому підприємстві	60
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.....	62
5.1 Характеристика об'єкта впровадження та економічні передумови	62
5.2 Розрахунок витрат на розробку та впровадження системи.....	63
5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження.....	64
ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68
ДОДАТОК А. ПРОГРАМНИЙ КОД ГОЛОВНОГО МОДУЛЯ.....	71
ДОДАТОК Б. ПРОГРАМНИЙ КОД СЕНСОРНОГО МОДУЛЯ	74
ДОДАТОК В. РЕЗУЛЬТАТИ ЧАСТОТНОГО СКАНУВАННЯ.....	77

ВСТУП

Сучасні IoT-системи «розумний будинок» характеризуються швидким зростанням кількості сенсорних та виконавчих пристроїв, що працюють у неліцензованих діапазонах і змушені співіснувати в умовах динамічної та часто перевантаженої радіообстановки. За таких умов надійність обміну даними між модулями системи суттєво залежить від правильного вибору частотного каналу, завадостійкості та здатності мережі адаптуватися до зміни спектрального завантаження. Саме тому актуальним є застосування підходів адаптивної селекції каналів зв'язку, які дають змогу підтримувати стабільність передавання, зменшувати втрати пакетів і підвищувати загальну якість функціонування системи.

Метою кваліфікаційної роботи є створення IoT-системи «Розумний будинок» з адаптивною селекцією каналів зв'язку та/або підвищення якості передавання інформації між модулями системи в умовах завад і змінної радіообстановки. Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено розв'язання комплексу взаємопов'язаних завдань, що охоплюють аналіз наявних рішень «розумного будинку» та застосовуваних у них технологій передавання даних, дослідження каналів зв'язку і чинників, які визначають якість передавання, порівняння основних протоколів зв'язку з визначенням їхніх переваг і недоліків, розгляд методів розширення спектра для реалізації адаптивної селекції каналів, обґрунтування вибору частотних діапазонів неліцензованих і доступних каналів, розроблення апаратно-програмної реалізації методу адаптивної селекції, формування загальної структури системи з визначенням її функціональних модулів та експериментальне тестування запропонованого методу.

Об'єктом дослідження є процес передавання інформації в системі «розумний будинок», а предметом – метод адаптивної селекції каналів зв'язку для забезпечення стабільного обміну даними між модулями системи.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІoT-СИСТЕМ З АДАПТИВНОЮ СЕЛЕКЦІЄЮ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Поняття, структура та класифікація ІoT-систем і систем «розумний будинок»

Інтернет речей (ІoT) визначають як концепцію розподілених інформаційно-керуючих систем, у яких фізичні об'єкти – пристрої, сенсори та виконавчі механізми – оснащені засобами вимірювання, оброблення й бездротового обміну даними та взаємодіють між собою і з хмарними сервісами, формуючи кіберфізичне середовище. На відміну від класичних автоматизованих систем, ІoT-рішення зазвичай базуються на недорогих мікроконтролерних платформах, масовому бездротовому зв'язку та підтримують масштабування до десятків і сотень вузлів.

Система «розумний будинок» є поширеним прикладом ІoT і розглядається як комплекс апаратно-програмних засобів для моніторингу параметрів середовища, керування інженерними підсистемами (освітлення, опалення, вентиляція, безпека, контроль доступу) та реалізації сценаріїв автоматизації з урахуванням потреб користувача. Для таких систем характерні інтегрованість, віддалений доступ, адаптивність до змін умов і наявність логічного центру керування. У межах будівлі або групи приміщень вузли «розумного будинку» спрямовані на підвищення комфорту, безпеки та енергоефективності, а розгортання зазвичай спрощується завдяки бездротовим технологіям зв'язку, таким як Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth Low Energy або пропріетарні рішення на кшталт nRF24L01.

ІoT-систему доцільно описувати як багаторівневу архітектуру, що охоплює сенсорний рівень (датчики та виконавчі пристрої), комунікаційний рівень

(мережеві протоколи й канали зв'язку), рівень оброблення даних (локальні шлюзи та/або хмарні сервіси) і прикладний рівень (інтерфейси взаємодії з користувачем). На сенсорному рівні використовують датчики температури, вологості, освітленості, руху, диму, газу, витoku води та виконавчі модулі на кшталт релейних блоків, розумних розеток і приводів, які реалізують керувальні дії переважно на мікроконтролерах Arduino, ESP, STM32 з вбудованими або зовнішніми радіомодулями. Комунікаційний рівень забезпечує обмін даними між вузлами, контролером і, за потреби, хмарою, використовуючи Ethernet/Wi-Fi або спеціалізовані технології сенсорних мереж, де критичними стають задачі вибору каналу, частотного діапазону й уникнення завад у перевантаженому радіоефірі. Рівень оброблення даних представлений «домашнім центром», що збирає й обробляє інформацію, зберігає історію та виконує сценарії автоматизації, а в розширених рішеннях частина функцій переноситься до хмарної інфраструктури. Прикладний рівень реалізує мобільні застосунки, веб-панелі, голосові інтерфейси й механізми налаштування, у яких формуються сценарії керування та засоби діагностики системи.

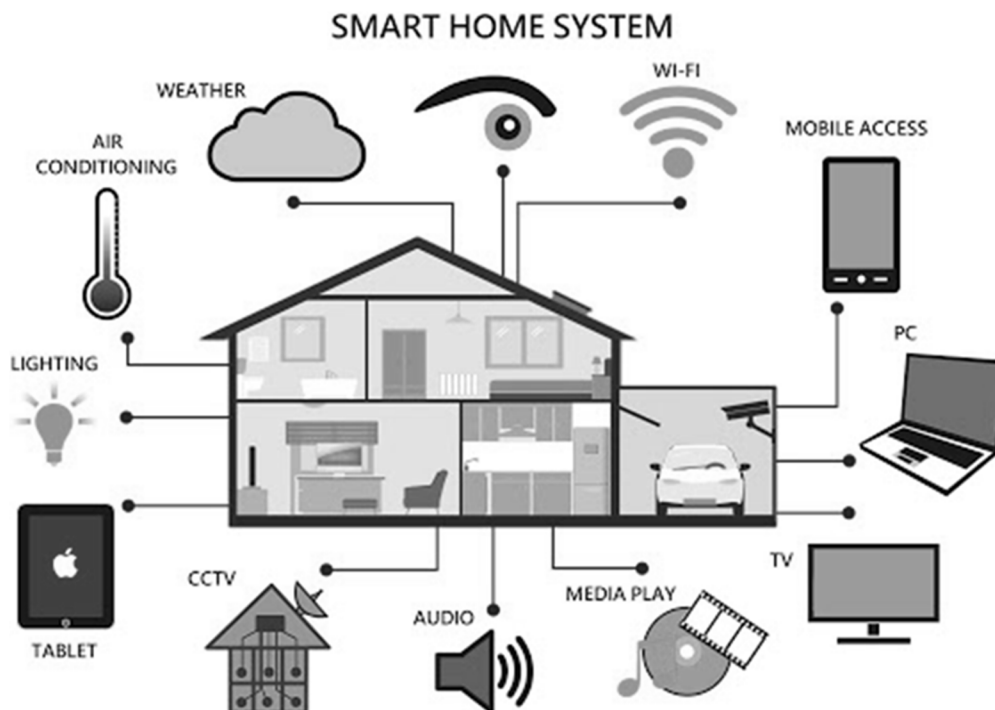


Рисунок 1.1 – Узагальнена багаторівнева структура IoT-системи «розумний будинок»

З позицій системного аналізу «розумний будинок» доцільно розглядати як ієрархічну систему, у якій нижній рівень утворюють локальні підсистеми (освітлення, клімат-контроль, безпека, мультимедіа, енергоменеджмент), здатні працювати автономно. На середньому рівні забезпечується їх інтеграція через спільну комунікаційну інфраструктуру та центральний контролер, а на верхньому – реалізуються комплексні сервісні сценарії, що поєднують кілька підсистем, наприклад режим «відсутність господаря».

Класифікацію IoT-систем і «розумного будинку» виконують за сферою застосування, масштабом, архітектурою керування, характеристиками комунікаційної підсистеми, рівнем інтеграції з хмарою та ступенем інтелектуальності. У контексті адаптивної селекції каналів ключовими є ознаки, пов'язані з архітектурою мережі та параметрами радіоканалів. Узагальнену класифікацію за цими ознаками наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація IoT-систем «розумний будинок» за основними ознаками

Ознака класифікації	Можливі класи / варіанти	Вплив на систему зв'язку
Масштаб системи	Окрема квартира; приватний будинок; багатоквартирний будинок; група будівель	Вимоги до дальності зв'язку, кількості вузлів, топології
Сфера застосування	Безпека; енергоменеджмент; комфорт і мультимедіа; медичний моніторинг; комплексні системи	Пріоритет каналів, чутливість до затримок і втрат пакетів
Тип архітектури керування	Централізована; децентралізована; ієрархічна; гібридна	Розподіл ролей вузлів, вимоги до надійності окремих каналів
Топологія бездротової мережі	Топологія «зірка»; дерево; mesh (сітка); комбінована	Можливість маршрутизації, дублювання маршрутів, масштабованість
Технологія бездротового зв'язку	Wi-Fi; ZigBee/Thread; Bluetooth Low Energy; пропріетарні ISM-рішення; комбінація технологій	Доступний частотний ресурс, швидкість, радіус дії, енергоспоживання
Ступінь інтеграції з хмарою	Локальна (offline); локально-хмарна (edge + cloud); повністю хмарна	Вимоги до надійності виходу в інтернет, типи протоколів
Ступінь адаптивності та «інтелекту»	Фіксована логіка (скрипти, таймери); правил-based (if-then); адаптивні системи; системи з машинним навчанням	Необхідний обсяг даних, частота опитування датчиків

Як видно з таблиці 1.1, із переходом від простих локальних рішень до комплексних систем із хмарними сервісами та алгоритмами машинного навчання зростають вимоги до пропускної здатності, надійності й завадостійкості каналів зв'язку. Підсистеми безпеки та аварійного оповіщення є найбільш чутливими до втрати пакетів і затримок, тоді як для повільно змінних параметрів (температура, вологість, енергоспоживання) допустимі більші затримки та нижча частота вимірювань.

Важливою ознакою класифікації є архітектура керування. У централізованих системах рішення приймає головний контролер, а периферійні вузли виконують функції збору даних і виконання команд, що спрощує розроблення та оновлення, але створює критичну «точку відмови». У децентралізованих або ієрархічних архітектурах частина рішень переноситься на периферійні модулі, які можуть автономно реагувати на аварійні стани, підвищуючи відмовостійкість, проте ускладнюючи синхронізацію та конфігурацію вузлів.

Окрему групу становлять характеристики бездротової мережі, зокрема топологія, спосіб доступу до середовища, підтримка маршрутизації та наявність механізмів адаптивного вибору каналу. Топологія «зірка» спрощує протокол обміну, але збільшує навантаження на центральний вузол, тоді як mesh розширює зону покриття та дає змогу обходити завадні ділянки радіоефіру через ретрансляцію пакетів між вузлами.

Залежність рівня автоматизації від ступеня інтеграції пристроїв можна проілюструвати графіком (рис. 1.2), де з ростом інтеграції (від автономних вузлів до повністю інтегрованої системи з хмарою) зростає функціональність і гнучкість керування, зокрема можливості адаптивних режимів, оптимізації енергоспоживання та підвищення безпеки.

У контексті адаптивної селекції каналів зв'язку важливим є спосіб організації радіодоступу. Частина систем працює на фіксованому каналі, заданому під час конфігурації, тому конфлікти каналів та завади виявляються вже в процесі експлуатації й потребують ручного переналаштування. Інші

системи здатні динамічно змінювати робочу частоту на основі сканування ефіру, автоматично обираючи менш завантажені канали та використовуючи стрибкоподібну перебудову частоти.

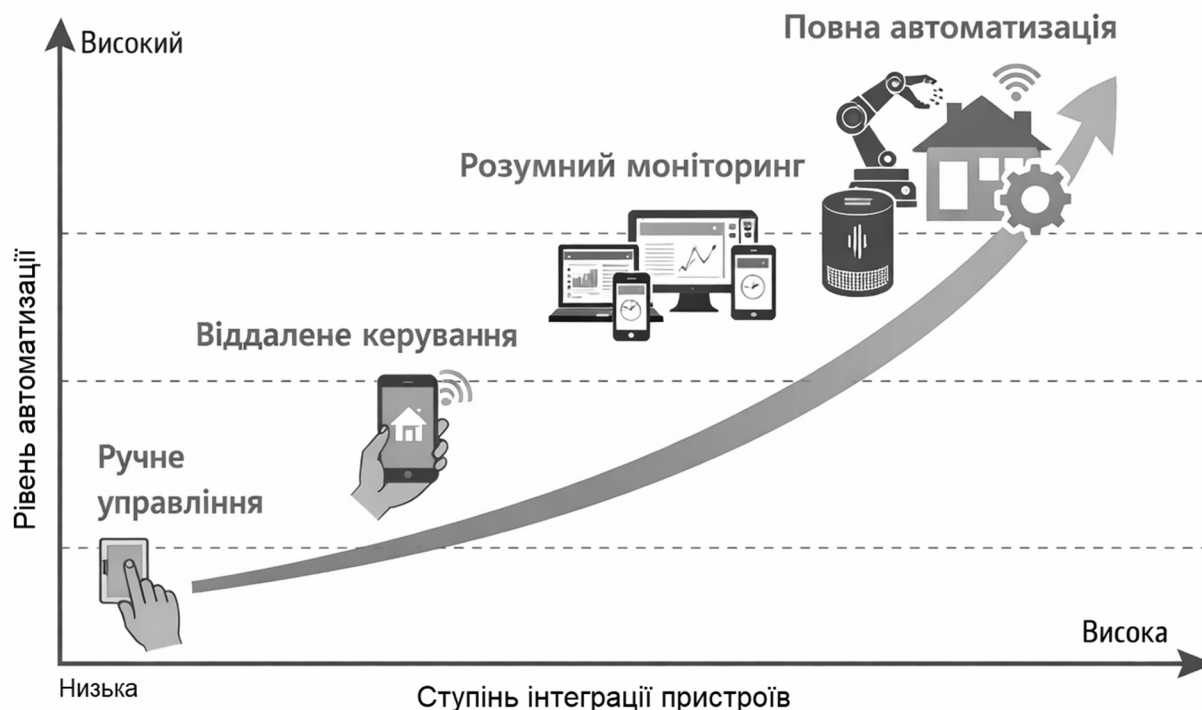


Рисунок 1.2 – Залежність рівня автоматизації IoT-системи «розумний будинок» від ступеня інтеграції пристроїв

Важливою ознакою є й підтримка мультипротокольної взаємодії, коли одночасно застосовуються кілька технологій бездротового зв'язку (Wi-Fi, ZigBee/пропрієтарна мережа 2,4 ГГц, Bluetooth Low Energy тощо). У цьому разі вибір оптимального каналу ускладнюється через взаємні завади між радіотехнологіями та особливості їхніх протоколів доступу до середовища.

Отже, IoT-системи «розумний будинок» мають складну структуру й різні варіанти архітектури та топології мережі. Така класифікація дає змогу чітко сформулювати вимоги й обмеження для каналів зв'язку, у межах яких має функціонувати адаптивний метод селекції каналів.

1.2 Технології та протоколи бездротового зв'язку для IoT-систем «розумний будинок»

Ефективність IoT-систем «розумний будинок» істотно залежить від властивостей бездротових каналів зв'язку між сенсорними модулями, виконавчими пристроями та головним контролером. В умовах обмеженого частотного ресурсу й високої щільності радіопристроїв у діапазоні 2,4 ГГц вибір технології, протоколу та частотного діапазону стає критичним для надійності системи.

У IoT системах найчастіше використовують три класи бездротових технологій: мережі загального призначення (Wi-Fi), енергоощадні мережі ближньої дії (ZigBee, Bluetooth Low Energy, Thread, Z-Wave) та пропрієтарні рішення в неліцензованих діапазонах ISM (nRF24L01, CC1101 тощо) [1–3]. Кожен клас характеризується своїм поєднанням параметрів: радіус дії, швидкість передавання, енергоспоживання, топологія, завадостійкість і наявність механізмів адаптивного вибору каналу.

Структуру стеків протоколів доцільно описувати узагальненою моделлю: на фізичному рівні задаються параметри радіоканалу (частота, модуляція, смуга пропускання), на каналному – механізми доступу до середовища (CSMA/CA, TDMA, FHSS, DSSS), на мережевому – маршрутизація й адресація, а на транспортному та прикладному – протоколи обміну даними (MQTT, CoAP, власні бінарні рішення).

Wi-Fi є стандартом де-факто для доступу до локальної мережі та інтернету в житлових приміщеннях. Сімейство стандартів IEEE 802.11 (b/g/n/ac/ax) забезпечує високі швидкості передавання даних і роботу в діапазонах 2,4 та 5 ГГц [4]. У більшості систем «розумний будинок» Wi-Fi виступає транспортом між домашньою мережею, хмарними сервісами та мобільним застосунком користувача.

Переваги Wi-Fi для IoT – висока пропускна здатність і широка підтримка пристроями (смартфони, ноутбуки, роутери, IP-камери, хаби), що спрощує інтеграцію з існуючою інфраструктурою. Недоліки – підвищене енергоспоживання та обмежена кількість клієнтів при стабільній якості сервісу, тому технологія неідеальна для великої кількості малопотужних сенсорів.

Для великої кількості малопотужних сенсорів і виконавчих пристроїв широко застосовуються технології ближньої дії ZigBee (IEEE 802.15.4), Thread та Z-Wave [5–7]. Вони спеціально орієнтовані на «розумний будинок» і підтримують топологію mesh із багатьма вузлами.

ZigBee та Thread базуються на IEEE 802.15.4, використовують діапазон 2,4 ГГц (і субгігагерцові діапазони), швидкість до 250 кбіт/с і DSSS, що забезпечує високу завадостійкість. Топологія mesh дає змогу збільшити радіус дії й обходити «проблемні» зони радіоефіру.

Z-Wave працює переважно в субгігагерцовому діапазоні 868–915 МГц, має менше завад від Wi-Fi та Bluetooth і кращу проникність крізь стіни за рахунок меншої швидкості, що є прийнятним для сенсорних застосувань. Для адаптивної селекції каналів важливо, що IEEE 802.15.4 підтримує роботу на різних каналах, а стеки ZigBee/Thread можуть переналаштовувати мережу при погіршенні якості зв'язку, хоча гнучкість цих механізмів часто обмежена реалізацією конкретного виробника.

Bluetooth Low Energy (BLE) – технологія короткого радіуса дії (до десятків метрів), оптимізована під низьке енергоспоживання [8]. У IoT вона переважно використовується для первинного налаштування пристроїв, локального сервісного доступу та передавання малих обсягів даних від носимих або автономних сенсорів. У «розумному будинку» BLE рідко є основним транспортом, але часто застосовується в окремих вузлах (замки, датчики, маячки). На фізичному рівні BLE використовує FHSS у діапазоні 2,4 ГГц, що підвищує стійкість до завад і полегшує співіснування з Wi-Fi. Водночас типовий профіль роботи та топологія «зірка» обмежують можливість побудови великих розподілених мереж.

Пропрієтарні рішення на базі радіомодулів в ISM-діапазонах (433 МГц, 868/915 МГц, 2,4 ГГц – nRF24L01, CC1101, RFM69 тощо) [9] надають розробнику повний контроль над параметрами фізичного й каналного рівнів: смугою, модуляцією, кодуванням, доступом до середовища, стрибкоподібною перебудовою частоти. Це дозволяє реалізувати спеціалізовані алгоритми адаптивної селекції каналів для конкретної системи. Порівняння основних технологій бездротового зв'язку наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння технологій бездротового зв'язку для IoT-систем «розумний будинок»

Технологія	Діапазон частот	Типова швидкість, Мбіт/с	Радіус дії в приміщенні	Топологія мережі	Енергоспоживання вузла	Особливості для адаптивного вибору каналу
Wi-Fi (802.11 b/g/n)	2,4 / 5 ГГц	11–150 і більше	20–30 м	Зірка (AP–клієнти)	Високе	Обмежена кількість каналів, сильні завади
ZigBee / Thread	2,4 ГГц, <1 ГГц	до 0,25	10–30 м (mesh – більше)	Mesh, дерево	Низьке	Доступно кілька каналів, перебудова мережі
Z-Wave	≈ 868/915 МГц	до 0,1	20–30 м, краще через стіни	Mesh	Низьке	Менше завад від Wi-Fi, менше каналів
Bluetooth Low Energy	2,4 ГГц	до 1	5–15 м	Переважно «зірка»	Дуже низьке	Використання FHSS, добре для співіснування
nRF24L01+ (пропрієт.)	2,4 ГГц	до 2	10–30 м	Зірка / проста mesh	Низьке	До 126 каналів, гнучкий стрибок частоти

Для наочності загальні тенденції також подано як графік компромісів між радіусом дії та пропускну здатністю (рис. 1.3). Wi-Fi займає зону високих швидкостей і середнього радіуса; ZigBee/Z-Wave – середніх/низьких швидкостей

і середнього радіуса; вузькосмугові ISM-рішення – низьких/середніх швидкостей із гнучкою адаптацією радіуса та енергоспоживання [10]. При цьому енергоспоживання, як правило, зростає зі збільшенням швидкості передавання та частоти пробудження пристроїв.



Рисунок 1.3 – Схематична залежність між пропускнуою здатністю, радіусом дії та енергоспоживанням для типових бездротових технологій «розумного будинку»

Для системи «розумний будинок», орієнтованої на моніторинг параметрів довкілля та передавання коротких службових повідомлень, надвисока швидкість передачі є надлишковою. Натомість ключовими стають завадостійкість, стабільність зв'язку в перевантаженому діапазоні 2,4 ГГц і можливість одночасної роботи багатьох модулів, що обґрунтовує вибір вузькосмугових рішень із великою кількістю каналів та підтримкою стрибкоподібної перебудови частоти.

Отже, у IoT-системах «розумний будинок» доцільно використовувати Wi-Fi як транспортний рівень для інтеграції з інтернетом, ZigBee/Thread/Z-Wave/BLE – для енергоощадних сенсорних мереж, а пропрієтарні ISM-рішення – для задач, де критичними є гнучка селекція каналів і стійкість до завад.

У кваліфікаційній роботі використано радіомодуль nRF24L01 у діапазоні 2,4 ГГц із підтримкою до 126 вузькосмугових каналів. Комбінація великої кількості каналів і програмної перебудови частоти дає змогу реалізувати алгоритм сканування ефіру, формування списку оптимальних каналів і стрибкоподібної зміни робочої частоти.

1.3 Перешкоди, завади та показники якості радіоканалів у бездротових IoT-мережах

Надійність бездротових IoT-систем «розумний будинок» залежить не лише від вибору технології зв'язку, а й від реальних умов поширення радіосигналу в приміщенні. У будівлях сигнал зазнає затухання в стінах і перекриттях, багатопроменеве поширення, відбиття від металевих конструкцій та впливу інших бездротових систем. Утворюється складне середовище, у якому якість радіоканалу змінюється в часі та просторі, тому для коректного проектування й адаптивної селекції каналів необхідно розуміти природу перешкод і показники якості радіоканалу.

Основні фізичні фактори включають затухання з відстанню та додаткові втрати в огорожувальних конструкціях, що особливо помітно в діапазоні 2,4 ГГц, а також багатопроменеве поширення, яке спричиняє інтерференцію та глибокі завмирання сигналу навіть при невеликих змінах положення приймача. Додатково діють фоновий шум та електромагнітні завади від побутової техніки, імпульсних блоків живлення, освітлення, а також інтенсивний радіообмін Wi-Fi, Bluetooth та інших IoT-пристроїв у діапазоні 2,4 ГГц. До мережевих завад

належить взаємний вплив різних протоколів, що працюють на тих самих або сусідніх каналах (наприклад, кількох Wi-Fi-мереж і сенсорної мережі на базі nRF24L01), що підвищує рівень шуму та ймовірність колізій. Узагальнену класифікацію основних типів завад подано в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Основні типи завад у бездротових IoT-мережах «розумний будинок»

Тип завади	Основне джерело	Вплив на радіоканал	Типові засоби зменшення впливу
Тепловий (фоновий) шум	Електронні компоненти приймача, середовище	Зменшення відношення сигнал/шум, збільшення BER/PER	Підвищення потужності сигналу, вибір вузькосмугових каналів, якісний приймач
Багатопроменеве замирання	Відбиття від стін, меблів, металу	Глибокі провали рівня сигналу, нестабільність RSSI	Використання рознесеного прийому, адаптивна зміна каналу, вибір розташування модулів
Перешкоди на тій самій частоті	Інші Wi-Fi/IoT-мережі, Bluetooth	Колізії кадрів, повторні спроби передавання, затримки	Адаптивний вибір менш завантажених каналів, рознесення по частоті
Перешкоди на сусідніх каналах	Широкопasmові сигнали Wi-Fi, UWB	Підвищення рівня шуму в сусідніх вузьких каналах	Використання каналів із меншим перекриттям, фільтрація
Імпульсні електромагнітні завади	Пуск електродвигунів, імпульсні БЖ	Короточасні сплески помилок, втрата окремих пакетів	Екранування, фільтри живлення, повторна передача

Для кількісного оцінювання впливу перешкод на радіоканал у бездротових IoT-мережах застосовують показники, що характеризують стан каналу на фізичному, каналному та мережевому рівнях. Для систем «розумний будинок» ключовими є RSSI, який відображає рівень потужності прийнятого сигналу (низькі значення зазвичай означають нестійкий зв'язок, хоча високий RSSI не гарантує якості), та SNR/SINR – відношення потужності корисного сигналу до шуму й завад, що безпосередньо визначає імовірність помилок приймання. Якість цифрового передавання також описують BER як частку помилкових бітів і PER як частку втрачених або пошкоджених пакетів. На практиці додатково

оцінюють рівень втрат пакетів, який узагальнює колізії, тайм-аути, помилки декодування та відсутність підтверджень АСК.

Для прикладних задач важливими є затримка та джитер, оскільки для сенсорних даних допустимі більші затримки, тоді як сигнали тривоги й керування виконавчими пристроями потребують малої та прогнозованої затримки. Окремо враховують пропускну здатність (ефективну швидкість із урахуванням службових даних і повторів) та доступність каналу як частку часу, коли він відповідає заданим критеріям якості, що є критичним для систем безпеки й моніторингу. Зазвичай між SNR і PER спостерігається нелінійна залежність, адже після досягнення певного порога SNR імовірність помилки різко зменшується, що показано на рис. 1.4. По осі абсцис відкладається SNR у дБ, по осі ординат – PER у логарифмічному масштабі. Крива має виражений пороговий характер: при SNR нижче 0–5 дБ PER майже дорівнює 1, а після досягнення 10–15 дБ швидко зменшується до прийнятних значень (менше 1–5 %). Це демонструє, що навіть незначне покращення умов прийому (зміна каналу, положення антени, зменшення завад) здатне різко підвищити надійність зв'язку.

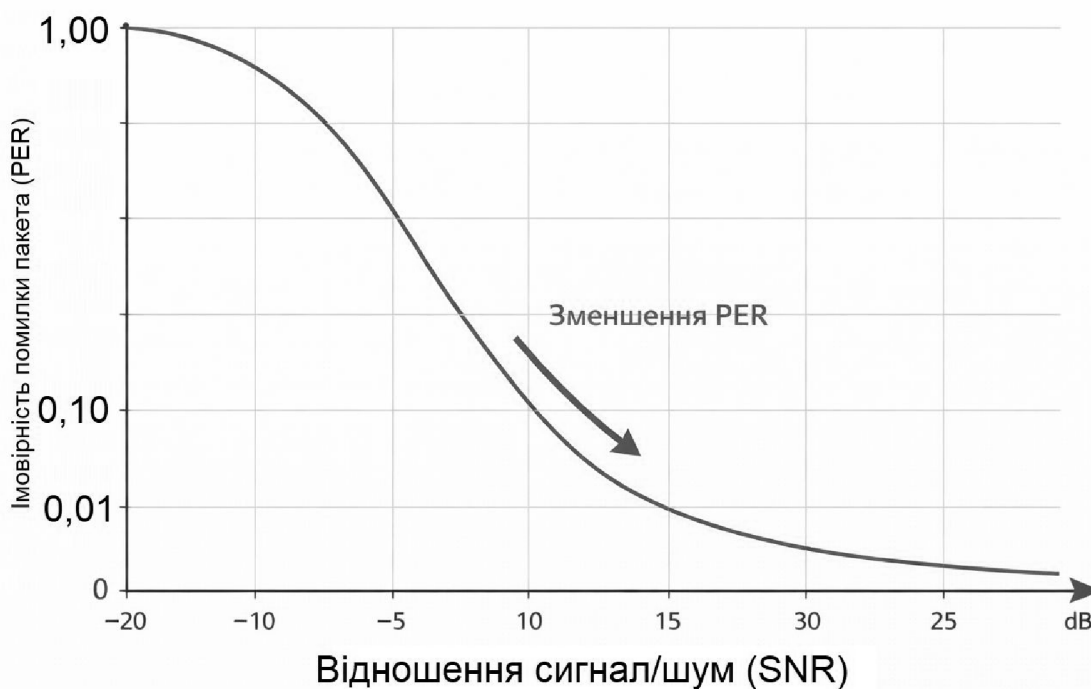


Рисунок 1.4 – Залежність імовірності помилки пакета (PER) від відношення сигнал/шум (SNR) для типового цифрового радіоканалу

У бездротових IoT-мережах «розумний будинок» перешкоди зменшують SNR і збільшують BER, PER та затримки через повторні передачі, причому завадова обстановка змінюється в часі через активність користувачів, роботу побутових приладів і появу нових Wi-Fi-мереж. Це зумовлює потребу в адаптивних методах, які періодично сканують діапазон, оцінюють рівень шуму, формують список пріоритетних каналів і реалізують стрибкоподібну зміну робочої частоти. Алгоритм вибору каналу має підтримувати такий SNR, за якого PER не перевищує заданий поріг (наприклад, 5 %), що й лежить в основі подальшого обґрунтування вибору діапазону та розроблення адаптивного методу селекції каналів.

1.4 Огляд підходів до адаптивної селекції каналів зв'язку та постановка задачі дослідження

Проблема вибору частотного каналу є однією з ключових для бездротових IoT-систем «розумний будинок» у перевантаженому діапазоні 2,4 ГГц, оскільки від способу селекції каналів залежать імовірність успішного приймання пакетів, рівень втрат, затримки та загальна надійність системи. Статичне налаштування або прості евристики «автовибору» дедалі частіше виявляються недостатніми в умовах, коли одночасно працюють десятки Wi-Fi-мереж та IoT-пристроїв, що формують змінний та складний завадовий фон.

Узагальнюючи відомі підходи, зазвичай виділяють такі основні напрями: статичний вибір каналу під час інсталяції, реактивні методи з перемиканням каналу при погіршенні якості зв'язку, проактивні алгоритми з періодичним скануванням ефіру, методи стрибкоподібної перебудови частоти (FHSS), а також підходи когнітивного радіо й машинного навчання. Їхню узагальнену класифікацію наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Класифікація підходів до адаптивної селекції каналів зв'язку

Клас підходу	Коротка характеристика	Переваги	Недоліки
Статичний вибір каналу	Ручне або одноразове налаштування каналу під час запуску	Простота, відсутність додаткових витрат	Не враховує зміну завад, швидко втрачає оптимальність
Реактивна зміна каналу	Перемикання при перевищенні порогів PER, RSSI тощо	Адаптація до деградації каналу	Реагує із запізненням, можливі «гойдання» між каналами
Проактивне сканування та вибір	Періодичне сканування діапазону з формуванням рейтингу каналів	Поліпшення стабільності, прогнозування	Потребує часу на сканування, додаткові обчислення
FHSS / псевдовипадковий стрибок	Швидка зміна частоти за відомою послідовністю	Стійкість до вузькосмугових перешкод	Потрібна синхронізація, не завжди враховується завантаженість каналів
Когнітивне радіо, ML-підходи	«Розумне» використання спектру на основі аналізу середовища	Потенційно максимальна ефективність	Висока складність, значні обчислювальні та енергетичні витрати

Різні класи методів селекції каналів мають обмеження щодо практичного застосування в системах «розумний будинок» на базі малопотужних мікроконтролерів. Найпростіший варіант – статичний вибір каналу під час монтажу прийнятний лише за низької щільності мереж, а у багатоквартирних будинках швидко втрачає ефективність через появу нових Wi-Fi-мереж, що підвищує завадовий фон і вимагає ручного переналаштування.

Реактивні підходи контролюють показники якості зв'язку (RSSI, SNR, PER, втрати пакетів) і перемикають канал при перевищенні порогів, однак реагують із запізненням і можуть спричиняти часті перемикання. Для IoT більш придатними є проактивні методи, що періодично сканують діапазон і формують перелік пріоритетних частот; до них належить запропонований у роботі підхід зі скануванням 2,4 ГГц з кроком 1 МГц, таблицею частот очікування та списком «кращих» каналів. Перспективним є поєднання проактивного сканування з FHSS, коли стрибкоподібна зміна частоти виконується лише по рекомендованих каналах, підвищуючи стійкість до вузькосмугових завад. Когнітивне радіо та методи машинного навчання наразі є надто ресурсомісткими для типових платформ IoT, місце адаптивної селекції у їх структурі показано на рис. 1.5.

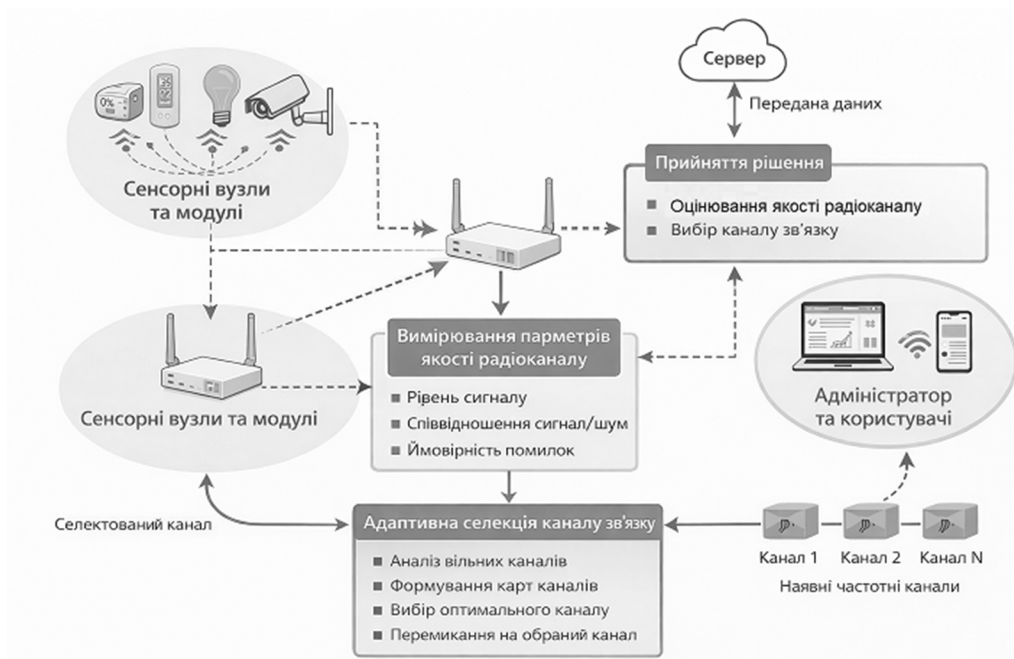


Рисунок 1.5 – Узагальнена схема адаптивної селекції каналів у системі «розумний будинок»

Для ілюстрації ефективності адаптивних підходів доцільно розглянути якісне порівняння статичного та адаптивного методів (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Якісне порівняння статичного та адаптивного методів вибору каналу

У статичному варіанті з часом (з появою нових мереж, зміною завантаженості) втрати зростають, тоді як адаптивний метод періодично перемикається на менш зашумлені канали, що дозволяє утримувати втрати в допустимих межах.

РОЗДІЛ 2

АДАПТИВНІ МЕТОДИ ВИБОРУ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ В СИСТЕМІ «РОЗУМНИЙ БУДИНОК»

2.1 Технології розширення спектра та керування частотним ресурсом у системі «розумний будинок»

Для підвищення ефективності передавання інформації в заданому діапазоні частот (BFR) використовують технології розширення спектра, що базуються на модуляції сигналу та забезпечують стійкіший зв'язок у каналі зв'язку (CC) за умов сильних спотворень і завад. У бездротових локальних мережах у діапазоні 2,4 ГГц для підвищення завадостійкості, спектральної ефективності й надійності обміну даними використовують методи OFDM, DFS, LFM, CSS та DSSS.

Метод ортогонального частотного мультиплексування підчастот (OFDM) об'єднує кілька потоків даних у спільному спектральному ресурсі та розподіляє передавання між набором ортогональних підчастот, через які транспортується інформація [11]. OFDM поєднує властивості модуляції та мультиплексування, а ортогональність підчастот забезпечує їх розділення на приймальній стороні навіть за часткового перекриття спектрів, що підвищує спектральну ефективність сигналу [12]. Формування комплексного OFDM-сигналу здійснюється як сума модульованих підчастот, параметри яких добирають так, щоб зберігалася ортогональність. Для ефективної реалізації методу застосовують обернене швидке перетворення Фур'є. У діапазоні 2,4 ГГц можуть використовуватися підчастоти з різними схемами модуляції залежно від вимог до стійкості зв'язку між модулями системи [13]. Переваги OFDM проявляються насамперед у роботі в зашумлених середовищах і за багатопроменевого поширення, однак практична реалізація потребує точної синхронізації часу і частоти, а висока піковість сигналу може збільшувати енергоспоживання.

Технологія динамічного вибору частоти (DFS) спрямована на зниження завад завдяки регулярному скануванню радіоефіру та перемиканню на канали з кращими умовами поширення. У процесі сканування канали переглядаються згідно з частотною сіткою, після чого формується таблиця DFS, де фіксується сила виявлених сигналів-перешкод; для зменшення хибних спрацьовувань додатково враховується спектральна щільність. Подальший аналіз таблиці дозволяє вибрати канал з мінімальним рівнем завад і встановити його центральну частоту як робочу, що забезпечує рівномірніший розподіл системи передавання даних по доступному спектру. У практиці широкосмугових систем у діапазоні 5 ГГц DFS пов'язаний із вимогами виявлення радарів і обов'язковим звільненням зайнятих ними каналів, тому в контексті DFS доцільно розрізняти власне механізм динамічного вибору частоти та механізм виявлення радара [14]. Алгоритмічно DFS реалізується як примусове сканування доступних каналів, вибір найменш зашумленого та періодичне повторення процедури, що супроводжується короткочасними перервами зв'язку під час перемикання центральної частоти [14]. Практичний приклад заповнення таблиці DFS та вибору каналу наведено у таблиці 2.1, де базова станція обирає канал з найнижчим рівнем сигналу завад і встановлює його як робочу частоту, після чого абонентський пристрій знаходить базову станцію шляхом послідовного перегляду дозволених каналів і відновлює обмін даними [15].

Таблиця 2.1 – Результати сканування DFS для частотних каналів діапазону 5 ГГц

Частотний канал для Wi-Fi 5 ГГц	Рівень сигналу, дБ
f_1	-83
f_2	-76
f_3	-90

Метод лінійної частотної модуляції (LFM) та технологія CSS (Chirp Spread Spectrum) використовують широкосмгові імпульси з керованою зміною миттєвої частоти для кодування інформації. При цьому частота сигналу зростає або зменшується з часом за заданим законом [16]. Як і інші методи розширеного спектра, LFM/CSS залучають широку смугу пропускання, що підвищує завадостійкість і стійкість до багатопроменевих перешкод навіть за низьких рівнів потужності, проте, на відміну від DSSS або FHSS, не покладаються на додавання псевдовипадкових компонентів, а використовують властивості модуляційного імпульсу [16]. CSS розглядається як придатна технологія для низькошвидкісних мереж у ISM-діапазоні 2,4 ГГц; зокрема, IEEE 802.15.4a визначає CSS для LR-WPAN, поєднуючи кодування CSS із диференціальною фазовою маніпуляцією (DPSK) з метою підвищення швидкості передавання [17]. Для CSS зазначається робота на частоті 2,4 ГГц із максимальною швидкістю 2 Мбіт/с, передавання символів у вигляді лінійних імпульсів зі смугою 80 МГц і тривалістю 1 мкс та системний коефіцієнт посилення 17 дБ.

Пряме послідовнісне розширення спектра (DSSS) є методом модуляції, що зменшує вплив шуму шляхом «розтягування» сигналу на ширшу смугу пропускання, ніж інформаційна смуга [18]. У DSSS інформаційні біти модулюються псевдовипадковою послідовністю розширення, яка складається з бітів значно коротшої тривалості, ніж тривалість вихідного біта, унаслідок чого підвищується швидкість чіпів і формується шумоподібний сигнал. Приймач, знаючи ту саму послідовність, виконує кореляційну обробку та відновлює повідомлення, а ефективне відношення сигнал/шум збільшується пропорційно коефіцієнту розширення [15]. Попри те, що DSSS займає ширшу смугу, спектр може бути частково обмежений смуговими фільтрами, що полегшує спектральне формування; водночас для FHSS додаткове формування смуги може спричиняти амплітудну модуляцію сигналу, закодованого частотними стрибками [20]. DSSS забезпечує підвищення стійкості до випадкових і навмисних перешкод, підтримує спільне використання каналу кількома користувачами, знижує

спектральну щільність потужності відносно фонового шуму та може бути корисним для оцінювання часових затримок між передавачем і приймачем.

Таблиця 2.2 – Порівняльна характеристика методів OFDM, DFS, LFM, CSS та DSSS для бездротових систем «розумного будинку»

Метод	Принцип	Переваги	Недоліки
OFDM	Передавання даних через набір ортогональних піднесучих (FFT/IFFT)	Висока спектральна ефективність; стійкість до багатопроменевості; підтримка високих швидкостей	Вимогливість до синхронізації; високий PAPR; підвищена обчислювальна складність
DFS	Сканування ефіру та динамічний вибір/перемикання на менш зашумлений канал	Зниження впливу завад; менше повторних передач; стабілізація роботи в щільному ефірі	Перерви зв'язку під час перемикання; витрати часу/енергії на сканування
LFM	Кодування інформації сигналом із лінійною зміною миттєвої частоти (chirp-імпульси)	Висока завадостійкість; робота за низьких рівнів потужності; стійкість до завмирань	Обмежені швидкості; складніша кореляційна/узгоджена обробка
CSS	Розширення спектра на основі chirp-символів із розподілом енергії по смузі	Дуже висока стійкість до вузькосмугових завад і багатопроменевості; працездатність при низькому SNR	Нижча спектральна ефективність порівняно з OFDM; швидкість залежить від режимів/стандарту
DSSS	Множення бітів на псевдовипадкову послідовність (чіпи) та кореляційне відновлення	Висока завадостійкість; зниження впливу перешкод; можливість спільного використання каналу	Потрібна синхронізація PN-послідовностей; ширша зайнята смуга
FHSS	Псевдовипадкова стрибкоподібна зміна несучої частоти між підканалами (синхронно на TX/RX)	Висока стійкість до вузькосмугових завад; ускладнення перехоплення; добрий множинний доступ у спільному діапазоні	Потрібна точна синхронізація «таблиці стрибків»; можливі взаємні завади з іншими системами; ефективність падає при широкосмугових перешкодах

Стрибкоподібна зміна частоти (FHSS) реалізує розширення спектра через псевдовипадкову зміну несучої частоти синхронно на передавачі й приймачі, розбиваючи доступний діапазон на піддіапазони та швидко перебудовуючи частоту в межах заданої таблиці стрибків. У такому підході завади впливають на зв'язок переважно в ті моменти, коли система перебуває на конкретній частоті, що підвищує стійкість до вузькосмугових завад і ускладнює перехоплення сигналу; водночас FHSS може тимчасово створювати перешкоди сусіднім DSSS-системам [20]. FHSS широко застосовується у дистанційно керованих пристроях і системах, де важливі множинний доступ і робота великої кількості передавачів/приймачів у спільному діапазоні без жорсткого обмеження кількості фіксованих каналів, характерного для традиційних FM/AM-рішень [22]. Оскільки смуга, потрібна для FHSS, є ширшою, ніж для передавання тієї самої інформації на одній фіксованій несучій, критичним елементом практичної реалізації стає синхронізація, що забезпечується спільною таблицею стрибків і передаванням синхронізаційної інформації на етапах обміну даними [3].

2.2 Обґрунтування вибору частотних діапазонів каналів зв'язку для розумного будинку

Сьогодні пристрої, що використовують радіоканали для зв'язку, масово застосовуються, а кількість бездротових пристроїв неухильно зростає. Однак через особливості формування й приймання радіохвиль, умови поширення сигналу та законодавчі обмеження на діапазони частот, доступні для приватного й комерційного використання, частотний ресурс, придатний для конкретних застосувань, є дуже обмеженим.

Неліцензовані радіочастотні діапазони доступні в усьому світі для обміну даними. В Україні для цієї мети виділено, зокрема, такі діапазони: 433,075 МГц, 434,750 МГц, 868,7–869,2 МГц, 915 МГц, 2,4 ГГц та 5,8 ГГц. Окрім нормативних

вимог, під час вибору діапазонів частот необхідно враховувати й технічні чинники. Зокрема, діапазон 2,400–2,4835 ГГц забезпечує більшу кількість каналів, вищу швидкість передавання даних, можливість безперервної роботи та використання більш компактних антен. Водночас стабільної роботи можна досягти переважно на менших відстанях, а вплив різноманітних перешкод стає відчутнішим.

Для частот нижче 1 ГГц дозволені діапазони відрізняються залежно від країни, і не завжди доступні однакові базові станції. Крім того, не в усіх регіонах дозволено безперервну роботу пристроїв у мережі. Перевагою таких діапазонів є те, що за однакової потужності передавання вони забезпечують більшу стабільну дальність зв'язку та менше піддаються впливу завад на шляху сигналу порівняно з діапазоном 2,4 ГГц.

Важливо зазначити, що в діапазоні 2,4 ГГц працює багато пристроїв, зокрема комп'ютери та бездротові мережеві пристрої, бездротові навушники та гарнітури, а також системи «розумного дому» на основі технологій ZigBee та Wi-Fi. Діаграма діапазонів частот для цих технологій наведена на рисунку 2.1. Обидві технології працюють у діапазоні 2,4 ГГц і використовують спільний частотний ресурс, тому одночасна робота мереж ZigBee та Wi-Fi на тих самих частотах призводить до їх взаємного впливу.

Отже, постійне зростання кількості бездротових пристроїв, розширення бездротових мереж і збільшення числа пристроїв, що перебувають у постійному підключенні, впливатимуть на стабільність їх функціонування та надійність зв'язку між ними. В таких умовах продуктивність бездротової мережі значною мірою залежатиме від ймовірності успішного приймання мережевих пакетів і керувальних сигналів.

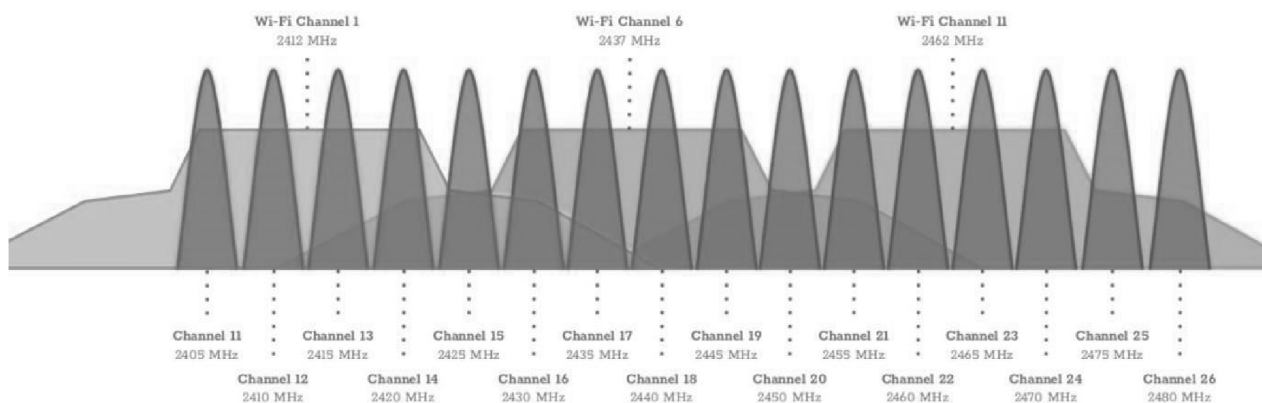


Рисунок 2.1 – Діаграма розподілу частотних каналів в діапазоні 2,4 ГГц

Вихідна потужність передавачів неліцензованого діапазону регламентується нормативними обмеженнями. За потреби можна використовувати зовнішній підсилювач, щоб встановити потужність вихідного сигналу на максимально допустиме значення. У деяких випадках, окрім підсилювача, застосовують спрямовану антену, а іноді спрямована антена може повністю замінити підсилювач. На чутливість приймача впливають його технічні характеристики, власний шум і міжвузлові завади. Крім того, помилки в налаштуванні тракту живлення антени також можуть знизити фактичну чутливість приймача.

2.3 Опис адаптивного методу вибору каналу зв'язку для системи «розумний будинок»

Метод адаптивного вибору каналу в системі «розумного будинку» – це спосіб організації зв'язку між різними модулями системи, який дає змогу уникати каналів із сильними перешкодами. Його основна ідея полягає у використанні лише «хороших» частот і в уникненні «поганих» каналів, на яких уже працюють інші пристрої або на які здійснюється зловмисний вплив. Цей метод підходить для пристроїв із вузькосмуговими діапазонами взаємодії,

зокрема для пристроїв, що працюють у діапазоні 1 МГц і 2,4 ГГц. Це означає, що пристрої мають 128 каналів, доступних для пошуку та використання.

За замовчуванням усі пристрої можуть використовувати один і той самий канал, що унеможлиблює одночасну роботу великої кількості пристроїв в одній мережі. У підсумку надто велика кількість пристроїв генерує надмірний шум на спільній частоті, що суттєво ускладнює передавання даних і призводить до численних повторних спроб та колізій. Це, своєю чергою, ще більше підвищує рівень шуму, формуючи постійний «гул» та створюючи перешкоди в цьому діапазоні. Подібна ситуація може виникати в найбільш критичні моменти роботи системи «розумного будинку», наприклад, під час формування сигналів тривоги або виявлення подій вторгнення, коли численні датчики одночасно повідомляють про свій стан центральному контролеру. У такому разі система фактично «брехатиме», тобто може не відреагувати належним чином на першу серйозну подію.

Щоб запобігти цьому та забезпечити безперебійне розгортання системи «розумного будинку» доцільно впровадити функцію стрибкоподібної перебудови частоти в адаптивний метод вибору каналу. Ця функція спрямована на покращення якості зв'язку та дасть змогу використовувати велику кількість модулів в одній бездротовій локальній мережі. Це передбачає використання ідентичних пристроїв, що працюють в одній зоні, застосовують бездротові модулі в одному частотному діапазоні та під'єднані до спільного центрального контролера. Для пошуку так званих «хороших» каналів використовується функція сканування частоти. Вона відповідає за сканування частотного діапазону, що застосовується протоколом зв'язку, та визначення, які канали є зашумленими, а які – практично неактивними й придатними до використання.

Функція сканування частоти виконується під час початкового запуску головного контролера системи «розумного будинку» і періодично викликається в процесі його роботи. Щоб зробити ці сканування максимально інформативними та відобразити всі можливі варіанти рівнів ефірних сигналів, у функції доцільно реалізувати метод генерації випадкових моментів запуску,

тобто псевдовипадкову зміну періоду виконання сканування. Це дасть змогу врахувати всі можливі сценарії, зокрема появу нових пристроїв або проходження масивів повідомлень, що підвищують рівень шуму в частотному діапазоні.

Під час початкового запуску генерується таблиця частот очікування; усі наступні запуски спрямовані на уточнення та доповнення цієї таблиці. У ній накопичуються результати вимірювань. Основним завданням реалізації адаптивного вибору каналу є формування списку пріоритетних частот, який містить N комірок (значень частот очікування), упорядкованих за пріоритетом від першого до останнього елемента. Цей список формується на основі таблиці частот очікування, отриманої внаслідок послідовного виконання описаного вище методу. Якщо в таблиці відбуваються зміни, оцінюється їхній вплив на список; якщо зміни стосуються більше ніж половини елементів, список пріоритетних частот переформовується.

Генерація списку здійснюється за алгоритмом, який враховує діапазони послідовних частот очікування, сусідні частоти та їх розподіл по всьому діапазону 2,4 ГГц. Під час формування послідовності списку додатково вводиться випадковий коефіцієнт, що має вирішальне значення для узгодженої роботи ідентичних систем і дає змогу уникнути ситуації, коли сусідні пристрої одночасно використовують одну й ту саму частоту.

Сформований список розповсюджується до всіх мережевих пристроїв. У разі виникнення перешкод усі підключені пристрої перемикають свою робочу частоту відповідно до чергової пріоритетної частоти зі списку. Якщо перешкоди виникають і на новій частоті, перемикання знову здійснюється згідно з наступним пріоритетним значенням. Це дає змогу експлуатувати кілька мереж в одному приміщенні (в одному радіусі дії) та поєднувати їх із домашніми мережами (Wi-Fi, Bluetooth тощо), що працюють у дозволеному діапазоні 2,4 ГГц. Запропонований метод є стійким до перешкод, і система здатна адаптуватися до будь-яких зовнішніх впливів.

Загалом функція сканування частоти працює таким чином:

- виконується сканування всіх частот у діапазоні від 2400 МГц до 2526 МГц з кроком 1 МГц із визначенням рівня сигналу та шуму на кожній частоті;
- протягом заданого часового інтервалу (TScan – період сканування) аналізується кілька частот і для кожної з них обчислюється середнє значення рівня сигналу, яке заноситься до таблиці результатів;
- відфільтровуються частоти, для яких сила сигналу перевищує 0,5;
- результуючий список доповнюється випадковими коефіцієнтами для визначення 12 найпріоритетніших частот;
- згенерований список частот очікування передається кожному модулю системи «розумний будинок».

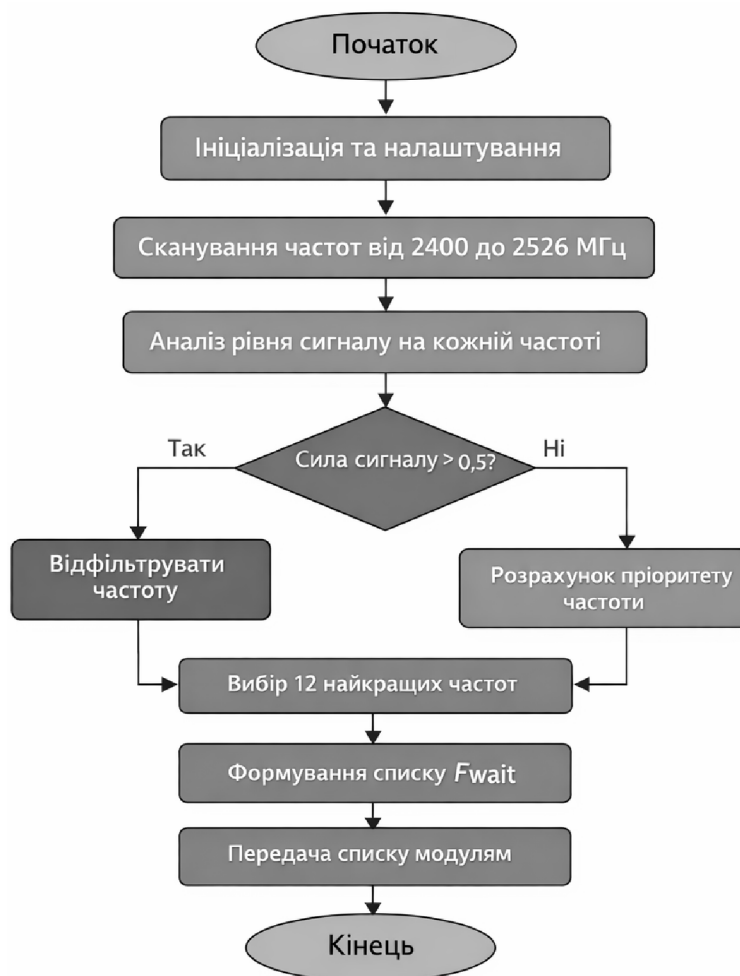


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритму адаптивної селекції частот для модулів системи «розумний будинок»

Ще одним компонентом адаптивного методу вибору каналу в системі «розумного будинку» є функція передавання даних зі стрибкоподібною перебудовою частоти, яка працює на основі даних, отриманих із попередніх операцій (тобто зі списку доступних частот). Ця функція організовує передавання даних між модулями системи за такими сценаріями:

- до головного модуля системи «розумного будинку» надходить короткий запит на передавання даних, який здійснюється на базовій робочій частоті;
- після підтвердження запиту передавання даних здійснюється на частоті, узгодженій обома сторонами під час попереднього «діалогу»;
- під час наступного сеансу передавання даних робоча частота змінюється.

Таким чином, передавання даних відбувається на частотах, вибраних зі списку доступних частот, причому щоразу нова частота обирається зі списку псевдовипадковим чином. Відповідний коефіцієнт (параметр вибору) є відомим лише двом сторонам, що беруть участь у «діалозі», і визначається за ідентифікатором інформаційного модуля та мережевою адресою системи «розумного будинку». При цьому цей коефіцієнт є унікальним для кожного модуля, що забезпечує додаткові переваги з погляду завадостійкості в усьому частотному діапазоні.

РОЗДІЛ 3

АПАРАТНО-ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ АДАПТИВНОЇ СЕЛЕКЦІЇ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ РОЗУМНОГО БУДИНКУ

3.1 Апаратно-програмна реалізація керуючого модуля системи «Розумний будинок» з адаптивною селекцією каналів зв'язку

Апаратно-програмна платформа реалізації адаптивного методу вибору каналу в системі «розумного будинку» формується з урахуванням вимог до енергоспоживання, радіочастотних параметрів (чутливості приймача та потужності передавання), обсягу пам'яті, доступності програмних засобів і рівня захисту даних. Для побудови бездротових вузлів використовують або використовують окремий приймач разом із керуючим мікроконтролером, який реалізує стек протоколів і прикладні функції з підключенням радіомодуля через SPI або UART, або застосовують системи на кристалі (SoC), що інтегрує приймач і мікроконтролер в одному корпусі та зменшує кількість зовнішніх компонентів і габарити друкованої плати. Незалежно від обраного підходу, ключовим є забезпечення надійної сумісної роботи стеку протоколів і прикладного коду, оскільки збої в одному з компонентів можуть спричиняти втрату зв'язку, вихід вузла з мережі або зупинку виконання програми.

У кваліфікаційній роботі реалізовано розподілений підхід побудови бездротового вузла. Для головного модуля системи обрано мікроконтролерну платформу Arduino Mega 2560 R3 на базі ATmega2560, що забезпечує достатній ресурс пам'яті та периферії для організації обміну даними, індикації та керування виконавчими елементами. Для інформаційних модулів застосовано Arduino Nano R3 на базі ATmega328 як компактну платформу прототипування з достатньою кількістю входів/виходів для підключення датчиків і периферії. Основні характеристики обидвох чіпів наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні технічні параметри мікроконтролера ATmega2560

Параметр	Значення	
	ATmega2560	ATmega328
Ядро мікропроцесора	AVR 8-біт	8-бітне RISC-ядро AVR
Тактова частота, МГц	до 16	до 20
Flash-пам'ять, кБайт	256 (з можливістю самопрограмування)	32 (з можливістю самопрограмування)
EEPROM-пам'ять, кБайт	4	1
RAM-пам'ять, кБайт	8	2
Кількість каналів АЦП	16	6
Розрядність АЦП, біт	10	10
Кількість каналів ШІМ	15	6
Розширення ШІМ, біт	8/16	8
Сторожовий таймер	1 (з окремим генератором)	1 (з окремим генератором)
Годинник реального часу	1 (на основі таймера/лічильника)	1 (на основі таймера/лічильника)
Кількість інтерфейсів UART	4	1
Напруга живлення ядра	1.8–5.5 В	1.8–5.5 В
Напруга живлення периферії	1.8–5.5 В	1.8–5.5 В
Робоча температура	–40...85 °C	–40...+85 °C

Комунікаційну підсистему реалізовано на базі радіомодуля nRF24L01+ для роботи в діапазоні 2,4 ГГц, який підтримує швидкості 250 кбіт/с, 1 Мбіт/с або 2 Мбіт/с і роботу на 126 незалежних каналах, що створює передумови для мінімізації взаємних завад і реалізації адаптивної селекції каналів. Обмін даними між мікроконтролером і nRF24L01+ здійснюється через протокол SPI, тому модуль підключається до відповідних ліній SPI плати Arduino. До основних

технічних характеристик радіомодуля можна віднести робочу частоту 2,4 ГГц, дальність зв'язку до 100 м (без зовнішньої антени), швидкість до 2 Мбіт/с, живлення 3–3,6 В, вихідну потужність до 0 дБм та піковий коефіцієнт підсилення антени близько 2 дБм. Розподіл контактів nRF24L01+ наведено в таблиці 3.2, а для стабілізації живлення модуля рекомендовано паралельне підключення електролітичного конденсатора ємністю не менше 100 мкФ і керамічного конденсатора 0,1 мкФ.

Таблиця 3.2 – Маркування контактів модуля бездротового зв'язку nRF24L01+

Найменування виводу радіомодуля	Призначення виводу радіомодуля
SCK	Тактовий сигнал SPI (синхронізація обміну).
MOSI/MI	Лінія передавання даних до модуля (Master Out / Slave In).
MISO/MO	Лінія передавання даних від модуля (Master In / Slave Out).
CE/SS	Лінія вибору пристрою на шині SPI (активація конкретного модуля серед кількох).
SCN	Вибір режиму приймання/передавання; фактично керувальний вхід CE.
IRQ	Вихід запиту переривання; використовується для оперативного сповіщення мікроконтролера, зокрема при надходженні нового пакета даних.
GND	Загальний провід (земля, «маса»).
Vcc	Живлення модуля 3,3 В.

Структурна організація керуючого модуля «Блок керування» сформована відповідно до вимог роботи в неліцензованому діапазоні 2,4 ГГц із дальністю передавання не менше 30 м у приміщенні, швидкістю до 2 Мбіт/с, вихідною потужністю 0 дБм, піковим коефіцієнтом підсилення антени 2 дБм і підтримкою близько 120 каналів. Для індикації станів і подій використовується РК-дисплей, керування яким оптимізовано через I²C-модуль на базі PCF8574 для зменшення кількості задіяних ліній введення/виведення, а звукове оповіщення реалізується

п'єзоелектричним випромінювачем HCM1205X. Введення команд користувача здійснюється з матричної клавіатури 4×4, а комутація навантажень із підвищеним струмом виконується двоканальними релейними модулями. Для задач планування та прив'язки управлінських дій у часі застосовується модуль реального часу DS1302. Структурну схему керуючого модуля наведено на рисунку 3.1. Принципову електричну схему головного модуля «Блок керування» наведено на рисунку 3.2.

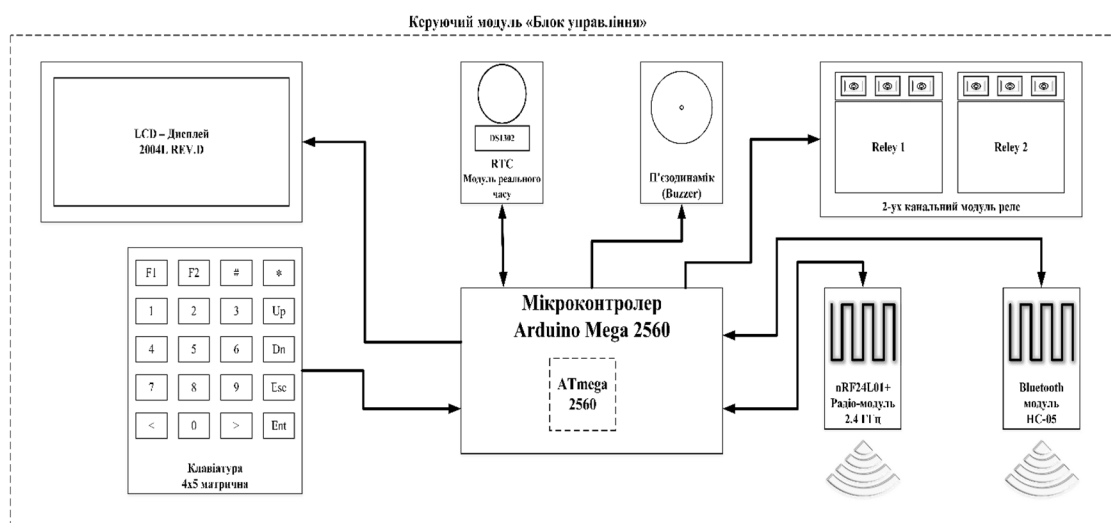


Рисунок 3.1 – Структурна схема блоку управління «розумного будинку»

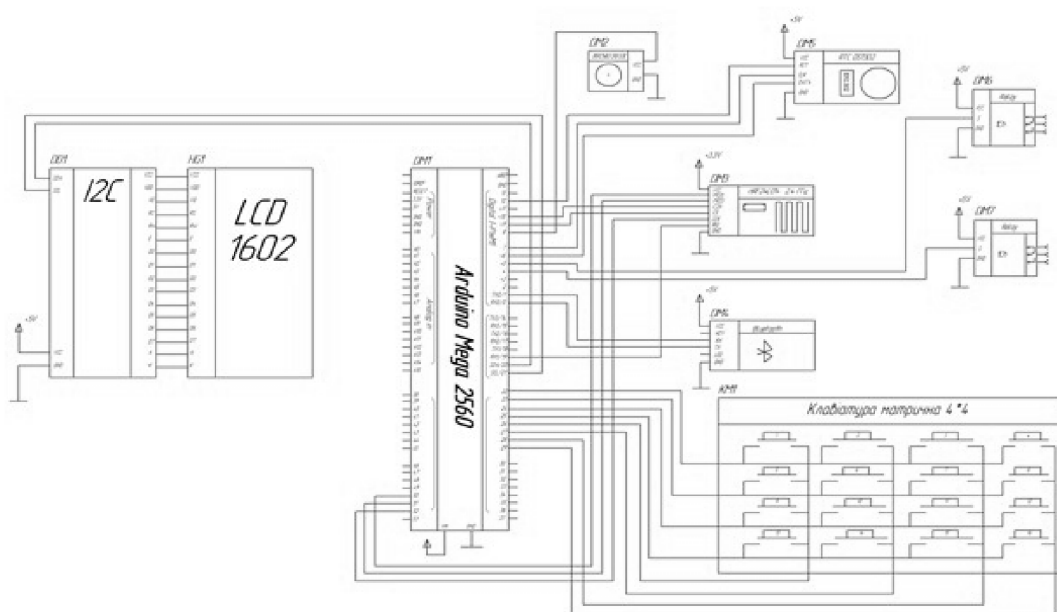


Рисунок 3.2 – Принципова електрична схема блоку управління «розумного будинку»

Функціонування керуючого модуля визначається алгоритмом, орієнтованим на реалізацію тестової програми адаптивного вибору каналу та підтримку стійкого радіозв'язку з інформаційними модулями системи «розумного будинку». На початковому етапі виконуються ініціалізація бібліотек, оголошення змінних, налаштування портів введення/виведення та запуск зовнішніх модулів, після чого модуль виконує сканування частотного діапазону, формує список частот очікування, встановлює базову робочу частоту та переходить до прослуховування лінії. За наявності спроби підключення реалізується процедура встановлення з'єднання з новим системним модулем із отриманням конфігураційних параметрів (ідентифікатора та адреси) та передаванням списку частот очікування і коду опорної частоти; за відсутності підключення модуль працює в режимі моніторингу подій. У робочому циклі відображаються стан мережі та меню операцій на РК-екрані, здійснюється опитування клавіатури й обробка команд користувача, а також періодичний контроль наявності з'єднання; у разі невдачі виконується повторна перевірка до трьох разів із відображенням повідомлення. За умови успішного зв'язку надсилається запит до інформаційного модуля, приймаються дані та виводяться на дисплей, а при надходженні попереджувальних повідомлень активується відповідна індикація й цикл повертається до режиму відображення стану мережі.

Програмне забезпечення головного модуля структуровано у вигляді набору функцій, що відповідають ініціалізації апаратних інтерфейсів, конфігурації nRF24L01+, формуванню та передаванню повідомлень, а також відображенню службової й аварійної інформації на дисплеї. Основні фрагменти коду, які реалізують підключення бібліотек, оголошення змінних, ініціалізацію модуля реального часу, виведення дати й часу, налаштування радіомодуля, ініціалізацію РК-дисплея, передавання даних та формування повідомлень про тривогу, наведено на рисунках 3.3–3.10. Повний програмний код головного та інформаційних модулів, включно зі змінними, константами, функціями, методами та розрахунковими формулами для реалізації адаптивного методу вибору каналу в системі «розумного будинку» наведено в додатках.

На рисунку 3.3 наведено фрагмент програмного коду, у якому підключаються бібліотеки для роботи з основними інтерфейсами та периферією пристрою. Зокрема, Wire.h використовується для обміну по шині I²C (керування LCD-дисплеєм і взаємодія з модулем реального часу), а SPI.h – для зв’язку по SPI з радіомодулем nRF24L01. Бібліотеки nRF24L01.h і RF24.h забезпечують ініціалізацію та високорівневе керування бездротовим радіоканалом. Для відображення інформації застосовано LiquidCrystal_I2C.h, для введення з клавіатури – Keypad.h, а RTC.h потрібна для доступу до функцій годинника реального часу та синхронізації часових міток.

```
#include <Wire.h>           // бібліотека для I2C-зв'язку (шина для LCD, RTC тощо)
#include <SPI.h>             // бібліотека для SPI-зв'язку (для радіомодуля nRF24L01)
#include <nRF24L01.h>        // константи й налаштування апаратури nRF24L01
#include <RF24.h>            // високорівнева робота з радіомодулем RF24
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // керування LCD-дисплеєм по I2C
#include <Keypad.h>          // робота з матричною клавіатурою
#include <RTC.h>             // бібліотека для модуля реального часу (годинника)
```

Рисунок 3.3 – Фрагмент коду підключення бібліотек у програмі головного модуля

На рисунку 3.4 наведено фрагмент ініціалізації апаратних ліній мікроконтролера, у якому задається режим роботи відповідних виводів. Команди pinMode(..., OUTPUT) переводять пini керування двома світлодіодами, бузером (зумером) та двома реле в режим виходу, що дозволяє програмно вмикати/вимикати ці виконавчі елементи. Таким чином формується базова конфігурація дискретних виходів для індикації станів, звукового оповіщення та комутації навантажень через релейні канали.

```
pinMode(led1Pin, OUTPUT); // налаштовуємо пін для першого світлодіода як вихід
pinMode(led2Pin, OUTPUT); // налаштовуємо пін для другого світлодіода як вихід
pinMode(BuzzPin, OUTPUT); // налаштовуємо пін бузера (зумера) як вихід
pinMode(RELAY1, OUTPUT);  // пін керування першим реле як вихід
pinMode(RELAY2, OUTPUT);  // пін керування другим реле як вихід
```

Рисунок 3.4 – Фрагмент коду налаштування виводів мікроконтролера

На рисунку 3.5 наведено команду ініціалізації модуля годинника реального часу DS1302. Виклик `time.begin(RTC_DS1302, 8, 10, 9)` задає тип RTC-пристрою та визначає пін підключення до мікроконтролера: CE=8, IO=10, SCLK=9. Після виконання цієї операції програма отримує можливість зчитувати та встановлювати поточні дату і час для формування часових міток і синхронізації роботи системи.

```
time.begin(RTC_DS1302, 8, 10, 9); // ініціалізуємо модуль годинника реального часу DS1302,
                                задаючи пін підключення (CE=8, IO=10, SCLK=9)
```

Рисунок 3.5 – Фрагмент коду ініціалізації модуля реального часу DS1302

На рисунку 3.6 наведено фрагмент коду, який виводить поточні дату й час, отримані з модуля RTC, у два канали індикації. Команда `Serial.println(time.gettime("d-m-Y, H:i:s, D"))`; формує рядок у заданому форматі та передає його в монітор порту для діагностики, а `lcd.print(...)` відображає той самий часовий штамп на LCD-дисплеї. Далі виконується затримка `delay(2000)` для забезпечення читабельності інформації, після чого екран очищається командою `lcd.clear()` для наступного оновлення. Завершальний `Serial.println()`; додає порожній рядок у консоль, відокремлюючи послідовні виводи та покращуючи сприйняття журналу повідомлень.

```
Serial.println(time.gettime("d-m-Y, H:i:s, D")); // виводимо поточну дату й час у монітор порту
lcd.print(time.gettime("d-m-Y, H:i:s, D"));      // показуємо дату й час на LCD-дисплеї
delay(2000);                                    // затримка 2 секунди, щоб користувач встиг прочитати
lcd.clear();                                    // очищаємо екран LCD
Serial.println();                               // виводимо порожній рядок у монітор порту
```

Рисунок 3.6 – Фрагмент коду формування та виведення дати й часу на РК-дисплей

На рисунку 3.7 наведено фрагмент коду налаштування радіомодуля nRF24L01 з використанням бібліотеки RF24. Спочатку визначаються пін керування CE_PIN і CSN_PIN, а також задаються 64-бітні адреси для кількох приймальних «труб» (логічних каналів), які використовуються для обміну з

різними вузлами мережі. Далі створюється об'єкт RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN) і в setup() виконується ініціалізація модуля (radio.begin()), після чого задаються основні параметри каналу зв'язку: номер радіоканалу (radio.setChannel(9)), швидкість передавання даних (radio.setDataRate(RF24_1MBPS)) та рівень потужності передавача (radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH)). Після цього відкриваються приймальні канали openReadingPipe() з відповідними адресами, а команда radio.startListening() переводить модуль у режим прийому для прослуховування ефіру й очікування повідомлень.

```
#define CE_PIN 48 // пін CE для керування модулем nRF24L01
#define CSN_PIN 53 // пін CSN (SPI-вибір) для модуля nRF24L01

// адреси передавання для різних "труб" (каналів зв'язку)
// суфікс LL означає 64-бітне ціле типу long long
const uint64_t pipe01 = 0xF0F1F2F3F4LL; // адреса труби 1
const uint64_t pipe02 = 0xF0F1F2F3F1LL; // адреса труби 2
const uint64_t pipe03 = 0xE8E8F0F0E1LL; // адреса труби 3

RF24 radio(CE_PIN, CSN_PIN); // створюємо об'єкт радіомодуля з указаними пінами

void setup() {
    radio.begin(); // ініціалізуємо радіомодуль
    delay(10); // коротка затримка для стабілізації

    radio.setChannel(9); // вибираємо радіоканал 9 (діапазон 0-127)

    // задаємо швидкість передавання даних:
    // RF24_250KBPS, RF24_1MBPS або RF24_2MBPS
    radio.setDataRate(RF24_1MBPS); // використовуємо швидкість 1 Мбіт/с

    // встановлюємо потужність передавача:
    // RF24_PA_MIN, RF24_PA_LOW, RF24_PA_MED, RF24_PA_HIGH
    radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH); // максимальна потужність для кращого зв'язку

    // відкриваємо приймальні "труби" для різних вузлів мережі
    radio.openReadingPipe(1, pipe01); // труба 1 з адресою pipe01
    radio.openReadingPipe(2, pipe02); // труба 2 з адресою pipe02
    radio.openReadingPipe(3, pipe03); // труба 3 з адресою pipe03
    // radio.openReadingPipe(0, pipe01); // приклад відкриття ще однієї труби

    radio.startListening(); // переводимо модуль у режим прийому (прослуховування ефіру)
    // radio.stopListening(); // команда для вимкнення прийому перед передаванням
}
```

Рисунок 3.7 – Фрагмент коду налаштування параметрів радіомодуля nRF24L01+

На рисунку 3.8 наведено фрагмент коду ініціалізації та первинного налаштування LCD-дисплея з інтерфейсом I²C. Команда LiquidCrystal_I2C

lcd(0x27,16,2) створює об'єкт дисплея з адресою 0x27 і параметрами екрана 16×2, після чого lcd.init() виконує ініціалізацію модуля (додатковий повторний виклик використовується для підвищення надійності запуску). Далі вмикається підсвітка (lcd.backlight()), на екран виводиться привітальне повідомлення «Smart Home», а затримка delay(1500) забезпечує його відображення протягом 1,5 с. Після цього дисплей очищається командою lcd.clear() для подальшого виведення поточної інформації системи.

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); // створюємо об'єкт LCD: адреса 0x27, дисплей 16 символів у 2 рядках
lcd.init(); // ініціалізуємо модуль дисплея
lcd.init(); // повторна ініціалізація (для надійного запуску деяких модулів)
// виводимо привітальне повідомлення на LCD
lcd.backlight(); // вмикаємо підсвітку дисплея
lcd.print("# Smart Home #"); // виводимо текст привітання "Smart Home"
delay(1500); // показуємо повідомлення протягом 1,5 секунди
lcd.clear(); // очищаємо дисплей після привітання
```

Рисунок 3.8 – Фрагмент коду ініціалізації та початкового налаштування РК-дисплея

На рисунку 3.9 наведено фрагмент коду організації сеансу передавання даних через радіомодуль nRF24L01. Спочатку команда radio.stopListening() вимикає режим прийому, щоб звільнити модуль для передачі, після чого radio.openWritingPipe(1, pipe) задає адресу (канал, «трубу») передавання. Далі виклик radio.write(&stan1, sizeof(stan1)) надсилає змінну stan1, вказуючи фактичний розмір пакета в байтах. Після завершення передавання команда radio.startListening() знову переводить модуль у режим прийому для подальшого прослуховування ефіру та очікування вхідних повідомлень.

```
radio.stopListening(); // зупиняємо приймач, припиняємо прослуховування
radio.openWritingPipe(1, pipe); // відкриваємо канал (трубу) для передавання даних
radio.write(&stan1, sizeof(stan1)); // надсилаємо змінну stan1 та вказуємо її розмір у байтах
radio.startListening(); // знову вмикаємо приймач для подальшого прослуховування
```

Рисунок 3.9 – Фрагмент коду для передавання даних між модулями системи «розумний будинок»

На рисунку 3.10 наведено фрагмент коду обробки події виявлення руху, коли значення `data[1]` дорівнює 1. У цьому випадку програма формує попереджувальне повідомлення та виводить його в монітор порту за допомогою `Serial.println()`, фіксує стан сенсора як активний. Паралельно інформація відображається на LCD-дисплеї: командами `lcd.setCursor()` задаються позиції курсора для першого й другого рядків, після чого `lcd.print()` виводить текст «Warning = moving» та стан сенсора «Sensor = Moving». Таким чином забезпечується одночасна текстова індикація тривожного стану як у консольному журналі, так і на локальному екрані пристрою.

```

if (data[1] == 1) {                                     // якщо другий елемент масиву data дорівнює 1 (виявлено рух)
  Serial.println("Warning = moving");                  // вивести попередження про рух у монітор порту
  Serial.println("Sensor = ");                        // вивести підпис для інформації про сенсор
  lcd.setCursor(0, 0);                                // встановити курсор у перший рядок дисплея
  lcd.print("Warning = moving");                      // показати текст попередження на першому рядку
  lcd.setCursor(0, 1);                                // встановити курсор у другий рядок дисплея
  lcd.print("Sensor = Moving ");                      // показати стан сенсора (рух) на другому рядку
}

```

Рисунок 3.10 – Фрагмент коду формування та виведення аварійного повідомлення на РК-дисплей

3.2 Архітектура та склад модулів системи «розумний будинок» з адаптивною селекцією каналів зв'язку

Система модулів «розумний будинок» призначена для інформування користувача про параметри навколишнього середовища, зокрема температуру, вологість і рівень освітленості, а також для фіксації надзвичайних ситуацій, таких як перебування людей у приміщенні, витік газу або затоплення в зоні контролю відповідного модуля. Архітектура системи передбачає взаємодію кількох бездротових функціональних модулів і використання методу адаптивної селекції каналів зв'язку, що підвищує надійність обміну даними в умовах змінної заводської обстановки.

Розроблена система складається з чотирьох взаємопов'язаних бездротових функціональних модулів (рисунок 3.11). Центральним елементом є головний модуль («домашній центр»), який організовує радіозв'язок, керує підключенням периферійних вузлів та забезпечує обмін даними. Інші три модулі виконують роль інформаційних: «датчик руху», «датчик газу/диму» та «датчик затоплення». Концепція розумного будинку базується на бездротовому обміні між усіма системними модулями, який використовується як для передавання команд керування, так і для отримання вимірюваних параметрів і службових повідомлень. Кожен модуль розглядається як окремий об'єкт системи з власним ідентифікаційним номером, що спрощує адресацію та масштабування мережі.

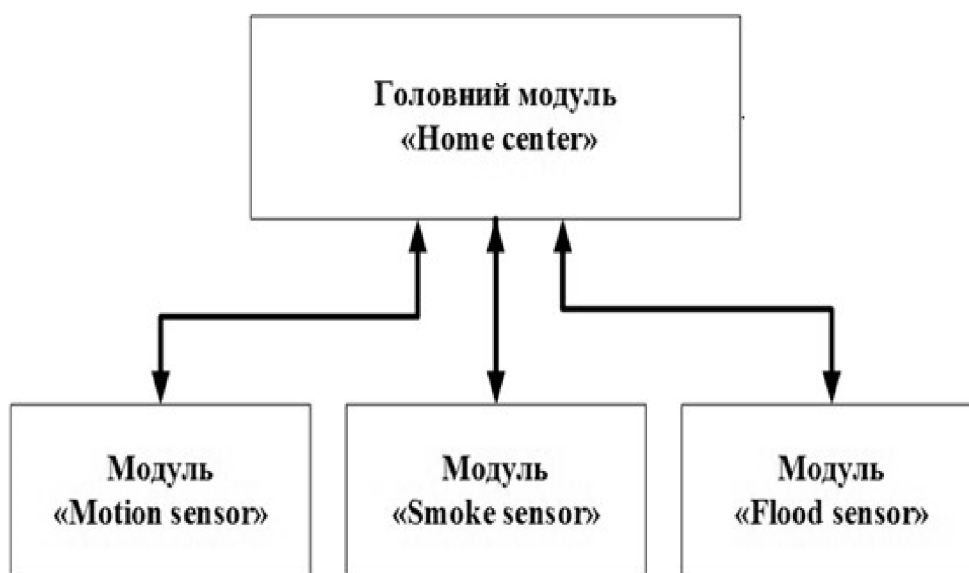


Рисунок 3.11 – Схема організації бездротового радіозв'язку між модулями системи РБ

У реалізованій системі головний модуль виконує функції встановлення з'єднань із периферійними модулями для приймання інформації або надсилання команд керування, забезпечує візуальне відображення стану системи та режимів її роботи на інформаційному дисплеї, а також керує побутовими приладами через релейні модулі й підтримує локальне керування з клавіатури пристрою. Взаємодію основних модулів системи «розумний будинок» подано на рисунку 3.12.

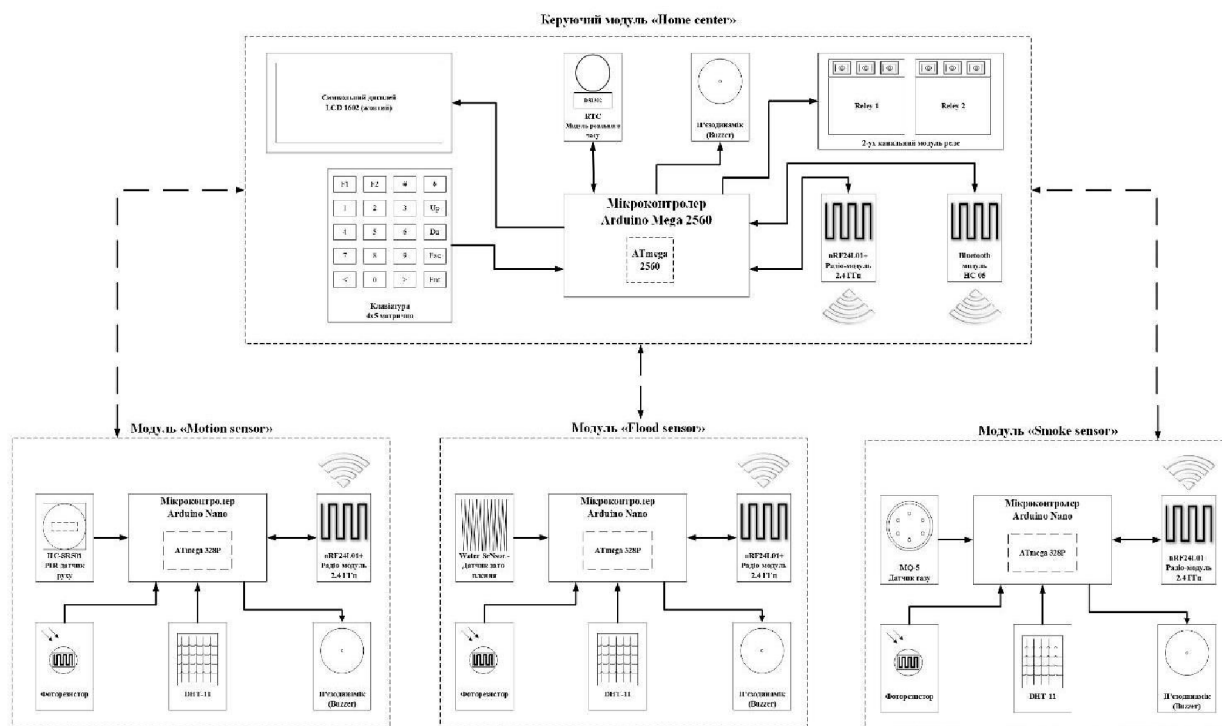


Рисунок 3.12 – Структурна схема взаємодії основних модулів системи «розумний будинок»

Периферійні інформаційні модулі спроектовано з акцентом на простоту, мінімальні габарити та знижене енергоспоживання, оскільки вони мають виконувати лише визначені головним модулем функції відповідно до активного режиму роботи (див. рисунки 3.13–3.15). Функціонально інформаційний модуль забезпечує встановлення з'єднання з головним модулем, зчитування показів датчиків, перевірку заданих порогових значень, обробку команд, отриманих бездротовим каналом, передавання даних про стан датчиків за запитом головного модуля та формування повідомлення «Тривога» у разі перевищення будь-яким параметром встановленого порога.

Структурну схему модуля «датчик руху» наведено на рисунку 3.13. Його апаратна частина побудована на мікроконтролерній платі Arduino Nano, яка керує радіомодулем nRF24L01+ для роботи в діапазоні 2,4 ГГц, п'єзоелектричним випромінювачем HCS1205X для звукового сповіщення, інфрачервоним датчиком руху для виявлення присутності людини, датчиком

освітленості (фоторезистором) для оцінювання рівня освітлення та датчиком DHT11 для вимірювання температури й відносної вологості повітря.

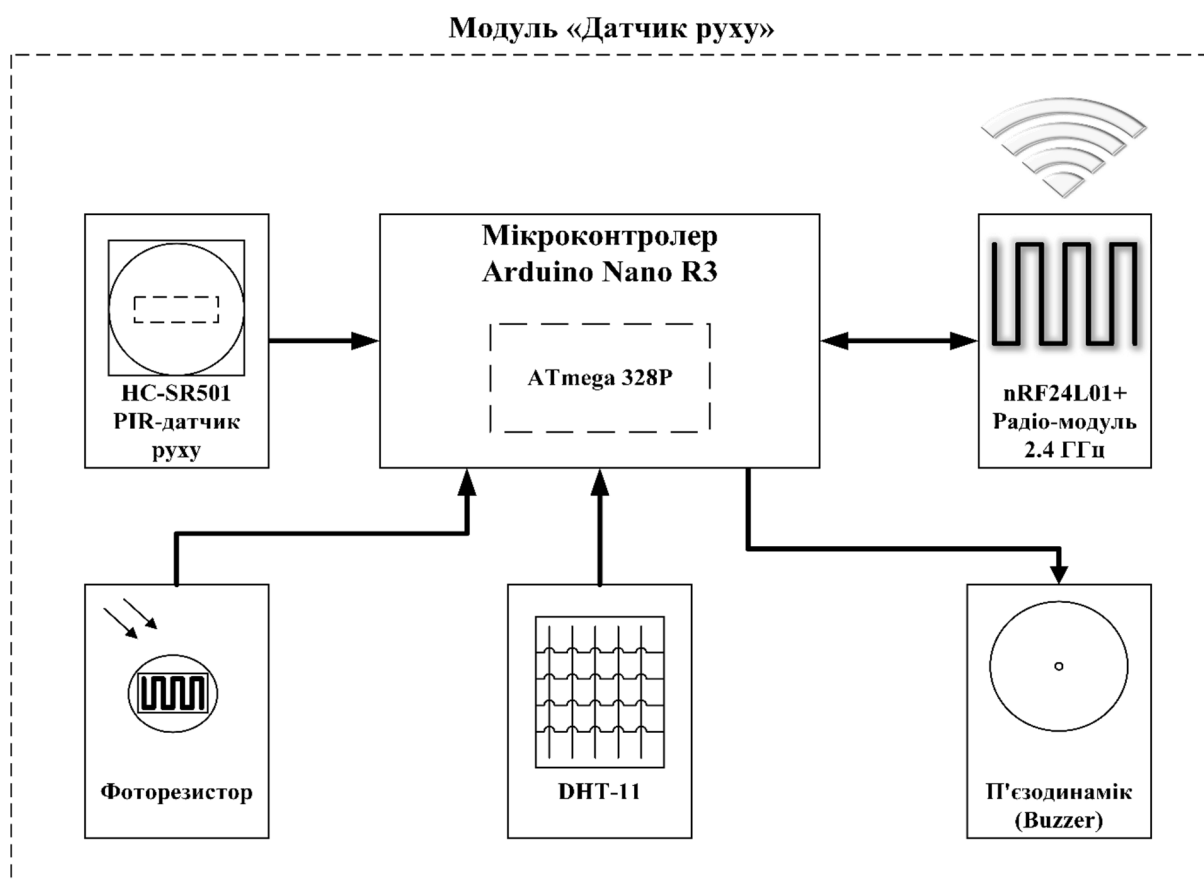


Рисунок 3.13 – Структурна схема інформаційного модуля «Датчик руху»

Структурну схему інформаційного модуля «датчик газу» наведено на рисунку 3.14. Модуль також реалізовано на Arduino Nano із застосуванням nRF24L01+ як засобу радіообміну та HCM1205X для звукової індикації. Вимірювання концентрації газів і диму забезпечує датчик MQ-5, а параметри мікроклімату та освітленості контролюються за допомогою DHT11 і фоторезистора відповідно, що дозволяє формувати як інформаційні повідомлення, так і попереджувальні сигнали при перевищенні порогів. Для обміну даними з центральним вузлом модуль періодично передає виміряні значення та статус тривоги по радіоканалу, забезпечуючи оперативне оповіщення про небезпечні концентрації газу або задимлення.

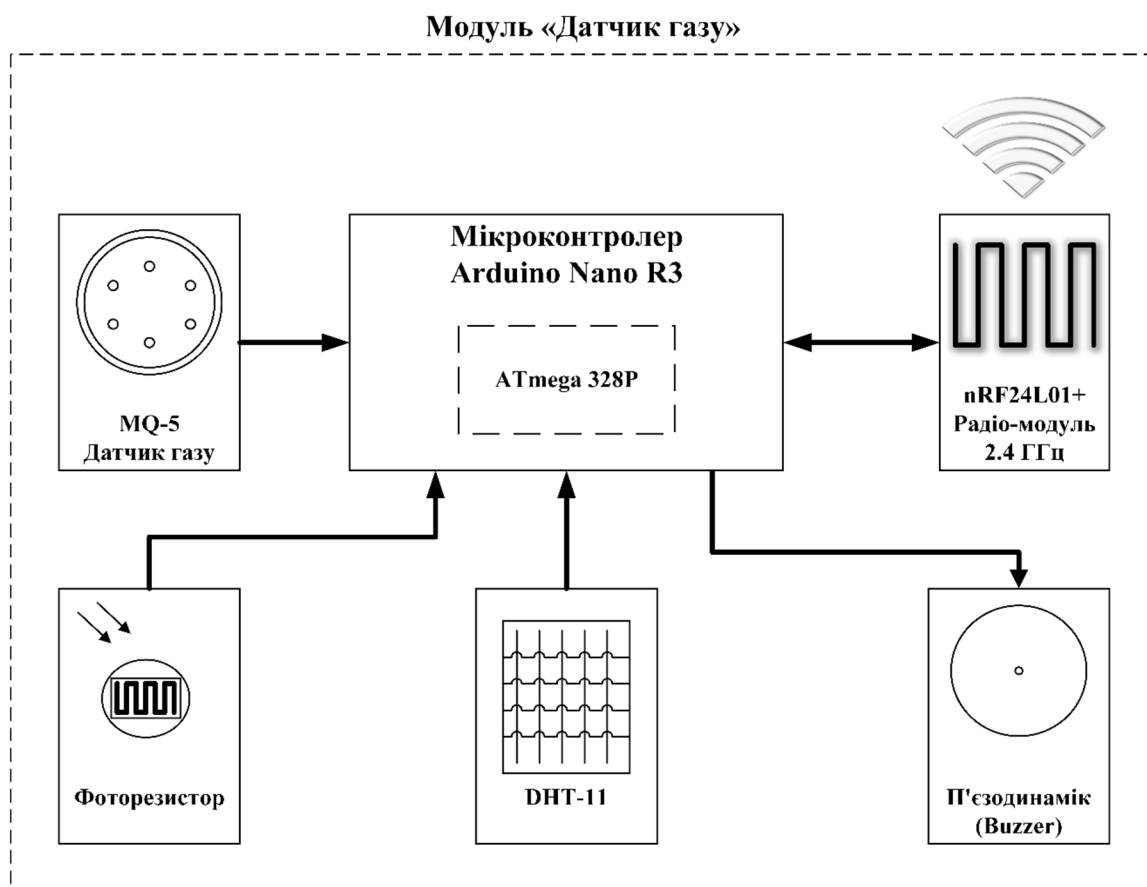


Рисунок 3.14 – Структурна схема інформаційного модуля «Датчик газу»

Структурну схему модуля «датчик затоплення» наведено на рисунку 3.15. Його основою є Arduino Nano, яка керує модулем nRF24L01+ для бездротового передавання даних, п'єзоелектричним випромінювачем для локальної сигналізації, датчиком витоку води для виявлення протікань у зоні контролю, а також датчиками освітленості й мікроклімату (фоторезистор і DHT11).

Взаємозамінність периферійних вузлів досягається тим, що їхня відмінність визначається переважно типом основного датчика, тоді як спільні компоненти та принципи підключення залишаються однаковими для всіх реалізацій.

Функціонування інформаційних модулів реалізується за спільною логікою, яка забезпечує підготовку програмного середовища, встановлення радіоз'єднання з головним модулем, адаптивний вибір робочої частоти, опитування сенсорів і передавання даних залежно від стану мережі та запитів «домашнього центру». Після ініціалізації бібліотек і змінних модуль сканує

діапазон частот, активує зовнішні вузли та здійснює спробу встановлення бездротового зв'язку з головним модулем; у разі неуспіху виконується прослуховування ефіру з повторенням спроби через заданий інтервал. Після встановлення з'єднання передаються конфігураційні дані модуля (ідентифікатор і адреса), приймається перелік доступних частот і опорна частота, після чого застосовується стрибкоподібна зміна робочої частоти передавання даних відповідно до отриманих параметрів. Далі модуль циклічно зчитує покази датчиків, перевіряє досягнення або перевищення порогових значень і, у разі спрацювання, надсилає попереджувальне повідомлення до головного модуля. У робочому режимі виконується прослуховування лінії радіозв'язку та, за наявності команди-запиту, передавання поточних даних; після витримки заданого інтервалу цикл опитування сенсорів повторюється.

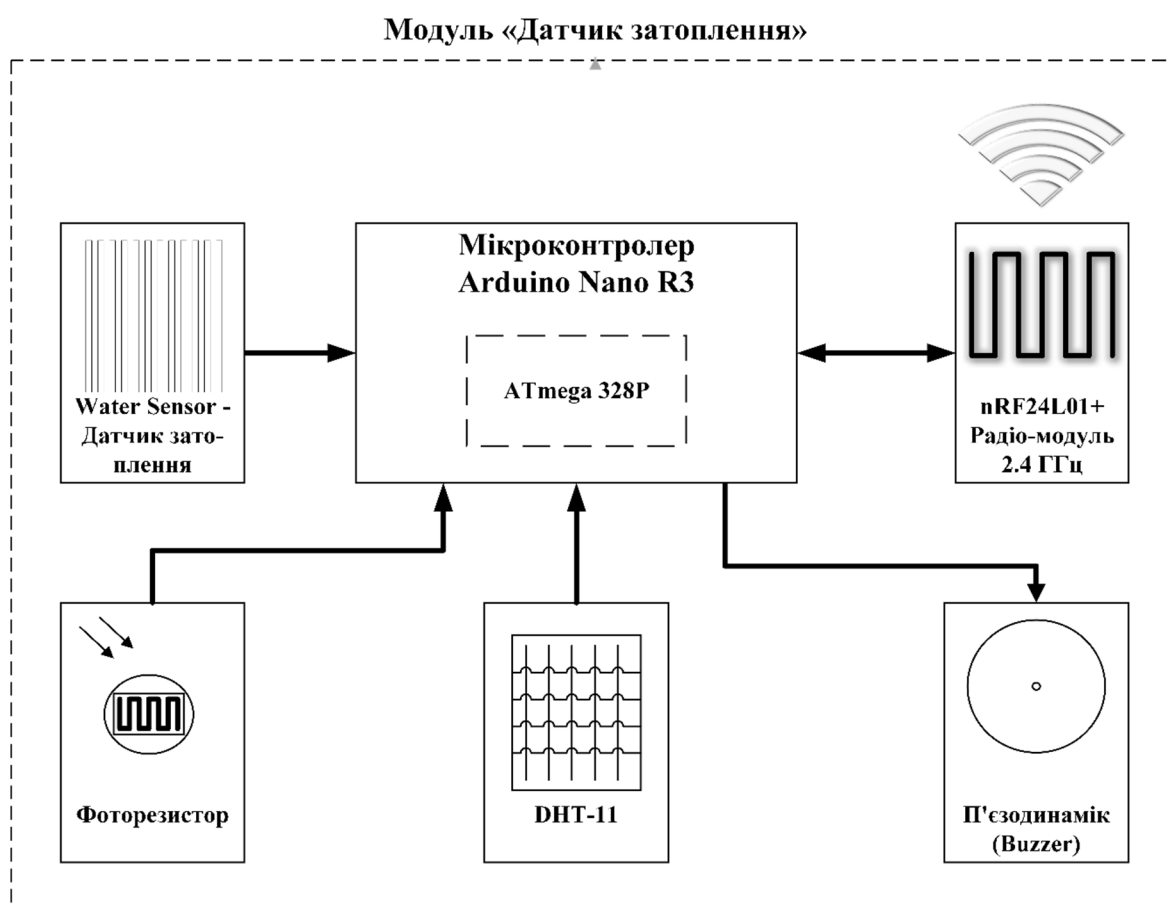


Рисунок 3.15 – Структурна схема інформаційного модуля «Датчик затоплення»

3.3 Експериментальні дослідження методу адаптивної селекції каналів зв'язку

Під час розроблення адаптивного методу вибору каналів зв'язку для системи «розумний будинок» було сформовано план дослідження та тестування. Для перевірки функціональності частотного сканера створено тестове програмне забезпечення, яке дало змогу візуалізувати результати випробувань, а також експортувати та аналізувати отримані дані.

Тестування алгоритму «Сканер частоти» проводилося на трьох незалежних пристроях, оснащених різними антенами діапазону 2,4 ГГц, у різних локаціях м. Львова зі значною концентрацією людей та технічних засобів. Протягом чотирьох послідовних днів у кожній локації щоденно виконувалося по чотири 15-хвилинних сеансів сканування з інтервалом у 3 години – о 9:00, 12:00, 15:00 та 18:00 за київським часом. На основі результатів цих випробувань було сформовано таблиці частот очікування відповідно до місць сканування (додаток В).

Місця проведення тестування:

1. «Механічний корпус Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького» – вул. Вол. Великого, 1, м. Дубляни, Львівська область, Україна.
2. «Торгово-розважальний центр “Forum Lviv”» – вул. Під Дубом, 7Б, м. Львів, Львівська область, Україна.

Період проведення тестування: жовтень 2025 року.

Вхідними даними для процесу сканування були виявлені точки доступу Wi-Fi та їхні зайняті канали. Ці дані отримували за допомогою мобільного застосунку Wi-Fi Analyzer, який виявляє й відображає всі доступні точки доступу Wi-Fi, канали їхнього зв'язку, а також мережеві параметри, зокрема рівень сигналу та несучу частоту.

Результати роботи застосунку в торговому центрі “Forum Lviv” (вул. Під Дубом, 7Б, м. Львів, Львівська область, Україна) показали, що точки доступу Wi-Fi у цьому торговому центрі розміщені досить щільно: поблизу місця сканування було виявлено близько 30 точок доступу, а їх розподіл у діапазоні 2,4 ГГц є близьким до оптимального (рисунок 3.16).

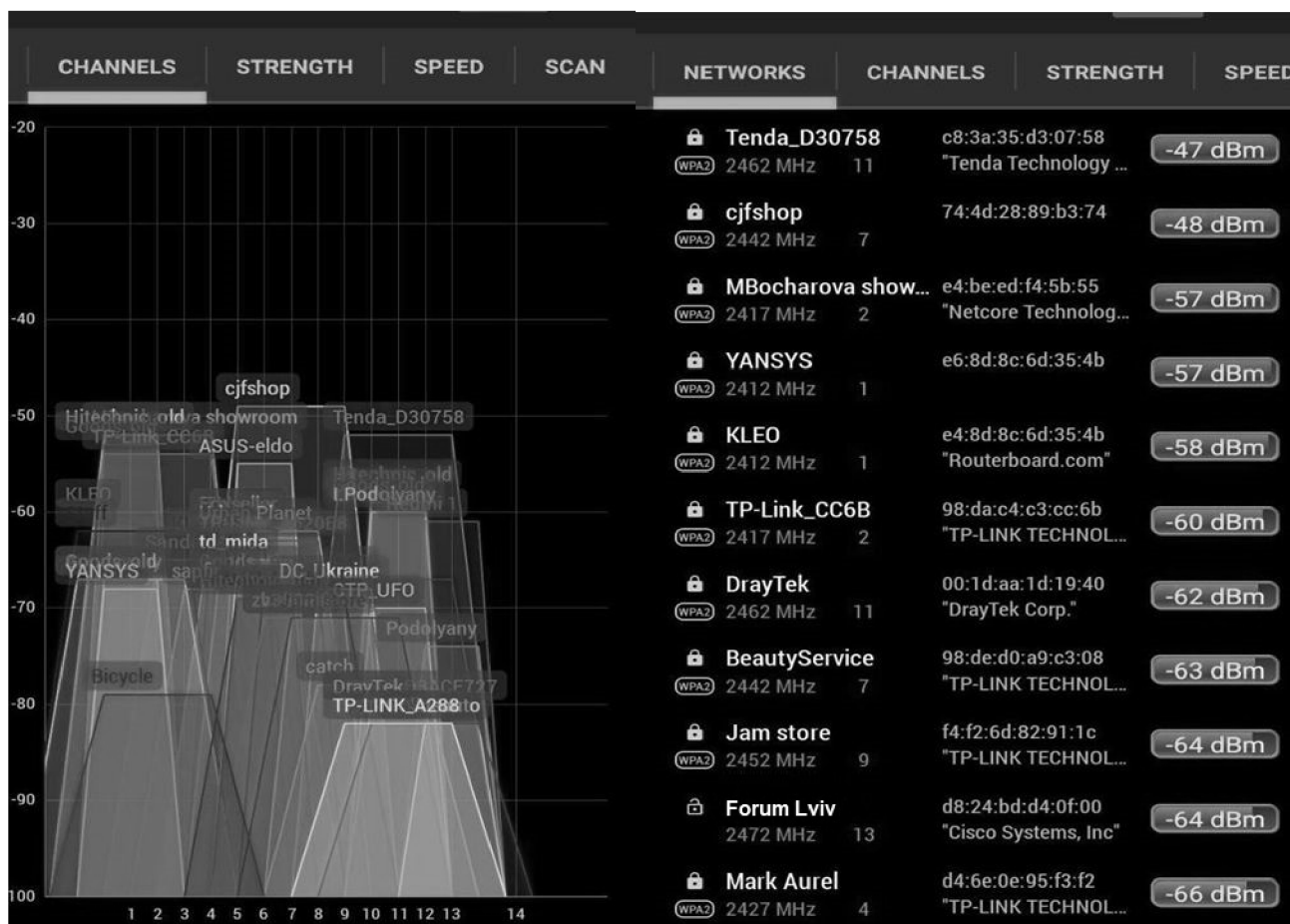


Рисунок 3.16 – Результати аналізу зайнятих каналів Wi-Fi у ТРЦ «Forum Lviv» у застосунку Wi-Fi Analyzer

У кваліфікаційній роботі як приклад використано торговельний центр «Forum Lviv» (вул. Під Дубом, 7Б, м. Львів, Львівська область, Україна) для демонстрації розподілу точок доступу мереж Wi-Fi в локації з найвищою щільністю радіосигналів. Тому саме це місце є найбільш придатним для подальшого «стресового» тестування методу адаптивного вибору каналу зв'язку в системі «розумного будинку».

12:00, 15:00 та 18:00. Отримані дані було збережено у вигляді матриці, а середнє значення для кожної частоти за весь період сканування обчислено за допомогою відповідних математичних виразів.

На основі результатів випробувань було побудовано графік сканування частот у діапазоні 2,4 ГГц (рисунок 3.18 та 3.19). На цьому графіку відображено результати сканування в Механічному корпусі ЛНУВМБ ім. С. З. Гжицького». По осі X подано діапазон частот 2,4 ГГц, по осі Y – рівень сигналу.

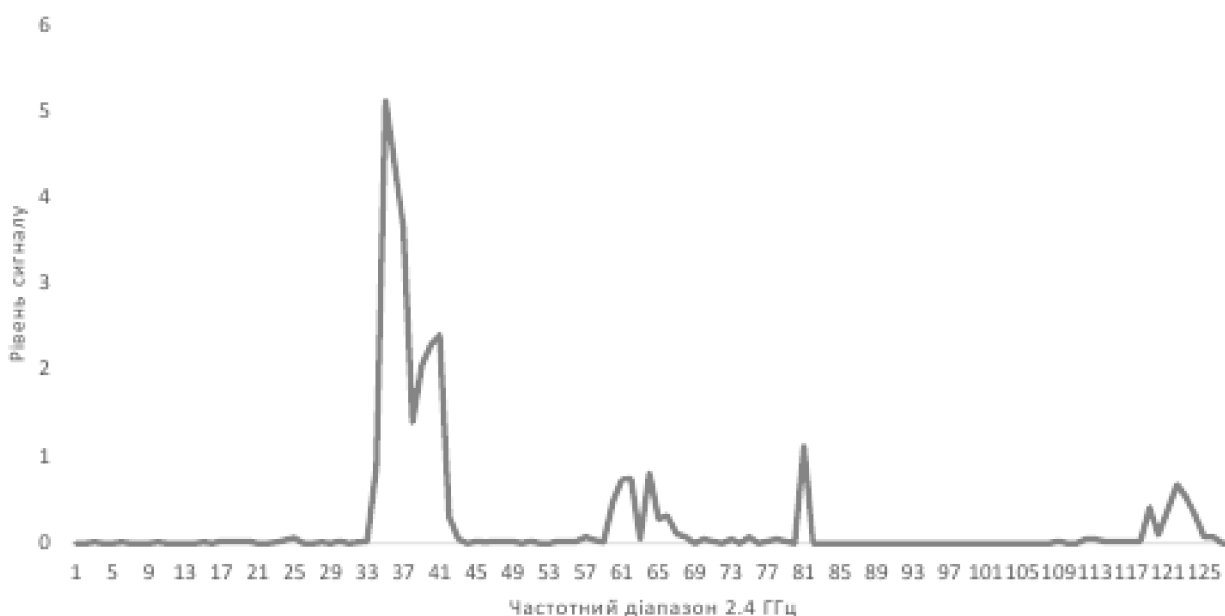


Рисунок 3.18 – Розподіл рівня шуму за частотними каналами в механічному корпусі ЛНУВМБ ім. С. З. Гжицького»

Щоб наочно продемонструвати ефективність роботи адаптивного методу вибору каналу, виконаємо порівняння широкосмугових і вузькосмугових методів поширення сигналу. Подальший аналіз результатів дослідження проведено для даних, отриманих в торговому центрі «Forum Lviv». Результати сканування для широкосмугового діапазону мереж Wi-Fi показано на рисунку 3.19, а результати сканування для вузькосмугового діапазону частот 2,4 ГГц показано на рисунку 3.20.

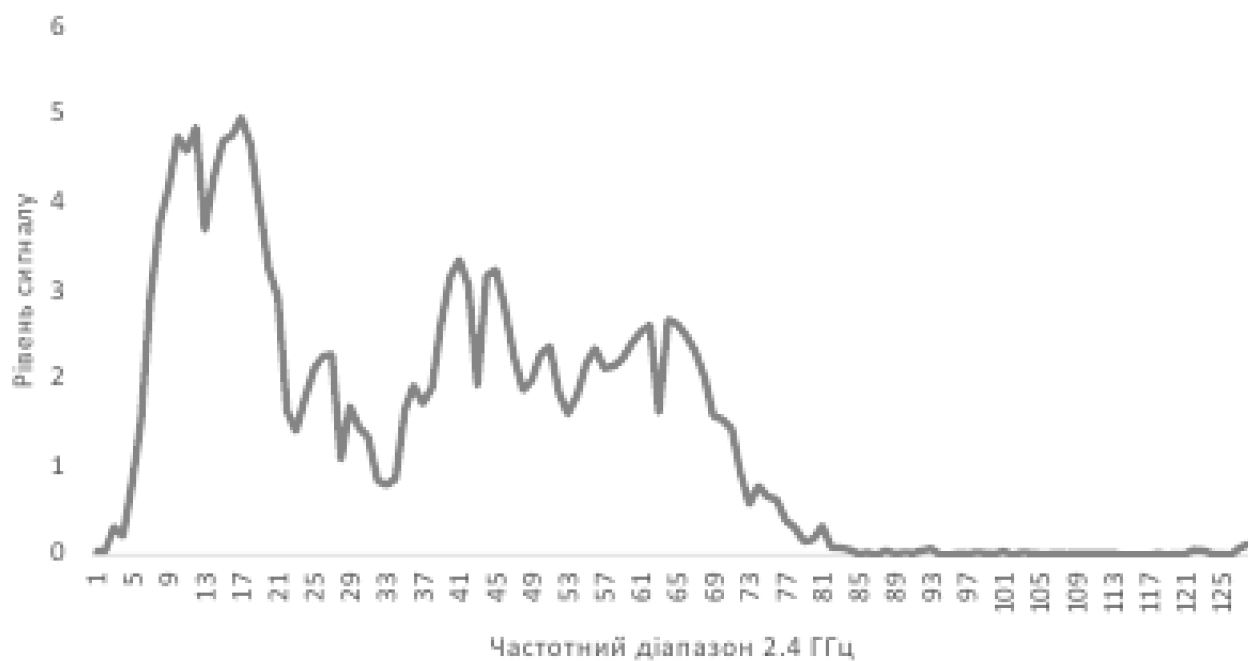


Рисунок 3.19 – Результати поканального сканування вузькосмугового діапазону у ТРЦ «Forum Lviv»

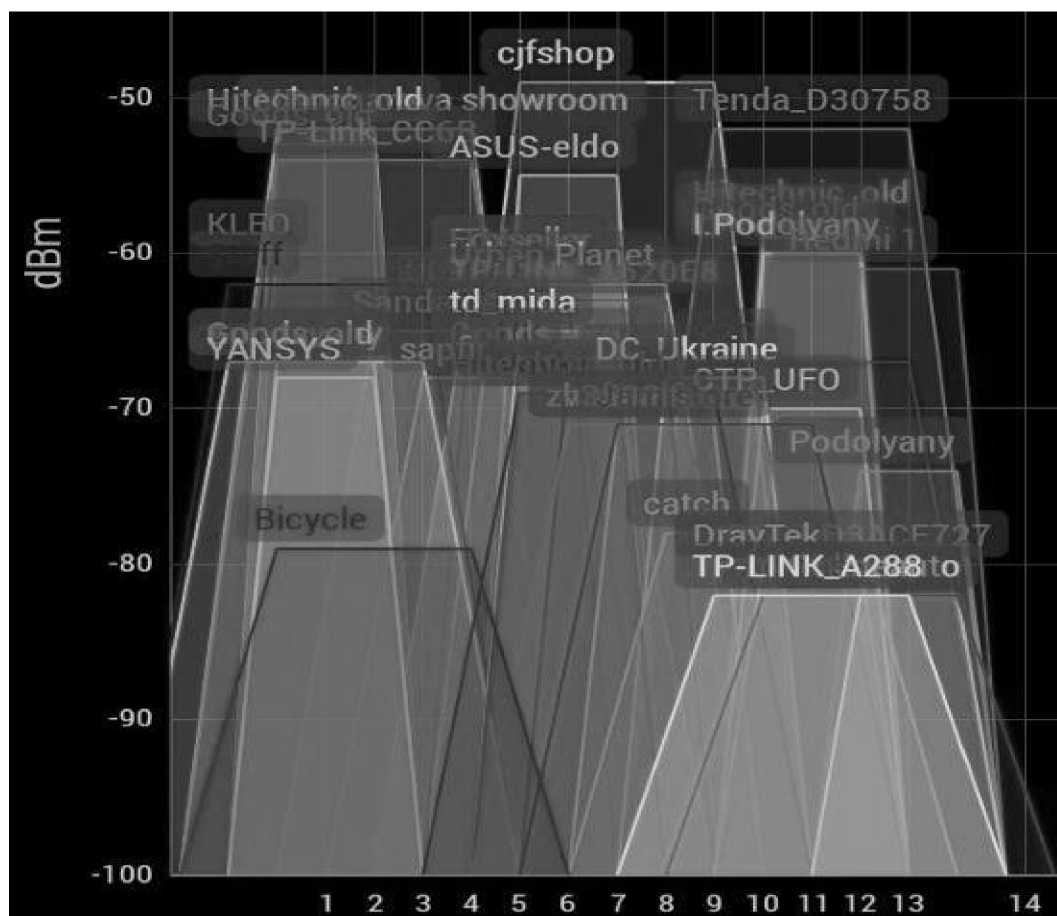


Рисунок 3.20 – Результати сканування широкосмугових Wi-Fi-сигналів у ТРЦ «Forum Lviv»

На основі наведених вище даних можна зробити висновок, що за умови коректно спроектованої архітектури та організації мережі використання різних методів передавання даних (наприклад, широкосмугових і вузькосмугових сигналів) не призводить до взаємних завад.

Цей висновок ґрунтується на аналізі результатів радіочастотного сканування торговельного центру «Forum Lviv» – одного з найбільш людних і технологічно насичених районів Львова. Як видно з рис. 3.19 та 3.20, хоча перша демонструє високу щільність сигналів і мереж Wi-Fi, друга не фіксує подібного явища: частоти каналів із 80 по 128 залишаються практично вільними.

Функцію стрибкоподібної зміни робочої частоти передавання даних було протестовано методом оцінювання втрат пакетів. Тестове програмне забезпечення безперервно передавало дані від інформаційного модуля системи до головного модуля системи «розумного будинку». Основним завданням тесту було визначення кількості помилок під час передавання даних. Це значення обчислювалося та відображалося у відсотках на РК-екрані головного модуля як відношення кількості втрачених пакетів до загальної кількості спроб передавання.

Процедура тестування передбачала встановлення з'єднання з інформаційним модулем, після чого головний модуль системи безперервно отримував нові пакети даних. Тест тривав 15 хвилин і проводився чотири рази на день – о 9:00, 12:00, 15:00 та 18:00 (тобто кожні 3 години) протягом чотирьох послідовних днів у різних локаціях м. Львова, а саме: «Механічний корпус Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького» та «Торгівельний центр “Forum Lviv”».

За результатами тестування було розраховано відсоток втрати пакетів відносно загальної кількості переданих даних. На обох тестових локаціях загальний коефіцієнт втрати пакетів не перевищував 5 %, а середнє арифметичне значення становило 4,36 %. Це підтверджує ефективність реалізованої функції та методу адаптивного вибору каналу зв'язку в системі «розумного будинку».

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗИВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

При дослідженні методів та засобів адаптивної селекції каналів зв'язку для розумного будинку було здійснено розробку модулів системи РБ із дотриманням усіх норм та правил з охорони праці та техніки безпеки. Враховуючи той факт, що виконання досліджень вимагає використання засобів обчислювальної техніки, то необхідним є створенням безпечних умов праці при використанні персональної електронно-обчислювальної машини (ПЕОМ). Також потрібно приділити особливу увагу питанням електро- та пожежної безпеки.

З урахуванням вимог ДСанПіН 3.3.2.007-98 та НПАОП 0.00-7.15-18 необхідно визначити небезпечні і шкідливі фактори, які впливають на користувачів ВДТ (візуально дисплейний термінал) ПЕОМ при експлуатації, дослідити ці фактори, розглянути їхній вплив, принципи їх нормування і способи запобігання їхнього шкідливого впливу на людину.

Основними шкідливими та небезпечними виробничими факторами, які пов'язані з використанням ПЕОМ, є такі:

- електромагнітне випромінювання радіочастотного діапазону;
- наявність іонізуючого рентгенівське випромінювання;
- випромінювання оптичного діапазону (ультрафіолетове, інфрачервоне і випромінювання видимого діапазону);
- електростатичне поле;
- недостатня освітленість робочої зони;
- підвищений рівень шуму;

- значна напруга зорових органів і пов'язане з цим перевтомлення користувача ПЕОМ;
- значне навантаження на пальці і кисті рук, що при відсутності профілактики і медичного контролю, може викликати професійні захворювання;
- тривале перебування в одному й тому ж самому положенні сидячи, що викликає застійні явища в організмі людини;
- відблиски на екрані монітора;
- можливість ураження електричним струмом; □ можливість виникнення пожежі.

Робоче приміщення з ПЕОМ по рівню безпеки ураження людей електричним струмом згідно ПУЕ можна віднести, до помешкань без підвищеної небезпеки, тому що:

- відносна вологість повітря не перевищує 75%;
- матеріал підлоги (паркет) є діелектриком;
- температура повітря не досягає значень, більших +30 °С;
- відсутня можливість одночасного дотику людини до з'єднаних з землею металоконструкцій будівлі, технологічних апаратів, механізмів і т.п., з одного боку, і до металевих корпусів електроустаткування - з іншого боку;
- відсутні хімічно агресивні середовища.

Електромережа трьохфазна з глухозаземленою нейтраллю, із зануленням і повторним заземленням нульового дроту відповідно до вимог ПУЕ (правил улаштування електроустановок). Мережа обладнана автоматом струмового захисту, розрахованого на струм 12 А. Час спрацювання автомату 0,1 с.

Для того, щоб не допустити ураження працівника електричним струмом при виникненні аварійних ситуацій, необхідно заземлити все обладнання, що працює від мережі 220 В, 50 Гц. Опір нульового дроту повинен бути таким, щоб при замиканні на корпус або нульовий дріт; виникав струм короткого замикання, сила якого повинна перевищувати в 1,4 рази номінальний струм спрацювання автомата струмового захисту (при струмі короткого замикання менше 100 А).

Тобто струм короткого замикання при виникненні аварійної ситуації в рази перевищує номінальний струм спрацювання автомату, що задовольняє встановленим нормам $K > 1,4$. Виконано всі необхідні заходи щодо електробезпеки відповідно до ДНАОП 0.00-1.21-98, додаткових заходів по електробезпеці впроваджувати не потрібно.

Облаштування робочих місць, обладнаних відеотерміналами, повинно забезпечувати:

- належні умови освітлення приміщення і робочого місця, відсутність відблисків;
- оптимальні параметри мікроклімату (температура, відносна вологість, швидкість руху та рівень іонізації повітря);
- належні ергономічні характеристики основних елементів робочого місця.

А також необхідно вжити заходи проти таких небезпечних і шкідливих чинників, як наявність шуму та вібрації, електромагнітного, ультрафіолетового і інфрачервоного випромінювання, електростатичного поля між екраном монітору і оператором, наявність пилу, озону, оксидів азоту й аероіонізації.

Будівлі і ті їх частини, в яких розташовуються ЕОМ, повинні мати не нижче II ступеня вогнестійкості.

Службові приміщення, в яких розташовані ПЕОМ, не повинні межувати з приміщеннями, де рівні шуму та вібрації перевищують норму (механічні цехи, майстерні тощо).

Відповідно до ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» площа приміщення, у яких розташовують відеотермінали, визначається, виходячи з розрахунку на одне робоче місце - не менше 6,0 кв. м, об'єм - не менше 20,0 куб. м, з урахуванням максимальної кількості осіб, які одночасно працюють у зміні.

Заземлені конструкції, що знаходяться в приміщеннях (батареї опалення, водопровідні труби, кабелі із заземленим відкритим екраном тощо), мають бути

надійно захищені діелектричними щитками або сітками від випадкового дотику. У приміщеннях з ПЕОМ слід щоденно проводити вологе прибирання, повинні бути медичні аптечки першої допомоги, а також система автоматичної пожежної сигналізації.

Загальне освітлення має бути виконане у вигляді суцільних або переривчастих ліній світильників, що розміщуються збоку від робочих місць (переважно зліва) паралельно лінії зору працівників. Як джерело світла при штучному освітленні повинні застосовуватися, як правило, люмінесцентні лампи типу ЛБ. Допускається у світильниках місцевого освітлення застосовувати лампи розжарювання.

Рівень освітленості на робочому столі в зоні розташування документів має бути в межах 300–500 лк. У разі неможливості забезпечити даний рівень освітленості системою загального освітлення допускається застосування світильників місцевого освітлення, але при цьому не повинно бути відблисків на поверхні екрана та збільшення освітленості екрана більше ніж до 300 лк. Для запобігання візуальному перевантаженню та зниження ризику помилок доцільно забезпечити рівномірність освітлення робочої зони, правильне розташування світильників відносно лінії погляду користувача та використання джерел світла з мінімальною пульсацією й нейтральною колірною температурою, що не спотворює сприйняття інформації на екрані й друкованих носіях. Додатково слід враховувати можливість регулювання яскравості монітора та контрастності з урахуванням фонового освітлення, а також періодично контролювати освітленість люксометром під час зміни умов освітлення або конфігурації робочого місця.

При дотриманні цих вимог виконання всіх видів робіт на ПЕОМ при дослідженні методів та засобів адаптивної селекції каналів зв'язку для розумного будинку є безпечним з точки зору охорони праці, техніки безпеки та протипожежної безпеки.

4.2 Оцінка надійності захисту виробничого персоналу об'єкта у воєнний час

Під час оцінювання надійності захисту виробничого персоналу слід враховувати, що наслідки надзвичайних ситуацій можуть призводити до ураження людей, загибелі або тривалої втрати працездатності, а тому рівень захищеності є одним із ключових чинників стійкості роботи підприємства в умовах мирного та воєнного часу. Найефективнішим заходом вважається укриття персоналу в захисних спорудах за умови достатньої місткості, відповідності захисним вимогам, наявності систем життєзабезпечення, досяжності укриттів у встановлений час і підготовленості працівників до дій за сигналами оповіщення. Узагальненим показником пропонується коефіцієнт надійності захисту, який відображає частку персоналу, забезпеченого комплексним захистом, і визначається за найменшим значенням часткових коефіцієнтів, що характеризують інженерний захист, сповіщення, навченість та готовність сховищ.

Оцінювання виконується шляхом аналізу можливості своєчасного укриття найбільшої працюючої зміни, ефективності доведення сигналів оповіщення, рівня підготовки персоналу та фактичної готовності сховищ до прийому людей у нормативний термін. За результатами визначають слабкі місця підготовленості об'єкта та формують пропозиції щодо підвищення надійності, зокрема шляхом удосконалення захисних властивостей споруд, планування додаткових укриттів, забезпечення чергового персоналу, повного комплектування засобами індивідуального захисту та готовності об'єкта до дій в умовах радіаційного, хімічного й біологічного ураження.

Інженерний захист оцінюють за здатністю захисних споруд забезпечити потрібну місткість, відповідність захисним вимогам, функціонування систем життєзабезпечення та можливість своєчасного зайняття укриттів. Для розрахунків використовують вихідні дані про можливий тип НС і параметри

уражальних факторів, віддаленість об'єкта, метео- та кліматичні умови, чисельність і розподіл персоналу, а також технічні характеристики захисних споруд, включно з планувальними параметрами та елементами інженерних систем. Параметри уражальних факторів уточнюються залежно від сценарію НС (землетрус, аварія на АЕС чи хімічно небезпечному об'єкті, пожежа, катастрофічне затоплення), після чого узагальнюються оцінку за мінімальним із часткових показників і визначають заходи вдосконалення. Об'єктивний стан захисту доцільно відображати в графічному документі «План укриття», де фіксуються місця розташування споруд, їх розрахункові характеристики, розподіл працівників і маршрути руху; допускається перевищення розрахункової місткості на 5–7 %.

4.3 Організація протипожежного захисту та проведення протипожежної профілактики на промисловому підприємстві

Протипожежна профілактика є комплексом організаційних і технічних заходів, спрямованих на запобігання пожежам, їх локалізацію та ліквідацію, а також на забезпечення безпечної евакуації людей і збереження матеріальних цінностей. Пожежна безпека промислового об'єкта означає такий стан, за якого ризик виникнення пожежі мінімізовано, а у разі її появи обмежується вплив небезпечних факторів на людей і забезпечується захист майна, оскільки пожежі супроводжуються полум'ям, підвищеною температурою, димом, токсичними продуктами горіння, дефіцитом кисню, руйнуванням конструкцій і можливими вибухами обладнання. Основи пожежної безпеки закладаються ще на стадії проєктування будівель і технологічних процесів та мають підтримуватися суворим дотриманням протипожежних вимог під час експлуатації.

Пожежна безпека підприємства формується системою запобігання пожежам, системою пожежного захисту та організаційно-технічними заходами.

Запобігання пожежам передбачає недопущення утворення горючого або вибухонебезпечного середовища і усунення джерел займання шляхом регламентації вмісту горючих газів, парів і пилу, забезпечення безпеки технологічних процесів, обладнання, електроустановок, вентиляції та зберігання матеріалів. Практично це реалізується через герметизацію устаткування, заміну горючих речовин на негорючі, обмеження обсягів зберігання, контроль концентрацій у повітрі, застосування робочої й аварійної вентиляції, відведення займистих середовищ у безпечні місця, використання інгібуючих домішок і вибір безпечних режимів роботи.

Пожежний захист забезпечується архітектурно-планувальними рішеннями, перешкоджанням поширенню вогню, застосуванням вогневідсікних пристроїв у технологічних комунікаціях і системах вентиляції, опалення та кондиціонування, а також впровадженням протидимного захисту, засобів сигналізації, сповіщення й пожежогасіння та організацією пожежної охорони. Відповідно до Закону України «Про пожежну безпеку» відповідальність за забезпечення пожежної безпеки на підприємствах покладається на керівників або уповноважених осіб, а власники та орендарі зобов'язані організувати профілактичні заходи, розробити й контролювати виконання внутрішніх нормативних документів, забезпечувати дотримання вимог і приписів нагляду, навчати персонал, підтримувати справність засобів протипожежного захисту та зв'язку, за потреби створювати відповідні підрозділи, надавати відомості про стан пожежної безпеки, впроваджувати автоматичні системи виявлення та гасіння пожеж і своєчасно повідомляти про несправності пожежної техніки, систем пожежогасіння та водопостачання.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

5.1 Характеристика об'єкта впровадження та економічні передумови

Розроблена IoT система з адаптивною селекцією каналів зв'язку призначена для використання у системах типу «розумний будинок» та на малих об'єктах побутової або виробничої автоматизації. Основною метою впровадження є підвищення надійності передавання даних у бездротовому середовищі, зменшення кількості втрат пакетів, а також зниження енергоспоживання пристроїв за рахунок ефективного використання радіоканалу.

Економічна доцільність полягає у скороченні витрат на обслуговування мережі, зниженні кількості збоїв та втрат інформації, а також у зменшенні простоїв обладнання. Упровадження системи можливе в житлових комплексах, навчальних корпусах, лабораторіях і підприємствах, де функціонує від 10 до 100 сенсорних вузлів (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Основні економічні показники об'єкта впровадження

Показник	Позначення	Значення
Кількість модулів системи	n	50 шт.
Середня вартість модуля	C_m	380 грн
Тривалість розробки	T	4 міс.
Очікуваний строк експлуатації	T_e	5 років
Орієнтовна економія на обслуговуванні	E_0	12–15 % на рік

На практиці реалізація системи може бути виконана як на базі мікроконтролерних платформ (ESP32, Arduino, Raspberry Pi), так і на готових промислових вузлах.

5.2 Розрахунок витрат на розробку та впровадження системи

До складу витрат на розробку входять матеріальні, енергетичні та трудові ресурси. Для оцінки використаємо узагальнену структуру витрат, наведену у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Структура витрат на розробку IoT системи

Стаття витрат	Позначення	Сума, грн	Питома вага, %
Закупівля мікроконтролерів (5 шт.)	C_1	1 900	18
Радіомодулі nRF24L01 (5 шт.)	C_2	850	8
Сенсорні вузли (датчики температури, руху, вологості тощо)	C_3	2 200	21
Джерела живлення, дроти, монтажні матеріали	C_4	1 000	10
Програмне забезпечення (ліцензії, IDE, хмара)	C_5	1 500	14
Заробітна плата виконавця	C_6	2 400	23
Інші накладні витрати (електроенергія, амортизація)	C_7	650	6
Разом	—	10 500	100

Витрати на оплату праці розраховуються за формулою:

$$C_{ЗП} = T_{РОБ} * C_{ГОД}, \quad (5.1)$$

де $T_{РОБ} = 160$ год/міс, $C_{ГОД} = 150$ грн/год, отже:

$$C_{ЗП} = 160 * 150 = 24\,000 \text{ грн}, \quad (5.2)$$

з урахуванням чотиримісячної розробки – 96 000 грн, з яких 25 % припадає на студентський проєкт. Графік динаміки витрат за етапами показано на рисунку 5.1.

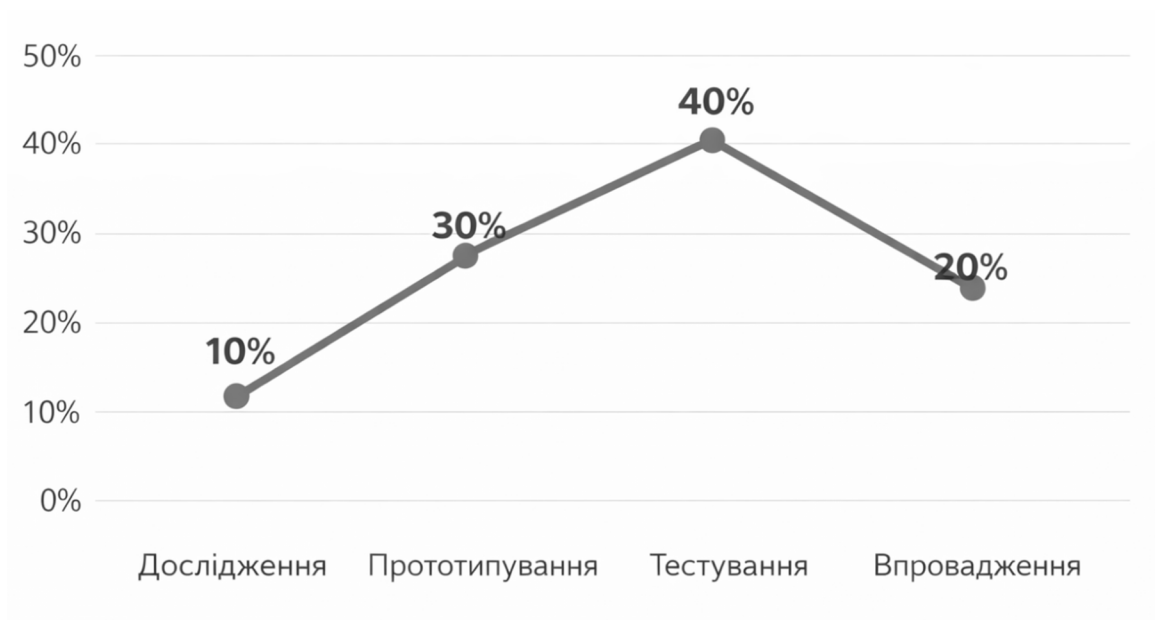


Рисунок 5.1 – Графік розподілу витрат за етапами розробки

Сумарні витрати на впровадження включають матеріальні (C_M), трудові (C_T) та накладні (C_H) складові:

$$C_{ЗАГ} = C_M + C_T + C_H. \quad (5.3)$$

Підставивши дані таблиці 5.2, отримаємо:

$$C_{ЗАГ} = 10\,500 + 24\,000 + 6\,000 = 40\,500 \text{ грн.} \quad (5.4)$$

5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження

Ефективність системи оцінюють за коефіцієнтом економічної ефективності:

$$E = \frac{E_{РІЧ}}{C_{ЗАГ}}, \quad (5.5)$$

де $E_{\text{річ}}$ – річна економія, що очікується внаслідок зменшення енергоспоживання й вартості обслуговування.

В результаті оптимізації частотного ресурсу система забезпечує економію електроенергії на 12 % та зниження кількості помилкових повторних передавань на 20 %. Для системи споживанням 50 Вт на годину й тривалістю роботи 8 год/добу річна економія енергії складе:

$$E_{\text{ен}} = 50 * 8 * 365 * 0,12 = 17\,520 \text{ Вт} * \text{год} \approx 17,5 \text{ кВт} * \text{год}. \quad (5.6)$$

При вартості 3,5 грн/кВт·год отримаємо:

$$E_{\text{грн}} = 17,5 * 3,5 = 61,25 \frac{\text{грн}}{\text{рік}}. \quad (5.7)$$

Для системи з 50 вузлами:

$$E_{\text{заг}} = 61,25 * 50 = 3062,5 \text{ грн/рік}. \quad (5.8)$$

Крім того, зменшення кількості технічних збоїв з 6 до 2 разів на рік скорочує витрати на обслуговування в середньому на 8 000 грн. Загальна річна економія становить:

$$E_{\text{річ}} = 8\,000 + 3\,062,5 = 11\,062,5 \text{ грн}. \quad (5.9)$$

Тоді коефіцієнт ефективності:

$$E = \frac{11\,062,5}{40\,500} = 0,273, \quad (5.10)$$

а термін окупності:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E} = 3,66 \text{ роки}. \quad (5.11)$$

Отже, система окупається менш ніж за 4 роки експлуатації, що є прийнятним для технічних рішень побутового рівня.

У результаті проведеного економічного аналізу доведено, що розробка IoT системи з адаптивною селекцією каналів зв'язку є економічно доцільною. Загальні витрати на створення прототипу становлять близько 40 тис. грн, при цьому річна економія – понад 11 тис. грн. Основні економічні показники впровадження запропонованих рішень наведено у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Економічна оцінка ефективності впровадження

Показник	Позначення	Значення
Загальні витрати на розробку	C_0	40 500 грн
Річна економія	$E_{річ}$	11 062 грн
Коефіцієнт ефективності	E	0,27
Термін окупності	$T_{ок}$	3,7 роки
Очікуваний прибуток за 5 років	P	55 310 грн

Графічно залежність накопиченого прибутку від часу показано на рисунку 5.2.

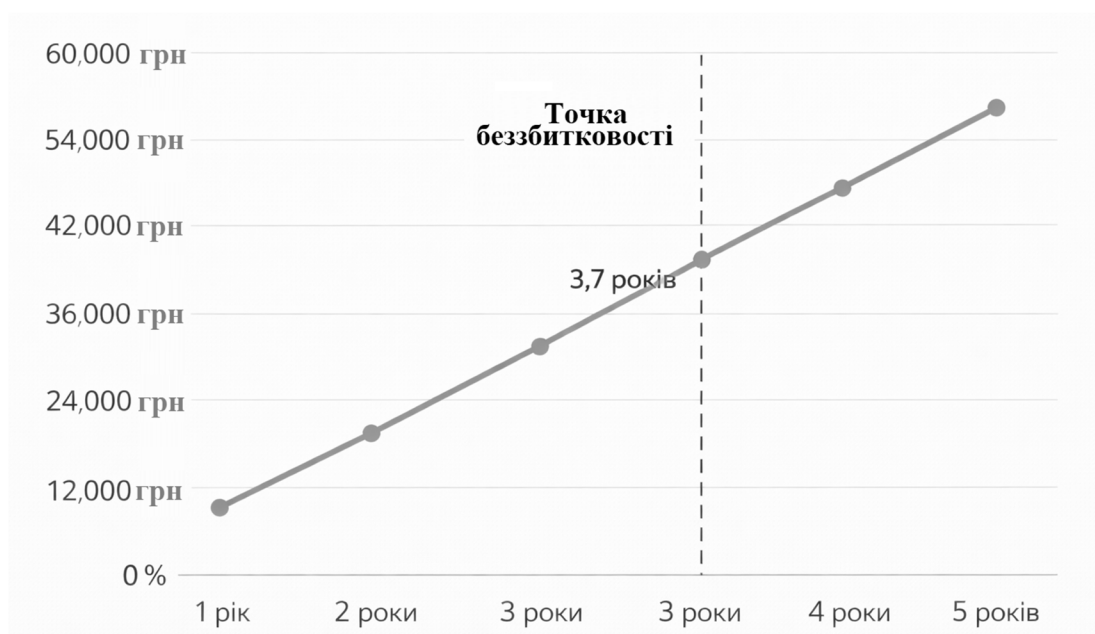


Рисунок 5.2 – Графік залежності накопиченого прибутку від тривалості експлуатації

Окупність системи досягається за 3–4 роки, а подальша експлуатація забезпечує стабільний прибуток і скорочення енергетичних та сервісних витрат. Розроблене рішення може бути масштабоване для більших об'єктів і комерційних систем управління мікрокліматом, енергоспоживанням та безпекою.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження проблеми надійного бездротового обміну даними в IoT-системах «розумний будинок» за умов змінної та перевантаженої радіообстановки, що обґрунтовує актуальність адаптивної селекції каналів зв'язку.

Узагальнено й систематизовано теоретичні основи побудови IoT-мереж «розумний будинок», а також проаналізовано чинники, що визначають деградацію радіоканалу в діапазоні 2,4 ГГц (фоновий шум, багатопроменевість, перешкоди від суміжних систем), і показники оцінювання якості зв'язку (RSSI, SNR/SINR, BER, PER), які доцільно використовувати як критерії для прийняття рішень щодо перемикання каналу.

Розглянуто та зіставлено підходи до селекції каналів (статичні, реактивні, проактивні, FHSS та ін.), на підставі чого обґрунтовано доцільність застосування проактивного сканування ефіру з формуванням переліку пріоритетних частот і подальшої стрибкоподібної перебудови робочої частоти на його основі.

Запропоновано структурну та алгоритмічну модель адаптивної селекції каналу з урахуванням завад і динаміки радіоефіру, а також сформульовано вимоги до її застосування в домашній IoT-інфраструктурі з різномірними модулями та сценаріями автоматизації.

Реалізовано апаратно-програмну основу системи на базі радіомодуля nRF24L01 у діапазоні 2,4 ГГц, що забезпечує можливість сканування ефіру, ранжування доступних каналів та виконання стрибкоподібної зміни робочої частоти як ключового механізму підвищення завадостійкості.

Передбачено експериментальне тестування розробленого підходу, зокрема дослідження функції сканування частот і стрибкоподібної зміни частоти передавання, що дає підстави вважати запропонований метод придатним для адаптації мережі до змін спектрального завантаження в реальних умовах експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пулеко І. В., Єфіменко А. А. Архітектура та технології Інтернету речей : навч. посіб. – Електронні дані. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. – 234 с.
2. Жураковський Б. Ю., Зенів І. О. Технології Інтернету речей : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 271 с.
3. Ачкасов І. А., Козир Б. Ю., Тімінський О. Г. Інтернет речей і смарт-технології : конспект лекцій. – Київ : КНУБА, 2022. – 64 с.
4. Невлюдов І. О., Новоселов С. К., Андрусевич В. А., Резніченко О. С. Технології Інтернету речей в управлінні пристроями на мікроконтролерах : навч. посіб. – Харків : Вид-во ХНУРЕ, 2023.
5. Баленко О. І. Апаратні засоби локальних та глобальних мереж : лекційний курс [Електронний ресурс]. – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. – 301 слайд.
6. Жураковський Б. Ю., Зенів І. О. Комп'ютерні мережі. Ч. 1 : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 336 с.
7. Антонова Г. В., Кедич А. В., Ковирьова О. В. Інтернет речей та бездротові смарт-мережі в точному землеробстві // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2019. – № 18. – С. 119–129.
8. Борківська О., Жураковський Б., Платоненко А. Інформаційна система розумного міста на базі технології LORA // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. – 2022. – Т. 4, № 16. – С. 113–128.
9. Жураковський Б. Ю., Пархомей І. Р., Дружинін В. А. Обробка інформації в сенсорних мережах // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2018. – Вип. 1(32). – С. 42–57.
10. Жураковський Б. Ю., Цьопа Н. В. Методика оцінювання та вибору з'єднувальної лінії інформаційних мереж // Advanced Information and Communications Technologies (AICT 2019) : матеріали міжнар. конф. – 2019. – С. 1–8.

11. Zhurakovskiy B., Nedashkivskiy O. System to collect information when transferring data to radio channels // *Cybersecurity: Education, Science, Technique*. – 2022. – Vol. 4, No. 15. – P. 6–34.
12. Жураковський Б. Ю., Недашківський О. Система захисту інформації при передачі даних в радіоканалі // *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. – 2022. – Т. 3, № 15. – С. 35–52.
13. Мошенченко М. С., Жураковський Б. Ю. Захист інформації в технологіях «Smart City» // *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. – 2021. – Т. 3, № 11. – С. 100–109.
14. Moshenchenko N., Zhurakovskiy B. SMARTCITY wireless fence and interactive infrastructure model // *Cybersecurity: Education, Science, Technique*. – 2021. – Vol. 1, No. 13. – P. 63–80.
15. Кабанова А. Б., Бодрова А. А., Логвин В. І. Дослідження Інтернету речей та його застосування у створенні розумного будинку // *Символ науки*. – 2016. – № 11.
16. Shevchenko O., Bondarchuk A., Polonevych O., Zhurakovskiy B., Korshun N. Methods of the objects identification and recognition research in the networks with the IoT concept support // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2021. – Vol. 2923. – P. 277–282.
17. Специфікація LoRaWAN. Вступ. Основні поняття та класи кінцевих пристроїв [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу: <https://habr.com/ua/post/316954/> (дата звернення: 02.12.2025).
18. Повний посібник з технології LoRa та глобальної відповідності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wonderfulpcb.com/uk/blog/lora-technology-global-compliance-frequency-best-practices/> (дата звернення: 02.12.2025).
19. IoT від lifecell – розумні рішення під ключ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://iot.lifecell.ua/> (дата звернення: 02.12.2025).

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОГРАМНИЙ КОД ГОЛОВНОГО МОДУЛЯ

MainModule_RB.ino

```
#include <SPI.h>
#include <RF24.h>

// CE/CSN (типово для Arduino Uno/Nano)
RF24 radio(9, 10);

// Адреси (5 байт + '\0')
static const uint8_t ADDR_MAIN[6] = "MAIN0";

enum MsgType : uint8_t { MSG_SENSOR=1, MSG_CMD=2, MSG_PONG=3 };

#pragma pack(push, 1)
struct Packet {
    uint8_t type, src, dst;
    uint16_t seq;
    int16_t a, b, c;    // універсальні поля даних
    uint8_t flags;
    uint8_t pad[32 - (1+1+1+2+2+2+2+1)];
};
#pragma pack(pop)

static uint16_t seqNo = 1;
static uint8_t channel = 76;

static const uint8_t NODES[] = { 1, 2, 3 };
static const uint8_t N = sizeof(NODES) / sizeof(NODES[0]);

void nodeAddr(uint8_t id, uint8_t out[6]) {
    out[0]='N'; out[1]='D'; out[2]='0'+(id%10); out[3]='0'; out[4]='0'; out[5]='\0';
}

void radioSetup(uint8_t ch) {
    radio.begin();
    radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
    radio.setPALevel(RF24_PA_LOW);
    radio.setRetries(5, 10);
    radio.setAutoAck(true);
    radio.setPayloadSize(32);
    radio.setChannel(ch);

    radio.openReadingPipe(1, ADDR_MAIN);
    radio.startListening();
}
```

```

// Швидка оцінка “зайнятості” каналу через RPD
uint16_t noiseScore(uint8_t ch, uint16_t samples=120) {
    radio.stopListening();
    radio.setChannel(ch);
    radio.startListening();

    uint16_t busy = 0;
    for (uint16_t i=0; i<samples; i++) {
        delayMicroseconds(140);
        if (radio.testRPD()) busy++;
    }
    return busy;
}

// Вибір каналу з мінімальним score у діапазоні [40..110] з кроком 2
uint8_t chooseChannel() {
    uint8_t best = channel;
    uint16_t bestScore = 0xFFFF;
    for (uint8_t ch=40; ch<=110; ch+=2) {
        uint16_t s = noiseScore(ch);
        if (s < bestScore) { bestScore = s; best = ch; }
    }
    return best;
}

void setChannel(uint8_t ch) {
    channel = ch;
    radio.stopListening();
    radio.setChannel(channel);
    radio.startListening();
}

bool sendCmd(uint8_t nodeId, uint8_t cmdFlags) {
    uint8_t addr[6]; nodeAddr(nodeId, addr);

    Packet p{};
    p.type = MSG_CMD;
    p.src = 0; // MAIN=0
    p.dst = nodeId;
    p.seq = seqNo++;
    p.flags = cmdFlags;

    radio.stopListening();
    radio.openWritingPipe(addr);
    bool ok = radio.write(&p, sizeof(p));
    radio.startListening();
    return ok;
}

bool readPacket(Packet &p) {
    if (!radio.available()) return false;
    radio.read(&p, sizeof(p));
}

```

```

    return true;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    radioSetup(channel);

    // первинний вибір каналу
    setChannel(chooseChannel());
}

void loop() {
    static uint32_t tPoll = 0;
    static uint8_t failStreak = 0;

    // прийом даних від вузлів
    Packet in;
    while (readPacket(in)) {
        if (in.type == MSG_SENSOR) {
            failStreak = 0; // є трафік – вважаємо зв'язок нормальним
            // За потреби – логування:
            // Serial.print("node="); Serial.print(in.src);
            // Serial.print(" a="); Serial.println(in.a);
        }
        if (in.type == MSG_PONG) failStreak = 0;
    }

    // опитування вузлів раз на 2 с
    if (millis() - tPoll >= 2000) {
        tPoll = millis();

        for (uint8_t i=0; i<N; i++) {
            bool ok = sendCmd(NODES[i], 0x01); // 0x01 = “запит стану”
            if (!ok) failStreak++;
        }

        // якщо серія невдач – пересканувати канал
        if (failStreak >= 5) {
            setChannel(chooseChannel());
            failStreak = 0;
        }
    }
}

```

ДОДАТОК Б

ПРОГРАМНИЙ КОД СЕНСОРНОГО МОДУЛЯ

PeripheralModule_RB.ino

```
#include <SPI.h>
#include <RF24.h>

RF24 radio(9, 10);

static const uint8_t NODE_ID = 1; // змініть для кожного вузла
static const uint8_t ADDR_MAIN[6] = "MAIN0";
static uint8_t channel = 76;

enum MsgType : uint8_t { MSG_SENSOR=1, MSG_CMD=2, MSG_PONG=3 };

#pragma pack(push, 1)
struct Packet {
    uint8_t type, src, dst;
    uint16_t seq;
    int16_t a, b, c;
    uint8_t flags;
    uint8_t pad[32 - (1+1+1+2+2+2+2+1)];
};
#pragma pack(pop)

static uint16_t seqNo = 1;

// Приклад датчиків (замініть під вашу схему)
static const uint8_t PIN_DOOR = 2; // геркон (INPUT_PULLUP)
static const uint8_t PIN_PIR = 3; // PIR
static const uint8_t PIN_LEAK = A0; // аналоговий

void nodeAddr(uint8_t id, uint8_t out[6]) {
    out[0]='N'; out[1]='D'; out[2]='0'+(id%10); out[3]='0'; out[4]='0'; out[5]='\0';
}

void radioSetup() {
    radio.begin();
    radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
    radio.setPALevel(RF24_PA_LOW);
    radio.setRetries(5, 10);
    radio.setAutoAck(true);
    radio.setPayloadSize(32);
    radio.setChannel(channel);

    uint8_t addr[6]; nodeAddr(NODE_ID, addr);
    radio.openReadingPipe(1, addr); // слухаємо свою адресу
    radio.openWritingPipe(ADDR_MAIN); // пишемо на MAIN
```

```

    radio.startListening();
}

bool sendToMain(const Packet &p) {
    radio.stopListening();
    bool ok = radio.write(&p, sizeof(p));
    radio.startListening();
    return ok;
}

bool readPacket(Packet &p) {
    if (!radio.available()) return false;
    radio.read(&p, sizeof(p));
    return true;
}

Packet buildSensor() {
    const int leak = analogRead(PIN_LEAK);
    const int door = digitalRead(PIN_DOOR); // залежить від підключення
    const int pir = digitalRead(PIN_PIR);

    Packet p{};
    p.type = MSG_SENSOR;
    p.src = NODE_ID;
    p.dst = 0;
    p.seq = seqNo++;

    p.a = (int16_t)leak; // наприклад, сире значення АЦП
    p.b = (int16_t)door; // 0/1
    p.c = (int16_t)pir; // 0/1

    // flags: bit0=door, bit1=pir, bit2=leak_alarm
    const int LEAK_THR = 450;
    p.flags = 0;
    if (door) p.flags |= (1<<0);
    if (pir) p.flags |= (1<<1);
    if (leak > LEAK_THR) p.flags |= (1<<2);

    return p;
}

void handleCmd(const Packet &cmd) {
    // cmd.flags bit0 = "запит стану", bit1 = "ping"
    if (cmd.flags & 0x01) sendToMain(buildSensor());

    if (cmd.flags & 0x02) {
        Packet pong{};
        pong.type = MSG_PONG;
        pong.src = NODE_ID;
        pong.dst = 0;
        pong.seq = seqNo++;
        sendToMain(pong);
    }
}

```

```
}  
}  
  
void setup() {  
  pinMode(PIN_DOOR, INPUT_PULLUP);  
  pinMode(PIN_PIR, INPUT);  
  pinMode(PIN_LEAK, INPUT);  
  
  radioSetup();  
}  
  
void loop() {  
  // прийом команд  
  Packet in;  
  while (readPacket(in)) {  
    if (in.type == MSG_CMD && (in.dst == NODE_ID || in.dst == 0)) {  
      handleCmd(in);  
    }  
  }  
  
  // періодична передача (push), якщо потрібно  
  static uint32_t tSend = 0;  
  if (millis() - tSend >= 5000) {  
    tSend = millis();  
    sendToMain(buildSensor());  
  }  
}
```


ДОДАТОК В

РЕЗУЛЬТАТИ ЧАСТОТНОГО СКАНУВАННЯ

Таблиця В.1 – Результати сканування частот у Торгово-розважальному центрі “Forum Lviv”

Номер каналу	Рівень шуму	Номер каналу	Рівень шуму	Номер каналу	Рівень шуму	Номер каналу	Рівень шуму	Номер каналу	Рівень шуму
1	0,04	26	2,28	51	1,85	76	0,39	101	0,00
2	0,05	27	1,09	52	1,61	77	0,31	102	0,03
3	0,32	28	1,69	53	1,81	78	0,15	103	0,02
4	0,22	29	1,45	54	2,18	79	0,18	104	0,01
5	0,82	30	1,34	55	2,35	80	0,33	105	0,01
6	1,54	31	0,85	56	2,12	81	0,08	106	0,02
7	2,93	32	0,79	57	2,14	82	0,08	107	0,01
8	3,77	33	0,87	58	2,23	83	0,06	108	0,02
9	4,18	34	1,65	59	2,40	84	0,01	109	0,02
10	4,76	35	1,93	60	2,54	85	0,03	110	0,02
11	4,60	36	1,72	61	2,62	86	0,00	111	0,02
12	4,87	37	1,91	62	1,63	87	0,05	112	0,02
13	3,70	38	2,63	63	2,68	88	0,01	113	0,00
14	4,32	39	3,16	64	2,63	89	0,03	114	0,00
15	4,72	40	3,36	65	2,49	90	0,02	115	0,00
16	4,77	41	3,06	66	2,31	91	0,05	116	0,00
17	4,98	42	1,94	67	2,02	92	0,07	117	0,02
18	4,67	43	3,18	68	1,58	93	0,00	118	0,00
19	3,98	44	3,25	69	1,55	94	0,00	119	0,01
20	3,26	45	2,82	70	1,43	95	0,02	120	0,01
21	2,94	46	2,26	71	0,92	96	0,01	121	0,06
22	1,64	47	1,88	72	0,58	97	0,03	122	0,05
23	1,41	48	1,98	73	0,78	98	0,02	123	0,01
24	1,79	49	2,28	74	0,66	99	0,01	124	0,01
25	2,12	50	2,37	75	0,63	100	0,04	125	0,00

Таблиця В.2 – Результати сканування частот у механічному корпусі Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького

Номер каналу	Рівень шуму	Номер каналу	Рівень шуму	Номер каналу	Рівень шуму	Номер каналу	Рівень шуму	Номер каналу	Рівень шуму
1	0,00	26	0,00	51	0,00	76	0,02	101	0,00
2	0,00	27	0,02	52	0,00	77	0,02	102	0,00
3	0,02	28	0,00	53	0,02	78	0,02	103	0,00
4	0,00	29	0,02	54	0,02	79	0,00	104	0,00
5	0,00	30	0,00	55	0,02	80	1,14	105	0,00
6	0,02	31	0,02	56	0,05	81	0,00	106	0,00
7	0,00	32	0,02	57	0,02	82	0,00	107	0,00
8	0,00	33	0,73	58	0,00	83	0,00	108	0,02
9	0,00	34	4,95	59	0,52	84	0,00	109	0,00
10	0,02	35	4,34	60	0,77	85	0,00	110	0,00
11	0,00	36	3,43	61	0,77	86	0,00	111	0,05
12	0,00	37	1,20	62	0,05	87	0,00	112	0,05
13	0,00	38	1,77	63	0,80	88	0,00	113	0,02
14	0,00	39	2,02	64	0,32	89	0,00	114	0,02
15	0,02	40	2,16	65	0,34	90	0,00	115	0,02
16	0,00	41	0,16	66	0,11	91	0,00	116	0,02
17	0,02	42	0,05	67	0,07	92	0,00	117	0,00
18	0,02	43	0,00	68	0,00	93	0,00	118	0,36
19	0,02	44	0,02	69	0,05	94	0,00	119	0,09
20	0,02	45	0,02	70	0,02	95	0,00	120	0,36
21	0,00	46	0,02	71	0,00	96	0,00	121	0,66
22	0,00	47	0,02	72	0,05	97	0,00	122	0,52
23	0,02	48	0,02	73	0,00	98	0,00	123	0,36
24	0,05	49	0,00	74	0,07	99	0,00	124	0,07
25	0,05	50	0,02	75	0,00	100	0,00	125	0,07