

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

Факультет електроніки

Кафедра електронних пристроїв та систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Євген ВЕРБИЦЬКИЙ

« ____ » червня _____ 2025 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електронні компоненти і системи»

спеціальності 171 «Електроніка»

на тему: «Пристрій керування сенсорами присутності людини»

Виконав:

студент IV курсу, групи ДС-11

Погрібний Олександр Сергійович _____

Керівник:

Доцент кафедри ЕПС, к.т.н.,

Олійник Остап Олегович _____

Консультант:

Рецензент:

Професор кафедри. АМЕС, д.т.н., професор

Дідковський Віталій Семенович _____

Консультант

з нормоконтролю:

Доцент кафедри ЕПС, к.т.н., доцент

Батрак Лариса Миколаївна _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД ОСНОВНИХ ПІДХОДІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КЕРУВАННЯ МАСИВОМ СЕНСОРІВ.....	10
1.1 Програмування мікроконтролерів: архітектура та принцип роботи	10
1.1.1 Архітектура мікроконтролерів	12
1.1.2 Принципи роботи мікроконтролера.....	15
1.2 Особливості роботи з радіопередавачами у вбудованих системах	17
1.2.1 Принципи роботи радіопередавачів у вбудованих системах	18
1.2.2 Параметри, що впливають на ефективність радіопередачі	20
1.3 Основи псевдовипадкового переналаштування робочої частоти та протоколу TDMA	21
1.3.1 Псевдовипадкове переналаштування робочої частоти (Frequency Hopping)	21
1.3.2 Технологія TDMA (Time Division Multiple Access).....	22
1.4 Використання GPS у вбудованих системах	24
1.4.1 Принцип роботи GPS.....	24
1.4.2 Переваги використання GPS у вбудованих системах	25
1.4.3 Приклади застосування GPS у вбудованих системах	25
1.5 Огляд систем керування на основі “центрально-виконавчий модуль”	26
1.6 Висновок до розділу 1	28
2 АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КЕРУВАННЯ СЕНСОРАМИ ПРИСУТНОСТІ ЛЮДИНИ	30
2.1 Розробка схемотехніки центрального та виконавчого пристроїв.....	32
2.1.1 Центральний пристрій.....	32
2.1.2 Виконавчий пристрій.....	36

ДП.ДС-11.02.000 ПЗ								
Змн	Арк.	№ докум.№	Підпис	Дата				
		Погрібний О. С.			Пристрій керування масивом сенсорів присутності людини. Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
		Олійник О. О.				3	115	
		Батрак Л. М.				«КПІ ім. Ігоря Сікорського», ФЕЛ, ЕПС, гр. ДС-11		
		Олійник О.О.						

2.2	Проектування друкованих плат та розробка корпусу	38
2.2.1	Складання специфікації-переліку компонентів для централі і виконавчого датчику	39
2.2.2	Вибір та компонування схеми	39
2.2.3	Розведення плати в програмі для централі.....	39
2.2.4	Розведення плати в програмі для виконавчого пристрою	41
2.2.5	Дотримання початкових вимог виготовленими платами	43
2.2.6	Процес розробки корпусу для центрального та виконавчого пристроїв	44
2.3	Принципи організації бездротового зв'язку між пристроями.....	47
2.3.1	Розрахунок довжини антени	48
2.3.2	Обчислення хвильового імпедансу антени	49
2.3.3	Розрахунок коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ)	50
2.3.4	Дослідження використання матеріалу антени	50
2.3.5	Дослідження діелектричного покриття антени	52
2.3.6	Дослідження взаємного впливу антен GPS та NRF під час паралельної роботи обох систем.....	53
2.4	Розрахунок енергоспоживання системи. Підбір акумуляторів.....	56
2.4.1	Теоретичний розрахунок часу роботи системи від акумулятора в активному режимі.....	56
2.4.2	Теоретичний розрахунок часу роботи системи від акумулятора враховуючи режими енергозбереження та інші втрати. Підбір оптимального акумулятора.....	58
	Висновки до розділу 2	64
3	РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРИСТРОЮ, ПРИЗНАЧЕНОГО ДЛЯ КЕРУВАННЯ СЕНСОРАМИ ПРИСУТНОСТІ ЛЮДИНИ.....	66

Висновки до розділу 3	88
4 ПРАКТИЧНА ВЕРИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗРОБЛЕНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ КЕРУВАННЯ МАСИВОМ СЕНСОРІВ ПРИСУТНОСТІ ЛЮДИНИ.	90
4.1 Схема побудови системи: централь і виконавчі модулі. Варіанти інтеграції зі сторонніми сенсорами.....	90
4.2 Програмна взаємодія: поетапна робота системи	90
4.3 Робота в умовах, що схожі з штатними: результати експерименту. Навантажувальне тестування системи	92
4.3.1 Вимір енергоспоживання системи	92
4.3.2 Тестування кварцу за різних температурних умов.....	93
4.3.3 Порівняння виміру координат модулем та мобільним телефоном ..	94
4.3.4 Тестування корпусу на міцність.....	95
4.3.5 Тестування на IP65.....	97
4.3.6 Перевірка UX. Визначення гучності індикації бузером та яскравості RGB світлодіодом.....	98
4.3.7 Тривале тестування системи в умовах штатної роботи.....	100
4.4 Аналіз стабільності зв'язку та точності відстаней.....	102
4.4.1 Тестування роботи системи за ідеального сигналу за допомогою з'єднання коаксіальним кабелем.....	103
4.4.2 Перевірка інтерференції металом на якість зв'язку	103
4.4.3 Тестування дальності радіо системи.....	105
4.4.4 Перевірка дотримання вимоги непомітності на відстані 150 м	106
4.4.5 Перевірка коректності передачі та отримання команд. Перевірка шифрування та дешифрування.....	107
4.5 Перевірка коректності передачі та отримання команд. Перевірка шифрування та дешифрування	108
4.5.1 Порівняння теоретично розрахованого та експериментально виміряного споживання системи	108

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

4.5.2 Порівняння теоретично розрахованої та експериментально визначеної ймовірності помилки	108
ВИСНОВКИ.....	109
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	112
ДОДАТОК А ХАРАКТЕРИСТИКИ ESP32	
ДОДАТОК Б ХАРАКТЕРИСТИКИ NEO-6M	
ДОДАТОК В ХАРАКТЕРИСТИКИ NRF24L01	
ДОДАТОК Г ХАРАКТЕРИСТИКИ TP4056	
ДОДАТОК Д ХАРАКТЕРИСТИКИ ESP8266	
ДОДАТОК Ж СПЕЦИФІКАЦІЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО МОДУЛЮ	
ДОДАТОК З УХ ПАТЕРНИ СИСТЕМИ	
ДОДАТОК К СТРУКТУРА КОМАНД РОЗРОБЛЕНОГО ПРОТОКОЛУ	
ДОДАТОК Л ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ	

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ВСТУП

Зі зростанням потреб у автоматизації, моніторингу та безпеці в різних сферах – від промисловості до сільського господарства та оборонного сектору – актуальним стає впровадження систем, здатних ефективно обробляти дані з великої кількості сенсорів. У таких умовах критично важливою є розробка централізованих систем, які можуть здійснювати надійний збір, аналіз і керування масивами сенсорних пристроїв у реальному часі, при цьому зберігаючи енергоефективність, масштабованість і стабільність зв'язку.

Система керування масивом сенсорів дозволяє централізовано керувати віддаленими пристроями, збирати з них інформацію, приймати рішення та надсилати керуючі сигнали. Вона може функціонувати в умовах промислових завод, працювати автономно, забезпечувати точне позиціонування та адаптацію до різних сценаріїв використання.

Об'єктом дослідження є бездротовий пристрій керування, що взаємодіє з масивом сенсорів присутності людини в режимі малої радіопомітності, високої енергоефективності та надійності виконання команд керування.

Предметом дослідження є архітектура, принципи побудови, алгоритми обміну даними та протоколи взаємодії в системі "центральний контролер — сенсори присутності людини".

Метою дипломного проекту є розробка універсальної, енергоефективної системи керування масивом сенсорів з можливістю масштабування, надійного зв'язку та точного визначення координат кожного сенсорного модуля.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасних архітектур і протоколів керування сенсорними системами;
2. Сформулювати вимоги до системи з урахуванням умов експлуатації (ангар, відкриті простори, польові умови);

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

3. Розробити функціональну, структурну та електричну схеми центрального контролера і сенсорних модулів;

4. Реалізувати апаратну частину системи: друковані плати, корпуси, джерела живлення;

5. Створити прошивку для мікроконтролерів із підтримкою бездротової передачі даних (NRF24L01+), GPS-позиціонування та енергозбереження;

6. Побудувати алгоритми TDMA-комунікації з підтримкою псевдовипадкового переналаштування робочої частоти;

7. Провести експериментальну перевірку роботи системи в різних умовах;

8. Проаналізувати ефективність, енергоспоживання та точність системи, сформулювати висновки й можливі напрями розвитку.

Практичне значення полягає у створенні адаптивної системи, яку можна застосовувати для охоронних, моніторингових, екологічних, промислових та військових цілей, де потрібна надійна передача даних і централізоване керування великою кількістю сенсорів.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

1 ОГЛЯД ОСНОВНИХ ПІДХОДІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КЕРУВАННЯ МАСИВОМ СЕНСОРІВ

1.1 Програмування мікроконтролерів: архітектура та принцип роботи

Сучасну галузь автоматизації, роботизації та систем розумного дому неможливо уявити без мікропроцесорних засобів та систем. Варто відзначити, що вагомий внесок у розвиток напівпровідникової мікросхемотехніки належить компанії Intel, яка заснована ще у 1986 році. Це був період появи багатьох новітніх технологій, які дали змогу створити напівпровідникові прилади - мікросхеми. Їх використання давало перспективи в усіх галузях техніки, зокрема і у автоматизації.[1]

Компанія Intel спеціалізувалася зокрема на проектуванні та виготовленні напівпровідникових запам'ятовуючих пристроїв. Першим серійним виробом була мікросхема "3101" 64-розрядної Шотткі-біполярної статичної оперативної пам'яті, що зображений на рис.1.1. Особливе ж місце, яке посіла Intel у світі електроніки, пов'язане з іншими пристроями – мікропроцесорами. Саме вони стали технічною базою нинішньої комп'ютерної науково-технічної революції.[1]

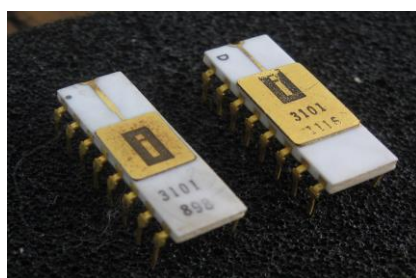


Рис.1.1. Зовнішній вигляд мікросхеми "3101" від компанії Intel.[2]

Повернемося до сьогодення. Мікроконтролери є ключовими компонентами для реалізації різноманітних електронних систем, включаючи IoT-пристрої, автоматизацію, системи керування та інші технології (рис.1.2).

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Вони застосовуються в різних сферах, таких як побутова техніка, медичні пристрої, системи управління ліфтами, мобільні телефони, рації та інші засоби зв'язку, електронні музичні інструменти та автомагнітоли, комп'ютерна периферія (клавіатури, джойстики, принтери тощо), світлофори, автоматичні ворота та шлагбауми, інтерактивні іграшки для дітей, а також у транспортних засобах, включаючи автомобілі, локомотиви і літаки, роботах та промислових верстатах[3]. Їхні особливості архітектури та принципи роботи визначають, як ефективно їх програмувати для досягнення потрібної функціональності.



Рис.1.2. Використання мікроконтролерів у різноманітних електронних системах.

Мікроконтролери активно використовуються в автомобільній електроніці. Наприклад, в автомобілі Peugeot 206 встановлено 27 мікроконтролерів, а в моделях, таких як BMW 7 серії, їх кількість перевищує 60. Ці мікроконтролери керують різними системами автомобіля, зокрема вприском палива, адаптивною підвіскою, освітленням, механізмами двірників, склопідіймачами та дзеркалами заднього виду (див. рис. 1.3)[3].

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

- ЦП (Центральний процесор). Це основний елемент мікроконтролера, який виконує всі операції з обробки даних та управління іншими компонентами системи[4].

- Оперативна пам'ять (RAM). Використовується для зберігання тимчасових даних під час виконання програм, таких як змінні та буфери.

- Постійна пам'ять (Flash). Зберігає програмний код, який виконується мікроконтролером. Це тип пам'яті, яка зберігає дані навіть після вимкнення живлення.

- Вхідно-вихідні порти (GPIO). Використовуються для підключення мікроконтролера до зовнішніх пристроїв (світлодіоди, кнопки, сенсори, моторчики) для прийому або відправки сигналів.

- Аналогово-цифрові перетворювачі (ADC). Використовуються для перетворення аналогових сигналів (наприклад, від датчиків) у цифрові значення, які мікроконтролер може обробляти (рис. 1.4).



Рис.1.4. Принцип роботи аналогово-цифрового перетворювача.

- Цифрово-аналогові перетворювачі (DAC). Використовуються для перетворення цифрових значень у аналогові сигнали, що можуть управляти зовнішніми пристроями, такими як двигуни або регулятори напруги (рис.1.5).

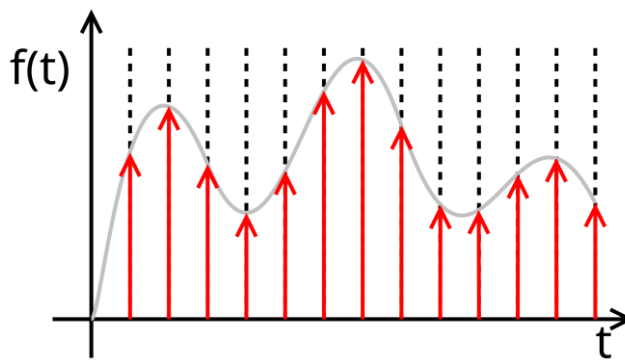


Рис.1.5. Принцип роботи цифро-аналогового перетворювача, де червоний графік - цифровий сигнал, сірий(отриманий) - аналоговий сигнал[5].

- Інтерфейси зв'язку (SPI, I2C, UART) - це інтерфейси, які дозволяють мікроконтролеру обмінюватися даними з іншими мікроконтролерами або пристроями, такими як сенсори, дисплеї, пам'ять та інші компоненти[4].

Типи архітектур мікроконтролерів(рис.1.6):

1. Harvard Architecture. В цій архітектурі використовуються окремі шини для доступу до даних і програмного коду. Це дає змогу одночасний доступ до пам'яті для даних і програмного коду, що значно покращує ефективність роботи мікроконтролера. Така архітектура зазвичай використовується в більш високопродуктивних пристроях. З переваг цієї архітектури можна виокремити зменшення часу доступу до пам'яті та покращену швидкість роботи при одночасному читанні та записі.

2. Von Neumann Architecture. В Von Neumann архітектурі використовується спільна шина для доступу як до програмного коду, так і до даних. Це простіша архітектура, яка часто застосовується у бюджетних і менш складних пристроях. З переваг - простота у реалізації, менша складність у проектуванні чіпа.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

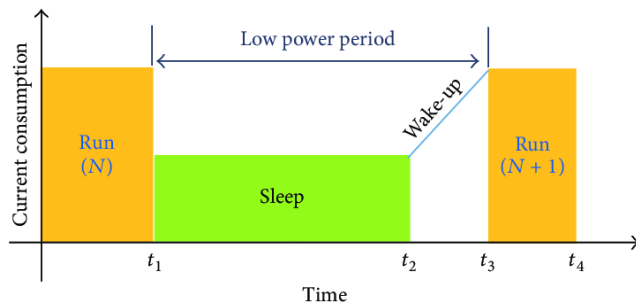


Рис.1.7. Графік споживання струму мікроконтролером при переході в режим DeepSleep та навпаки[6].

2. Режим активної роботи. У режимі активної роботи мікроконтролер виконує програму, яка була завантажена в пам'ять. В цей час він активно взаємодіє з вхідними та вихідними пристроями, обробляє дані та передає сигнали. У режимі активної роботи відбувається основна обробка команд, які виконуються процесором[7].

Також варто описати основні етапи роботи МК. Коли мікроконтролер увімкнений або перезапущений, він завантажує програму з Flash. Ця пам'ять зберігає програмний код навіть після вимкнення живлення. Завантаження програми відбувається з початку адресного простору, після чого програма починає виконуватися.

Після завантаження програми мікроконтролер переходить до виконання інструкцій, зчитуючи їх з пам'яті. Цей процес називається вибором інструкцій, коли ЦП (центральний процесор) вибирає наступну інструкцію і готується до її виконання.

Далі, мікроконтролер активно взаємодіє з різними пристроями через порти вводу-виводу (GPIO). Це можуть бути такі операції:

- Отримання даних з сенсорів, датчиків або інших пристроїв.
- Відправка результатів на вихідні пристрої, такі як світлодіоди, дисплеї, керування реле чи іншими елементами.

Така схема етапів роботи називається Fetch-Decode-Execute (FDE), тобто Отримання-Декодування-Виконання (рис.1.8)[8].

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

- Діапазон передачі: важливо враховувати, що різні радіопередавачі мають різні діапазони передачі. Наприклад, NRF24L01+ забезпечує діапазон до 100 м, в той час як LoRa може забезпечити до 15 км на відкритому просторі.

- Енергоспоживання: Вбудовані системи, що працюють на батареях, потребують радіопередавачів з низьким енергоспоживанням. Модулі на NRF24L01+ або LoRa забезпечують ефективне використання енергії, з можливістю роботи в режимах сну.

- Протоколи зв'язку: важливо враховувати, чи підтримує радіомодуль необхідні протоколи для передачі даних, наприклад SPI, I2C, або UART для інтеграції з мікроконтролерами.

1.2.1 Принципи роботи радіопередавачів у вбудованих системах

Радіопередавачі в вбудованих системах використовують високочастотні сигнали для передачі даних бездротовим способом. Зазвичай система включає, модулятор для модуляції інформації в сигналі, антену для радіопередачі і прийому сигналів, радіоприймач для отримання сигналів, перетворених на цифрові дані[11].

При передаванні даних, модуляція сигналу є ключовою для забезпечення правильного відображення інформації на певній частоті. У системах використовують різні методи модуляції:

1. FSK (Frequency Shift Keying) — використовується в модулях типу NRF24L01+ і є одним з найпоширеніших способів модуляції для передачі бітових даних (рис.1.10.а)[12].
2. ASK (Amplitude Shift Keying) — інший метод, який змінює амплітуду сигналу для передачі даних(рис.1.10.б).
3. PSK (Phase Shift Keying). Замість того, щоб змінювати амплітуду чи частоту сигналу, як у інших методах модуляції (наприклад, вищезгадані ASK або

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

1.2.2 Параметри, що впливають на ефективність радіопередачі

- Дальність зв'язку. Визначається такими параметрами як вихідна потужність передавача, чутливість приймача, антена, її форма і розміри, перешкоди від інших радіопристроїв або фізичних об'єктів (стіни, металеві конструкції).

- Швидкість передачі даних визначається максимальним значенням, яке підтримує конкретний радіомодуль[13]. Щоб розрахувати бітрейт (R_b) для різних методів модуляції, використовується формула:

$$R_b = R_s \cdot \log_2(M),$$

де R_b – бітрейт (швидкість передачі даних в бітах на секунду), R_s – швидкість символів (символьна швидкість, baud rate), M – порядок модуляції, тобто кількість різних символів, які можна передавати за один символ (стани, рівні амплітуди, фази тощо).

Проте варто зазначити, що Chirp Spread Spectrum (CSS) не підпорядковується класичним формулам бітрейту через те, що LoRa має специфічний механізм модуляції для довготривалої передачі на великі відстані з низьким споживанням енергії. Поточна швидкість передачі залежить від обраної ширини смуги пропускання і термінів сплутування сигналу. Також використовується логарифмічна модуляція, що дає змогу отримувати надзвичайно довгі зв'язки з низьким енергоспоживанням. Типові значення бітрейту для LoRa складають від 300 біт/с до 50 кбіт/с залежно від налаштувань і умов[14].

- Захист від завад. Для забезпечення надійності радіозв'язку використовуються методи захисту від завад такі як частотне переналаштування або ж корекція помилок.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

1.3 Основи псевдовипадкового переналаштування робочої частоти та протоколу TDMA

В новітніх радіосистемах, від яких вимагають стабільності, завадостійкості та масштабування, часто використовуються технології такі як TDMA (Time division multiple access) та переналаштування робочої частоти. У цьому підрозділі наведені принципи роботи, переваги та сфери застосування.

1.3.1 Псевдовипадкове переналаштування робочої частоти (Frequency Hopping)

Псевдовипадкове переналаштування робочої частоти — це метод, який полягає в регулярній зміні частоти для передачі даних на певному проміжку часу. Основною метою є збільшення завадостійкості та підвищення безпеки передачі сигналів у радіочастотному спектрі. Частота змінюється після кожного пакету даних або через встановлений час. Цей метод дозволяє пристроям змінювати свою частоту передачі в певному діапазоні частот, що дозволяє уникнути перешкод, викликаних іншими пристроями, що працюють на тій самій частоті.

Визначають окремі типи переналаштування:

1. **Псевдовипадкове переналаштування робочої частоти (FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum)**. Це найбільш поширена форма частотного переналаштування, при якій сигнал періодично перемикається між низкою частот в межах певного діапазону. Використовується для збільшення стійкості до завад, оскільки, якщо на одній частоті виникають перешкоди, пристрій може переміститися на іншу частоту[15].

2. **Пряма послідовність із розширенням спектру (DSSS — Direct Sequence Spread Spectrum)**. Сигнал передається через весь діапазон частот на малих широких смугах, що забезпечує широку спектральну дисперсію сигналу.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Цей метод використовується в таких системах, як Wi-Fi та Bluetooth для підвищення захищеності сигналу. Приклад використання DSSS під час роботи Bluetooth наведено на рис.1.11.

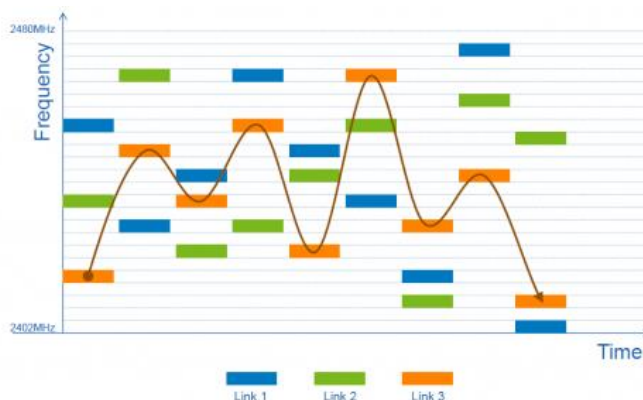


Рис.1.11. Використання DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) в роботі Bluetooth[16].

Серед **переваг** такого “прийому” можна виділити:

- Зменшення впливу завад, оскільки таке переналаштування частоти дозволяє уникати перешкод на конкретних частотах, роблячи систему стійкішою до них.

- Збільшення безпеки. Частотне переналаштування ускладнює перехоплення сигналу або прослуховування переданих даних.

- Покращення якості зв'язку, бо завдяки зміні частот, зв'язок стає менш вразливим до інтерференції від інших пристроїв[15].

Частотне переналаштування активно використовується в мобільному зв'язку(GSM, CDMA), Wi-Fi (802.11b/g/n/ac), супутникових комунікаціях, оборонних технологіях та радіозв'язку.

1.3.2 Технологія TDMA (Time Division Multiple Access)

TDMA (Time Division Multiple Access) — це технологія доступу до середовища передачі, що дозволяє кільком пристроям використовувати одну і ту ж частоту для передачі даних, розподіляючи часовий ресурс між ними. Вона

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

1.4. Використання GPS у вбудованих системах

У вбудованих системах GPS (Global Positioning System) є важливим компонентом для визначення географічного місцезнаходження пристроїв та коригування їх дій відповідно до місця розташування. Завдяки своїй здатності точно визначати координати на Землі, GPS використовується в різноманітних додатках, від розумних пристроїв до автономних транспортних засобів і систем моніторингу.

У цьому підрозділі розглядається, як GPS-модулі інтегруються в вбудовані системи, їх основні переваги, обмеження та приклади застосування.

1.4.1 Принцип роботи GPS

GPS складається з 24-30 супутників, що обертаються навколо Землі і постійно передають сигнали (рис.1.14). Кожен сигнал містить інформацію про час і місцезнаходження супутника. GPS-приймач на пристрої використовує ці сигнали для обчислення своєї поточної позиції.

Основні етапи роботи модуля GPS:

1. Прийом сигналів: GPS-приймач отримує сигнали від мінімум чотирьох супутників.
2. Обчислення відстані: На основі часу, що сигнал рухався від супутника до приймача, обчислюється відстань.
3. Визначення координат: Завдяки математичному процесу триангуляції GPS приймач визначає своє місцезнаходження — широту, довготу та висоту.
4. Визначення часу: Оскільки GPS також використовує точні часи супутників, система здатна синхронізувати час в реальному часі[19].

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

переміщення по заданому маршруту, а також зібрати інформацію про оточення (наприклад, для картографування). Також деякими командами вчених використовуються датчики, які з'єднуються через IoT з GPS для моніторингу параметрів навколишнього середовища, таких як температура або вологість в різних точках.

1.5 Огляд систем керування на основі “централь-виконавчий пристрій”

Такі системи широко використовується в розумних пристроях, IoT-системах, автоматизації та інших застосунках, де необхідно забезпечити управління віддаленими пристроями з одного центрального пункту. Виконання задач у такій системі відбувається через чітке розподілення ролей між центральним контролером та виконавчими пристроями, що взаємодіють за допомогою бездротового(рідше дротового) зв'язку.

Центральний пристрій (центральний контролер) виступає як основний управляючий елемент, який збирає інформацію від виконавчих пристроїв, обробляє її та надає команди для виконання певних дій.

Виконавчі пристрої, в свою чергу, отримують команди від центрального пристрою, виконують необхідні операції, такі як зчитування даних або включення/вимикання пристроїв (наприклад, реле, сенсори, актуатори), і повертають результат виконаної операції назад до центрального пристрою.

Велика кількість інженерних компаній використовують системи керування за принципом “централь-виконавчий датчик”. З найвідоміших:

- Google використовує системи центрального та виконавчого пристрою в своїх розумних будинках за допомогою платформи Google Nest. Вона включає в себе пристрої для управління освітленням, термостатами, камери спостереження та сигналізацію, що підключені до центрального хаба (Google Nest Hub). Цей хаб

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

взаємодіє з виконавчими пристроями через бездротові технології, такі як Wi-Fi та Bluetooth[21].

- Amazon використовує систему Alexa(рис.1.15), яка є центральним пристроєм для управління бездротовими розумними пристроями в будинку, такими як освітлення, замки, термостати і навіть побутова техніка. Виконавчі пристрої взаємодіють з Alexa через Wi-Fi та Zigbee, а також мають можливість управління через голосові команди або мобільні додатки[22].



Рис.1.15. Система Amazon Alexa.

- Samsung розробила SmartThings — платформу для розумного дому, де центральний пристрій (SmartThings Hub) підключає до системи різні виконавчі пристрої, такі як сенсори, реле, камери спостереження, розумні розетки та інші компоненти. SmartThings підтримує Wi-Fi, Zigbee, Z-Wave та Bluetooth для бездротового зв'язку[23].

- Xiaomi з її платформою Mi Home використовує систему Центральний-виконавчий пристрій для управління розумними пристроями у будинку. Mi Hub (центральний пристрій) взаємодіє з різними виконавчими пристроями, такими як сенсори руху, розумні лампочки, камера відеоспостереження через Wi-Fi або Zigbee[24].

- Система Аїах(рис.1.15) має архітектуру, де центральний пристрій (центрально) виконує роль керуючого елемента, а виконавчі пристрої — це

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

різноманітні датчики, камери, розетки, які відповідають за виконання команд і збору даних. Компанія “Ajax Systems” розробила протоколи як для бездротового зв’язку(наприклад Jeweller, Wings), так і для дротового(Fibra). Це дозволяє створювати ефективні та гнучкі системи безпеки. Виконавчі пристрої у цій системі - це датчики, що розроблені під окремі вимоги та призначені для детекції різного роду проблем. Наприклад датчики руху - для виявлення людей та об'єктів у визначених зонах, датчики відкриття дверей/вікон - для контролю за безпекою входів у будівлю, камери відеоспостереження - для запису та моніторингу відео в реальному часі, датчики диму, газу, температури - для виявлення пожеж або витоків газу, сирени та інші звукові пристрої - для активації сигналізації[25].



Рис.1.15. Рішення використання принципу “центрально-датчик” від компанії “Ajax Systems”.

Висновки до розділу 1

У сучасних вбудованих системах мікроконтролери та радіопередавачі стали важливими елементами для реалізації бездротового зв'язку та автоматизації різноманітних пристроїв. Вони використовуються для створення інтегрованих рішень у таких сферах, як IoT, розумні будинки, промислова автоматизація та автономні системи. Мікроконтролери, завдяки своїй компактності та багатофункціональності, дозволяють інтегрувати обчислювальні потужності та управлінські функції в найрізноманітніші пристрої.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Основною технологією, що підтримує ці системи, є радіопередавачі, які забезпечують бездротову передачу даних. У їх роботі активно використовуються методи модуляції, такі як FSK, ASK, PSK та LoRa для довготривалих зв'язків. Інтеграція GPS у вбудовані системи дозволяє реалізувати точне відстеження місцезнаходження пристроїв і забезпечує можливість автономної роботи без необхідності підключення до інфраструктури.

Крім того, технології псевдовипадкового налаштування і TDMA активно використовуються для забезпечення надійної та стійкої передачі даних в умовах радіоінтерференції, що важливо для бездротових комунікацій у мобільних мережах, IoT, Wi-Fi і LoRa. Технологія GPS додає можливість інтеграції навігаційних функцій в автономні системи та рішення для точного відстеження та геолокації.

Усі ці технології разом дозволяють створювати високофункціональні, надійні та енергоефективні системи, що є основою для подальшого розвитку автоматизації та бездротових технологій у сучасних вбудованих пристроях.

Проте існуючі системи розроблені виключно під вузьконаправлене використання, та втрачають головну перевагу - універсальність. Тому постала задача в створенні системи, що може бути застосована для різних нестандартних задач. Як для керування освітленням, так і для керуванням охоронними сенсорами, як для цивільного використання, так і для подвійного призначення.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

2 АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ КЕРУВАННЯ СЕНСОРАМИ ПРИСУТНОСТІ ЛЮДИНИ

Важливим етапом є розгляд та узагальнення початкових умов та вимог, які повинні бути враховані при проектуванні та експлуатації системи керування масивом сенсорів.

Загалом система складається із 1 централі та набору однотипних виконавчих датчиків, тому в табл.2.1 наведено вимоги, розділені для кожного пристрою окремо.

Таблиця 2.1

Параметр	Значення	
	Для централі	Для виконавчого пристрою
Радіус спрацювання, м	10–15	
Значення помітної потужності на відстані 100–150, дБ	–110	
Опір сенсора, що підключений, до виконавчого пристрою, Ом	$\leq 720\text{год.}(30\text{днів}) -$	1–1.5
Вірогідність помилки системи	10^{-12}	
Напруга живлення, В	± 3.7	
Час життя від одного заряду акумулятора, год.	$\leq 24\text{год.}$	$\leq 720\text{год.}(30\text{днів})$

підтримують як традиційний бездротовий зв'язок, так і енергоефективні бездротові з'єднання.

- Широкий спектр інтерфейсів: підтримуються SPI, I2C, UART, CAN, PWM, I2S, що дає можливість підключати безліч різних периферійних пристроїв, таких як сенсори, дисплеї, реле та інші.

- Енергоефективність: Завдяки різним режимам енергозбереження, ESP32 є ідеальним рішенням для портативних та автономних пристроїв, де важливий тривалий час роботи від батареї.

- Масштабованість: Цей мікроконтролер підтримує роботу з багатьма сенсорами та компонентами в реальному часі, що робить його підходящим для складних IoT-систем, таких як розумні будинки, автоматизація промислових процесів, системи контролю доступу тощо [26].

Враховуючи всі вищезгадані переваги цього мікроконтролера - його було обрано для проектування централі, а саме версію ESP-WROOM-32(рис.2.2), характеристики якого, наведені у Додатку А[26, 27].



Рис.2.2. Мікроконтролер ESP-WROOM-32[28].

Для можливості запису координат місцезнаходження окремого датчику та зчитування поточного положення централі під час штатної роботи системи, було обрано GPS-модуль NEO-6M - популярний GPS-модуль, виготовлений компанією u-blox, який використовується для точного визначення географічних координат. Він зображений на рис.2.3. Основні характеристики наведені в Додатку Б.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33



Рис.2.3. GPS-модуль NEO-6M[29].

Основа для реалізації бездротової системи master-slave - це бездротовий радіомодуль. Ідеальним рішенням, що вирізняється високим діапазоном зв'язку, низьким енергоспоживанням та простотою інтеграції став модуль NRF24L01+, який працює на частоті 2.4 ГГц та підтримує швидкість передачі даних до 2 Мбіт/с. Він використовує стандартний інтерфейс SPI для підключення до мікроконтролера. Основні характеристики та переваги модуля наведено в Додатку В[30].



Рис.2.4. Радіомодуль NRF24L01+[31].

Важливим елементом UX(User Experience - досвід користування) є світло-звукова індикація, що потрібна для сигналізації про внутрішні події та помилки, що виникають під час штатної роботи системи. Саме для цього, під час проектування схемотехніки централі, у перелік електронних компонентів були додані RGB-світлодіод(зображений на рис. 2.5), зі спільним катодом та активний п'єзоелектричний буюзер(зображений на рис.2.6).

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

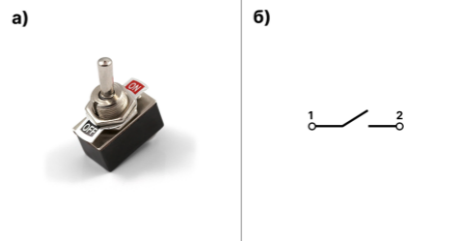


Рис.2.8. а - Зображення бістабільного двохпозиційного тумблера, б - його позначення на схемі електричній принциповій[34].

Об'єднавши всі елементи в один пристрій, отримаємо схему електричну принципову, що зображена в Додатку 5.

2.1.2 Виконавчий пристрій (далі виконавчий модуль(VM) або slave)

Перед початком проектування та роботи над схемою електричною принциповою виконавчого модуля, варто, для аналітичного огляду та оцінки валідності обраних електронних компонентів, скласти узагальнену структурну схему роботи цього девайсу (рис.2.9).

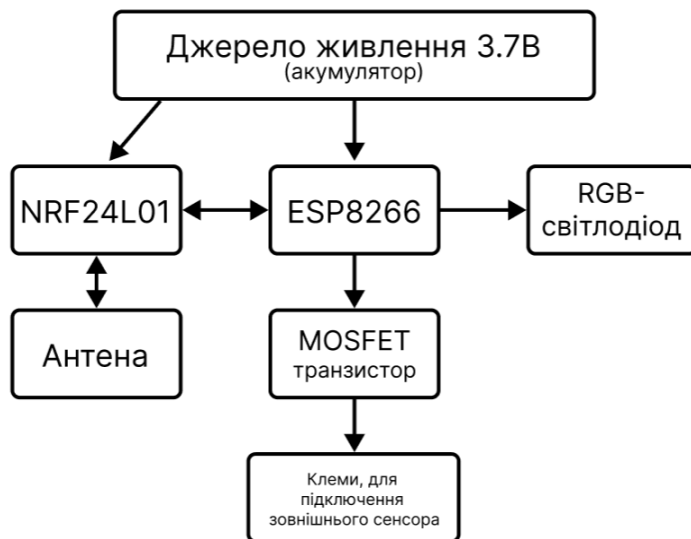


Рис.2.9. Узагальнена структурна схема роботи виконавчого модуля в системі.

Виконавчий модуль не потребує такої ресурсності та потужності мікроконтролера для обробки інформації та виконання функції в окремих

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

потоках, натомість має бути більш енергоефективним, оскільки знаходиться далеко від постійного людського доступу. Для цього ідеально підходить популярний мікроконтролер ESP8266, розроблений компанією Espressif Systems. Характеристики цього мікроконтролера узагальнено в Додатку Д.

Для зв'язку із центральним пристроєм, в якості радіомодуля був обраний NRF24L01+(див. п.2.1.1.). Його характеристики наведені в Додатку В.

Також для відображення заряду батареї при першому запуску VM, в схемі передбачений RGB-світлодіод зі спільним катодом, який застосовується лише раз для енергоефективності та продовження часу життя пристрою від акумуляторної батареї.

Для керування активністю зовні-підключеного сенсора, на платі розміщений MOSFET типу IRLZ44N, що зображений на рис.2.10 - N-channel транзистор, який добре підходить для невеликих навантажень і має низький $R_{ds(on)}$ (мінімальні втрати на активному каналі). Він має низьке споживання енергії і швидку реакцію в порівнянні з механічними реле.

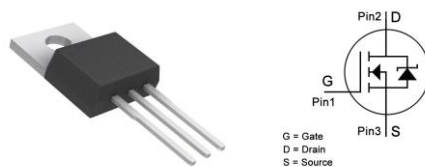


Рис.2.10. Зображення n-канального mosfet транзистора IRLZ44N та його позначення на схемі електричній принциповій[35].

Для дотримання стабільної роботи в польових умовах із підвищеною вологістю, для підключення сенсорів варто використовувати пило- та вологозахисні клеми типу Phoenix Contact - "PUSH IN" серії. Вигляд такої елемної колодки для монтажних плат показаний на рис.2.11.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37



Рис.2.11. Зовнішній вигляд клемної колодки Phoenix Contact - "PUSH IN" серії для монтажних плат.

Об'єднавши всі електронні компоненти в один пристрій, отримаємо схему електричну принципову, що зображена в Додатку 7.

2.2 Проєктування друкованих плат та розробка корпусу

Проєктування друкованих плат (ДП) та розробка корпусу є важливими етапами в розробці будь-якої електронної системи, оскільки від цього залежить не тільки функціональність пристрою, але й його надійність, довговічність та зручність у використанні. В даному підрозділі детально розглянуто процес проєктування друкованих плат для центрального та виконавчого пристроїв, а також розробку корпусу, що забезпечує належний захист від зовнішніх факторів, таких як волога, пил і механічні пошкодження

2.2.1 Складання специфікації-переліку компонентів для централі і виконавчого датчику

В Додатку Ж наведено специфікацію компонентів для центрального пристрою (централі) та виконавчого датчику, що включає в себе всі основні елементи, необхідні для реалізації функцій, таких як керування сенсорами, обробка даних, бездротова комунікація та управління зовнішніми пристроями.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

2.2.2 Вибір компоновання та схеми

Для початку необхідно визначити взаємне розташування на платі. Це включає в себе мікроконтролери, радіомодулі, сенсори, живлення та інші компоненти. Вибір компоновання має на увазі врахування таких факторів:

- Розмір платформи: Важливо врахувати обмеження щодо розмірів друкованої плати, особливо коли проект має компактні розміри.

- Схема з'єднань: Для кожного компонента потрібно визначити необхідні порти для підключення до інших компонентів. Це включає GPIO порти, інтерфейси (SPI, I2C, UART), а також живлення.

- Розташування компонентів: Компоненти повинні бути розташовані так, щоб забезпечити оптимальний потік сигналів, мінімальні шляхи з'єднань та зменшити перешкоди між сигналами.

- Важливим аспектом проектування плати, що складається із готових модулів, є розміщення на платі не за принципом “плата-бутерброд”. Оскільки це може призвести до завад при роботі системи.

2.2.3 Розведення плати в програмі для централі

У цьому підпункті детально розглядається процес розведення друкованої плати (PCB) для центрального пристрою в системах керування. Для цього буде використовуватись програмне забезпечення EasyEDA[36]. Перший етап - правильне розташування електронних компонентів. Вони повинні бути розташовані так, щоб забезпечити мінімальні перешкоди та оптимальні шляхи для електричних сигналів. Важливо враховувати короткі шляхи для сигналів і добре екранування для зменшення шуму. Приклад розташування компонентів для центрального пристрою зображено на рис. 2.12.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Радіо- та GPS-модулі будуть винесені окремими платами для зручності розташування всередині корпусу та відсутності взаємного впливу при роботі.

Після завершення проектування та розведення плати важливо провести перевірку схеми та симуляцію роботи плати:

1. DRC (Design Rule Check): перевірка на відповідність вимогам для мінімальних відстаней між доріжками, компонентами та іншими критеріями.

2. ERC (Electrical Rule Check): перевірка на правильність підключень та відсутність коротких замикань.

3. 3D модель: перевірка створеної плати в 3D-форматі для візуалізації та оцінки її компоновки (рис.2.14).

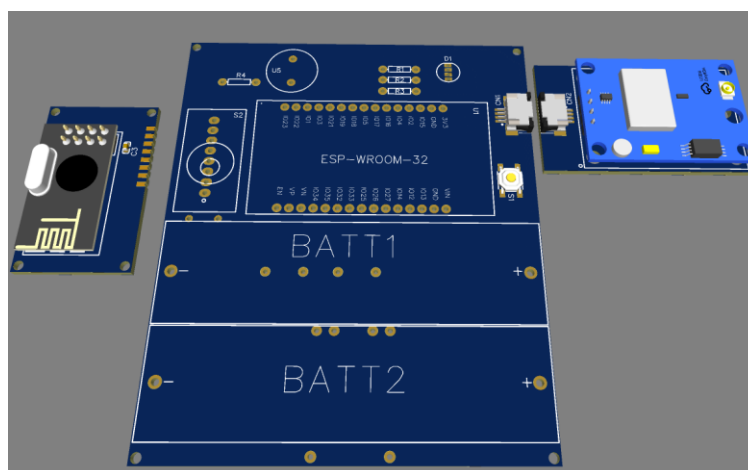


Рис.2.14. Вигляд готової друкованої плати центрального модуля в 3Д.

2.2.4 Розведення плати в програмі для виконавчого пристрою

Алгоритм дизайну й моделювання друкованої плати для виконавчого модуля ідентичний до центрального. Єдина відмінність - строга вимога до розміру розробленого пристрою. Оскільки він має легко інтегруватися в будь-яку обрану кінцевим користувачем систему, то повинен мати невеликі габарити.

Моделювання починається із розташування елементів, так як зображено на рис.2.15.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

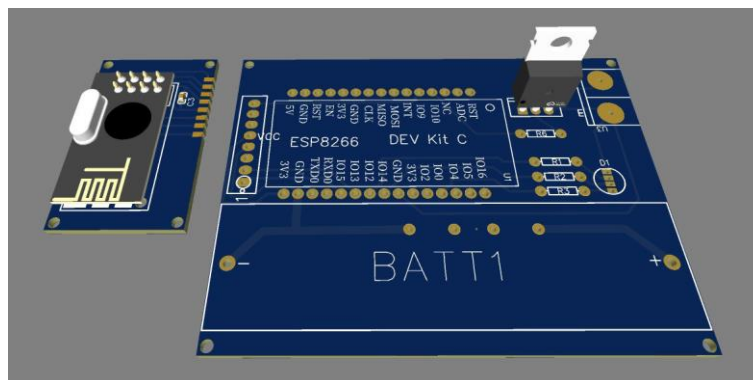


Рис.2.17. Вигляд готової друкованої плати центрального модуля в 3Д.

2.2.5 Дотримання початкових вимог виготовленими платами

Для стабільної роботи системи в польових умовах, важливо врахувати пило- та волого захисту плати у разі порушення герметичності корпусу. Пил, який може накопичуватися на платах та контактних з'єднаннях, що викликає корозію або короткі замикання. Волога, що може проникати в плати також може спричинити утворення корозії, виведення електричних з'єднань з ладу або пошкодження компонентів.

Для забезпечення пило- та вологозахисту друкованих плат застосовуються різні технології та матеріали. Один з найбільш поширених способів захисту плат від вологи та пилу — конформне покриття. Це тонкий шар захисного матеріалу, який наноситься на поверхню плати для запобігання проникненню вологи, пилу та інших забруднень. Типи конформних покриттів:

- Силіконові покриття: забезпечують хорошу еластичність і стійкість до вологи.
- Парафінові покриття: добре захищають від пилу, але менш стійкі до вологи.
- Акрилові покриття: використовуються для захисту від вологи та пилу, добре висихають і надають гарну адгезію.

Конформне покриття зазвичай наноситься розпиленням або зануренням плати в захисний розчин(рис.2.18).

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43



Рис.2.18. Приклад конформного покриття на електронних компонентах[37].

Для друкованих плат, які містять рекомендації щодо допустимих діапазонів товщини покриття залежно від типу використовуваного матеріалу, стандарти товщини визначаються міжнародними нормами, такими як IPC-A-610. Мінімальна конформна товщина покриття — це найтонший шар, який ефективно захищає компоненти. Мінімальна товщина забезпечує безперервний захисний бар'єр без отворів чи щілин, які можуть знизити ефективність захисту. Натомість максимальна конформна товщина покриття визначає найбільший шар, який можна нанести без шкоди для функціональності або продуктивності електронної плати[37].

Стандарти виробництва електроніки, зокрема такі, як IPC (Association Connecting Electronics Industries), надають загальні вказівки щодо мінімальної товщини конформного покриття, враховуючи тип матеріалу та передбачуване застосування. Однак деякі галузі можуть розробляти власні стандарти або керуватися вимогами клієнтів для досягнення специфічних показників продуктивності та надійності[37].

2.2.6 Процес розробки корпусу для центрального та виконавчого пристроїв

У цьому пункті розглядається процес розробки корпусу для центрального та виконавчого пристроїв в вбудованих системах. Створення корпусу є важливим етапом, оскільки він не тільки виконує функцію захисту внутрішніх компонентів пристрою, але і забезпечує ергономічність, надійність та

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

естетичний вигляд пристрою. Крім того, корпус має бути спроектований таким чином, щоб не порушувати електричні характеристики пристрою, наприклад, не створювати зайвих перешкод для сигналу або не збільшувати температуру внутрішніх компонентів.

Вибір корпусу:

Матеріал для корпусу має бути вибраний з урахуванням кількох факторів:

1. Механічна міцність: корпус повинен бути здатний витримувати зовнішні механічні навантаження та удари.

2. Теплові характеристики: важливо забезпечити достатнє охолодження внутрішніх компонентів пристрою, щоб уникнути перегріву, особливо в компактних корпусах.

3. Вартість: матеріал повинен бути економічно вигідним для масового виробництва.

Процес проектування корпусу починається з створення 3D-моделі в спеціалізованому програмному забезпеченні для проектування, такому як SolidWorks[38].

Важливо виокремити основні етапи розробки корпусу:

1. Створення базової форми. Корпус проектується з урахуванням розмірів та форми внутрішніх компонентів (мікроконтролерів, радіопередавачів, датчиків, роз'ємів тощо).

2. Розміщення роз'ємів та кнопок. Тобто визначаються місця для підключення зовнішніх пристроїв, наприклад, USB-роз'єм в центральному модулі, кнопка реєстрації, тумблер тощо.

Розроблена прототипна 3Д модель готового корпусу для центрального та виконавчого модулів зображена на рис.2.19.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

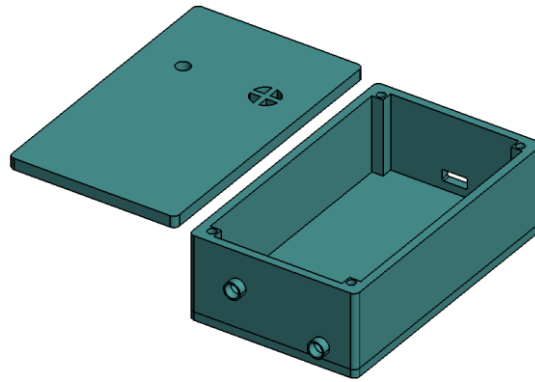


Рис.2.19. Вигляд готового корпусу центрального модуля.

3. Екранування: для радіоелектронних пристроїв, що працюють з радіопередавачами, додаються металеві екрани або металеві елементи для забезпечення захисту від електромагнітних завад.

Після проектування моделі корпусу наступним етапом є його виготовлення. Існує кілька методів виготовлення корпусів, які залежать від матеріалу та вимог до точності, проте найвигіднішим варіантом є 3D-друк. Використовується для прототипування та виготовлення малих партій корпусів. Цей метод дозволяє створити точну копію моделі з можливістю коригувати дизайн на етапі виготовлення. Може бути використаний для виготовлення корпусів з пластику ABS, PLA, PETG. Трафаретний друк використовується вже для виготовлення корпусів з пластику або металів для більших партій продукції.

Корпус, що має рейтинг IP6X, є повністю пилонапроникним. Це означає, що він повністю захищений від потрапляння будь-яких твердих частинок, включаючи пил і бруд. Цей рівень захисту особливо важливий для пристроїв, які працюють у середовищах з великою кількістю пилу, таких як промислові об'єкти, будівельні майданчики або сільськогосподарські угіддя. Також здатний витримати струмені води, які подаються з будь-якого напрямку. Це означає, що він може бути використаний у вологих умовах або в ситуаціях, коли на пристрій може потрапляти вода (наприклад, в умовах дощу або вологого середовища), без ризику пошкодження внутрішніх компонентів. Для дотримання цього стандарту,

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

в усі отвори корпусу мають вставлятись спеціальні резинові проставки, що допоможуть запобігти потраплянню вологи у середину. Таку технологію використовують у лінійці бездротових вуличних датчиків компанії Ajax Systems: MotionCam Outdoor (рис.2.20), MotionProtect Outdoor, StreetSiren, StreetSirenDoubleDeck і тд. Готовий корпус зображений на рис.2.21.



Рис. 2.20. Вуличний датчик компанії Ajax Systems MotionCam Outdoor, що має сертифікат стандарту IP56.

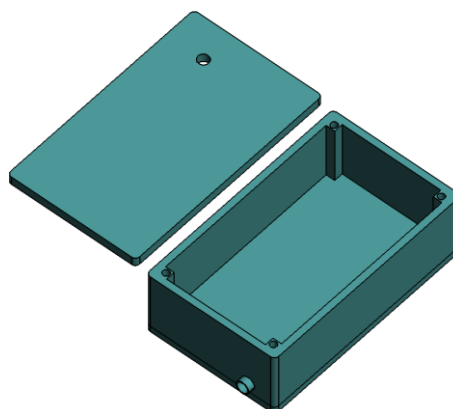


Рис. 2.21. Вигляд готового корпусу виконавчого модуля.

2.3 Принципи організації бездротового зв'язку між пристроями

Принципи організації бездротового зв'язку між центральним і виконавчим пристроєм включають вибір відповідної технології, таких як NRF24L01+, застосування протоколу TDMA для уникнення колізій і ефективного використання радіочастотного спектра, а також частотне переналаштування

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

робочої частоти для підвищення завадостійкості. Надійність зв'язку забезпечується через перевірку контрольних сум, шифрування даних та механізм підтвердження отримання. Всі ці принципи дозволяють створити стабільну та безпечну систему для бездротового керування пристроями, що працюють у різних умовах.

2.3.1 Розрахунок довжини антени

Для розрахунку довжини антени, використаємо стандартну формулу:

$$L = \frac{c}{f \cdot n},$$

де L – довжина антени(в метрах), c – швидкість світла($3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$), f – частота сигналу(в Гц), n – коефіцієнт, що залежить від типу антени:

$n = 2$, для дипольної антени

$n = 1$, для монопольної антени

Обрахуємо довжину антени для GPS-модуля, що обраний для централі, використавши формулу 2.1. Відомі початкові параметри:

$f \approx 1.575 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ (для GPS L1-сигналу)

$n = 2$ (для дипольної антени)

Розрахунок:

$$L_{central_GPS} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.575 \cdot 10^9 \cdot 2} = 0.0952(\text{м}) = 9.52(\text{см}).$$

Розрахуємо довжину антени для модулю NRF24L01+ для централі. Відомі початкові параметри:

$f \approx 2.4 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ (стандартна частота для NRF24L01+).

$n = 1$ (для монопольної антени).

Розрахунок:

$$L_{central_NRF} = \frac{3 \cdot 10^8}{2.4 \cdot 10^9 \cdot 1} = 0.125(\text{м}) = 12.5(\text{см}).$$

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Обчислимо довжину антени для виконавчого пристрою модулю NRF24L01+. Відомі початкові параметри:

$$f \approx 2.4 \cdot 10^9 \text{ Гц} \text{ (стандартна частота для NRF24L01)}$$

$$n = 1 \text{ (для монопольної антени)}$$

Так як на виконавчому пристрої та на централь використовується однакові NRF-модулі, що працюють на однаковій частоті, то можна припустити, що:

$$L_{execute_NRF} = L_{central_NRF} = 0.125(\text{м}) = 12.5(\text{см}).$$

2.3.2 Обчислення хвильового імпедансу антени

Хвильовий імпеданс антени можна визначити за допомогою формули, яка залежить від геометрії антени та матеріалу, з якого вона виготовлена. Ось загальна формула:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{4h}{d} + \sqrt{\left(\frac{4h}{d}\right)^2 + 1}\right),$$

де Z_0 – хвильовий імпеданс антени (в Омах), ϵ_r – діелектрична проникність матеріалу (для повітря, наприклад, $\epsilon_r \approx 1$), h – висота провідника над підкладкою (в метрах), d – ширина мікροстрічки(в метрах).

Припустимо, у нас є мікροстрічкова антена з наступними параметрами:

- $\epsilon_r = 4.4$ (для матеріалу FR4)
- $h = 1.6\text{мм}$
- $d = 2\text{мм}$

Підставимо значення у формулу:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{4.4}} \ln\left(\frac{4 \cdot 1.6}{2} + \sqrt{\left(\frac{4 \cdot 1.6}{2}\right)^2 + 1}\right)$$

$$Z_0 = 28.6 \ln(3.2 + \sqrt{10.24 + 1})$$

$$Z_0 \approx 28.6 \cdot 1.876 \approx 53.7(\text{Ом})$$

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

2.3.3 Розрахунок коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ)

Коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ або VSWR, від англ. Voltage Standing Wave Ratio) визначає, наскільки добре система передає потужність, яка може відобразитися назад через непідходящий імпеданс антени або кабелю. Чим нижчий КСХ, тим ефективніше відбувається передача сигналу. КСХ можна визначити за допомогою наступної формули:

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|},$$

де $|\Gamma|$ – це коефіцієнт відбиття (Reflection Coefficient), що обчислюється як:

$$|\Gamma| = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0},$$

де Z_L – імпеданс антени, Z_0 – імпеданс кабелю або середовища.

$$SWR = \frac{1 + 0.231}{1 - 0.231} = \frac{1.231}{0.769} \approx 1.6.$$

2.3.4 Дослідження використання матеріалу антени

Матеріал антени напряму впливає на її ефективність, чутливість та довговічність. Наведемо перелік основних типів матеріалів для антен, що використовуються в радіозв'язку:

1. Мідна антена. Один з найпоширеніших матеріалів для антен. Мідні антени забезпечують низький опір і високу провідність, що робить їх ефективними для широкого спектра частот.

2. Алюмінієва антена. Легкий та дешевий матеріал, який часто використовується для антен з меншою вартістю. Алюміній має більш високу ступінь корозійної стійкості, ніж мідь.

3. Золота антена (золоте покриття). Золото має дуже високу провідність, тому антену, покриту золотом, можна використовувати в критичних застосуваннях, де необхідна максимальна стабільність роботи і довговічність.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

4. Нержавіюча сталь. Використовується для антен, які мають підвищені вимоги до міцності. Вона менш проводима, але забезпечує хорошу механічну стабільність і стійкість до атмосферних умов.

5. Пластик з металевим покриттям (наприклад, позолота або алюмінієве покриття). Легкі пластикові антени з металевим покриттям використовуються в бюджетних і малогабаритних пристроях.

Для оптимального вибору матеріалу антени, складемо порівняльну табл.2.3:

Таблиця 2.3

Матеріал	Переваги	Недоліки
Мідь	<ul style="list-style-type: none"> - Висока ефективність - Добра провідність - Відносно низька ціна 	<ul style="list-style-type: none"> - Схильність до окислення при високій вологості
Алюміній	<ul style="list-style-type: none"> - Легкість - Стійкість до корозії - Добра доступність і низька ціна 	<ul style="list-style-type: none"> - Вищий опір, ніж у міді
Золото(покриття)	<ul style="list-style-type: none"> - Висока провідність - Стійкість до корозії - Довговічність 	<ul style="list-style-type: none"> - Висока ціна - Менша міцність порівняно із іншими матеріалами
Нержавіюча сталь	<ul style="list-style-type: none"> - Механічна міцність - Стійкість до корозій - Відносно дешевий матеріал 	<ul style="list-style-type: none"> - Набагато менша провідність у порівнянні з міддю чи алюмінієм
Пластик із металевим покриттям	<ul style="list-style-type: none"> - Легкість - Низька вартість - Стійкість до корозії 	<ul style="list-style-type: none"> - Дуже низька механічна міцність

Для GPS антен зазвичай використовуються мідні або алюмінієві антени. Для більшості застосувань достатньо матеріалу з хорошою провідністю і невеликою вагою, тому мідь або алюміній будуть оптимальними виборами.

Для антен NRF24L01+ часто використовуються мідні або алюмінієві антени, так як ці матеріали забезпечують хорошу ефективність на частотах 2.4 ГГц, при цьому мають високу механічну міцність для використання в портативних пристроях.

2.3.5 Дослідження діелектричного покриття антени

Використання діелектричного покриття на антах зумовлене збільшенням стійкості до корозії, покращення механічних характеристик та стабільності роботи в агресивних умовах. Такі покриття не проводять електричних струм, проте виконують захисну функцію, що дозволяє збільшити термін служби антен, а також покращити в окремих випадках їх ефективність.

Наведемо найбільш часто використовувані типи діелектричних покриттів антен:

1. Полімерні покриття (наприклад епоксидні або поліуретанові смоли).
2. Керамічні покриття(наприклад оксидні покриття). Керамічні покриття використовуються для захисту антен від корозії та механічних пошкоджень. Вони мають високу термостійкість і добре працюють при великих температурах.
3. Тефлонове (PTFE) покриття. Тефлон є одним із найпоширеніших діелектричних матеріалів, який використовується для захисту антен. Він має відмінні властивості термостійкості, а також низький коефіцієнт втрат для мікрохвильових сигналів.
4. Силіконове покриття. Силікон — це інший популярний матеріал для захисту антен, особливо коли потрібно забезпечити високу гнучкість та стійкість до екстремальних температур.

Сформуємо порівняльну табл.2.4 для аналізу матеріалів:

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Таблиця 2.4

Покриття	Переваги	Недоліки	Вартість
Полімери (епоксид, поліуретан)	Захист від корозії, стійкість до механічних пошкоджень	Зниження ефективності, чутливість до температур	Низька
Кераміка	Висока термостійкість, стійкість до агресивних середовищ	Зменшення ефективності, висока ціна	Середня
Тефлон(PTFE)	Низькі втрати сигналу, термостійкість	Висока ціна, складність нанесення	Висока
Силікон	Гнучкість, стійкість до температур	Не дуже хороші електричні властивості	Низька
Поіетилен, поліпропілен	Захист від вологи, механічна міцність	Зниження ефективності на високих частотах	Низька

Для GPS антен на частоті 1.575 ГГц і для NRF24L01 на 2.4 ГГц найкращими варіантами для діелектричного покриття є Тефлон (PTFE) і Поліетилен (PE). Тефлон є ідеальним вибором для мінімальних втрат сигналу на високих частотах, тоді як Поліетилен буде більш економічним варіантом для менших вимог до ефективності.

2.3.6 Дослідження взаємного впливу антен GPS та NRF під час паралельної роботи обох систем

Для того, щоб зрозуміти, чи є взаємовплив між GPS-антеною та NRF-антеною, потрібно врахувати такі фактори, як: частота роботи, тип антени, геометричні характеристики, потужність передачі, а також природні і штучні перешкоди. Проаналізуємо основні аспекти впливу, включаючи частотний діапазон, ізоляцію між антенами і вплив на якість зв'язку.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

1. Частоти використання. GPS L1-сигнал працює на частоті 1.575 ГГц, в той час як радіомодуль NRF24L01+ працює на частоті 2.4 ГГц. Їхні частоти не співпадають і знаходяться досить далеко одна від одної, тому безпосередній взаємовплив сигналів від антен з точки зору частотного діапазону малоймовірний. Проте в реальних умовах можуть виникати перешкоди через ширину смуги та взаємний вплив на сигнали, зокрема якщо антену для GPS і для NRF24L01 розташувати в близькості одна від одної або використовується загальний корпус для обох модулів. Розрахуємо відстань, між антенами, яка мінімізує їхній взаємний вплив(інтерференцію):

$$I = \frac{P_{signal2}}{P_{signal1}},$$

де $P_{signal1}$ – потужність сигналу першої антени (GPS), $P_{signal2}$ – потужність сигналу другої антени (NRF24L01+).

Для зручності, ізоляція вимірюється в децибелах (дБ)

$$I_{dB} = 10\lg\left(\frac{P_{signal2}}{P_{signal1}}\right).$$

Для безпечного взаємного впливу сигналів, ізоляція повинна бути не менше 20–30 дБ для мінімізації перешкод.

$$I_{dB} = 10\lg\left(\frac{P_{signal2}}{P_{signal1}}\right) = 30.$$

Відомо, що для мікрохвильових частот ізоляція залежить від відстані, тому для приблизного розрахунку використаємо залежність радіусної ізоляції від відстані d :

$$I_{dB} = 20\lg\left(\frac{d}{d_0}\right),$$

де d – відстань між антенами, d_0 – референсна відстань, на якій ізоляція становить 0 дБ.

Отримаємо рівняння:

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

$$30 = 20 \lg\left(\frac{d}{1}\right),$$

$$\lg(d) = \frac{30}{20} = 1.5 \Rightarrow d = 10^{1.5} = 31.62(\text{м}).$$

Проте антени GPS і NRF24L01+ розташовані на одному пристрої, тому забезпечити відстань 30 м між ними фізично неможливо. Для цього доведеться застосовувати інші методи для мінімізації взаємного впливу сигналів. Ось кілька можливих підходів:

1. Екранування антен.

Екранування може допомогти знизити взаємний вплив між антенами, якщо вони знаходяться в одному пристрої. Можна використати металеві екрани або металізовані оболонки для кожної антени, щоб ізолювати їх одну від одної. Металеві екрани з алюмінію, міді або сталеві пластини допоможуть зменшити взаємне наведення.

2. Розташування антен на різних рівнях.

Якщо антену GPS та антену NRF24L01+ розташовувати на різних рівнях або з різними кутами нахилу, можна досягти покращеної ізоляції через фізичне відділення. Наприклад GPS-антену розмістити на верхній частині пристрою (на даху або у верхній частині корпусу), а NRF — на нижній.

3. Програмні обмеження.

Для того, щоб розділити роботу цих двох модулів, варто відмовитись від концепції одночасної роботи в паралельних потоках, натомість притриматись послідовності у визначенні поточного положення за допомогою GPS та надсилання команд, або ж прослуховування ефіру радіо-модулем.

4. Регулювання потужності NRF24L01.

Враховуючи початкові умови, що зазначені в табл.2.1, не доцільно використовувати максимальну потужність радіо-модуля, оскільки це впливатиме на енергоспоживання, на вірогідність виявлення системи на відстані > 150 м. за допомогою частотних зчитувачів ефіру та на вплив на GPS-модуль.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

2.4 Розрахунок енергоспоживання системи. Підбір акумуляторів

Для системи керування масивом сенсорів, вибір акумуляторної батареї є критично важливим для забезпечення стабільної роботи у польових умовах. Задача полягає в тому, щоб акумулятор забезпечував достатньо тривалий час роботи, при цьому не перевищуючи вимог до розміру і ваги пристрою. Вибір акумулятора також залежить від споживаної потужності всіх компонентів системи, зокрема мікроконтролера, сенсорів та радіозв'язку.

Основні параметри акумулятора:

1. Ємність акумулятора (мА за год або А за год) - визначає, скільки енергії акумулятор може зберігати.
2. Напруга акумулятора (В) - повинна відповідати вимогам живлення для мікроконтролера та інших компонентів.
3. Тип акумулятора - вибір між літій-іонними (Li-ion) або літій-полімерними (Li-Po) акумуляторами, що відрізняються енергетичною щільністю, вагою та розмірами.
4. Робочі температури - в залежності від умов експлуатації (поля, приміщення, відкриті території).

2.4.1 Теоретичний розрахунок часу роботи системи від акумулятора в активному режимі

Централь. Вхідні дані:

1. ESP32: $P_{ESP32} = 250(мА)$ - активний режим.
2. NRF24L01+: $P_{NRF24L01+} = 20(мА)$ - активний режим.
3. GPS (NEO-6M): $P_{GPS} = 30(мА)$ - активний режим.
4. Кнопка: практично не споживає потужність в режимі очікування.
5. Тумблер: аналогічно кнопці.
6. RGB світлодіод: $P_{RGB} = 20(мА)$ - на середній яскравості.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Розрахунок для виконавчого модуля:

$$T_{Exec1} = \frac{2500 \cdot 10^{-3}}{290 \cdot 10^{-3}} = \frac{2500}{290} = 8.62(\text{год}).$$

2.4.2 Теоретичний розрахунок часу роботи системи від акумулятора враховуючи режими енергозбереження та інші втрати. Підбір оптимального акумулятора

Тепер, врахуємо всі аспекти роботи системи, враховуючи програмний DeepSleep, а також втрати на інших електронних компонентах. Для розрахунку часу роботи від акумулятора необхідно детально врахувати споживану потужність кожного з компонентів системи, періоди їх активності і сну. Будемо використовувати літій-іонні акумулятори типу 18650 з ємністю 2500 мА · год для кожної банки, і, враховуючи, що їх два, отримаємо 5000 мА · год на два акумулятори.

Енергоспоживання та час роботи центрального модуля

Процес ініціалізації для центрального модуля триває від 30 с до 2 хв, що напряму залежить від швидкості налаштування на роботу модуля GPS.

- ESP32:

В момент ініціалізації споживає 150-250(мА).

$$P_{ESP32_INIT} = 200 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2}{60} = 6 \cdot 10^{-3} (A \cdot \text{год}) \text{—споживання в режимі}$$

ініціалізації.

В активному режимі ESP32 споживає приблизно 200(мА). Розглядаючи протокол TDMA, що пристосований під систему, можна порахувати час, в який мікроконтролер активний і не знаходиться в режимі сну.

$$\begin{aligned} T_{ESP_ACTIVE} &= T_{LOC} + T_{TX} + N \cdot T_{SLOT} = 30 + 50 + 20 \cdot N = \\ &= 80 + 20 \cdot N(\text{мс}), \end{aligned}$$

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

де N – кількість виконавчих модулів в системі. І тоді:

$$P_{ESP_WORK} = 200 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{T_{ESP_ACTIVE}}{3600} = \frac{0.2(80 \cdot 10^{-3} + 20N \cdot 10^{-3})}{3600} =$$

$$= (4.4 + 1.1N) \cdot 10^{-6} (A \cdot год).$$

Графік залежності споживання від кількості датчиків зображений на рис.2.22:

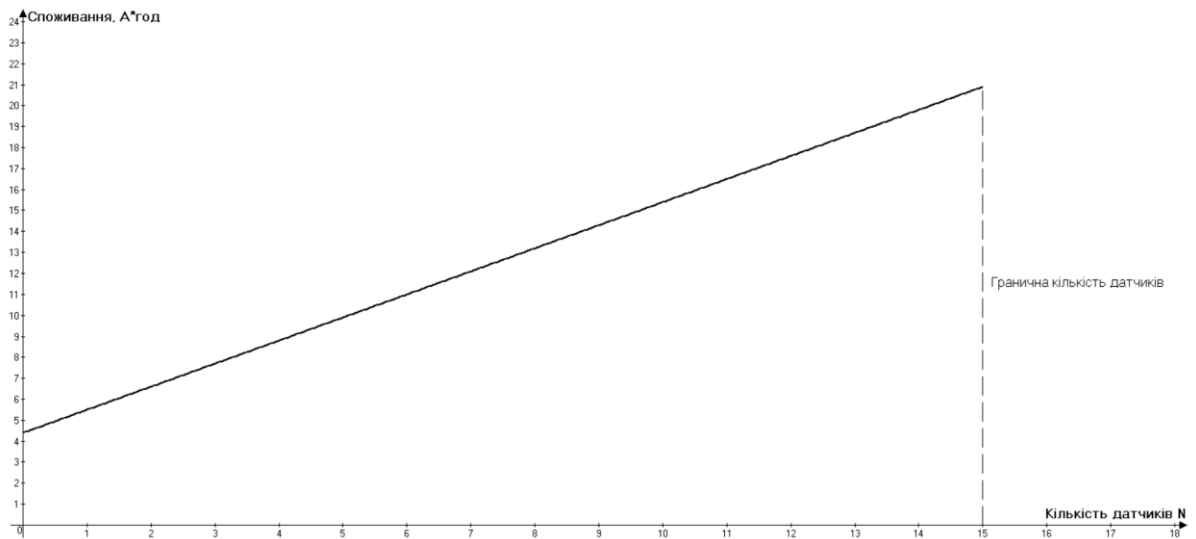


Рис.2.22. Графік залежності споживання централі від кількості виконавчих модулів в системі.

Для обрахунків оберемо значення 5 датчиків. Тоді:

$P_{ESP_WORK} = (4.4 + 1.1 \cdot 5) \cdot 10^{-6} = 9.9 \cdot 10^{-6} (A \cdot год)$ — споживання в робочому режимі за 1 цикл TDMA.

В режимі сну, споживання 10-20(мкА). Тоді обчислимо споживання в режимі DeepSleep:

$$T_{ESP_SLEEP} = T_{GUARD} + T_{PAUSE} \cdot N,$$

$$T_{ESP_SLEEP} = (10 + 5 \cdot 5) \cdot 10^{-3} = 35 \cdot 10^{-3} (с),$$

$$P_{ESP_SLEEP} = 15 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{T_{ESP_SLEEP}}{3600} = 15 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{35 \cdot 10^{-3}}{3600} = 1.04 \cdot 10^{-10} (A \cdot год).$$

- NRF24L01:

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Модуль NRF24L01+ споживає близько 10-15(мА) в режимі ініціалізації.

$$P_{NRF_INIT} = 12 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2}{60} = 0.4 \cdot 10^{-3} (A \cdot год) \quad \text{— споживання за час}$$

ініціалізації системи.

Надалі потужність залежить від порядкового номера циклу передачі пакету. Централь починає надсилати команду на мінімальній потужності, споживаючи 5-6(мА). На наступний цикл, якщо відповідь не була отримана, збільшує потужність до середньої, при цьому споживання збільшується до 7-9(мА), і при усіх наступних циклах переходить на надсилання на максимальному рівні потужності, споживаючи 11-13(мА). Графік залежності споживання від кількості циклів зображено на рис.2.23.

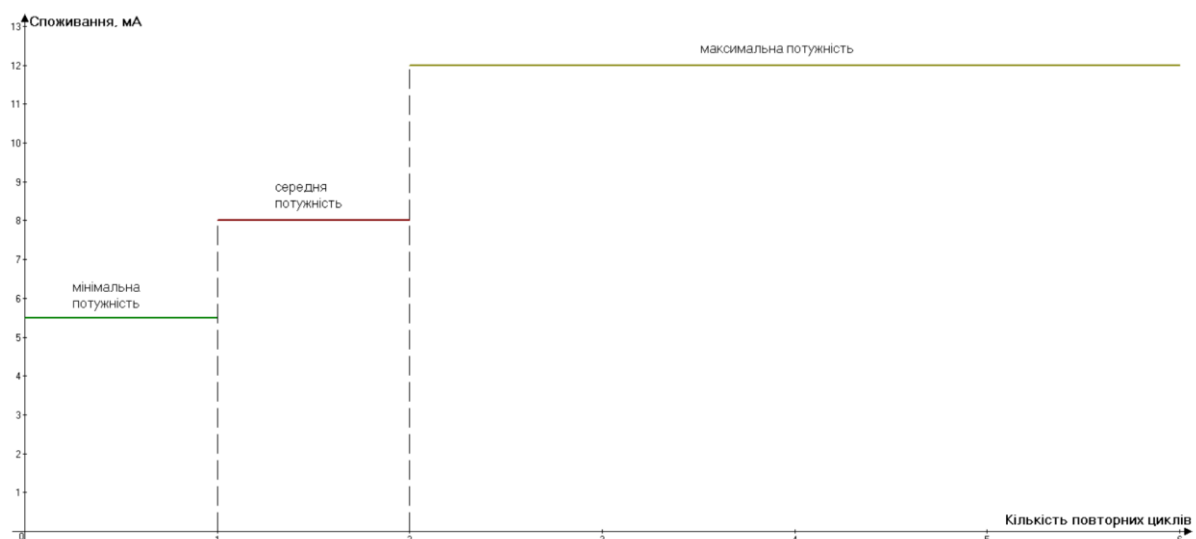


Рис.2.23. Графік споживання центрального модуля від кількості повторних циклів.

Для обрахунків, варто взяти ідеальні умови зашумленості ефіру, під час якого виконавчий модуль відразу надсилає команду-відповідь, при цьому модуль налаштовано на мінімальну потужність передачі. Обчислимо, враховуючи інтервали TDMA, час активного режиму NRF:

$$T_{NRF_ACTIVE} = T_{TX} + N \cdot T_{SLOT},$$

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

$$T_{NRF_ACTIVE} = 50 + 5 \cdot 20 = 150(\text{мс}),$$

$$P_{NRF_WORK} = 5.5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{T_{NRF_ACTIVE}}{3600} = 5.5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{150 \cdot 10^{-3}}{3600} = 2.29 \cdot 10^{-7} (\text{А} \cdot \text{год}) -$$

споживання в робочому режимі за 1 цикл TDMA.

Модуль NRF24L01 в режимі deep sleep споживає дуже мало енергії, а саме 1(мкА). Для обчислення енергоспоживання в режимі сну, варто визначити, який час модуль в ньому знаходиться:

$$T_{NRF_SLEEP} = T_{LOC} + T_{GUARD} + T_{PAUSE} \cdot N,$$

$$T_{NRF_SLEEP} = 30 + 10 + 5 \cdot 5 = 65(\text{мс}),$$

$$P_{NRF_SLEEP} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{T_{NRF_SLEEP}}{3600} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{65 \cdot 10^{-3}}{3600} = 1.8 \cdot 10^{-11} (\text{А} \cdot \text{год}).$$

- GPS(NEO-6M):

Під час ініціалізації, GPS споживає 40-50(мА).

$$P_{GPS_INIT} = 45 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2}{60} = 1.5 \cdot 10^{-3} (\text{А} \cdot \text{год}).$$

Цей модуль має найбільше споживання в системі, так як майже не має режиму енергозбереження і постійно опитує супутники. Процес опитування займає лише 20(мс). Споживана потужність при цьому рівна 30-40(мА).

$$P_{GPS_WORK} = 35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{20 \cdot 10^{-3}}{3600} = 1.94 \cdot 10^{-7} (\text{А} \cdot \text{год}).$$

В режимі паузи, модуль споживає 10(мА). При цьому час паузи вираховується за формулою:

$$T_{GPS_SLEEP} = T_{TX} + T_{GUARD} = 50 + 10 = 60(\text{мс}),$$

$$P_{GPS_SLEEP} = 10^{-2} \cdot \frac{60 \cdot 10^{-3}}{3600} = 1.66 \cdot 10^{-7} (\text{А} \cdot \text{год}).$$

- RGB світлодіод

Під час ініціалізації, на початку роботи, індикує заряд батареї протягом 150(мс). При цьому споживає:

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

$$P_{RGB_INIT} = 25 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{150 \cdot 10^{-3}}{3600} = 1.042 \cdot 10^{-6} (A \cdot год).$$

При увімкненні, світлодіод показує оператору про початок робочого режиму індикацією, при цьому тривалість 150(мс).

$$P_{RGB_WORK} = 25 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{150 \cdot 10^{-3}}{3600} = 1.042 \cdot 10^{-3} (A \cdot год).$$

- Бузер:

Під час ініціалізації, на початку роботи, індикуює заряд батареї протягом 150 мс. При цьому споживаючи 30-50(мА).

$$P_{BUZZER_INIT} = 40 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{150 \cdot 10^{-3}}{3600} = 1.67 \cdot 10^{-6} (A \cdot год).$$

При увімкненні, світлодіод показує оператору про початок робочого режиму індикацією, при цьому тривалість 150(мс).

$$P_{BUZZER_WORK} = 40 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{150 \cdot 10^{-3}}{3600} = 1.67 \cdot 10^{-6} (A \cdot год).$$

- TP4056:

В режимі сну або без зарядки споживана потужність дуже низька, близько 50-100(мкА), тобто коли TP4056 не заряджає акумулятор, а лише контролює його стан.

$$P_{TP4056} = 75 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 75 \cdot 10^{-6} (A \cdot год).$$

Розрахуємо окремо потужності:

$$\begin{aligned} P_{INIT} &= P_{ESP32_INIT} + P_{NRF_INIT} + P_{GPS_INIT} + P_{RGB_INIT} + P_{BUZZER_INIT} = \\ &= 6 \cdot 10^{-3} + 0.4 \cdot 10^{-3} + 1.5 \cdot 10^{-3} + 1.042 \cdot 10^{-6} + 1.67 \cdot 10^{-6} = 7.9 \cdot 10^{-3} (A \cdot год). \\ P_{WORK} &= (P_{ESP_WORK} + P_{ESP_SLEEP} + P_{NRF_WORK} + P_{NRF_SLEEP} + P_{GPS_WORK} + P_{GPS_SLEEP}) \cdot \\ &\quad \cdot (3600 - 120) + P_{RGB_WORK} + P_{BUZZER_WORK} + P_{TP4056} = \\ &= (9.9 \cdot 10^{-6} + 1.04 \cdot 10^{-10} + 2.29 \cdot 10^{-7} + 1.8 \cdot 10^{-11} + 1.94 \cdot 10^{-7} + 1.66 \cdot 10^{-7}) \cdot \\ &\quad \cdot (3480) + 1.042 \cdot 10^{-6} + 1.67 \cdot 10^{-6} + 75 \cdot 10^{-6} = 36.58 \cdot 10^{-4} (A \cdot год). \end{aligned}$$

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Тоді час життя від двох акумуляторів типу 18650:

$$T_{Central2} = \frac{C}{P_{INIT} + P_{WORK}} = \frac{5000 \cdot 10^{-3}}{7.9 \cdot 10^{-3} + 36.58 \cdot 10^{-3}} = 112.41(\text{год}) = 4.68(\text{дiб}).$$

Енергоспоживання та час роботи виконавчого модуля

Враховуючи написаний програмний код, можна вирахувати, що система проходить процес ініціалізації протягом 3(с), з яких 150(мс) RGB-світлодіод індикуює заряд акумулятора. Зазвичай ESP8266 споживає близько 160-200(мА) в ініціалізаційному режимі (при активних функціях, але без підключення до мережі). Модуль NRF24L01+ споживає близько 10-15(мА) в режимі ініціалізації. RGB-світлодіод споживає приблизно 20-30(мА) при максимальній яскравості.

Обчислимо:

$$P_{ESP_INIT} = 200 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{3}{3600} = 1.66 \cdot 10^{-4} (A \cdot \text{год}) \text{ — споживання протягом}$$

3(с) в режимі ініціалізації.

$$P_{NRF_INIT} = 12 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{3}{3600} = 9.96 \cdot 10^{-6} (A \cdot \text{год}) \text{ — споживання протягом}$$

3(с) в режимі ініціалізації.

$$P_{RGB} = 25 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{150 \cdot 10^{-3}}{3600} = 1.042 \cdot 10^{-6} (A \cdot \text{год}) \text{ — споживання протягом}$$

150(мс) під час засвічення.

Тоді:

$$P_{INIT} = P_{ESP_INIT} + P_{NRF_INIT} + P_{RGB},$$

$$P_{INIT} = 1.66 \cdot 10^{-4} + 9.96 \cdot 10^{-6} + 1.042 \cdot 10^{-6} \approx 1.77 \cdot 10^{-4} (A \cdot \text{год}).$$

В режимі ALWAYS_LISTEN_MODE виконавчий модуль протягом 10(мс) прослуховує ефір та опитує всі порти, та 20(мс) знаходиться в режимі DeepSleep. В цьому режимі ESP8266 споживає приблизно 200-250(мА), NRF24L01 близько 10-15(мА).

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

$$P_{ESP_LISTEN} = 220 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10^{-2}}{3600} = 6.11 \cdot 10^{-7} (A \cdot год) \text{—споживання}$$

протягом 10 мс в режимі слухання ефіру.

$$P_{NRF_LISTEN} = 12 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10^{-2}}{3600} = 0.33 \cdot 10^{-7} (A \cdot год) \text{—споживання протягом}$$

10 мс в режимі слухання ефіру.

$$P_{LISTEN} = P_{ESP_LISTEN} + P_{NRF_LISTEN},$$

$$P_{LISTEN} = (6.11 + 0.33) \cdot 10^{-7} = 6.44 \cdot 10^{-7} (A \cdot год).$$

Виконавчий модуль знаходиться в режимі DeepSleep протягом 20(мс). За цей час споживання:

$$P_{ESP_SLEEP} = 15 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-2}}{3600} = 8.33 \cdot 10^{-11} (A \cdot год) \text{—споживання}$$

протягом 20(мс) в режимі DeepSleep.

$$P_{NRF_SLEEP} = 1.5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-2}}{3600} = 0.833 \cdot 10^{-11} (A \cdot год) \text{—споживання}$$

протягом 20(мс) в режимі DeepSleep.

$$P_{SLEEP} = P_{ESP_SLEEP} + P_{NRF_SLEEP},$$

$$P_{SLEEP} = 8.33 \cdot 10^{-11} + 0.833 \cdot 10^{-11} = 9.163 \cdot 10^{-11} (A \cdot год)$$

Час життя виконавчого модуля від Li-ion акумулятора типу 18650:

$$T_{EXEC2} = \frac{2500 \cdot 10^{-3}}{P_{INIT} + (P_{LISTEN} + P_{SLEEP})(60 \cdot 60 - 3)} =$$

$$T_{EXEC2} = \frac{2500 \cdot 10^{-3}}{1.77 \cdot 10^{-4} + (6.44 \cdot 10^{-7} + 9.163 \cdot 10^{-11}) \cdot 3597} = 1002.48(год) = 41.77(дiб)$$

Висновки до розділу 2

У цьому розділі було здійснено проектування та розробку апаратної частини системи керування масивом сенсорів. В результаті аналізу технічних

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

вимог і умов експлуатації було обрано оптимальну апаратну платформу на базі модуля ESP32, а також підібрано супутні компоненти — сенсори, засоби живлення, комунікаційні модулі та захисні елементи. Окрема увага приділялася питанням енергозбереження, стабільності зв'язку та можливості масштабування системи.

Розроблена апаратна частина забезпечує функціональну основу для реалізації основних завдань системи: збирання даних, передача інформації по бездротовому каналу, обробка сигналів та взаємодія з центральним керуючим пристроєм. Конструкція вузлів передбачає можливість подальшого розширення як за кількістю сенсорів, так і за функціональністю, що підвищує універсальність системи.

Таким чином, створена апаратна архітектура повністю відповідає вимогам, поставленим на етапі технічного завдання, і є готовою до інтеграції з програмним забезпеченням. У наступному розділі буде розглянута програмна реалізація системи, яка забезпечить логіку обробки даних, бездротову комунікацію між модулями та централізоване керування масивом сенсорів на базі розробленої апаратної платформи.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПРИСТРОЮ, ПРИЗНАЧЕНОГО ДЛЯ КЕРУВАННЯ СЕНСОРАМИ ПРИСУТНОСТІ ЛЮДИНИ

3.1 Розробка прошивки для центрального та виконавчого модулів. Опрацювання координат GPS та обчислення відстані

Процес розробки прошивки для центрального модуля в системах на базі мікроконтролерів є ключовим етапом у створенні функціонуючої та ефективної системи. Для того, щоб прошивка була ефективною та надійною, важливо враховувати всі особливості роботи системи, забезпечуючи її інтеграцію з іншими пристроями, мінімальне енергоспоживання, стабільність зв'язку та безпеку передачі даних.

3.1.1 Бібліотеки, які підключені і використовуються

При розробці прошивки для центрального модуля в системах на базі мікроконтролерів, таких як ESP32 або Arduino, використовуються різні бібліотеки для взаємодії з компонентами, сенсорами, радіомодулями та іншими пристроями. Ось список основних бібліотек, які можуть бути використані в прошивці:

1. “**RF24**”. Є однією з найбільш популярних для роботи з радіомодулями. Вона дозволяє налаштовувати та ініціалізувати NRF24L01+ для передачі та прийому даних, підтримувати передачі даних на визначеній частоті, надає можливість роботи з багатьма каналами та налаштуванням швидкості передачі даних[39].

2. “**Adafruit GPS**”. Дозволяє отримувати географічні координати (широта, довгота, висота) та інші дані від GPS-приймачів, парсинг NMEA-формату даних, Розрахунок часу і швидкості на основі сигналів GPS[40].

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

3. “**LowPower**”. Дозволяє активувати режим DeepSleep на ESP32, знижуючи споживання енергії в періоди бездіяльності.

Для програмування мікроконтролерів ESP32 та ESP8266 будуть використовуватись стандартні бібліотеки із відповідними назвами.

3.1.2 User Experience, або ж світлозвукова індикація у системі. Розробка патернів сповіщення внутрішніх процесів та помилок

User Experience (UX) — це важливий аспект у розробці будь-якої вбудованої системи. Одним з ключових компонентів UX є світлозвукова індикація, яка дозволяє кінцевим користувачам або операторам отримувати інформацію про стан системи, виконання команд або наявність помилок. Світлозвукова індикація покращує взаємодію з пристроєм і підвищує зрозумілість роботи системи.

Світлова індикація виконана за допомогою RGB-світлодіодів (RGB LED), які підключаються до GPIO-портів мікроконтролера. Світлодіоди є економічними, ефективними та надають чітку візуальну інформацію.

Таблиця з світлозвуковими патернами зображена в Додатку 3.

3.1.3 Режим реєстрації, як вмикається та обробляється окремими модулями

У системах, же централь керує масивом виконавчих модулів, режим реєстрації є важливим етапом для налагодження взаємодії один з одним. Він дозволяє безпечно підключати нові виконавчі датчики до центрального пристрою. Цей процес має забезпечити надійний захист від помилкових підключень, а також простоту в налаштуванні системи.

Режим реєстрації(Register Mode) — це процедура, при якій виконавчий датчик автоматично підключається до центрального контролера, отримуючи унікальний псевдовипадковий ID для подальшої ідентифікації в системі та

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

визначення часового слота в протоколі TDMA, і координати положення в просторі.

Визначимо ключові етапи режиму реєстрації для кожного з модулів окремо:

Етапи Register Mode для централі

Тільки зійшовши з виробництва, центральний модуль “голий”, тобто не містить в своїй енергонезалежній пам’яті зареєстрованих виконавчих модулів. При увімкненні такої централі для роботи у Work Mode(режим штатної роботи) ми побачимо лише Empty_Memory індикацію(див Додаток 9). Для безпосереднього переходу в реєстраційний режим, потрібно перед увімкненням затиснути кнопку реєстрації, після чого централь відразу сповістить оператора про початок режиму Register Mode за допомогою індикації Register_Mode. В цьому режимі централь працює так, як зазначено на рис. 3.1.

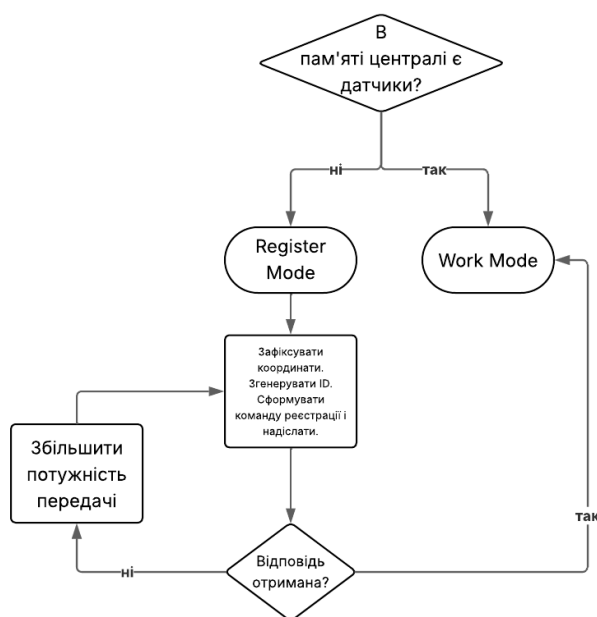


Рис.3.1. Алгоритм Register Mode для центрального модуля.

3.1.5 Керування радіомодулем

Керування радіомодулем є важливою частиною прошивки, оскільки забезпечує правильну організацію зв'язку, стабільність передачі даних та ефективне використання енергоресурсів. Для обраного радіомодуля NRF24L01+ задаються такі початкові властивості:

- `radio.setPALevel(RF24_PA_HIGH);` // Налаштування потужності передачі
- `radio.setChannel(0x4c);` // Вибір каналу зв'язку
- `radio.openWritingPipe(0xF0F0F0F0E1LL);` // Відкриття каналу для запису
- `radio.openReadingPipe(1, 0xF0F0F0F0D2LL);` // Відкриття каналу для читання
- `radio.startListening();` // Початок прослуховування

Важливо правильно керувати станами радіомодуля для досягнення ефективності зв'язку та збереження енергії. Зазвичай радіомодулі працюють у різних режимах:

Режим передачі (TX): використовується для відправки даних.

Режим прийому (RX): використовується для прийому даних.

Режим сну: використовується для зменшення споживання енергії, коли пристрій не передає або не приймає дані. (`radio.powerDown()`)

Розрахунок 1 dB Compression Point (P1dB) для системи

1 dB compression point (P1dB) — це точка, при якій підсилений вихідний сигнал системи зменшується на 1 дБ порівняно з лінійним коефіцієнтом підсилення. Це означає, що система або компонент починають виходити з лінійного режиму і починають проявляти нелінійні ефекти в підсилювачі, а саме: з'являються небажані гармоніки у вихідному сигналі та інтермодуляції.

Для багатьох радіокомунікаційних систем можна використовувати спрощену модель для розрахунку 1 dB compression point, яка базується на

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

передавальному каналі і параметрах підсилювачів (наприклад, для радіочастотних підсилювачів або модуляцій):

$$P_{1dB} = P_{out} - 1dB,$$

де P_{1dB} – потужність на виході, коли з'являється 1 dB спотворення, P_{out} – максимальна потужність, яку система може вивести, не досягаючи 1 dB спотворення.

Для NRF24L01+ максимальна потужність передавача $P_{out} = 20dBm$. Тоді точка компресії:

$$P_{1dB} = 20dBm - 1dB = 19dBm.$$

3.1.6 Дослідження deep sleep і впровадження його в систему

Режим Deep Sleep є одним з найефективніших способів зменшити енергоспоживання в мікроконтролерах, таких як ESP32 або ESP8266. Вбудовані системи, особливо ті, що працюють від батарей, повинні використовувати режим глибокого сну (deep sleep) для продовження терміну служби пристроїв та підвищення енергоефективності. Режим deep sleep — це спеціальний стан, у якому мікроконтролер споживає мінімум енергії, вимикаючи більшість своїх внутрішніх компонентів, зокрема ЦП (центральний процесор), життєво важливі порти вводу/виводу (GPIO) та інші непотрібні функції, при цьому залишаючи можливість швидко прокинутися за зовнішнім сигналом або таймером. На ESP вмикається за допомогою функції `esp_sleep_enable_timer_wakeup(sleep_time)`.

Графік споживання в режимі deep sleep(рис.3.3):

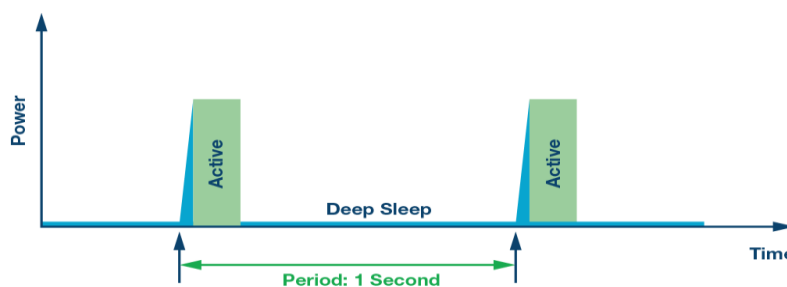


Рис.3.3. Графік, що візуально показує споживання в режимі DeepSleep.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

3.1.7 Опрацювання координат GPS та обчислення відстані

Розглянемо процес обробки GPS-координат, отриманих від модуля NEO-6M, та їх використання для обчислення відстані між двома точками в системі. Оскільки система працює в реальному часі, дуже важливо коректно опрацьовувати дані координат для точного визначення місцезнаходження пристроїв та здійснення відповідних дій, таких як активація чи деактивація виконавчих пристроїв на основі їхнього положення. NEO-6M передає координати в форматі десяткових градусів, наприклад:

Широта: 50.4501(північна широта)

Довгота: 30.5236 (східна довгота)

При отриманні таких даних за допомогою мікроконтролера ESP32, координати зчитуються з GPS-модуля через інтерфейс UART і використовуються для обчислень.

Для обчислення відстані між двома точками на Землі (які визначаються за їхніми координатами: широта та довгота), достатньо використовувати стандартну формулу:

$$d = \sqrt{(\varphi_2 - \varphi_1)^2 + (\lambda_2 - \lambda_1)^2 + (h_2 - h_1)^2},$$

де φ_2 та φ_1 – широти другої та першої точки, λ_2 та λ_1 – довготи другої та першої точки, h_2 та h_1 – висоти другої та першої точки.

3.2 Створення команд та їх будова(структура)

Розглянемо принципи створення команд, які передаються між центральним і виконавчим пристроями для виконання конкретних дій. Команди є основним інструментом управління в бездротовій системі, де важливо забезпечити ефективне, надійне і безпечне взаємодія між пристроями. Створення команд і визначення їх структури є ключовим етапом в проектуванні протоколу зв'язку, що дозволяє пристроям коректно обробляти отриману інформацію. Структура команд повинна бути стандартизованою і зрозумілою для обох

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

пристроїв, щоб забезпечити чітку інтерпретацію і виконання запитів. І протоколи, що використовуються для системи, команда складається з декількох основних елементів:

1. Преамбула (Start Byte). Це початковий байт або набір байтів, що сигналізує про початок команди. Призначення преамбули — вказати, що наступні байти належать команді, а не випадковим даним. Преамбула дозволяє обробляти команду з правильним початком. В даному випадку використовується **0xAA**.

2. Ідентифікатор команди (Command Identifier). Це байт або декілька байтів, що визначають тип команди. Він дозволяє розпізнати, яка саме операція має бути виконана (наприклад, включення реле, зчитування стану датчика). В табл.3.1 зібрані усі команди, що використовуються у проектуваній системі.

Таблиця 3.1

Назва команди	Command Identifier	Тип команди	Напрямок передачі	Відповідь на команду
SYS_OK	0x01	Адресна	Двосторонній	-
SYS_REG	0x02	Адресна	Централь ⇒ VM	SYS_OK
SYS_WORK	0x03	Ширококомовна (бродкаст)	Централь ⇒ VM	SYS_OK
SYS_LOWBAT	0x04	Адресна	VM ⇒ централь	SYS_OK
SYS_CORRECT	0x05	Адресна	Централь ⇒ VM	SYS_OK

3. Ідентифікатор пристрою (Device Identifier). Для системи з кількома виконавчими пристроями, кожен пристрій може мати свій унікальний ідентифікатор, щоб команда була адресована конкретному пристрою. Це забезпечує точність комунікації між центральним і виконавчим пристроєм.

4. Параметри команди (Command Parameters). Це байти, що містять параметри, необхідні для виконання команди. Наприклад, це може бути значення температури, час вимкнення або параметри для активації певного функціоналу. Ці параметри змінюються залежно від типу команди.

5. Перевірка цілісності даних (Checksum). Це кінцевий байт або набір байтів, що використовуються для перевірки правильності передачі даних. Контрольна сума (наприклад XOR) допомагає виявити помилки передачі під час комунікації.

6. Кінець команди (End Byte). Це байт або символ, який вказує на завершення команди, що допомагає отримувачу коректно визначити кінець пакету даних. В даному випадку, кінець команди показує байт **0xFF**.

Приклад структури команди може виглядати наступним чином(рис.3.4):

AA	01	0001	01	AB	FF
1	2	3	4	5	6

Рис.3.4. Приклад структури команди. 1 - преамбула, 2 - ідентифікатор команди, 3 - ідентифікатор пристрою, 4 - параметр команди, 5 - checksum, 6 - End Byte.

Детально структура кожної команди розібрана в Додатку К.

Після формування системи в шістнадцятковому вигляді, мікроконтролер шифрує дані, задля уникнення саботажу . Після цього команда конвертується у двійковий вигляд та передається на радіомодуль.

3.3 Метод шифрування і дешифрування

Враховуючи обмеження ресурсів мікроконтролера ESP32 та необхідність забезпечення мінімального споживання енергії, для цього проекту ми використовуємо легкі методи шифрування та дешифрування. Метою є забезпечення базової конфіденційності і цілісності переданих даних без значних витрат ресурсів і часу виконання.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

Один з найпростіших і водночас ефективних методів шифрування, який можна використовувати для забезпечення базового рівня безпеки на мікроконтролерах, є метод шифрування XOR.

XOR (Exclusive OR) — це бітова операція, яка працює за принципом: біт результату буде 1, якщо біт обох операндів різний ($0 \text{ XOR } 1 = 1$, $1 \text{ XOR } 0 = 1$), і 0, якщо операнди однакові ($0 \text{ XOR } 0 = 0$, $1 \text{ XOR } 1 = 0$).

Переваги:

- Легке виконання: XOR-шифрування можна реалізувати за допомогою простого алгоритму, що добре підходить для обмежених ресурсів мікроконтролера, таких як ESP32.

- Мінімальне споживання енергії: Оскільки XOR є дуже швидкою операцією, вона займає мінімум часу та споживає дуже мало енергії, що є важливим для пристроїв на батареї.

- Симетричне шифрування: Те саме значення ключа використовується як для шифрування, так і для дешифрування даних.

В проєктованій системі використовується ключ **0x55**. Розглянемо алгоритм шифрування за допомогою XOR, використавши команду, що наведена на рис.2.25. Для цього виконаємо XOR кожного байта команди з відповідним байтом ключа (в нашому випадку ключ повторюється для кожного байта):

$$AA \wedge 55 = FF$$

$$01 \wedge 55 = 54$$

$$00 \wedge 55 = 55$$

$$01 \wedge 55 = 54$$

$$01 \wedge 55 = 54$$

$$AB \wedge 55 = F6$$

$$FF \wedge 55 = AA.$$

Тоді шифроване повідомлення буде виглядати так:

FF54555454F6AA.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

Щоб дешифрувати повідомлення, потрібно знову виконати операцію XOR за допомогою того ж ключа (0x55). Для цього беремо шифровану команду і виконуємо XOR кожного байта з тим самим ключем:

$$FF \wedge 55 = AA$$

$$54 \wedge 55 = 01$$

$$55 \wedge 55 = 00$$

$$54 \wedge 55 = 01$$

$$54 \wedge 55 = 01$$

$$F6 \wedge 55 = AB$$

$$AA \wedge 55 = FF.$$

Після дешифрування ми отримуємо *AA01000101ABFF*, що відповідає тому, що вказано в прикладі на рис.2.25. Завдяки тому, що XOR є оберненою операцією, при повторному застосуванні того ж ключа відбувається відновлення оригінальних даних.

3.4 Реалізація протоколу передачі (TDMA + переналаштування робочої частоти)

Розглянемо реалізацію протоколу передачі даних, що включає використання TDMA (Time Division Multiple Access) та частотного переналаштування для забезпечення ефективної та надійної комунікації між центральним пристроєм та виконавчими пристроями в системі. Цей підхід дозволяє мінімізувати колізії в передачі даних, збільшити зависи на з'єднанні, а також забезпечити високу надійність та безпеку бездротового зв'язку.

3.4.1 Структура протоколу ТДМА в проектованій системі

У центральному пристрої визначаються параметри циклу TDMA:

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

- T_LOC - час зчитування місцезнаходження. Цей проміжок часу не входить в саму концепцію TDMA, проте є дуже важливим фактором задля уникнення взаємного впливу GPS- та NRF-модулів

- T_TX — час передачі сигналу від центрального пристрою до виконавчого пристрою.

- T_GUARD — час між передачею і прийомом для уникнення колізій.

- T_SLOT — час, що виділяється на передачу або отримання даних кожним пристроєм.

- T_PAUSE - час між слотами передачі кожного з датчиків. Використовується для уникнення колізій і корекції синхронізації кварцу на виконавчих пристроях.

- T_CYCLE — повний цикл TDMA, що включає всі інтервали для передачі даних.

Методом тестування, було виведено найбільш підходящі часові інтервали для кожного з параметрів. Узагальнимо їх в табл.3.2 та зобразимо блок-схему роботи протоколу в системі на рис.3.5.

Таблиця 3.2

Параметр	Часовий інтервал, мс
T_LOC	30
T_TX	50
T_GUARD	10
T_SLOT	20
T_PAUSE	5

3.4.2 Використання переналаштування робочої частоти системі

У системі частотне переналаштування реалізується через використання модуля NRF24L01+, який підтримує апаратне переналаштування частоти в діапазоні 2.4 ГГц.

Частотне переналаштування полягає у регулярній зміні частоти передачі сигналу в межах дозволеного діапазону (2.4 ГГц для NRF24L01+). Це дозволяє уникати завад, які можуть виникати внаслідок перенасичення каналу або від інших бездротових пристроїв. У кожному повторному циклі передачі даних, у випадках, коли централь не отримала підтвердження виконання команди від одного з датчиків, частота змінюється на іншу, таким чином створюється динамічний канал зв'язку. Псевдовипадкове переналаштування робочої частоти дозволяє ефективно використовувати весь доступний діапазон частот, знижуючи ймовірність перенавантаження окремих каналів і покращуючи пропускну здатність системи.

Для забезпечення переналаштування з використанням 3 частот, які знаходяться не надто поряд одна з одною, ми можемо вибрати канали, що мають відносно великі відстані між собою, щоб зменшити можливість перекриття з іншими пристроями, що працюють на сусідніх каналах. Для цього можна вибрати 3 канали NRF24L01+ з діапазону 2.4–2.4835 ГГц, які мають певний розрив між собою. Наприклад:

- Канал 0 — 2.400 ГГц (головна частота, main);
- Канал 25 — 2.425 ГГц (хопова частота, hop1);
- Канал 50 — 2.450 ГГц (хопова частота, hop2).

На рис.3.7 наведено блок схему роботи псевдовипадкового переналаштування робочої частоти на центральному на виконавчому пристроях.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

Після увімкнення “пустого” виконавчого датчика, тобто того, в пам’яті якого не міститься інформації про ID, положення в просторі та централі, VM постійно знаходиться в режимі слухання (Listening Mode), чекаючи на сигнали від центрального пристрою. Після надходження бродкаст-команди, пристрій перевіряє її на відповідність типу команди, чи є вона реєстраційною командою. Етапи валідації реєстраційної бродкаст команди:

- Перевірка преамбули. Для початку перевіряється, чи дійсно отримана інформація є надісланою з централі командою. Для цього перший байт отриманих даних дешифрується за алгоритмом, що описаний в пункті 2.5.6 і перевіряється на відповідність преамбули значенню 0xAA. Робиться це для того, щоб не витратити зайві ресурси заряду акумулятора при дешифруванні даних, що не надсилались із центрального модуля.

- Повне дешифрування команди. Після валідації отриманих даних, виконавчий модуль дешифрує команду у звичний вигляд для подальшої роботи.

- Перевірка команди. Наступним кроком є перевірка першого(рахуючи з 0) байту, що відповідає за назву команди. Якщо справджується умова, що зазначається у формулі (xx), то модуль продовжує розбір команди.

$$B_{GET}[1] = 0x02,$$

де B_{GET} – отримані дані, $B_{GET}[1]$ – перший байт отриманих даних.

- Зчитування даних та запис їх у внутрішню пам’ять. Наступні байти відповідають за значення ID датчика та його положення в просторі. Ці дані записуються в енергонезалежну пам’ять та використовуються в подальших обчисленнях.

- Перевірка цілісності команди за допомогою Checksum байту.

- Формування команди-відповіді та надсилання її безпосередньо до центрального модуля.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

3.5.2 Опрацювання робочої команди в штатному режимі

Алгоритм валідації робочої команди дуже схожий із перевіркою команди реєстрації. Він складається з таких етапів:

Перевірка преамбули. Детально розписана в пункті 2.8.1.

Повне дешифрування команди(відповідно до пункту 2.8.2).

Перевірка команди на відповідність умові, що визначена нижче.

$$B_{GET}[1] = 0x03,$$

де B_{GET} – отримані дані, $B_{GET}[1]$ – перший байт отриманих даних.

- Перевірка масиву даних. Оскільки робоча команда є бродкастною - тобто адресується усім датчикам, що знаходяться в радіусі 15 м, виконавчий модуль, що лежить поза визначеної зони, може почути сигнал. Тому важливим етапом є перевірка на потребу виконання цієї команди. Для цього центральний модуль формує масив, що складається із ID виконавчих пристроїв, яким наказано виконати робочу команду. Зі сторони VM алгоритм проходить по всім елементам масиву й перевіряє кожне його значення на еквівалентність його ідентифікатора, що записаний в енергонезалежну пам'ять.

- Виконання команди та підтвердження. У разі підтвердження адресованості робочої ширококомовної команди для виконавчого модуля, що її отримав, VM виконує дію, що вимагається від нього та формує відповідь у вигляді команди SYS_OK.

3.5.3 Перевірка заряду акумулятора та надсилання функції SYS_LOWBAT

Важливою функцією виконавчого модуля є контроль над зарядом внутрішнього акумулятора, що не допускає ситуацій повного розряду й призведення до його не дієздатності. Тому раз на кілька циклів перевіряється напруга і у разі переходу за нижню границю значення LOW_BATTERY датчик

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

правильну гіпотезу. У бездротових системах це може бути порівняно з випадковим помилковим сприйняттям, коли система вважає, що є помилка, хоча передача даних була успішною.

$$P(\alpha) = Q\left(\frac{E_b}{N_0}\right),$$

де $Q(x)$ – це функція розподілу стандартного нормального розподілу, E_b – енергія на біт, N_0 – спектральна щільність шуму.

Якщо ми припустимо, що енергія на біт $E_b = 1$ (мВт), а спектральна щільність шуму $N_0 = 0.1$, то

$$P(\alpha) = Q\left(\frac{1}{0.1}\right) = Q(10).$$

Відомо, що значення функції Q для $Q(10)$ дуже близьке до 0 (приблизно 10^{-23}). Тобто ймовірність помилки 1-го роду в такій ситуації є дуже низькою.

Обчислення ймовірності помилки 2-го роду

Помилка 2-го роду (β) виникає, коли гіпотеза альтернативна (H_1) не відкидається, хоча насправді вона є правильною. Це ситуація, коли система не сприймає наявності помилки, хоча передача даних не була успішною. У бездротових системах це можна порівняти з випадком, коли помилка не була виявлена.

Формула для ймовірності помилки 2-го роду:

$$P(\beta) = Q\left(\frac{E_b}{N_0}\right),$$

де $Q(x)$ – це функція розподілу стандартного нормального розподілу, E_b – енергія на біт, N_0 – спектральна щільність шуму.

Якщо ми припустимо, що енергія на біт $E_b = 1$ (мВт), а спектральна щільність шуму $N_0 = 0.1$, то

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

$$P(\beta) = Q\left(\frac{1}{0.1}\right) = Q(10).$$

Як і для помилки 1-го роду, значення для функції $Q(10)$ дуже мало (приблизно 10^{-23})

3.6.2 Типи тестування. Підбір методів тестування моєї системи. Складання тест-плану тестування

Підбір методів тестування залежить від типу системи, її компонентів, а також від того, яку інформацію необхідно отримати під час тестування. Ось кілька основних методів тестування, які можуть бути використані для системи:

1. Тестування модулів окремо (Unit Testing)

Мета: Перевірити, чи працюють окремі модулі прошивки (наприклад, модуль для керування радіомодулем, модуль для роботи з GPS, модуль для обробки даних).

2. Інтеграційне тестування

Мета: Перевірити взаємодію між кількома модулями або пристроями в системі.

3. Тестування на реальних умовах

Мета: Перевірити, як система працює в реальних умовах експлуатації, з урахуванням завад, перешкод та інших факторів, що можуть впливати на роботу системи.

4. Стрес-тестування (Stress Testing)

Мета: Перевірити, як система працює при високих навантаженнях та в умовах перевантаження.

1. Тестування безпеки

2. Мета: Оцінити рівень безпеки системи від зовнішніх атак та спроб несанкціонованого доступу.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

3. Для задовільного тестування системи, перевірки стабільності роботи в різних умовах, складемо список тестів:

4. Тестування дальності радіо системи. Перевірка дотримання вимоги непомітності на відстані 150 м. Перевірка швидкості передачі пакетів в умовах чистого еталонного ефіру(з'єднання радіомодулів коаксіальним кабелем).

5. Порівняння виміру координат модулем та мобільним телефоном.

6. Вимір споживання.

7. Вимір впливу температури на похибку виміру часу кварцем.

8. Перевірка коректності передачі та отримання команд. Перевірка шифрування та дешифрування.

9. Тестування корпусу на міцність

10. Тестування на пило- та вологозахист в УкрТесті.

3.6.3 Логування роботи системи

Логування роботи системи є важливим елементом для моніторингу її роботи, відстеження помилок, а також для оптимізації і покращення ефективності системи. У контексті вбудованих систем на основі мікроконтролерів, таких як ESP32 або ESP8266, логування дозволяє зберігати важливу інформацію про роботу центрального та виконавчого пристроїв, що дає змогу проводити детальний аналіз роботи системи в реальному часі або після її завершення.

Рівні логування:

1. Інформаційні повідомлення: логування загальних подій, таких як запуск системи, з'єднання пристроїв або початок виконання певної функції. Наприклад: “INFO: SYSTEM START”.

2. Попередження (Warning): записи, що інформують про потенційно проблемні ситуації, які не є критичними, але можуть вплинути на роботу системи. Приклад: “WARN: REBOOT SYSTEM”.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

3. Помилки (Error): логування проблемних ситуацій, коли певні функції системи не виконуються через помилки в роботі. Приклад “SENS1 is not in a correct timeslot”

4. Критичні помилки (Critical): логування ситуацій, які призводять до збоїв у роботі системи або її компонентів. Приклад: “ERR: GPS init error”.

Для збереження логів за тривалий період роботи, додатково було встановлено Micro-SD карту, та налаштовано процес запису.

Висновки до розділу 3

У даному розділі було реалізовано програмне забезпечення для центрального контролера та сенсорних модулів, яке забезпечує повноцінне функціонування системи керування масивом сенсорів. Основну увагу було приділено реалізації бездротового обміну даними за протоколом TDMA з псевдовипадковим переналаштуванням робочої частоти, що дозволяє забезпечити стійкість до завад, упорядкованість передачі та масштабованість мережі. Для оптимізації енергоспоживання реалізовано перемикання в режим сну, а також розроблено механізми активації вузлів за подією.

Програмна частина також забезпечує точне позиціонування вузлів за допомогою вбудованого GPS-модуля, обробку та передачу зібраних сенсорних даних до центрального вузла, а також базовий контроль цілісності та синхронізацію пакетів. Було створено протокол взаємодії, реалізовані засоби діагностики та відлагодження, що дозволяє ефективно аналізувати функціонування системи у різних умовах.

Завершення розробки програмної частини дає змогу перейти до наступного етапу — практичного тестування розробленої системи в реальних умовах. Це дозволить перевірити узгодженість взаємодії апаратної та програмної частин, оцінити ефективність зв'язку, стабільність роботи при навантаженні та

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

енергоспоживання, а також виявити потенційні напрями для оптимізації системи.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

4 ПРАКТИЧНА ВЕРИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗРОБЛЕНОГО ПРИБОРУ ДЛЯ КЕРУВАННЯ МАСИВОМ СЕНСОРІВ ПРИСУТНОСТІ ЛЮДИНИ

4.1 Схема побудови системи: централь і виконавчі модулі. Варіанти інтеграції зі сторонніми сенсорами

У вбудованих системах з бездротовим зв'язком важливо правильно побудувати архітектуру системи, де центральний пристрій виступає в ролі керуючого елемента, а виконавчі датчики виконують функції моніторингу та виконання фізичних дій, відповідно до команд. Схеми побудови системи, розміщення датчиків під час процесу реєстрації зображені в Додатку Л.

Сенсори, що інтегруються в систему, можуть вимірювати різні фізичні або хімічні параметри навколишнього середовища, і їх впровадження в неї забезпечують додаткові функціональні можливості. Ось кілька варіантів інтеграції сторонніх сенсорів у вбудовані системи:

1. Інтеграція із охоронними датчиками
2. Інтеграція із освітлювальними приладами
3. Симбіоз з сигналізаціями, сиренами
4. Застосування в системах подвійного призначення

4.2 Програмна взаємодія: поетапна робота системи

Програмна взаємодія системи централь-виконавчий пристрій включає в себе кілька етапів, на яких різні компоненти (центральний пристрій, виконавчий пристрій) взаємодіють між собою, здійснюючи передачу даних, виконання команд та обробку результатів. Опишемо основні етапи роботи:

1. Реєстрація виконавчих датчиків.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

- Централь підноситься на місце майбутньої установки виконавчого модуля. Шляхом затискання реєстраційної кнопки, вмикається режим реєстрації.

- Паралельно цим, після увімкнення, виконавчий модуль знаходиться в зацикленому режимі ALWAYS_LISTEN_MODE.

- Централь генерує псевдовипадковий ID, фіксує місцезнаходження у вигляді координат, формує команду SYS_REG, яка шифрується, надсилає за допомогою радіомодуля NRF24L01+. Після чого переходить в режим прослуховування, очікуючи відповіді від виконавчого модуля.

- Виконавчий модуль отримує ID, записує його в свою пам'ять та координати. Після цього формує команду SYS_OK та надсилає на централь. Після завершення реєстрації виконавчий пристрій переходить у робочий режим (WORK_MODE).

2. Робочий режим

- Після переходу централлю у WORK_MODE, вона визначає, які виконавчі модулі знаходяться в межах досяжності (в радіусі 15 м).

- За допомогою TDMA протоколу центральний пристрій надсилає команди до вибраних виконавчих пристроїв. Команди включають інструкції для замкнення/розімкнення пристроїв.

- Виконавчі пристрої отримують команди через радіозв'язок, виконують їх і передають підтвердження через SYS_OK пакет. Якщо команду не було виконано (через помилку чи перешкоди в передачі), виконавчий пристрій намагається виконати команду ще раз або сповіщає центральний пристрій про помилку.

3. Синхронізація та використання частотного переналаштування.

- Для уникнення колізій сигналу та підвищення стабільності зв'язку, центральний пристрій регулярно синхронізує всі виконавчі пристрої за допомогою TDMA (Time Division Multiple Access). Кожен пристрій отримує виділений часовий слот (T_SLOT) для передачі своїх даних.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

4. Вхід у режим очікування.

- Після виконання команд виконавчий пристрій повертається в режим сну та очікування для економії енергії.

- Центральний пристрій продовжує моніторинг статусу системи та готується до наступного циклу передачі команд або прийому даних від виконавчих пристроїв.

4.3 Робота в умовах, що схожі з штатними: результати експерименту.

Навантажувальне тестування системи

4.3.1 Вимір енергоспоживання системи

Оцінка енергоспоживання дозволяє зрозуміти, як ефективно використовуються енергетичні ресурси, а також забезпечує оптимізацію роботи пристроїв для збільшення їхнього терміну служби.

Для вимірювання енергоспоживання в системах зазвичай використовуються вимірювання за допомогою мультиметра, що дозволяє вимірювати споживаний струм в амперах. Підключається послідовно в ланцюг між джерелом живлення (наприклад, акумулятором) і пристроєм для вимірювання поточного споживання. Для цього експерименту використовувався точний мультиметр Fluke із можливістю вимірювання середнього значення(рис.4.1).



Рис.4.1. Використаний у замірах мультиметр Fluke200 TrueRMS.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

Для визначення температурного коефіцієнта кварцу необхідно виміряти температурний дрейф за допомогою формули:

$$\Delta f = TC \cdot f \cdot \Delta T,$$

де Δf – зміна частоти, TC – температурний коефіцієнт (ppm/°C), f – номінальна частота резонатора (16 МГц), зміна температури (°C).

Для тестування було вибрано температурні діапазони, які є типовими для роботи системи:

1. -20°C;
2. 15°C;
3. 45°C.

Зміни температури відбувались за допомогою морозильної камери, та індукційної пічки. Температура визначалась за допомогою мультиметра та термопари. Отримані результати закріплено в табл.4.2.

Таблиця 4.2.

Температура (°C)	Частота (МГц)	Температурний дрейф(ppm)
-20	16.0002	-30
15	16.0000	0
25	15.9995	+50

4.3.3 Порівняння виміру координат модулем та мобільним телефоном

Тестування точності роботи GPS-модуля проводилось на відкритій місцевості, подалі від будь-яких перешкод, що можуть створити перешкоди для роботи. Виміряні модулем координати зображено на рис.4.2.

```
> Task :Test.main()
> GPS: 48.247193, 32.222472
```

Рис.4.2. Виміряне значення координат поточного місцезнаходження центрального модуля.

Приклад логів.

За допомогою сервісу Google Maps було визначено координати положення мобільного телефону, що використовувався для порівняння. Важливо зауважити, що різниця між поточними двох пристроїв складала не більше 10(см). І у результаті, різниця між двома вимірами склала 0.9(м) (рис.4.3).

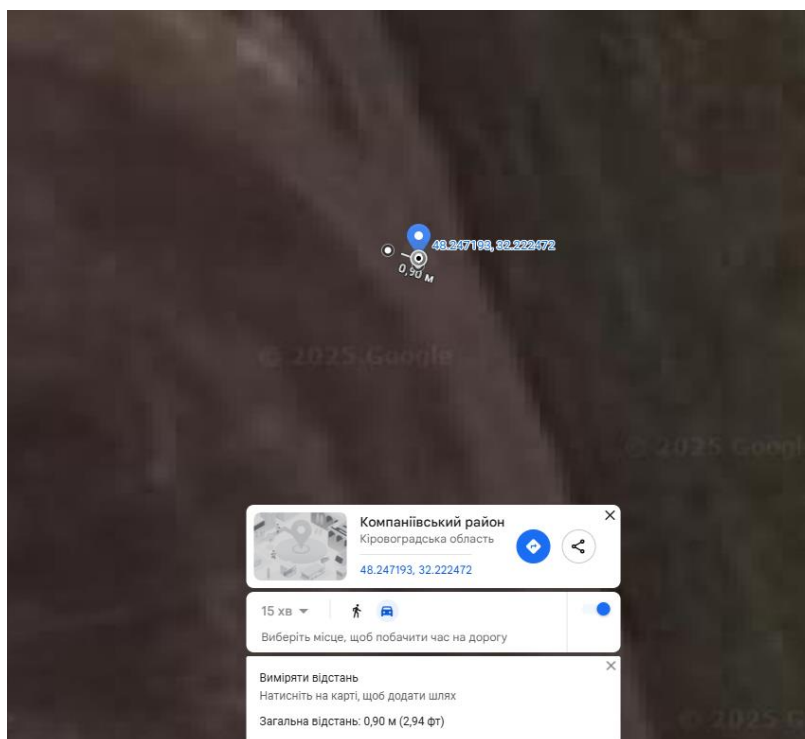


Рис.4.3. Різниця між вимірними координатами поточного положення.

4.3.4 Тестування корпусу на міцність

Мета тестування корпусу на міцність — оцінити здатність корпусу витримати механічні навантаження, удари та вібрації при експлуатації пристрою в реальних умовах, а також забезпечити захист від механічних пошкоджень внутрішніх компонентів системи. Основні цілі тестування:

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		95

- Визначення стійкості до фізичних пошкоджень.
- Перевірка надійності матеріалів корпусу при механічних навантаженнях.
- Оцінка міцності з'єднань (наприклад, кришки, дверцята, герметизація).
- Тестування поглинання ударів та впливу вібрацій на структуру корпусу та внутрішні компоненти.

Тестування на ударну міцність має на меті визначити, чи може корпус витримати механічні удари, які можуть виникнути під час транспортування, експлуатації або при випадкових падіннях. Використовувався спеціальний ударний тестер (рис.4.4), що дозволяє імітувати падіння корпусу з різних висот або на різні поверхні.



Рис.4.4. Використаний у випробуваннях ударний тестер для перевірки корпусу та плати на стійкість до падінь та ударів.

Під час перевірки використовувалась сила удару від 1.0 до 3.0(Дж) та на різні частини корпусу. Результати тестування узагальнено в табл.4.3:

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		96

Таблиця 4.3.

Частина корпусу	Тип удару	Сила удару, Дж	Кількість ударів до пошкодження	Тип пошкодження	Рекомендації
Верхня	Удар по площині	1	6	Малі тріщини по поверхні	Потрібно додатково армувати верхню частину
Бокова	Удар по куту	2	8	Легке деформування корпусу	Бокові частини мають високу здатність до деформацій
Задня	Удар по площині	1.5	-	-	Стійка до легких ударів, хороший матеріал для використання
Передня	Удар по куту	2.5	10	Тріщина на краю	Потрібно посилити передню частину для кращої стійкості
Кут корпусу	Удар по куту	3	-	-	Кути корпусу мають найбільшу стійкість
Середина	Удар по площині	2	14	Легка вм'ятинка	Добре витримує удари, але потребує обережності при великих навантаженнях

4.3.5 Тестування на IP65

Це тестування дозволяє оцінити, наскільки ефективно корпус захищає внутрішні компоненти пристрою від погіршення роботи через вплив зовнішнього середовища, і є важливим для систем, які працюють в польових умовах, в сільському господарстві, на вулиці або в промислових установках, де

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		97

пристрої можуть бути піддані різним фізичним навантаженням, таким як пил, волога, дощ або вибухові середовища.

Обраний стандарт IP65 передбачає повний захист від пилу і захист від водяних струменів. Тестування проводиться в ДП "Укрметртестстандарт", яке виконує комплексну перевірку за допомогою спеціалізованого обладнання і може видавати сертифікат на її проходження.

Проте для перевірки пилозахисту в спец. камері, треба конфігурувати корпус датчика, додавши спеціальний штуцер, який надалі буде підключений до компресора. Корпус для тестування на IP65 зображений на рис.4.5.

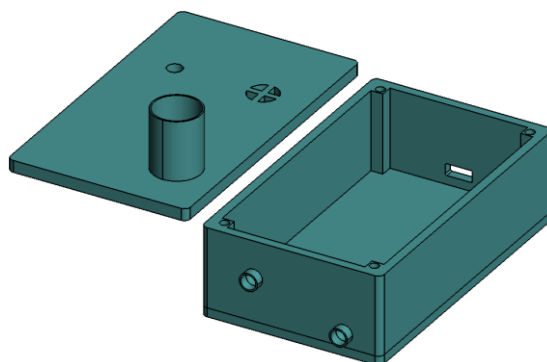


Рис.4.5. Модифікований корпус центрального модуля, для перевірки на пилозахист в ДП "Укрметртестстандарт".

4.3.6 Перевірка UX. Визначення гучності індикації бузером та яскравості RGB світлодіодом

Для цього тесту буде виміряно, чи є рівень гучності бузера достатнім для виявлення сигналів у різних середовищах та чи відповідає яскравість RGB світлодіода умовам експлуатації пристрою.

1. Тестування гучності бузера було виміряно за допомогою каліброваного шумоміра UNI-T UT352 в режимі пікової гучності. Висота встановлення складала 2 м., дальність від вимірювального пристрою до бузера - 1 м. Тривалість виміру складала 90 секунд. Після цього результати виміру було сформовано графіки, що зображені на рис.4.6.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		98

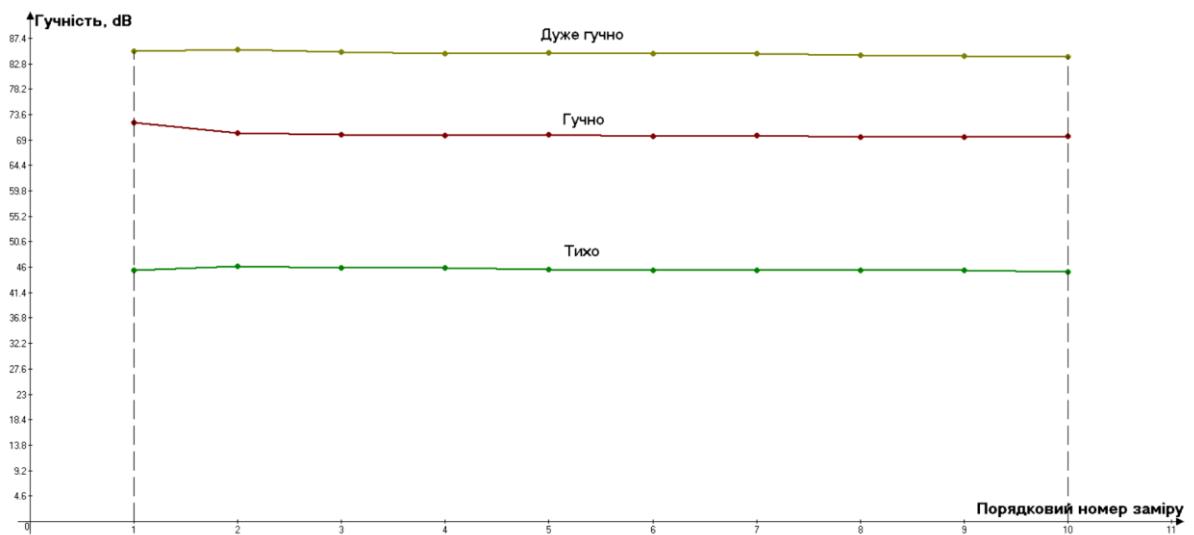
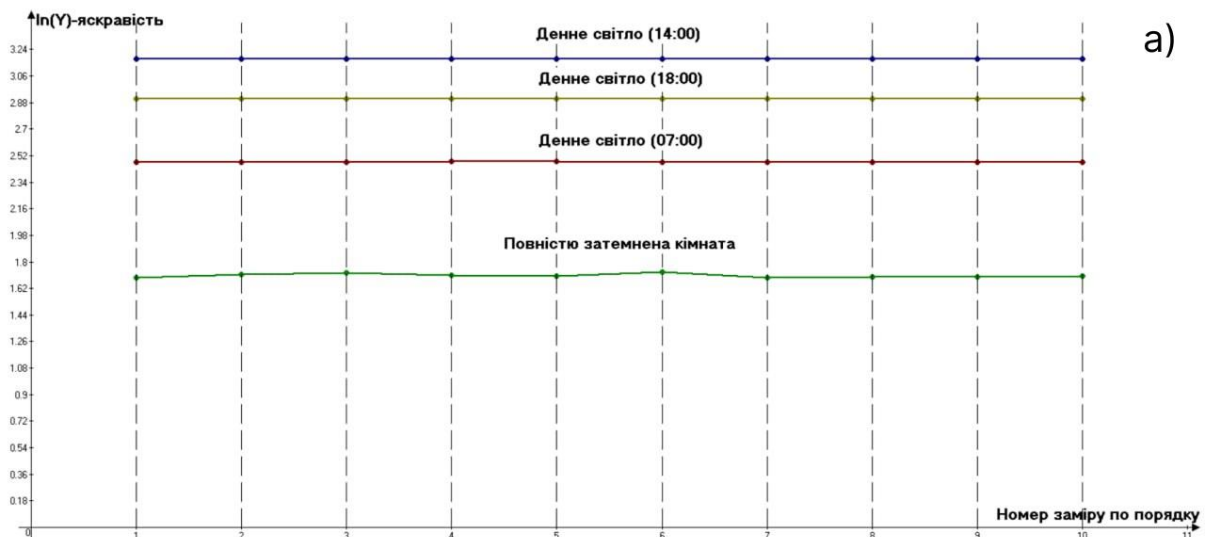


Рис.4.6. Графік експериментально виміряної гучності п'єзоелектричного бузера.

2. Тестування яскравості індикації було виміряно за допомогою люксметра UNI-T UT383. Перевірка проводилась як в повністю затемненій кімнаті, так і при денному світлі в різний час доби (07:00, 14:00, 18:00). Дальність пристрою від джерела світла складала 1 м. Після виміру, результати сформовано у графік на рис.4.7.



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

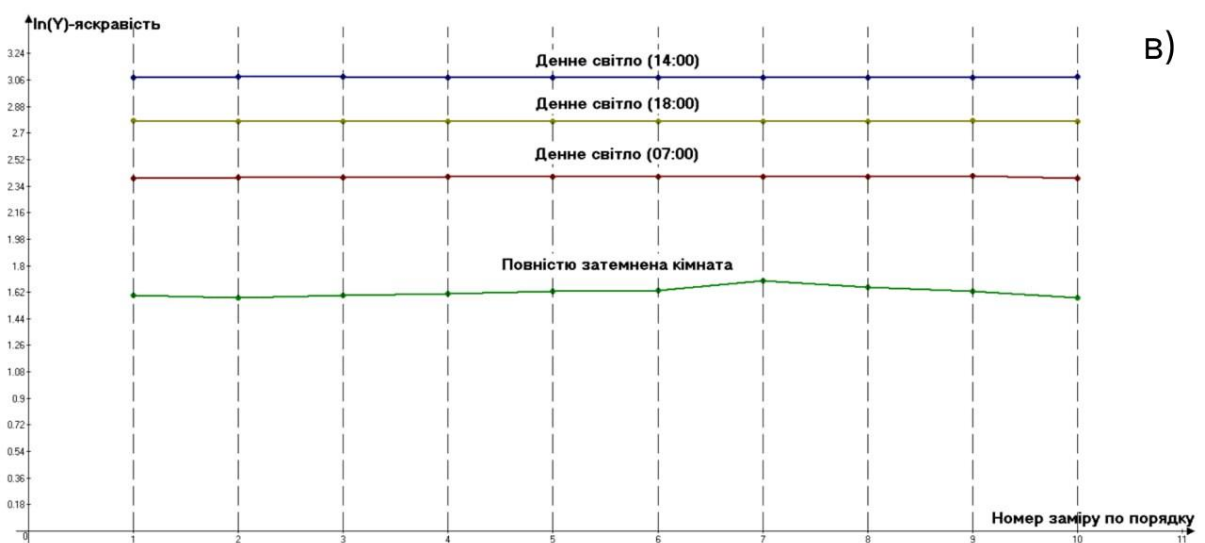
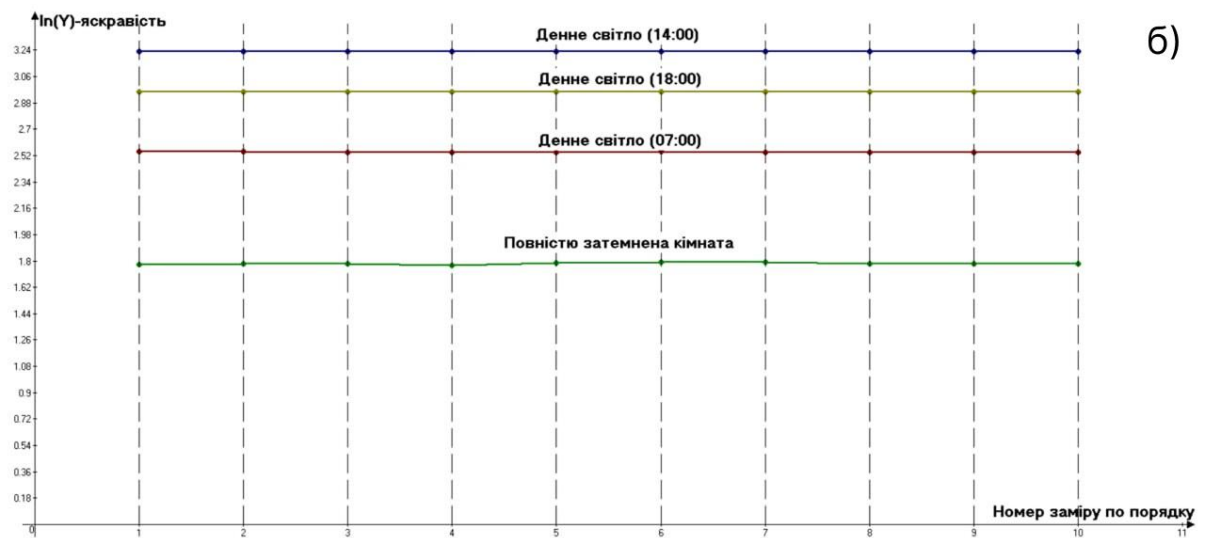


Рис.4.7. Графік експериментально вимірної яскравості RGB-світлодіода, де а - червоний колір, б - зелений, в - синій.

4.3.7 Тривале тестування системи в умовах штатної роботи

Процедура тривалого тестування:

1. Першим етапом є підготовка пристроїв до тестування. Для цього етапу було складено систему із однієї централі та трьох виконавчих датчиків, які були розміщені на відстанях 8, 15, 19 м. від централі відповідно. Схема розміщення датчиків (рис.4.8):

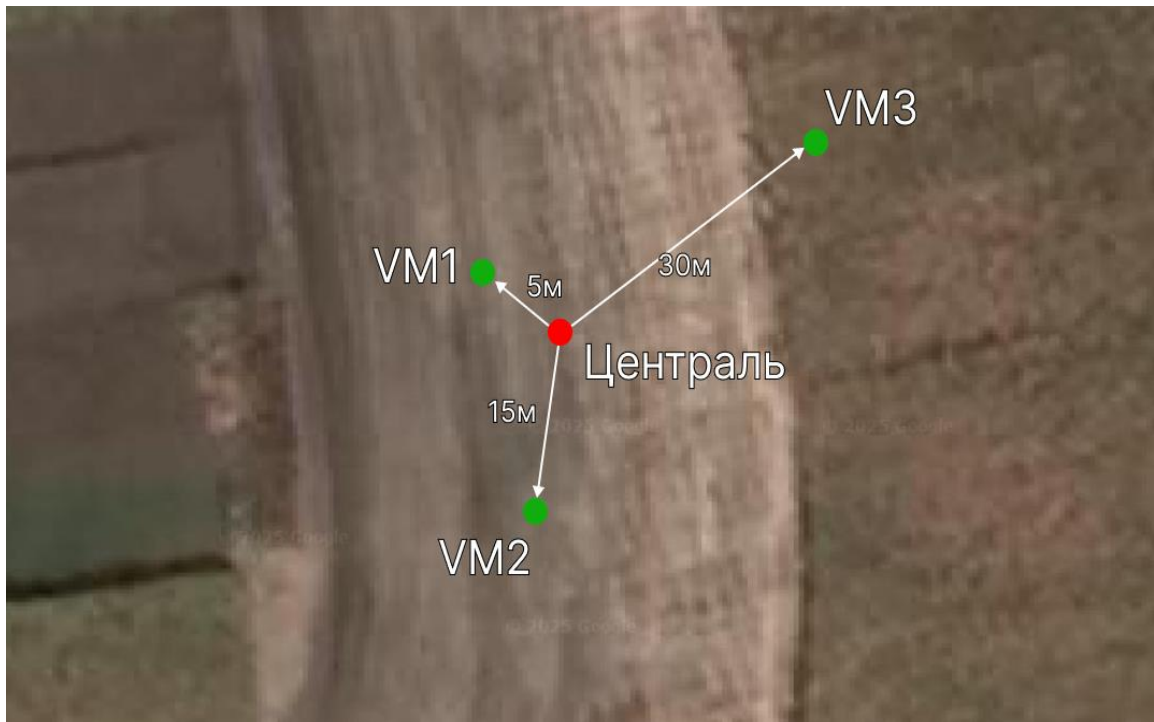


Рис.4.8. Приклад розміщення датчиків при тестуванні системи в умовах штатної роботи.

До центрального модуля було під'єднано ноутбук для моніторингу, збору та запису даних про роботу системи. Після чого, визначено умови навколишнього середовища, що закріплені в табл.4.4.

Таблиця 4.4

Параметр	Значення
Температура, °С	24.3
Вологість, %	42
Тиск, Па	1017

2. Структура тесту. Наступним етапом перевірялись всі можливі випадки використання системи. Основні параметри закріплено в табл.4.5.

Таблиця 4.5.

Параметр	Значення
Середній час реєстрації	143 мс
Відношення хибних спроб реєстрації до загальних	2%
Кількість повторних циклів передачі команди	2 цикли / 100 спроб
Кількість разів виходу датчика за межі свого часового слота	0 разів/100 спроб
Відношення кількості неспрацювань системи до загальної кількості спроб	0.5%
Кількість отримання пошкоджених пакетів	0.5%

4.4 Аналіз стабільності зв'язку та точності відстаней

Для подальшої перевірки якості зв'язку за різних умов, моделюючи різні ситуації використання, було створено спеціальний скрипт, що надсилає із центрального модуля масив команд, при цьому шифруючи їх, а натомість виконавчий модуль дешифрує, перевіряє цілісність та порівнює із вихідними даними, узагальнюючи це в окремий файл. Схоже програмне забезпечення використовується для перевірки справності жорстких дисків та допомагає зібрати статистику про кількість пошкоджених команд.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		102

4.4.1 Тестування роботи системи за ідеального сигналу за допомогою з'єднання коаксіальним кабелем

У цьому контексті використання коаксіального кабелю для підключення радіо передавача і приймача дозволяє створити оптимальні умови для тестування роботи системи, оскільки кабель забезпечує стабільний сигнал з мінімальними втратами і без втручання перешкод, типових для бездротових з'єднань.

- Тип кабелю: використовується коаксіальний кабель 50 Ом для забезпечення узгодження імпедансу.

- Довжина кабелю: повинна бути мінімальною для зменшення втрат сигналу, тому було обрано значення в діапазоні 3-5 м.

- Підключення: з'єднання радіомодулів через SMA роз'єми.

- Всі параметри радіомодулів налаштовані на максимальну потужність та на частоту 2.4 ГГц.

- Температура в межах +20°C до +25°C.

- Вологість: 40%–60% для мінімізації впливу температури та вологості на роботу системи.

Результати тестування зафіксовано в табл.4.6.

Таблиця 4.6.

Параметр	Значення
Швидкість передачі даних	1.9 Мбіт / с
Час затримки	2.5 мс
Якість сигналу	40 dB
Потужність сигналу	0 дБм (на виході передавача)

4.4.2 Перевірка інтерференції металом на якість зв'язку

Мета цього тестування:

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		103

- Оцінити, як металеві об'єкти (стіни, двері, металеві конструкції тощо) впливають на якість зв'язку між пристроями.

- Визначити, чи можуть металеві об'єкти призвести до значного погіршення сигналу або втрат даних.

- Оцінити ефективність роботи системи при наявності металевих перешкод та виявити обмеження радіусів дії системи.

- Визначити, чи вистачає системі додаткових методів компенсації для боротьби з інтерференцією (частотного переналаштування, підсилення сигналу).

Тестування проводиться в умовах, де між пристроями були розміщені металеві об'єкти, такі як:

- Металеві стіни (сталеві конструкції).

- Металеві предмети (столи, стільці, обладнання).

- Металеві вікна та двері.

- Також в тестовій зоні було мінімум зовнішніх джерел завад, таких як Wi-Fi або Bluetooth.

У результаті було отримано масив тестових даних, які можна сортувати та узагальнити в табл.4.7.

Таблиця 4.7.

Тип інтерференції	Відстань, м	Якість сигналу, dB	Тип завад
Без металевих перешкод	10	46	Мінімальні завади
Малий металевий об'єкт (металева деталь)	10	40	Легке поглинання сигналу
Середній металевий об'єкт (металева стіна)	10	34	Помітне зниження сигналу

Високий металевий об'єкт (металеві конструкції)	15	27	Сильне поглинання сигналу
Металеві перешкоди (на 50% сигнал проходить через металеву конструкцію)	20	18	Сильна завадність, значні втрати даних
Повне блокування (металеві перешкоди на 90%)	20	5	Повна відсутність зв'язку

4.4.3 Тестування дальності радіо системи

Для вимірювання дальності радіо системи використовувались штативи, для підняття обох модулів(центрального та виконавчого) на висоту 3 м, для відсутності впливу опуклості поверхні. Після цього за допомогою застосунок Google Maps вимірювались основні дальності для перевірки, що зображені на рис.4.8.



Рис.4.8. Приклад розміщення датчиків під час тестування дальності зв'язку.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		105

Після цього запускався скрипт, що згаданий у підрозділі 3.4, для перевірки коректності передачі даних на різних відстанях. У результаті було отримано табл.4.8.

Таблиця 4.8.

Відстань, м	Кількість пошкоджених пакетів, %	Середня затримка, мс
5	0	2
10	0	4
15	1	7
20	2	13
25	2	18
30	5	22
1000(гранична)	31	500

4.4.4 Перевірка дотримання вимоги непомітності на відстані 150 м

Тестування проводиться в умовах, які наближені до реальних ситуацій, коли пристрої повинні залишатись невидимими для сторонніх осіб на відстані 150(м). Основні умови:

- Відстань між пристроями: центральний та виконавчий модулі та вимірювальний прилад повинні працювати на відстані 150(м) в умовах відкритого простору або з мінімальними перешкодами.

- Інтерференція: між пристроями можуть бути інші бездротові пристрої (наприклад, Wi-Fi або Bluetooth), щоб імітувати реальні умови, коли в системі є інші джерела сигналу.

Вимірювання проводилось за допомогою аналізатора частот TinySA Ultra, що зображений на рис.4.9.

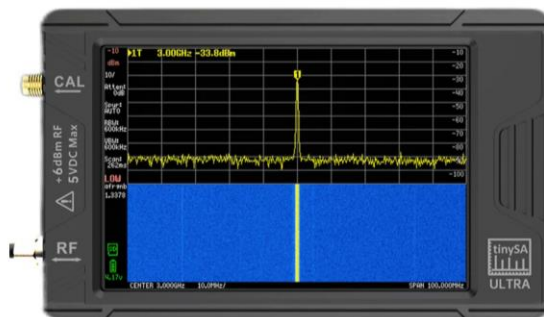


Рис.4.9. Аналізатор частота TinySA Ultra, що використовувався під час перевірки непомітності на відстані 150(м).

Вимірюна потужність на частоті 2.4(ГГц) склала – 90(dBm). Проте враховуючи зашумленість ефіру, також перевірялось значення зростання вимірної потужності при вмиканні системи.

4.4.5 Перевірка коректності передачі та отримання команд. Перевірка шифрування та дешифрування

Для перевірки виконання функції шифрування та дешифрування, а також валідації отриманих команд та відсортування випадкових пакетів, використовувався скрипт, що описаний на початку підрозділу. Після отримання результатів їх було оформлено у табл.4.9.

Таблиця 4.9.

Кількість переданих пакетів, шт.	Кількість пошкоджених пакетів/тих, що не були коректно дешифровані, шт.
50	1 / 0
200	1 / 1
500	3 / 2

4.5 Оцінка ефективності системи за результатами проведених експериментів

4.5.1 Порівняння теоретично розрахованого та експериментально виміряного споживання системи

Шляхом теоретичних розрахунків, було визначено, що середнє споживання централі в робочому режимі рівне 36.58(мА), а виміряне за допомогою Fluke True RMS 41.7(мА). Для виконавчого модуля виміряне рівне 2.8(мА), а розраховане 2.493(мА). Таким чином визначимо відносну похибку:

$$\delta P_{CENTRAL_WORK} = \left| 1 - \frac{P_{ВИМІР1}}{P_{РОЗРАХ1}} \right| \cdot 100\% = \left| 1 - \frac{41.7}{36.58} \right| \cdot 100\% = 13\% .$$

$$\delta P_{EXECUTIVE_WORK} = \left| 1 - \frac{P_{ВИМІР2}}{P_{РОЗРАХ2}} \right| \cdot 100\% = \left| 1 - \frac{2.8}{2.493} \right| \cdot 100\% = 12.3\% .$$

4.5.2 Порівняння теоретично розрахованої та експериментально визначеної ймовірності помилки

В пункті 2.8.1 було визначено, що теоретична ймовірність похибки рівна 0.299%. При тестуванні системи в штатному режимі, відсоток неспрацювань системи складав 0.5%.

Повторні спроби передачі даних при втраті пакету (через завади або помилки) дозволили підвищити надійність системи на рівні 99%.

Система показала високу стійкість до завад завдяки використанню частотного переналаштування та дільникам часового доступу TDMA. Проте металеві перешкоди можуть значно знизити ефективність роботи системи без додаткових компенсаторів.

На коротких відстанях (до 50 м) система працювала без збоїв. На відстані 1000 м з'явилися втрати пакетів та підвищена затримка через зниження рівня сигналу.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		108

ВИСНОВКИ

У межах дипломного проєкту було розроблено та реалізовано систему керування з використанням драйвера, що передає сигнали через оптичний канал. Проведений аналіз існуючих технологій дозволив обґрунтувати доцільність застосування оптичного керування як ефективного способу забезпечення гальванічної розв'язки та підвищення електробезпеки силових пристроїв.

У ході проєктування були виконані наступні завдання:

- сформовано технічні вимоги до центрального та виконавчих модулів системи;
- розроблено функціональні та принципові електричні схеми;
- здійснено розведення друкованих плат та виготовлення захищених корпусів;
- створено програмне забезпечення для управління передачею даних через NRF24L01+ та обробки GPS-координат;
- реалізовано протокол бездротового зв'язку з використанням TDMA та частотного переналаштування для підвищення завадостійкості;
- проведено теоретичні розрахунки енергоспоживання та практичне тестування системи.

За результатами випробувань підтверджено, що система демонструє високу точність позиціонування, стабільність зв'язку та низьку ймовірність помилок (менше 0,5%). Було доведено ефективність реалізованих алгоритмів та структурної архітектури як у закритих приміщеннях, так і на відкритих просторах. Практичним шляхом було визначено параметри отриманої системи:

- Швидкість передачі: 1.9 Мбіт / с.
- Максимальна кількість датчиків в системі: 100 шт.
- Максимальна густина датчиків на площу радіусом 15 метрів: 10-15 шт.
- Ймовірність помилки системи: 0.4%

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		109

- Оптимальна дальність стабільної роботи системи: 15-20 м.

Отримані результати підтверджують доцільність використання розробленого рішення для широкого спектру застосувань — від цивільних систем освітлення та безпеки до спеціалізованих промислових і навіть військових задач. Високий рівень модульності, масштабованості та енергоефективності системи свідчить про її практичну цінність і потенціал для подальшого розвитку.

У процесі дослідження була проведена порівняльна характеристика самостійно розробленої бездротової радіосистеми з комерційною системою Ajax.

Самостійно розроблена система призначена для централізованого керування масивом сенсорних модулів, які можуть бути використані в інженерних, дослідницьких, військових або освітніх цілях.. Живлення сенсорних модулів автономне, реалізовано енергозберігаючий режим (sleep), а також є можливість геопозиціонування завдяки модулю GPS NEO-6M. Оновлення прошивки можливе вручну або через OTA.

Система Ajax, натомість, є готовим до використання комерційним рішенням, орієнтованим на охорону житлових, офісних та промислових об'єктів. Вона використовує запатентований бездротовий протокол Jeweller, який забезпечує надійний двосторонній зв'язок з дальністю до 2000 м на відкритій місцевості. Ajax гарантує тривалий термін автономної роботи сенсорів (до 3 років), автоматичне оновлення програмного забезпечення, а також високий рівень захисту — зокрема, шифрування даних, захист від глушіння та контроль цілісності каналу зв'язку. Інтерфейс системи реалізований у вигляді мобільного застосунку, що зручно для кінцевого користувача.

Головною перевагою самостійно розробленої системи є її гнучкість, відкритість для модифікацій, можливість інтеграції з іншими модулями, а також значно нижча вартість одного сенсорного вузла (у межах 10–20 доларів США).

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		110

У свою чергу, Ajax забезпечує професійну якість, стабільність роботи та зручність для користувача, хоча й має вищу вартість (від 50 до 80 доларів США за пристрій) і обмежену можливість налаштування.

Таким чином, вибір між двома системами залежить від цілей: у випадку, коли важливо мати повний контроль, можливість доопрацювання та адаптації — доцільніше використовувати власноруч створену систему.

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		111

37. Конформні стандарти покриття [Електронний ресурс]. — PottingCompound. — Режим доступу:

<https://www.pottingcompound.com/uk/конформні-стандарты-товщини-покриття/>

38. SolidWorks Tutorials [Електронний ресурс]. — Режим доступу:

<https://www.solidworks.com/ru/partner-product/solidworks-tutorials>

39. GitHub — nRF24 Library [Електронний ресурс]. — Режим доступу:

<https://github.com/nRF24/RF24>

40. GitHub — Adafruit GPS Library [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://github.com/adafruit/Adafruit_GPS

					ДП.ДС-11.02.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		115