

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Інформаційних електронних систем

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ ІОТ СИСТЕМ»

Виконав: студент 2(4)-го курсу, групи РТ-23мс
спеціальності 172 – Електронні комунікації та
радіотехніка, ОП- Радіотехніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

В.О.

Власюк О.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., каф. ІРТС

О.О.

Осадчук Я.О.

(прізвище та ініціали)

«11» 06 2025 р.

Рецензент: д.т.н., доц., професор каф. ІКСТ

М.М.

Михалевський Д.В.

(прізвище та ініціали)

«12» 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«13» 06 2025 р.

Вінниця ВНТУ - 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет Інформаційних електронних систем
Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність – 172 Електронні комунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма – Радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС

Олександр ОСАДЧУК

22.03. 2025 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Власюку Олександру Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Сенсори температури для бездротових IoT систем»
керівник роботи Осадчук Ярослав Олександрович, к.т.н., доц., каф. ІРТС
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від “20”03 2025 року № 97
2. Строк подання студентом роботи 10 06 2025 року
3. Вихідні дані до роботи: дослідити концепції, пов'язані з бездротовими сенсорними мережами: архітектура, функції, компоненти та застосування; реалізувати коди для налаштування модуля передавача XBEE, IP-шлюзу та платформи, що включає сенсори температури; реалізувати серверний компонент моніторингу, який дозволяє здійснювати дистанційне зондування; розробити вбудовану систему сенсорних вузлів для моніторингу температури та вологості з використанням електронних схем та антен, виготовлених за технологією SSAIL; провести моделювання та вимірювання фрактальної антени на частоті 2,43 ГГц, нижнього діапазону частот Wi-Fi.
4. Зміст текстової частини: Вступ. Розумні сенсори температури та системи сенсорів температури. Розробка структури для системи моніторингу навколишнього середовища на основі бездротової сенсорної мережі. Розробка бездротової сенсорної мережі для моніторингу навколишнього середовища та її впровадження з використанням технології SSAIL. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Біполярний транзистор (BJT). Схема для генерації різниці DVBE. Спрощена схема CMOS-сенсора температури. Фотографія мікросхеми. Виміряні показники температури. Систематичні похибки в залежності від температури. Типи мережевих схем. Результати вимірювання температури та вологості з сенсора DHT на сервері. Схема типової бездротової сенсорної мережі (WSN) з кількома вузлами. Конструкція друкованої плати. Антена, що збирає енергію. Результати моделювань.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	к.т.н., доцент каф. ІРТС Осадчук Я.О.		
Охорона праці	професор кафедри БЖДПБ, доцент, д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 25.03.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	14.02.2025-28.02.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2025-19.03.2025	
3.	Розробка завдання на БКР. Затвердження теми.	20.03.2025-25.03.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	26.03.2025-06.05.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки . Експериментальне дослідження.	07.05.2025-18.05.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини БКР	19.05.2025-22.05.2025	
7.	Охорона праці (ОП)	23.05.2025-25.05.2025	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	26.05.2025-05.06.2025	
9.	Нормоконтроль	07.06.2025-10.06.2025	
10.	Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	11.06.2025-15.06.2025	
11.	Захист БДР ЕК	16.06.2025-17.06.2025	

Студент



(підпис)

Власюк О.В.

Керівник роботи



(підпис)

Осадчук Я.О.

РЕФЕРАТ

УДК 621.397

Власюк О.В. Сенсори температури для бездротових IoT систем. Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 124с. На українській мові. Бібліогр.: 64 назв; Рис. 35.

В бакалаврській кваліфікаційній роботі проведено аналіз джерел по сенсорам температури для бездротових IoT систем, зроблено висновок, що для інтелектуальних сенсорів та MEMS найпоширенішими елементами для вимірювання температури є транзистори, термопари та термобатареї, оскільки ці елементи можна реалізувати за допомогою технології IC.

У другому розділі дослідженні кілька концепцій, пов'язаних з бездротовими сенсорними мережами: архітектура, функції, компоненти та застосування. Реалізовано коди для налаштування модуля передавача XBEE, IP-шлюзу та платформи, що включає різні сенсори. Запропоновано відповідне взаємозв'язування цих компонентів для формування цілісної та ефективної платформи для моніторингу екологічних подій. Реалізовано серверний компонент моніторингу, який дозволяє здійснювати дистанційне.

В третьому розділі була зосереджена увага на розробці вбудованої системи сенсорних вузлів для моніторингу температури та вологості з використанням електронних схем та антен, виготовлених за технологією SSAIL. Ця технологія покращує конструкцію сенсорів, дозволяючи формувати антену та схему збору радіочастотних сигналів на різних пластиках, навіть на корпусі пристрою. Було розроблено та протестовано частину вузла, що містить збирач енергії та комунікаційну частину. Результати моделювання та вимірювань фрактальної антени показують ідеальну відповідність на частоті 2,43 ГГц, і вона повністю охоплює нижній діапазон частот Wi-Fi.

Сенсорну мережу з випадково розподіленими вузлами було показано за допомогою моделювання в MATLAB на основі таких параметрів, як довжина області, ширина області, очікувані показники сенсорів та розмір пакета даних. Були проаналізовані різні режими роботи модуля Wi-Fi, і було зроблено висновок, що режим глибокого сну використовує найменшу кількість енергії.

Ключові слова: сенсор температури, бездротова сенсорна мережа, інтернет-комунікація, інтернет речей, моніторинг навколишнього середовища.

ABSTRACT

Vlasyuk O.V. Temperature sensors for wireless IoT systems. Bachelor's qualification work. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 124p. In Ukrainian. Bibliography: 64 titles; Fig. 35.

In the bachelor's qualification work, an analysis of sources on temperature sensors for wireless IoT systems was conducted, it was concluded that for intelligent sensors and MEMS, the most common elements for measuring temperature are transistors, thermocouples and thermopiles, since these elements can be implemented using IC technology.

In the second section, several concepts related to wireless sensor networks are studied: architecture, functions, components and applications. Codes for configuring the XBEE transmitter module, IP gateway and platform including various sensors are implemented. Appropriate interconnection of these components is proposed to form a holistic and effective platform for monitoring environmental events. A monitoring server component is implemented, which allows for remote.

The third section focused on the development of an embedded sensor node system for temperature and humidity monitoring using electronic circuits and antennas fabricated using SSAIL technology. This technology improves the design of sensors by allowing the antenna and RF signal collection circuit to be formed on various plastics, even on the device body. A part of the node containing the energy harvester and the communication part was designed and tested. The results of the simulation and measurements of the fractal antenna show a perfect match at 2.43 GHz, and it completely covers the lower Wi-Fi frequency range.

A sensor network with randomly distributed nodes was demonstrated using MATLAB simulations based on parameters such as the length of the region, the width of the region, the expected sensor performance, and the size of the data packet. Different operating modes of the Wi-Fi module were analyzed, and it was concluded that the deep sleep mode uses the least amount of energy.

Keywords: temperature sensor, wireless sensor network, internet communication, internet of things, environmental monitoring.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗУМНІ СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ ТА СИСТЕМИ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ	12
1.1 Вимірювання температури, різниці температур та змін температури в промисловому застосуванні	13
1.2 Температурні чутливі елементи	14
1.3 Характеристики сенсорів температури біполярних транзисторів.....	17
1.4 Біполярні транзистори в комплементарній метал-оксидно- напівпровідниковій (КМОП) технології	19
1.5 Сенсори температури з виходом, що модулюється шпаруватістю (DEM).....	21
1.6 Принципи роботи інтелектуальних сенсорів температури на основі біполярних транзисторів з цифровим змінним коефіцієнтом (DCM).....	24
1.7 Обробка сигналів модульованого робочого циклу.....	28
1.8 Прості системи з цифровою та аналоговою обробкою сигналів.....	34
1.9 Висновки до розділу.....	35
2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ДЛЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ БЕЗДРОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ	37
2.1 Вибір типу сенсорної мережі	37
2.2 Бездротова сенсорна мережа.....	42
2.3 Методологія, впровадження та результати	45
2.4 Висновки до розділу.....	60
3 РОЗРОБКА БЕЗДРОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ЇЇ ВПРОВАДЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ SSAIL	61
3.1 Вибір типу бездротової сенсорної мережі	61
3.2 Досягнення у застосуванні бездротових сенсорних мереж (WSN).....	63
3.3 Комунікаційний модуль з використанням технології SSAIL.....	67
3.4 Проектування модуля Wi-Fi та сенсорного вузла.....	68
3.5 Конструкція енергозбиральної антени.....	70
3.6 Архітектура та реалізація сенсорного вузла.....	72
3.7 Моніторинг вузла сенсора.....	72
3.8 Моделювання вузла сенсорної мережі.....	74
3.9 Аналіз споживання енергії комунікаційним модулем.....	78

3.10	Антенa для збору енергії з мережі Wi-Fi на частотах 2,4 ГГц та 5,0 ГГц.....	80
3.11	Результат реалізації сенсорного вузла.....	83
3.12	Висновки до розділу.....	85
4	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	87
4.1	Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	87
4.2	Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	90
4.3	Пожежна безпека.....	95
	ВИСНОВКИ.....	98
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	100
	Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал.....	105
	Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (бакалаврської) кваліфікаційної роботи.....	117
	Додаток В (довідниковий) Лістинг програми.....	119

ВСТУП

Актуальність. Технологія Інтернету речей (IoT) та її застосування перетворюють реальні речі на розумні об'єкти, інтегруючи все в рамках спільної інфраструктури для управління продуктивністю за допомогою програмного застосунку та пропонуючи своєчасне оновлення за допомогою інтегрованих веб-серверів. Якість життя, зелена економіка та управління забрудненням у суспільстві вимагають комплексних систем моніторингу навколишнього середовища з простими у використанні функціями та обслуговуванні. Це дослідження пропонує впровадження бездротової сенсорної мережі з вбудованими сенсорними вузлами, виготовленими з використанням технології вибіркової активації поверхні, індукованої лазером. Така технологія дозволяє інтегрувати електричні схеми з пластиковим корпусом сенсора вільної форми. У цій роботі розроблено недорогий асинхронний веб-сервер для моніторингу сенсорів температури та вологості, підключених до Wi-Fi модуля ESP32. Дані з сенсорних вузлів по всьому об'єкту збираються та відображаються у вигляді графіків у режимі реального часу на веб-сервері. Кілька веб-клієнтів в одній мережі можуть отримати доступ до даних сенсорів. Енергія для сенсорних вузлів може живитися шляхом збору енергії з навколишніх джерел електромагнітного випромінювання. Ця автоматизована система з автономним живленням контролює фактори навколишнього середовища та клімату, допомагає своєчасно діяти та покращує конструкцію сенсорів, дозволяючи формувати антену та радіочастотні схеми на різних пластиках, навіть на самому корпусі пристрою. Вона також забезпечує більшу гнучкість у модифікації апаратного забезпечення та швидке масштабне розгортання.

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) стають дедалі поширенішими в різних сферах, включаючи промисловість, транспорт, навколишнє середовище та охорону здоров'я. Крім того, зростає використання технологій Інтернету речей (IoT) майже у всіх секторах підтримує цю тенденцію. Основна увага в цьому дослідженні була зосереджена на вбудованій системі сенсорних вузлів з використанням технології селективної активації поверхні, індукованої лазером (SSAIL) для моніторингу температури та вологості. За допомогою цієї технології антени та схеми збору радіочастот можуть бути сформовані на різних пластиках, включаючи корпус пристрою. В результаті пристрій можна зменшити. Комунікаційний модуль, який підтримує схеми антен для збору енергії, дозволяє швидко та економічно ефективно виготовляти тривимірні схеми на гнучкому матеріалі. Крім того, навіть у складних умовах довготривала робота розподілених сенсорів може бути досягнута шляхом

збору енергії з різних джерел електромагнітного випромінювання. Крім того, збір енергії з навколишнього середовища може зменшити потребу в обслуговуванні сенсорних мереж, забезпечуючи їх достатню кількість енергії для тривалішого терміну служби, що призводить до багатьох переконливих екологічних переваг та переваг у розгортанні.

Швидкий розвиток пристроїв Інтернету речей (IoT) призвів до появи різноманітних можливостей вбудованих веб-серверів. Сучасні технологічні досягнення в галузі промислових бездротових мереж моніторингу (IWSN) в основному стосуються застосувань систем екстреної допомоги, систем регулювання та контролю, систем нагляду, систем керування з розімкнутим циклом, систем оповіщення та систем моніторингу. Натомість, встановлення великомасштабних пристроїв IoT ускладнює використання систем керування на виробничих лініях, оскільки їхні величезні розміри та крихка структура роблять їх ще складнішими. Тому це дослідження дало змогу запропонувати одне з найдоступніших та найпоширеніших рішень для потреб суспільства. Сенсорну систему можна налаштувати за допомогою програмних та апаратних технологій, що спрощує її розгортання для моніторингу навколишнього середовища та забезпечує можливість збору енергії для живлення вузла в місцях, які достатньо рясніють навколишніми радіочастотними сигналами протягом тривалого часу.

Метою роботи є покращення характеристик бездротових сенсорних мереж з сенсорами температури.

Об'єктом дослідження є концепції, пов'язані з бездротовими сенсорними мережами: архітектура, функції, компоненти та застосування.

Предметом дослідження – вбудована система сенсорних вузлів для моніторингу температури та вологості з використанням електронних схем та антен, виготовлених за технологією SSAIL.

Для досягнення поставленої мети у бакалаврській кваліфікаційній роботі розв'язуються наступні задачі:

- провести аналіз сенсорів температури для бездротових IoT систем;
- дослідити концепції, пов'язані з бездротовими сенсорними мережами: архітектура, функції, компоненти та застосування;
- реалізувати коди для налаштування модуля передавача XBEE, IP-шлюзу та платформи, що включає сенсори температури.
- реалізувати серверний компонент моніторингу, який дозволяє здійснювати дистанційне зондування;

- розробити вбудовану систему сенсорних вузлів для моніторингу температури та вологості з використанням електронних схем та антен, виготовлених за технологією SSAIL;
- провести моделювання та вимірювання фрактальної антени на частоті 2,43 ГГц, нижнього діапазону частот Wi-Fi.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні: основних положень теорії функції комплексної змінної; рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей; диференціального та інтегрального числення.

Наукова новизна одержаних результатів:

На основі проведеного аналізу джерел зроблено висновок, що для інтелектуальних сенсорів та MEMS найпоширенішими елементами для вимірювання температури є транзистори, термопари та термобатареї, оскільки ці елементи можна реалізувати за допомогою технології ІС. Для діапазону температур від -55°C до $+150^{\circ}\text{C}$ біполярні транзистори дуже добре підходять для використання як сенсори температури завдяки їхній низькій вартості, хорошій довготривалій стабільності та високій чутливості.

Дослідженні кілька концепцій, пов'язаних з бездротовими сенсорними мережами: архітектура, функції, компоненти та застосування. Виявлені основні кроки, корисні для побудови бездротової сенсорної мережі. У цьому контексті реалізовано коди для налаштування модуля передавача XBEE, IP-шлюзу та платформи, що включає різні сенсори. Реалізовано серверний компонент моніторингу, який дозволяє здійснювати дистанційне зондування звідусіль.

Розроблена вбудована система сенсорних вузлів для моніторингу температури та вологості з використанням електронних схем та антен, виготовлених за технологією SSAIL. Ця технологія покращує конструкцію сенсорів, дозволяючи формувати антену та схему збору радіочастотних сигналів на різних пластиках, навіть на корпусі пристрою.

Практичне значення одержаних результатів:

Було розроблено та протестовано частину вузла системи сенсорних вузлів для моніторингу температури та вологості з використанням електронних схем та антен, виготовлених за технологією SSAIL, що містить збирач енергії та комунікаційну частину. Комунікаційний модуль, що використовується для підтримки схем антени, що збирає енергію, був розроблений для забезпечення швидкого та економічно ефективного виготовлення схем на гнучкому матеріалі у трьох вимірах. Результати моделювання та вимірювань фрактальної антени показують ідеальну

відповідність на частоті 2,43 ГГц, і вона повністю охоплює нижній діапазон частот Wi-Fi.

Сенсорну мережу з випадково розподіленими вузлами було показано за допомогою моделювання в MATLAB на основі таких параметрів, як довжина області, ширина області, очікувані показники сенсорів та розмір пакета даних. Були проаналізовані різні режими роботи модуля Wi-Fi, і було зроблено висновок, що режим глибокого сну використовує найменшу кількість енергії. Результати моделювання вдосконаленого протоколу LEACH та стандартного протоколу LEACH показують, що I-LEACH зменшує споживання енергії приблизно на 43% та збільшує пропускну здатність на 40% у мережі зі 100 вузлів. Загальне споживання енергії сенсорною мережею з десяти вузлів оцінювалося в 65,31 мВт на день за заданого режиму роботи. Моніторинг сенсорних вузлів здійснювався незалежно за допомогою високорівневого хостингового додатку PHP та бази даних MySQL. Дані сенсорів, отримані веб-клієнтом, відображалися у вигляді графіків у режимі реального часу на веб-сервері. Таким чином, ця модель є перспективною для моніторингу параметрів повітря в містах та промислових зонах.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати бакалаврської кваліфікаційної роботи отримані автором практично самостійно.

Структура і обсяг роботи. Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 4 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел.

1 РОЗУМНІ СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ ТА СИСТЕМИ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ

Окрім сенсорних елементів, інтелектуальні сенсори оснащені вбудованою електронікою, щоб вони могли взаємодіяти з іншими пристроями для обробки отриманих даних [1]. Для таких сенсорів технології виробництва та використання сенсорів, а також електронні компоненти повинні бути сумісними. Ця сумісність має бути необхідною не лише на етапі виробництва, але й за обставин, що виникають протягом життєвого циклу застосування.

Цей конфлікт вимог чітко очевидний: з одного боку, сенсорні елементи повинні взаємодіяти з фізичним середовищем якомога плавніше, тоді як, з іншого боку, електронна схема повинна бути захищена від агресивного середовища, щоб захистити її від механічних пошкоджень та корозії. Однак для деяких сенсорів ця проблема майже не існує. Наприклад, в інтелектуальних сенсорах температури та акселерометрах можна зібрати сенсорні мікросхеми в герметично закритих корпусах, тоді як фізичні величини, такі як температура та прискорення, все ще можна виміряти, оскільки за належної обережності значення згаданих величин рівні всередині та зовні корпусу. Максимальний температурний діапазон інтелектуальних сенсорів температури обмежений схемним рішенням електронних схем. Зазвичай це діапазон приблизно від -50°C до $+140^{\circ}\text{C}$. Однак, при використанні нетрадиційних чутливих елементів, таких як теплові лінії затримки, можливо створити розумні сенсори для набагато ширшого діапазону [2]. Більше того, навіть у звичайній технології інтегральних схем (IC) деякі електронні схеми можуть працювати за високих температур, навіть до $+300^{\circ}\text{C}$ [3]. Для вищих температур необхідно використовувати інші типи сенсорів. Наприклад, для сенсорів температури можна використовувати платинові (Pt) резистори для діапазону температур від приблизно -260°C до $+1000^{\circ}\text{C}$, тоді як за допомогою різноманітних термопар можна охопити ще ширший діапазон від приблизно -270°C до $+3500^{\circ}\text{C}$.

Слід зазначити, що термопари вимірюють не абсолютну температуру, а лише різниця температур між опорним спаєм та вимірювальним спаєм. Для вимірювання температури опорного спаю можна використовувати інтелектуальний сенсор температури, такий як ті, що розглядаються в цьому розділі. Фактично, інтелектуальний сенсор температури також може бути інтегрований разом з джерелом опорної напруги та інтерфейсною схемою для обробки вихідної напруги термопари та створення відповідного виходу для мікроконтролера [4].

Існує багато інших прикладів сенсорних систем, у яких фізичні/хімічні сигнали необхідно вимірювати в поєднанні з температурою, і де інтеграція з одним або кількома інтелектуальними сенсорами температури може бути гарним варіантом. Наприклад, у теплових інфрачервоних (ІЧ) сенсорах випромінювання, що випромінюється об'єктом, перетворюється на різницю температур у поглиначі тепла. Поглинене тепло нелінійно пов'язане з температурами як об'єкта, так і поглинача [5]. Температура поглинача зростатиме порівняно з температурою основної частини детектора, створюючи різницю температур, яка вимірюється термобатареею. Використовуючи напругу термобатареї та температуру основної частини детектора як входні сигнали для інтерфейсної схеми, ІЧ-випромінювання можна легко розрахувати.

Цей розділ в основному обмежується концепціями, проектуванням та застосуванням інтелектуальних температурних систем. Сенсори температури, виготовлені за комплементарною металооксидно-напівпровідниковою (КМОП) технологією. Увага зосереджена на таких властивостях, як точність, роздільна здатність та оптимізація споживання енергії. Буде показано, як користувачі можуть застосувати свої знання для оптимізації систем сенсорів температури з точки зору точності, швидкості та обслуговування в промислових застосуваннях [6].

1.1 Вимірювання температури, різниці температур та змін температури в промисловому застосуванні

Сенсори температури з високим рівнем точності є дорогими, що головним чином пов'язано з необхідними процедурами калібрування та налаштування. Крім того, точність слід регулярно перевіряти та слідкувати за тим, щоб під час застосування, наприклад, під час термоцикування або важкого механічного навантаження, необхідна точність зберігалася.

У багатьох промислових застосуваннях стабільність і хороша роздільна здатність протягом певного інтервалу часу важливіші, ніж точність відносно стандартів.

Розглянемо як приклад моніторинг змін температури з часом. Припустимо, що зміна температури на сенсорі використовуються для моніторингу теплових ефектів біомедичної або фізичної діяльності, наприклад, для характеристики матеріалів та/або моніторингу хімічних і фізичних процесів. У таких випадках зміни температури з часом необхідно відстежувати протягом певного інтервалу часу з достатньою роздільною здатністю. Абсолютна температура менш суттєва і іноді контролюється лише

для компенсації впливу певних температурних коефіцієнтів. Тому для таких застосувань основні вимоги до сенсорів температури можуть стосуватися роздільної здатності та стабільності, тоді як абсолютна точність може мати менше значення. З одного боку, сенсори з роздільною здатністю та стабільністю кращою за 1 мК легко знайти, тоді як з іншого боку, сенсори з точністю 1 мК є дуже дорогими. Крім того, важко підтримувати таку високу точність протягом тривалого періоду.

Розглянемо як другий приклад. Моніторинг різниці температур. Інтенсивність ІЧ-випромінювання можна виміряти за допомогою теплового сенсора. У такому сенсору випромінювання перетворюється на тепло на теплопоглинаючій мембрані. Через добре охарактеризований теплопровідник це тепло надходить у основну частину сенсора. Різниця температур між обома кінцями теплопровідника є мірою поглиненого тепла. Сенсори Зеєбека дуже добре підходять для вимірювання різниці температур завдяки особливості, яка дозволяє вимірювати різницю температур без зміщення. З певною нелінійністю вихідна напруга цих сенсорів пропорційна різниці температур між двома переходами [7]. У такому застосуванні має сенс також виміряти температуру одного зі спаїв, наприклад, щоб компенсувати вплив температурної залежності теплопровідності та коефіцієнта термоЕРС. Зазвичай точність, необхідна для сенсора температури, значно нижча, ніж для сенсора різниці температур.

1.2 Температурні чутливі елементи

В інтелектуальних системах сенсорів температури та мікроелектромеханічних системах (MEMS) часто використовуються інтегровані сенсори, які поєднують сенсорні елементи з інтерфейсною електронікою, необхідною для зв'язку, наприклад, з мікроконтролерами. Окрім інтегрованих сенсорів, у таких системах також можуть застосовуватися дискретні сенсорні елементи. Дискретні елементи використовуються, наприклад, для калібрування та тестування. Дискретні елементи також використовуються в середовищах, в яких температури виходять за межі діапазону, який може витримувати інтерфейсна електроніка. Таблиця 1.1 підсумовує основні характеристики деяких поширених вбудованих та дискретних сенсорних елементів для систем сенсорів температури та MEMS.

Біполярні транзистори (БДТ) та термістори належать до найчутливіших пристроїв у цій таблиці. Часто БДТ використовуються з короткозамкненим з'єднанням колектор-база і зміщені добре контрольованим струмом. Такий

спосіб зміщення має перевагу в тому, що результуюча напруга база-емітер майже лінійно залежить від температури [7]. Також характеристики термістора можна лінеаризувати, застосовуючи послідовні або шунтуючі резистори, але це призведе до зниження чутливості [7]. Висока чутливість може бути корисною, оскільки вона послабить вимоги до точності схем обробки. Фактично, будь-яка еквівалентна вхідна похибка схем обробки буде поділена на чутливість сенсора під час розрахунку відповідної температурної похибки. Часто не так складно розробити хорошу схему обробки. У цьому випадку точність сенсорних елементів важливіша за їхню чутливість.

Значною мірою неточність температурних чутливих елементів спричинена перехресним впливом механічних напружень, а отже, також змінами механічних властивостей.

Таблиця 1.1 - Основні характеристики різних типів температурних чутливих елементів

Features	Transistors (BJTs)	Thermocouples	Platinum resistors	Thermistors
Temperature range (°C)	Medium −50 to +180	Very large −270 to +3500	Large −260 to +1000	Medium −80 to +180
Accuracy	Medium	Problematic because of the reference junction	High over a wide range	High over a small range
Accuracy for measuring small temperature differences	Medium	High	Medium	Medium
Suited for integration on a silicon chip	Yes	Yes	Not in standard technology	Not in standard technology
Sensitivity	High (2 mVK ^{−1})	Low (0.05–1 mVK ^{−1})	Low (0.4%K ^{−1})	High (5%K ^{−1})
Linearity	Good	Good	Good	Very strong nonlinearity
Electrical quantity representing the temperature	Voltage	Voltage	Resistance	Resistance

З тих самих причин на точність сенсора впливає механічне напруження, що залишається після виготовлення та упаковки сенсорних елементів. Якщо порівнювати властивості транзисторів і термісторів, то у

важливому діапазоні температур близько $+300\text{ K}$ термістори мають кращу точність. Саме тому термістори часто застосовуються в сенсорних системах. З іншого боку, транзистори є одними з основних компонентів ІС. Тому транзистори можна виготовляти як компоненти сенсорів температури на кристалі. Отже, інновації в сенсорах температури на основі біполярних транзисторів слідували за швидким розвитком та інноваціями в технології ІС. З цієї причини в інтелектуальних сенсорах та MEMS біполярні транзистори є улюбленими елементами для вимірювання температури. Тому цей розділ буде присвячений переважно сенсорам температури на основі біполярних транзисторів та відповідним системам сенсорів температури.

Термопари генерують напругу, пропорційну різниці температур між, наприклад, опорним спаєм та вимірювальним спаєм.

Термобатареї складаються з низки послідовно з'єднаних термопар і також використовуються для вимірювання різниці температур. Термобатареї можуть бути виготовлені за технологією ІС і дуже добре підходять для застосування в теплових сенсорах. У теплових сенсорах фізичні величини вимірюються шляхом перетворення фізичних сигналів у температуру, спочатку різницю температур, а потім перетворення цієї різниці температур у напругу термобатареї. Зазвичай у таких сенсорах також вимірюється опорна температура, наприклад, за допомогою біполярного транзистора або термочутливого резистора. ІЧ-сенсори, включаючи популярні клінічні вушні термометри, є прикладами теплових сенсорів, у яких випромінювання поглинається консольною балкою [6], що викликає різницю температур, яка вимірюється термобатареею. Вимірювання абсолютної температури за допомогою термопари або ІЧ-сенсора також вимагає використання сенсора абсолютної температури, наприклад, термістора або транзистора, для вимірювання опорної температури.

У промислових системах часто використовуються дискретні елементи, що чутливі до температури, оскільки їх високої точності та чудової довготривалої стабільності. Найчастіше використовуваними елементами є платинові резистори, термопари та термістори. Завдяки своїй стабільності платинові резистори занесені до Міжнародної температурної шкали 1990 року як стандарт температури плавлення в діапазоні температур від $-259,4^{\circ}\text{C}$ до $+961,9^{\circ}\text{C}$ [8]. Для вищих температур використовуються інші типи сенсорів, такі як певні типи термопар. Через низьку вартість та високу надійність дискретні термопари широко використовуються в промислових застосуваннях, де доступні різні типи для різних діапазонів температур.

Термістори дуже чутливі, але не такі стабільні, як Pt резистори. Вони широко застосовуються в діапазоні температур від -80°C до $+180^{\circ}\text{C}$. Окрім

високої чутливості, термістори мають переваги малого розміру та недорогої вартості. Однак їхня сильна нелінійність ускладнює обробку термістора.

Лінеаризацію можна досягти за допомогою шунтуючих та послідовних резисторів [6], оцінка зниження чутливості. Деякі інтерфейси сенсорів, такі як універсальний інтерфейс сенсора [9], пропонують спеціальні режими обробки для термісторів, включаючи лінеаризацію.

Протягом останніх десятиліть інновації в системах температурних сенсорів, реалізованих з дискретними температурними чутливими елементами, стосувалися переважно розробки електронних інтерфейсів [10]. Для отримання додаткової інформації щодо дискретних температурних чутливих елементів та відповідних вимірювальних систем читача можна звернутися до спеціалізованої літератури [11].

1.3 Характеристики сенсорів температури біполярних транзисторів

Транзистори підходять для застосування в обмеженому діапазоні температур від (-55°C) до (150°C) . Їхніми основними перевагами є те, що вони підходять для інтеграції в стандартну технологію ІС, їхня висока чутливість і прийнятна довготривала стабільність, рис. 1.1(а).

Найпростіший спосіб зміщення температурного транзистора: колектор і база закорочені, і подається струм зміщення I_{bias} . Зазвичай струм бази значно менший за струм колектора ІС, тому ІС дорівнює I_{bias} . Сприятливі властивості транзисторів для застосування в температурних сенсорах зумовлені передбачуваним і точним зв'язком напруги база-емітер V_{BE} з температурою.

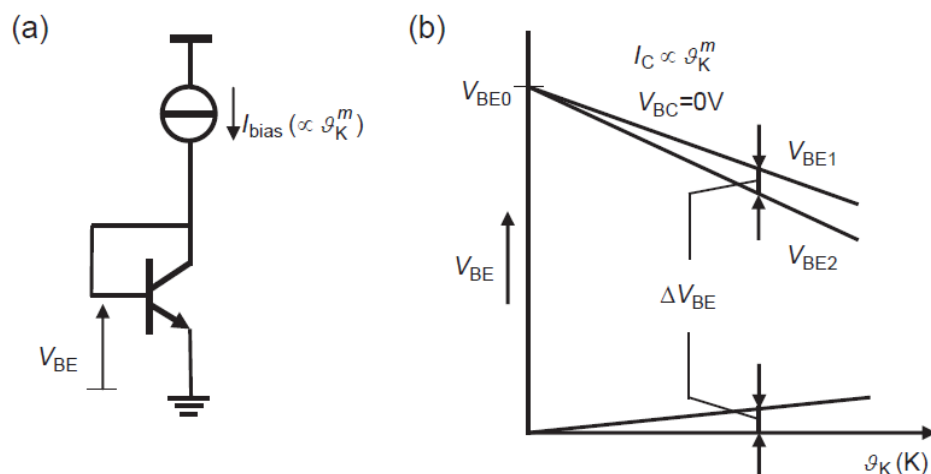


Рисунок 1.1 – (а) Біполярний транзистор (BJT) з короткозамкненим колектором та базою, що працює з постійним струмом I_{bias} ; (б) Напруга база-емітер V_{BE} зменшується майже лінійно з температурою w_K , тоді як різниця (ΔV_{BE}) між двома біполярними транзисторами, зміщеними різним струмом густини лінійно зростають з абсолютною температурою w_K

На рис.1.1 (б) представлено графіки залежності напруги база-емітер від температури для двох однакових транзисторів, які зміщені при різній щільності колекторного струму. Існує два методи визначення температури з V_{BE} : як показано:

1. У першому методі V_{BE} одного транзистора є мірою температури. Ця напруга має негативний температурний коефіцієнт (Рис. 1.1(б)).

2. У другому методі мірою температури є різниця (DV_{BE}) між базовою напругою емітера двох транзисторів, зміщених з різною щільністю струму (не показано на рис. 1.1(а)). Ця напруга пропорційна абсолютній температурі (АТЕ). Таким чином, ця напруга має позитивний температурний коефіцієнт (рис. 1.1(б)).

Будь-яку бажану лінійну температурну характеристику можна реалізувати шляхом посилення та/або додавання напруг. Ця властивість широко застосовується в інтелектуальних сенсорах температури.

У більшості сучасних сенсорів температури як напруга V_{BE} , так і різниця DV_{BE} між напругами база-емітер двох транзисторів використовуються як міра для сенсорів температури температура (див. рис.1.2). При порівнянні цих двох напруг виявляються такі особливості:

- Напруга DV_{BE} стійка до коливань концентрації легуючих домішок, тому її допуски менші, ніж у напруги V_{BE} . З цієї причини останню часто калібрують та підлаштовують.

- Напруга DV_{BE} значно менша, ніж V_{BE} , і тому чутливіша до шуму та перешкод.

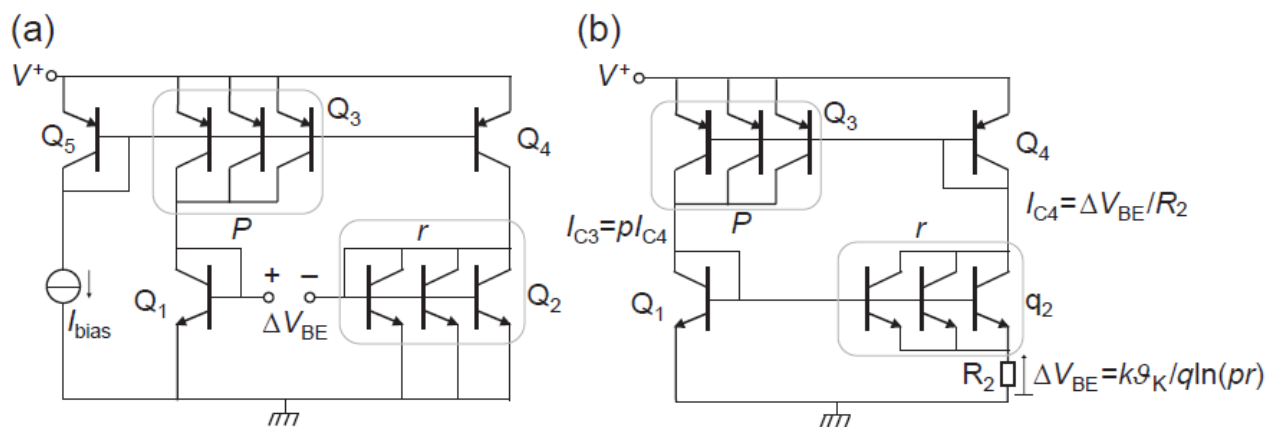


Рисунок 1.2 (а) Принцип схеми для генерації різниці DV_{BE} між напругами база-емітер двох транзисторів Q_1 та Q_2 , (б) Просте джерело струму, пропорційне абсолютній температурі

Причина використання обох напруг полягає в тому, що вони мають

протилежні температурні коефіцієнти. Таким чином, підсилена напруга ADVBE може бути використана для компенсації температурного коефіцієнта VBE, що призводить до отримання температурно-незалежної напруги (так званої опорної напруги забороненої зони). Цю напругу можна використовувати як внутрішню (власну) опорну напругу, що є важливою особливістю для забезпечення ратіометричної обробки сигналів.

На рис. 1.2(a) показано просту схему, яка генерує напругу DVBE. Для точності вимірювання, важливо, щоб усі транзистори мали однакову температуру w_K . Оскільки кремній є добрим теплопровідником, цього можна легко досягти, якщо схема виготовлена у вигляді інтегральної схеми. Транзистори Q3 та Q2 реалізовані з номерами p та r транзисторів, з'єднаних паралельно. Група паралельно з'єднаних транзисторів виконує еквівалентні функції до багатоемітерного транзистора з такою ж кількістю емітерів, з'єднаних паралельно.

Транзистори Q4, Q3 та Q5 (рис. 1.2(a)) працюють у так званій конфігурації струмового дзеркала. При температурі w_K густини колекторного струму цих трьох транзисторів однакові. Оскільки транзистор Q3 реалізований з p компонентами, з'єднаними паралельно, коефіцієнт колекторного струму $I_{C3}/I_{C4} = I_{C1}/I_{C2}$ підтримується на постійному точному значенні p, яке не залежить від температури чи інших фізичних параметрів.

1.4 Біполярні транзистори в комплементарній метал-окисдно-напівпровідниковій (КМОП) технології

Виготовлення сенсорів температури на основі біполярних транзисторів не обмежується біполярною технологією. У наступних розділах буде показано, що виготовлення таких сенсорів за CMOS-технологією може призвести до створення чудових сенсорів, які можна виготовити з меншими витратами. Крім того, показано, що підкладкові PNP (біполярні) транзистори, які можна легко виготовити за CMOS-технологією, менш чутливі до механічних навантажень, ніж NPN-транзистори, виготовлені за іншими технологіями [10]. Це пояснює, чому CMOS-сенсори температури, що обговорюються в наступних розділах, демонструють менший зсув упаковки та мають кращу довготривалу стабільність, ніж попередні біполярні конструкції.

Архітектури інтелектуальних систем сенсорів температури

В інтелектуальних сенсорах температури чутливі елементи та електроніка інтерфейсу сенсора об'єднані в одному чіпі. Таке поєднання може бути дуже сприятливим з точки зору стандартизації вихідного сигналу,

точності, надійності, можливості загального калібрування. Такі сенсори температури можуть працювати у важливому проміжному діапазоні температур від -50°C до $+180^{\circ}\text{C}$ з високою точністю та високою надійністю. Чіпи сенсорів можуть постачатися в широкому спектрі корпусів. Використання металевої інкапсуляції пропонує перевагу герметичності, що є гарним для довгострокової служби.

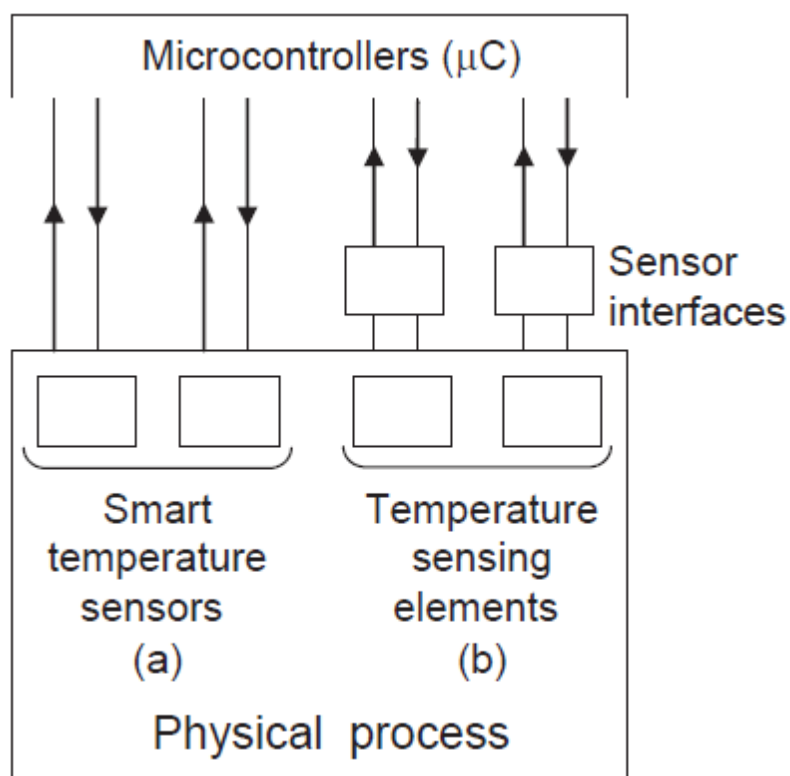


Рисунок 1.3 – Можлива конфігурація системи з мікроконтролером, деякими інтелектуальними сенсорами температури та дискретними елементами вимірювання температури з окремими інтерфейсами сенсорів

Іноді для сенсорів температури небажано поєднувати електроніку та чутливі елементи. Наприклад, коли потрібен дуже широкий діапазон температур або коли є екстремальні вимоги до стабільності чи корпусування. У такому випадку можна розробити інтелектуальну сенсорну систему, яка складається з дискретного чутливого елемента, інтерфейсу сенсора та мікроконтролера, як показано праворуч рис. 1.3(б).

Також можливо створювати мікроконтролери та інтелектуальні сенсори або сенсорні інтерфейси схеми на одному кристалі. Однак, слід враховувати наступні міркування

1. Мікроконтролери – це компоненти, що виробляються у значно більших обсягах, ніж інтелектуальні сенсори або схеми інтерфейсу сенсорів. Тому виробництво мікроконтролерів та інтелектуальних сенсорів або схем

інтерфейсу окремо коштуватиме дешевше.

2. Роздільне виробництво також може вирішити можливі проблеми сумісності, оскільки мікроконтролери часто виробляються за технологіями, які не підходять для інтелектуальних сенсорів.

3. Щоб уникнути самонагріву, бажано максимально зменшити розсіювання потужності в сенсорному чіпі. Тому в системі сенсора температури часто краще відокремити енергоємні пристрої обробки сигналів від пристроїв вимірювання температури.

Для забезпечення зв'язку між інтелектуальними сенсорами та мікроконтролерами потрібне перетворення аналогових сигналів у цифрові. Для цього аналого-цифровий перетворювач (АЦП) може бути реалізований або на кристалі сенсора, або на кристалі мікроконтролера. На ринку можна знайти багато мікроконтролерів із вбудованими АЦП. Як альтернатива, інтелектуальний сенсор температури також може бути реалізований з вихідними сигналами, сумісними з мікроконтролером, наприклад, частотно-модульований сигнал, сигнал з періодичною модуляцією або сигнал з модуляцією шпаруватості (DCM). В одному з перших інтелектуальних сенсорів температури на ринку був реалізований модулятор шпаруватості за технологією BICMOS. Нещодавно цей сенсор був перероблений та реалізовано за недорогою CMOS-технологією [11]. Сильною особливістю інтелектуальних сенсорів з виходом DCM є те, що вони отримують (дуже) високу роздільну здатність при досить низькому споживанні енергії.

При використанні CMOS-технології потрібні спеціальні схемотехнічні методи для вирішення проблем, спричинених великою невідповідністю компонентів та низькочастотним шумом. У решті цього розділу будуть представлені детальні відомості про ці спеціальні методи. Як приклад, це зроблено для сенсорів температури з виходом DCM. Буде показано, що систематичне застосування представлених методів забезпечить відмінну продуктивність схеми/системи за низької вартості.

1.5 Сенсори температури з виходом, що модулюється шпаруватістю (DEM)

Інтелектуальні сенсори з модулятором шпаруватості виробляють прямокутну вихідну напругу V_0 (Рис. 1.4), де шпаруватість D дорівнює відношенню часу високої напруги t_H до періоду $t_p = t_H + t_L$.

Привабливою особливістю цього вихідного сигналу є те, що його можна інтерфейсувати як до цифрового, так і до аналогового доменів. Такий сенсор також можна застосувати без використання мікроконтролера або

АЦП. Коли для оцифрування виходу сенсора використовується мікроконтролер, вихід сенсора підключається до входу таймера мікроконтролера, де частота таймера зазвичай значно вища, ніж частота виходу сенсора. Кількість імпульсів дискретизації протягом часу високого рівня t_H та загальний період часу t_p зберігаються у двох окремих регістрах. Таким чином, мікроконтролер виконує перетворення часового інтервалу в цифрові числа. Щоб знайти шпаруватість D , мікроконтролер виконує ділення. Імпульси дискретизації не синхронізовані з вихідним сигналом. Тому існуватиме певна невизначеність щодо точних моментів початку та закінчення часових інтервалів t_H та t_p . Ця невизначеність відповідає за виникнення шуму дискретизації, який еквівалентний шуму квантування АЦП.

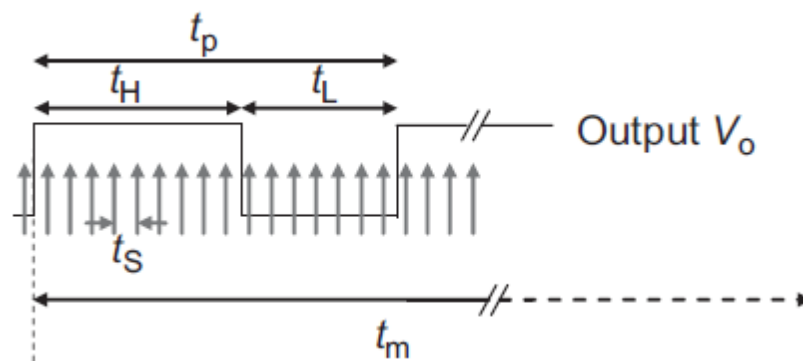


Рисунок 1.4 – Вихідна напруга V_o з модульованим робочим циклом інтелектуального сенсора температури. Імпульси показують моменти вибірки таймером мікроконтролера, що вказує на причину шуму вибірки

Розрахунок показує, що цей шум вибірки викликає похибку в робочому циклі зі стандартним відхиленням s_D .

Розглянемо методи підвищення точності інтелектуальних систем CMOS-сенсорів температури. Головним чином з економічних причин, технологія CMOS стала провідною технологією IC. Однак, для прецизійних аналогових схем технологія CMOS має два основні недоліки:

- Через велику невідповідність компонентів CMOS, такі базові схеми, як подільники напруги та струмові дзеркала, мають великі похибки коефіцієнта відношення, тоді як операційні підсилювачі мають велику напругу зсуву.
- КМОП-транзистори є поверхневими пристроями. Тому струми через КМОП-транзистори мають сильну низькочастотну ($1/f$) шумову складову.

На щастя, існують методи зменшення впливу цих недоліків. Ці методи настільки успішні, що сьогодні багато прецизійних КМОП-схем працюють

краще, ніж їхні біполярні аналоги. Два з цих методів - це динамічне узгодження елементів (DEM), яке зменшує вплив невідповідності компонентів, та перерізання, яке зменшує вплив напруги зміщення та низькочастотного шуму. Ці методи будуть коротко розглянуті в цьому розділі.

Типова схема CMOS, яка генерує напругу PTAT у CMOS-технології, показана на рис. 1.5(a), який зображує CMOS-версію схеми на рис. 1.2(a). Струмове дзеркало реалізовано на КМОП-транзисторах. У КМОП-технології також можливо виготовляти (підкладку) біполярні транзистори. Такі транзистори використовуються для генерації напруг DV_{BE} та V_{BE} , які є

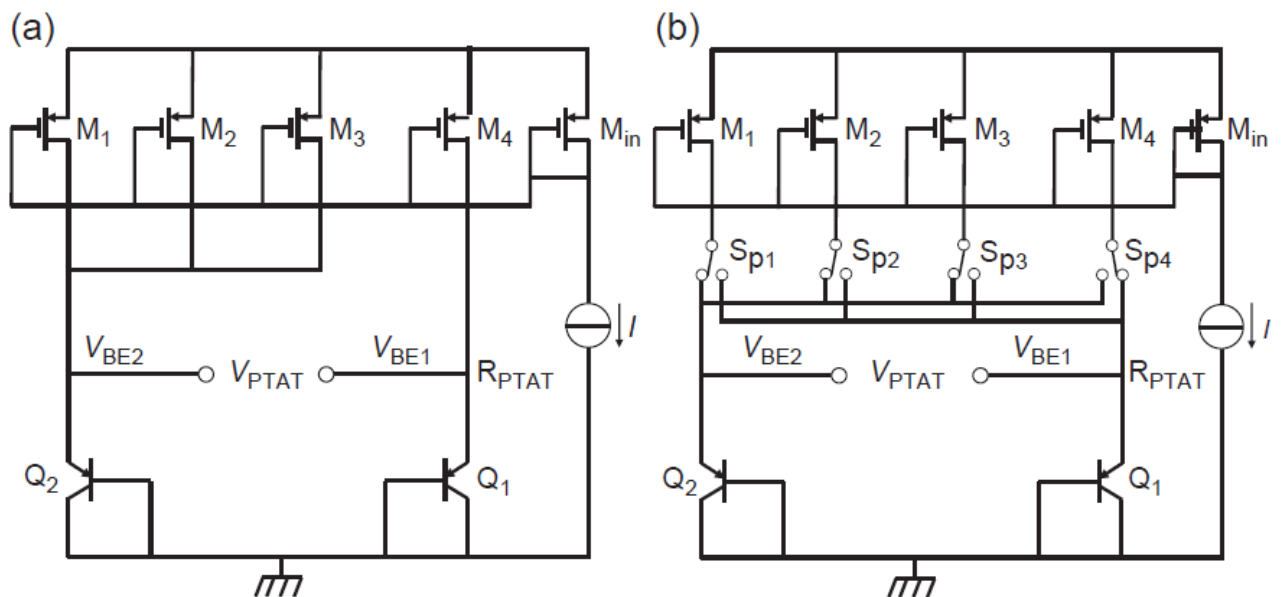


Рисунок 1.5 – Схеми, що генерують напруги, пропорційні абсолютній температурі, за допомогою КМОП-технології: (a) Базова схема; (b) Аналогічна схема з динамічним узгодженням елементів Р-канальних МОН-транзисторів (PMOS)

Однак, невідповідність між PMOS-транзисторами призведе до непередбачуваної похибки у значенні цього відношення. Застосовуючи DEM, як показано на рис. 1.5(б), помилку, викликану невідповідністю між M_1 та M_4 , можна значно зменшити до другого порядку. Для застосування цифрового моделювання даних (DEM) положення транзисторів M_1 та M_4 послідовно міняються місцями, що виконується за допомогою перемикачів $Sp_1 - Sp_4$. Після одного циклу вимірювання (чотири кроки в цьому випадку) кожен з транзисторів M_1 та M_4 переходить у положення зміщення Q_1 , тоді як інші зміщують Q_2 . Повний цикл містить N ($N = 4$) кроків перестановки. З кожним кроком значення DV_{BE} зберігається. Після повного циклу середнє значення чотирьох значень DV_{BE} наближається до номінального значення

дуже добре. Після аналого-цифрового перетворення значень DVBE, середнє значення можна розрахувати в мікроконтролері. Той самий метод можна застосувати і для інших пар компонентів. Слід зазначити, що метод DEM систематично зменшує помилки, спричинені невідповідністю. Крім того, також систематично зменшується вплив низькочастотного шуму (з частотою, меншою за частоту циклу DEM). З іншого боку, застосування DEM майже не має недоліків: при належному проектуванні вплив недосконалостей перемикача незначний.

Для користувачів мікросхем з технікою DEM буде корисно бути поінформованими про це, щоб вони могли повною мірою скористатися перевагами цієї методики зменшення помилок.

Основна ідея переривання частоти в сенсорній системі полягає в модуляції (перериванні) низькочастотних сигналів сенсорів, щоб отримати вищу частоту сигналу, яку можна легко відрізнити від низькочастотних неідеальностей підсилювачів, таких як шум зсуву та $1/f$. На виході підсилювача сигнал знову перерізається (демодулюється), тому частота сигналу сенсора повертається до свого початкового значення, тоді як шум зсуву та $1/f$ перетворюється на вищі частоти, щоб його можна було видалити за допомогою фільтра низьких частот. Сьогодні багато прецизійних інструментальних підсилювачів оснащені вбудованими переривниками [12]. У сенсорних системах переривники також можуть застосовуватися у фізичній області, так що переваги, отримані за допомогою цієї методики, впливають на більшу частину ланцюга обробки сигналів.

Можна стверджувати, що концепції DEM та переривання сигналу демонструють значний збіг: коли переривання застосовується шляхом заміни вхідних клем підсилювача, це частково подібно до заміни двох гілок диференціального вхідного підсилювача, що є дією, подібною до DEM. В решті розділу представлено тематичне дослідження інтелектуального сенсора температури [13], в якому застосовуються як DEM, так і переривання. Буде показано, що ці методи можна дуже добре об'єднати та синхронізувати один з одним, використовуючи ті самі тактові сигнали.

1.6 Принципи роботи інтелектуальних сенсорів температури на основі біполярних транзисторів з цифровим змінним коефіцієнтом (DCM)

Представлений тут приклад стосується інтелектуального сенсора температури на основі біполярного транзистора з виходом постійного коефіцієнта змінної частоти (DCM). У цьому сенсору три біполярні транзистори, що визначають температуру, використовуються для генерації

основних напруг $DV_{BE}(w)$ та $V_{BE}(w)$ (рис. 1.6).

Струми I_1 та I_2 використовуються для заряджання та розряджання конденсатора між двома пороговими напругами (рис. 1.7(a)). Перемикач активується, коли напруга на конденсаторі V_C перетинає одну з двох порогових напруг V_2 та V_1 відповідно. Різниця $(V_2 - V_1)$ між пороговими напругами є напругою гістерезису тригера Шмітта, що дорівнює міжпіковому значенню пилкоподібної форми напруга на конденсаторі. Фактично, схема на рис. 1.7(a) працює як вільно працюючий релаксаційний генератор. Необхідно звернути увагу, що значення D не залежить від значень порогових напруг V_1 та V_2 , а також значення ємності C . Сума струмів зарядки та розрядки I_{ref} розроблена з дещо позитивним температурним коефіцієнтом. Це ефективно компенсує нелінійність, спричинену кривизною. В кінцевому результаті, робочий цикл лінійно змінюється в діапазоні температур. З робочого циклу D температуру w_C у градусах Цельсія.

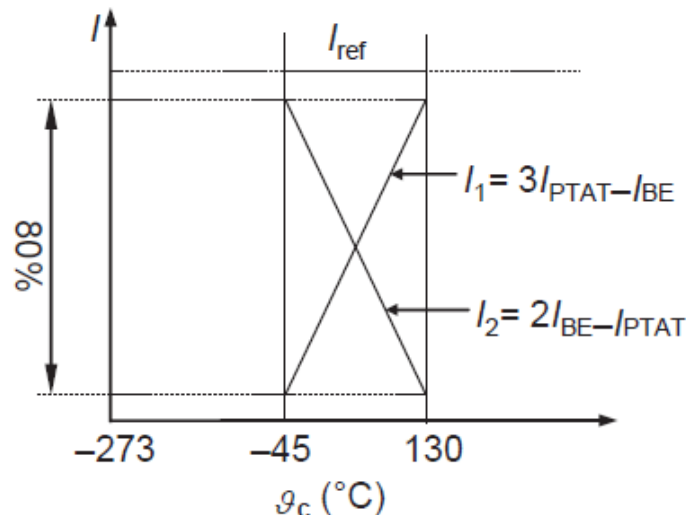


Рисунок 1.6 – Генеровані струми I_1 та I_2 залежно від температури w_C у градусах Цельсія

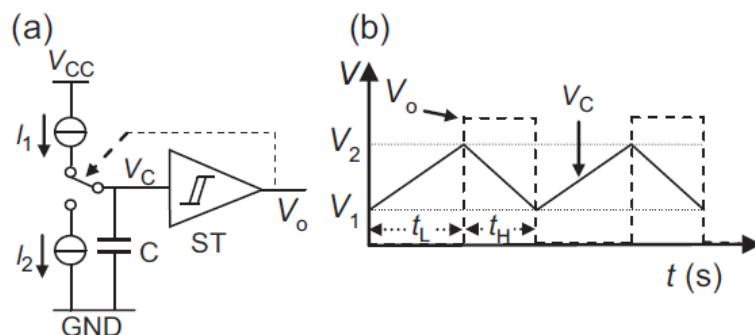


Рисунок 1.7 – Інтелектуальний сенсор з вихідним сигналом, модульованим шпаруватістю: (a) Основний принцип схеми, (b) Напруга V_C на конденсаторі C та вихідна напруга V_o прямокутної форми тригера Шмітта

Рис. 1.8 показує спрощену схему фактичного CMOS-сенсора. Генератор IPTAT — це добре відома схема основного елемента реалізовано за допомогою струмового дзеркала PMOS (OP1, M4eM7) та біполярних транзисторів Q1 та Q2. Транзистори PMOS зі струмовим дзеркалом ідентичні. Біполярний транзистор Q2 реалізовано з трьома транзисторами, з'єднаними паралельно, що має таку ж продуктивність, як і багатоемітерний транзистор з трьома емітерами, з'єднаними паралельно. Підсилювач OP1 забезпечує зміщення біполярних транзисторів Q1 та Q2 зі співвідношенням струмів 1:3 до струмового дзеркала. Разом зі співвідношенням площі емітера 1:3 для Q1 та Q2 це призводить до того, що Q1 та Q2 зміщені зі співвідношенням густини струму 1:9. Завдяки негативному зворотному зв'язку з високим коефіцієнтом посилення контуру, OP1 працює в лінійній області, так що його диференціальна вхідна напруга практично дорівнює нулю. Це призводить до того, що напруга на резисторі RPTAT дорівнює DVBE, так що струм через цей резистор є струмом PTAT $I_{PTAT} = DV_{BE}/R_{PTAT}$ (w1 mA за кімнатної температури).

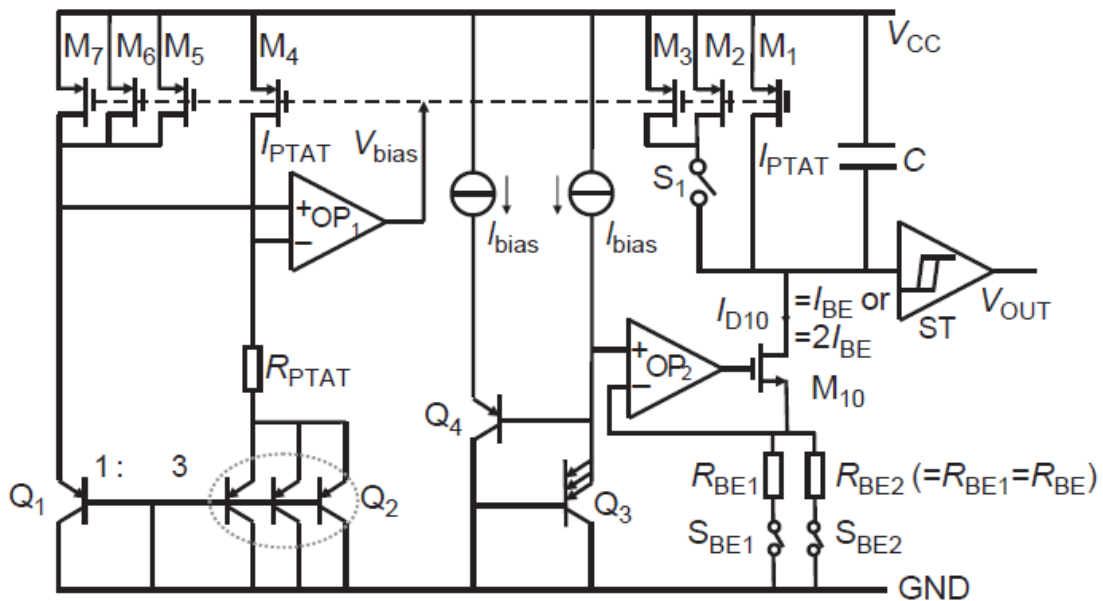


Рисунок 1.8 – Спрощена схема CMOS-сенсора температури

Подібним чином генерується струм IBE. Через негативний зворотний зв'язок, OP2 та МОН-транзистор M10 разом з резисторами RBE1 та RBE2 працюють як перетворювач напруги в струм. Якщо один з перемикачів SBE1 та SBE2 увімкнено, то підсилювач OP2 та резистор RBE перетворюють напругу база-емітер VBE3 транзистора Q3 у струм. Під час фази заряду конденсатора C, S1 увімкнено, і лише один з перемикачів SBE1 та SBE2 увімкнено. Це призводить до заряджання конденсатора C струмом $I_1 =$

ЗІРТАТ—ІВЕ. Під час фази розряду конденсатора C , перемикач S_1 вимкнено, обидва перемикачі S_{B1} та S_{B2} увімкнено. Це призводить до розряду конденсатора C струмом $I_2 = 2I_{BE} - I_{PTAT}$. При використанні CMOS-технології, проста реалізація схеми на рис. 1.8 призведе до низької точності. Ця неточність буде головним чином пов'язана з великою невідповідністю компонентів MOSFET-транзисторів, що спричиняє не тільки неточність у коефіцієнті струму струмових дзеркал, але й великі напруги зміщення в двох операційних підсилювачах. Ці проблеми можна вирішити, застосовуючи DEM та перерізання. Це дає модифіковану схему рис. 1.9.

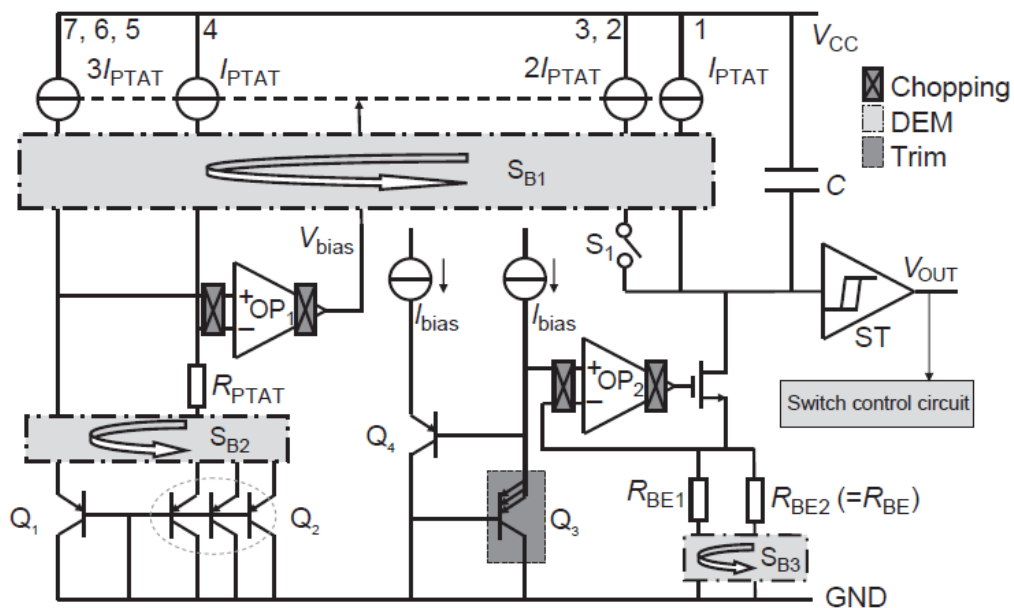


Рисунок 1.9 – Модифікації схеми для досягнення вищої точності з використанням динамічного узгодження елементів (DEM) та переривання.

Також у цій покращеній схемі невідповідності входних транзисторів застосованих підсилювачів OP_1 та OP_2 викликають великі напруги зсуву, які з'єднані послідовно з основними сигналами DV_{BE} та V_{BE} і таким чином безпосередньо впливають на точність сенсора. Щоб мінімізувати цей вплив, ефекти зсуву та $1/f$ шуму операційних підсилювачів зменшуються шляхом застосування переривання. Для тактових сигналів переривачів використовується вихідний сигнал релаксаційного генератора. Тому в цій конструкції зовнішній тактовий генератор не потрібен.

Невідповідність компонентів транзисторів струмового дзеркала також є основними джерелами помилок, оскільки ця невідповідність впливає на співвідношення струмів струмових дзеркал. Тому можна зробити висновок, що невідповідність резисторів R_{BE1} та R_{BE2} призводить до неточності компонентів I_{BE} . Зрештою, можна зробити висновок, що також невідповідність площ емітера підкладкових PNP Q_1 та Q_2 впливатиме на

точність сенсора. Всі ці помилки зменшуються застосуванням DEM. Щоб запобігти падінню напруги, спричиненому перемикачами DEM у блоці SB2, які використовуються для перемикання Q1 та Q2, для точного вимірювання DBE використовуються з'єднання Кельвіна [13]. Подібно до машини з перериванням станів, стани DEM також синхронізуються виходом тригера Шмітта, тому зовнішній тактовий генератор не потрібен. Коли всі групи компонентів обертаються одна за одною, отримуючи таким чином кожну можливу перестановку, це вимагатиме великої кількості періодів. Це буде досить трудомістким та енергоємним. Тому всі чотири групи компонентів обертаються одночасно, лише в межах восьми станів DEM/переривання. В роботі [14] показано, що цей велике спрощення майже не впливає на точність. Під час кожного циклу DEM/подрібнення відбуваються такі дії

- PMOS-транзистори джерел струму обертаються один раз,
- чотири компоненти Q1 та Q2 обертаються двічі,
- Резистори RBE міняються місцями чотири рази,
- операційні підсилювачі перериваються в чотири рази.

1.7 Обробка сигналів модульованого робочого циклу

Як описано в попередньому розділі, цикл DEM/переривання складається з восьми станів. Через невідповідність компонентів, робочий цикл вихідного сигналу сенсора змінюватиметься від періоду до періоду. У випадку постійної температури вихідний сигнал повторюватиметься кожні вісім періодів (Рис. 1.10). Для досягнення найкращої точності вихідний сигнал сенсора має бути належним чином оброблений. Мікроконтролер може вимірювати часові інтервали t_{L1} , t_{H1} ; t_{L2} , t_{H2} , використовуючи власний таймер. Систематичні помилки, спричинені невідповідністю компонентів та зміщенням, компенсуються шляхом їх усереднення протягом восьми послідовних періодів модулятора шпаруватості. Цей етап обробки сигналу виконується користувачем, який тому повинен усвідомлювати, що використання неповних циклів DEM/переривання призведе до втрати точності.

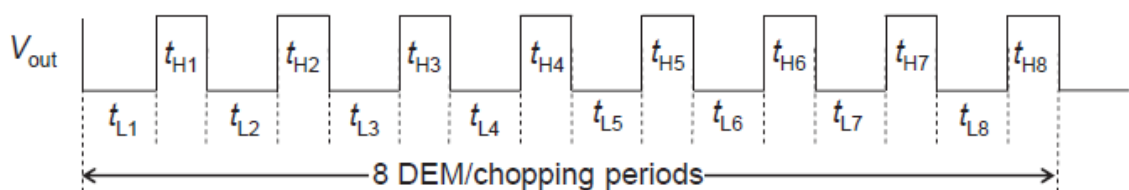


Рисунок 1.10 – Вихідний сигнал сенсора температури

Розглянемо перший тип усереднення: найкраща точність за будь-якої швидкості. Найкраща точність досягається шляхом обчислення робочого циклу кожного з восьми періодів циклу DEM/перерізання (рис. 1.10) а потім усереднення результатів. Оскільки виконання ділення з плаваючою комою потребує відносно значного часу мікроконтролера, цей тип усереднення є швидшим. Однак він призводить до вищої залишкової похибки другого порядку. Це можна пояснити наступним чином: кожен період має різну вагу. Довші періоди матимуть більші ваги, ніж коротші, і таким чином більше сприятимуть похибці кінцевого «усередненого» результату. Наприклад, рис.1.11 показує змодельовані похибки залишкової температури, спричинені зміщенням 2 мВ в OP1 (рис. 1.9) (найгірший випадок) для двох типів усереднення: D_{avg1} та D_{avg2} відповідно. Тут обидві залишкові помилки нормалізовані до 0 при 27°C. Зауважте, що середнє значення D_{avg2} призводить до більших похибок, особливо за низьких

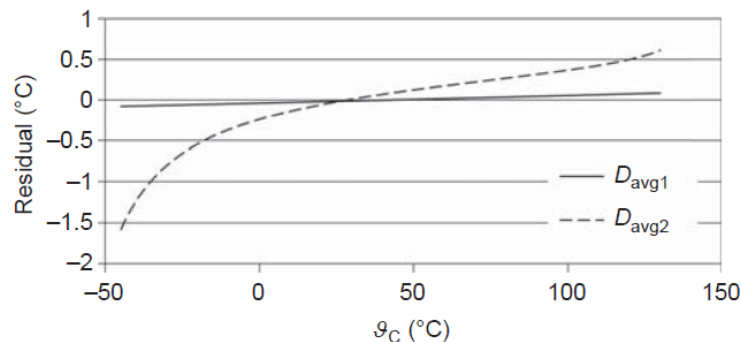


Рисунок 1.11 – Змодельовані залишкові похибки, отримані з D_{avg1} та D_{avg2} для напруги зміщення

Другий метод усереднення: найкраща точність на середніх та низьких швидкостях. Коли усереднення застосовується протягом більш ніж одного циклу DEM/переривання, можна використовувати третій тип усереднення, який також зменшує кількість поділок, зберігаючи при цьому найкращу точність. Цей метод працює наступним чином: припустимо, що перший цикл DEM/переривання виходу сенсора має 16 часових інтервалів, $t_{L1,1}$, $t_{H1,1}$, $t_{L8,1}$, $t_{H8,1}$, згідно з рис. 1.10, і що в мікроконтролері ці інтервали представлені числами $NL1,1$, $NH1,1$, $NL2,1$, $NH2,1$, $NL8,1$, $NH8,1$ відповідно. Для наступного циклу DEM/переривання ці інтервали представлені числами $NL1,2$, $NH1,2$, $NL2,2$, $NH2,2$, $NL8,2$, $NH8,2$ відповідно тощо. Після M циклів DEM/переривання шпаруватість D_{avg3} .

Сенсор температури, виготовлено за стандартною 0,7-міліметровою КМОП-технологією компанії ON-Semiconductor (рис. 1.12(a)). Більшість контактних площадок використовуються для зберігання коду підлаштування,

необхідного для калібрування на рівні пластини, та для виконання підлаштування. Ці контактні площадки недоступні для користувача. Чіп також має три контактні площадки, доступні для користувача: VCC, GND та OUT. Мікросхеми сенсорів доступні в різних корпусах (TO18, TO92, TO220, SOT223 та SOIC-8). Вихідний сигнал сенсора – це прямокутна напруга між рейками (Рис. 1.10) з частотою, що змінюється приблизно від 500 Гц до 7 кГц. Тільки шпаруватість прямокутних хвиль забезпечує точну інформацію про температуру.

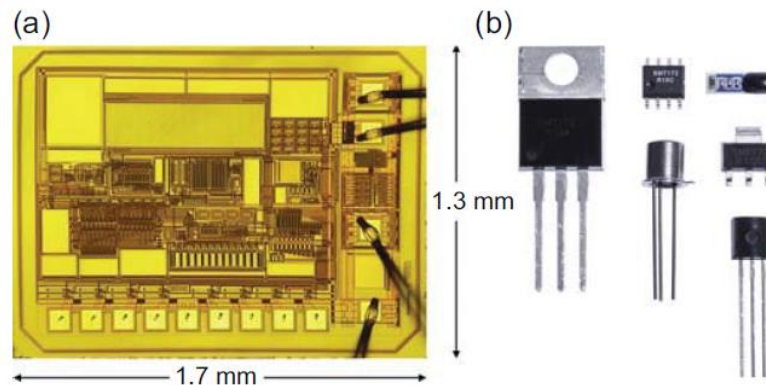


Рисунок 1.12 – (а) Фотографія мікросхеми, (b) сенсор температури в різних корпусах. Відтворено з дозволу Smartec

Щоб скористатися цим, робочий цикл D_{avg} повинен бути розрахований протягом восьми послідовних періодів одним із трьох способів, щоб знайти температуру w_C у градусах Цельсія, підставляється значення D_{avg} . Щоб показати важливість усереднення за групами з восьми періодів, суцільна лінія в рис. 1.13 показує ковзне середнє результатів вимірювань. У такому масштабі графіка не спостерігається жодних коливань. Однак, якщо зображати всі вимірювання окремо для кожного періоду, без будь-якого усереднення (пунктирна лінія на рис. 1.13), виявляються величезні коливання, які зумовлені невідповідністю компонентів CMOS.

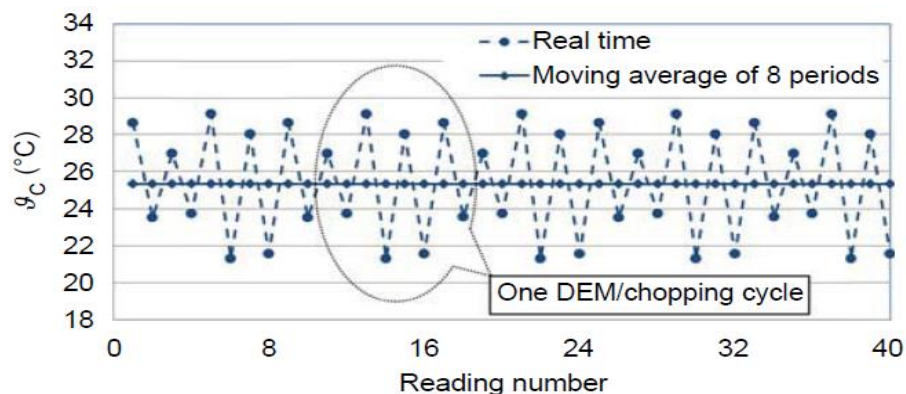


Рисунок 1.13 Виміряні показники температури за кімнатної температури ($w_{C,ref} = 25,356^{\circ}\text{C}$). DEM, динамічне зіставлення елементів

Пунктирною лінією результати повторюються кожні вісім вимірювань. Очевидно, це означає систематичні похибки, які відповідають восьми станам у межах кожного циклу DEM/розрізання. Ці похибки варіюються від $-4,0^{\circ}\text{C}$ до $3,7^{\circ}\text{C}$, і ці значення змінюються від мікросхеми до мікросхеми, залежно від конкретних невідповідностей. Усереднення за вісім періодів зменшує ці систематичні похибки до менш ніж $0,02^{\circ}\text{C}$. У масштабі, використаному для цього рисунка, не спостерігається жодних коливань, спричинених шумом, оскільки ці коливання є досить малі. Однак ці невеликі коливання також важливі. Вимірювання можна розпочати з будь-якого довільного перехідного процесу (вгору чи вниз) у циклі DEM/переривання. Будь-яка серія з восьми періодів охоплюватиме повний цикл DEM/переривання. Результати вимірювань, що обговорюються в решті цього розділу, базуються на використанні середнього значення за цілим числом M циклів DEM/переривання. З іншого боку, слід зазначити, що для $M [1]$ похибки, спричинені використанням неповних циклів DEM/переривання (тому M більше не є цілим числом), швидко зменшуються зі збільшенням значення M .

Рис. 1.14(а) показує типовий результат вимірювань систематичних похибок у повному діапазоні температур від -45°C до $+130^{\circ}\text{C}$. На рисунку видно, що все ще існує певна систематична нелінійність. Для низьких температур це головним чином через неповну корекцію кривизни. За високих температур це відбувається через експоненціальне збільшення струмів витoku. Рис. 1.15(б) показує вимірювану загальну похибку для випадку, коли з тими ж емпіричними даними середній робочий цикл ($D_{\text{avg}2}$)

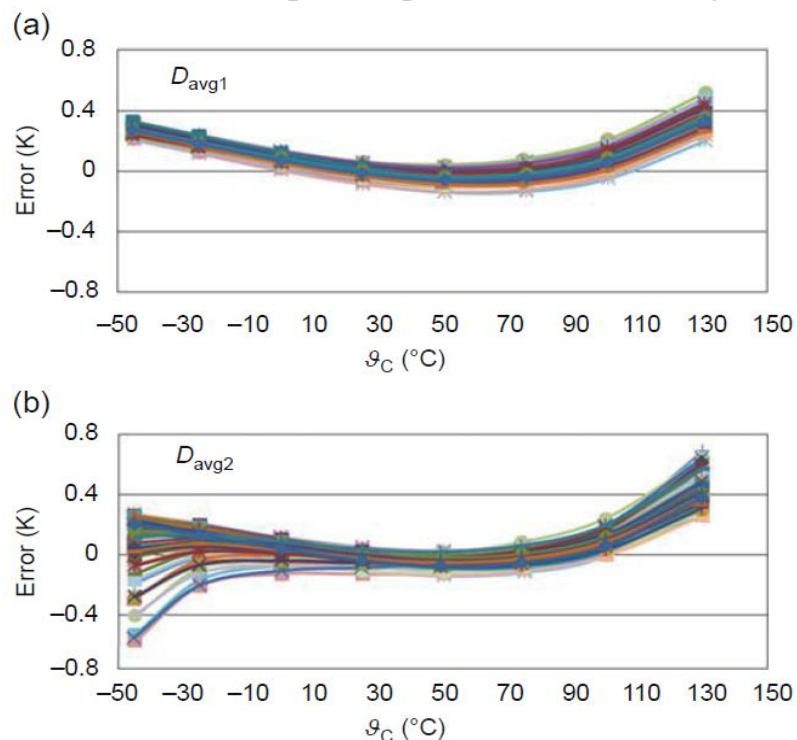


Рисунок 1.14 – Систематичні похибки в залежності від температури

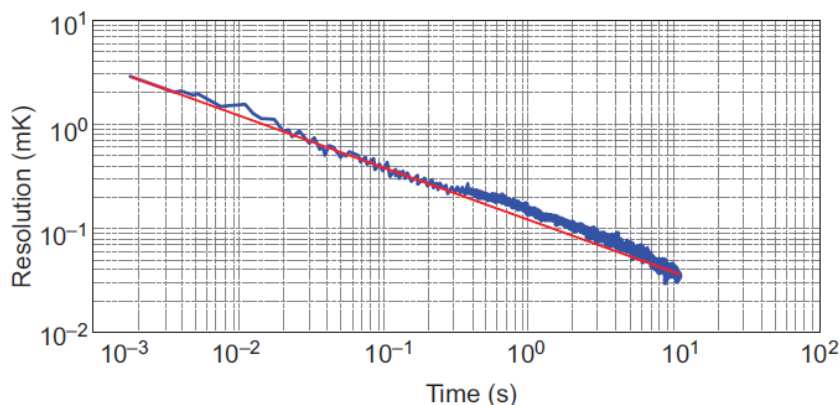


Рисунок 1.15 – Вимірюна роздільна здатність (стандартне відхилення) в залежності від часу вимірювання (частота дискретизації 72 МГц)

За низьких температур застосування D_{avg2} призводить до більшої похибки, ніж використання D_{avg1} або D_{avg3} . З іншого боку, для діапазону температур $0...110^{\circ}\text{C}$, різниця між рис. 1.14(a) та (b) є незначними. При зміні напруги живлення від 2,5 до 5,5 В виміряні коливання вихідного сигналу були меншими за $0,1^{\circ}\text{C}$.

Шумові характеристики сенсорів температури.

Для вимірювання шуму сенсора його температура підтримувалася на (дуже) стабільному значенні приблизно 25°C . Вимірювання шуму зі стандартним відхиленням до 30 мК ($=30 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}$) потребують особливої обережності та можливі лише за умови дуже стабільної температури під час вимірювання. Щоб досягти цього, сенсори були зібрані в термоконтактному корпусі. Крім того, спеціальний вимір-Для усунення впливу зміни температури навколишнього середовища застосовується техніка обробки [15]. Кожне вимірювання базувалося на усередненні за цілим числом M циклів DEM/подрібнення. Рис. 1.15 показує, що стандартне відхилення шуму зменшується з квадратним коренем з часу вимірювання. Такої поведінки слід очікувати для теплового шуму, але не для шуму $1/f$. Це означає, що придушення шуму $1/f$ працює достатньо добре. Для часу вимірювання t_m 1 с (555 циклів DEM по 8 періодів, $M = 555$) роздільна здатність становить близько 0,17 мК (середньоквадратичне значення). Для мінімального часу вимірювання t_m 1,8 мс (8 періодів, $M = 1$) роздільна здатність становить близько 3 мК (середньоквадратичне значення) рис. 1.15). Енергоефективність сенсора можна характеризувати за допомогою коефіцієнта роздільної здатності $(FoM) F$.

Зміна упаковки та довгострокова стабільність.

У прецизійних сенсорах температури зміна механічного напруження є основною причиною довготривалого дрейфу. Це також стосується і

інтелектуальних сенсорів температури, про які йдеться в цьому розділі. У сенсорах температури на основі біполярних транзисторів чутливість до механічного напруження зумовлена так званим ефектом п'єзопереходу, ефектом, який робить напругу база-емітер біполярних транзисторів чутливою до напруження. Цей ефект є анізотропним, тобто залежить від орієнтації механічного напруження та напрямку колекторного струму відносно орієнтації кристала. Для PNP-транзисторів цей ефект менш суттєвий, ніж для NPN, тоді як для розтягувальних напружень ефекти менш суттєві, ніж для стискальних напружень. Ретельні дослідження цих ефектів показують, що найкращим вибором для біполярних транзисторів як сенсорів температури є вибір вертикальних PNP-транзисторів, виготовлених на кремнієвих пластинах з орієнтацією {100}.

Основні характеристики інтелектуального сенсора температури на основі біполярного транзистора, розглянутого в цьому розділі, перелічені в таблиці 1.2. Основні досягнення цього продукту стосуються високої точності та роздільної здатності, а також чудової роздільної здатності FoM. Час вимірювання може становити всього 1,8 мс, що відповідає часу, необхідному для одного циклу DEM/зрізання з восьми періодів. Однією з головних причин низького енергоспоживання сенсора є те, що він видає квазіаналоговий сигнал. Часові інтервали якого потім оцифровуються мікроконтролером, а не в сенсору. Таким чином, перенесення частини функціональності з сенсора на мікроконтролер допомагає зменшити самонагрівання сенсора та знизити витрати системи.

Таблиця 1.2 - Основні характеристики розумного біполярного транзисторного сенсора температури

Назва	SMT172
Напруга живлення (В)	2.7...5.5
Струм живлення (мА)	42...75
Кількість штифтів	3
Діапазон температур (°C)	від -45 до +130
Вихідний сигнал	Модульований робочий цикл
Мінімальний час вимірювання (мс)	1e22
Чутливість до напруги живлення (°C/V)	0,1
Найкраща точність (°C) (діапазон температур [°C])	0,1 (-20 до +60)
	0,3 (-45 до +130)
Роздільна здатність під час вимірювання	0,00017°C за 1 с 0,003°C за 1,8 мс

1.8 Прості системи з цифровою та аналоговою обробкою сигналів

Привабливою особливістю сенсорів температури з виходом DCM, таких як SMT172, є те, що вихідний сигнал можна зчитувати як цифровим, так і аналоговим способом. Тут розглянуто два простих системних приклади кожного з них:

Система моніторингу температури з цифровою обробкою сигналів

На рис. 1.16 (а) показано восьмисенсорну систему моніторингу з цифровою обробкою сигналів, яка складається з восьми сенсорів, оціночної плати SMT8-ARM, який може зчитувати вихідні сигнали до восьми сенсорів, комп'ютер. Ця система може контролювати температуру у восьми місцях. Сигнали обробляються оцінюючою платою, яка була розроблена для швидкого прототипування та постачаються з необхідним програмним забезпеченням для мікроконтролера, що знижує поріг для нових користувачів в оцінці характеристик сенсорів для їхнього застосування. Аналогічно, були розроблені й інші оціночні плати (Рис. 1.16(б)), наприклад, плата з інтерфейсом I2C, яка дозволяє вимірювати до 128 сенсорів в одній системі.

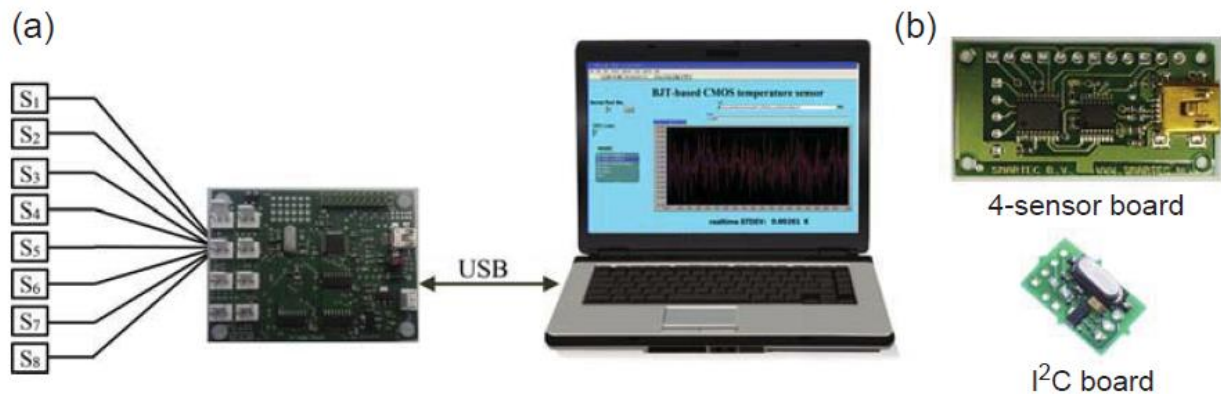


Рисунок 1.16 –(а) Восьмисенсорна вимірювальна система, (б) Інші оціночні плати. Відтворено з дозволу Smartec

Система контролю температури з аналоговою обробкою сигналів

Приклад використання властивостей аналогового сенсора з вихідним сигналом DCM показано на рис. 1.17. На цьому рисунку показано схему керування для простого аналогового термостата, де інтелектуальний сенсор температури з модуляцією шпаруватості виходу (рис. 1.4) виявляє температуру, яку потрібно контролювати. Коли робочий цикл D лінійно змінюється з температурою та застосовується фільтр низьких частот, вихідна напруга $V_{average}$ цього фільтра є постійною напругою, яка лінійно змінюється з температурою. У цій установці $V_{average}$ порівнюється із заданою напругою $V_{setpoint}$, яка регулюється потенціометром. Бінарна

вихідна напруга тригера Шмітта використовується для керування нагрівачем (не показано на рис. 1.17), який забезпечується живленням, поки $V_{average} < V_{setpoint}$. Зверніть увагу, що обидві напруги, $V_{average}$ та $V_{setpoint}$, також пропорційні напрузі живлення. Однак це не вплине на двійковий вихід тригера Шмітта. Зауважте також, що для реалізації такого процесора не потрібен мікроконтролер.

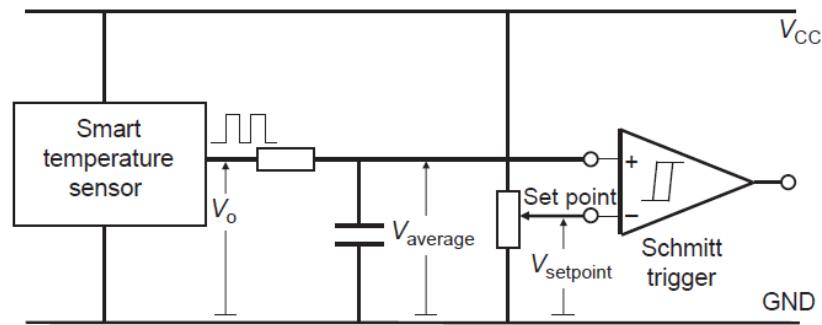


Рисунок 1.17 – Сенсорна частина простого термостата з інтелектуальним сенсором температури з модульованою вихідною напругою V_o за робочим циклом та потенціометром для регулювання заданого значення. Вихід тригера Шмітта керує нагрівачем

Спосіб використання фільтра для усереднення подібний до цифрових сигналів. Це означає, що в межах циклу DEM/переривання довгі періоди мають більший вплив, ніж короткі. За низьких температур похибка зростатиме. З іншого боку, для діапазону температур від 0°C до 110°C результати будуть такими ж точними, як і ті, що отримані за допомогою інших способів усереднення.

1.9 Висновки до розділу

На основі проведеного аналізу джерел, можна зробити висновок, що для інтелектуальних сенсорів та MEMS найпоширенішими елементами для вимірювання температури є транзистори, термопари та термобатареї, оскільки ці елементи можна реалізувати за допомогою технології IC. На системному рівні також важливими є платинові резистори, термістори та ІЧ-сенсори. Представлено порівняння властивостей чотирьох типів чутливих елементів. Термобатареї використовуються для вимірювання різниці температур і дуже підходять для теплових сенсорів, які вимірюють фізичну величину, спочатку перетворюючи сигнали в теплові величини, а потім перетворюючи теплові величини в електричні величини. Зазвичай у таких сенсорах також вимірюється опорна температура, наприклад, за допомогою біполярного транзистора.

Для діапазону температур від -55°C до $+150^{\circ}\text{C}$ біполярні транзистори дуже добре підходять для використання як сенсори температури завдяки їхній низькій вартості, хорошій довготривалій стабільності та високій чутливості. Ці транзистори також можуть бути виготовлені за стандартною біполярною, BiCMOS та CMOS технологією, разом з аналоговими та цифровими електронними схемами. З цих причин для багатьох інтелектуальних сенсорів та MEMS ці елементи є кращими при реалізації систем сенсорів температури.

Показано, що навіть недорога КМОП-технологія може бути дуже придатною для реалізації високоточних сенсорів температури та опорних напруг із забороненою зоною. Вертикальні PNP-транзистори, такі як транзистори підкладки у звичайних КМОП-{100}-орієнтованих кремнієвих пластинах, достатньо стійкі до впливу механічних навантажень. Тому сенсори температури, що використовують ці біполярні транзистори, мають менший зсув упаковки та хорошу довготривалу стабільність. У КМОП-технології узгодження компонентів погане. Незважаючи на цей недолік, існують методи для досягнення високої точності з аналоговими схемами, реалізованими в КМОП-технології. Ці методи, такі як DEM та переривання, здаються дуже ефективними для зменшення або навіть усунення впливу неузгодженості КМОП-компонентів.

Ці концепції були застосовані в інтелектуальному сенсору температури з виходом DCM сигналу. Показано, що за допомогою таких інтелектуальних сенсорів можна досягти високої надійності та точності за низьких витрат. Крім того, споживання енергії цими сенсорами може бути дуже низьким, що важливо для обмеження самонагріву. Вихідні сигнали DCM підходять не тільки для безпосереднього зчитування мікроконтролером, але й можуть використовуватися в аналогових застосуваннях без будь-яких мікроконтролерів або цифрових схем.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ДЛЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА НА ОСНОВІ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

2.1 Вибір типу сенсорної мережі

Бездротова сенсорна мережа (БСМ) – це технологія, розроблена з великим потенціалом у багатьох галузях, включаючи спостереження за Землею, моніторинг навколишнього середовища, сільське господарство, організацію ресурсів, охорону здоров'я, громадську безпеку, транспорт та військову справу. Обговорюється потенціал БСМ у наземних застосуваннях та її загальні тенденції, а також піднімаються важливі питання [15]. БСМ формуються набором пристроїв, які бездротово з'єднані один з одним через бездротову мережу та передають дані до шлюзу для надсилання в Інтернет. Пристрій називається вузлом, де кожен вузол підключений до одного (або кількох) сенсорів. Зазвичай кожен вузол сенсорної мережі складається з кількох частин: радіопередавач із внутрішньою антеною або зовнішнім антенним з'єднанням, мікроконтролер [16]. Також існує електронна схема взаємодії сенсорів як джерело енергії, зазвичай акумулятор або вбудований тип збору енергії [17].

Сенсорний вузол – це бездротовий пристрій, відповідальний за виявлення подій з навколишнього середовища та подальшу передачу їх до вузла-приймача [18]. У деяких випадках сенсор може використовуватися як пересилач; агрегування даних з кількох сенсорних вузлів, усунення надлишковості та передача даних до наступного вузла [19]. Для ефективного виконання цих завдань сенсорний вузол повинен бути оснащений мікроконтролером зі специфічними характеристиками. У цьому контексті для виконання складних обчислювальних інструкцій без ігнорування енергетичних обмежень потрібен низькоенергетичний та швидкий мікроконтролер. Розмір сенсорного вузла варіюється від коробки для взуття до розміру кінчика пальця, вартість сенсорних вузлів варіюється від кількох до сотень доларів, залежно від складності кожного сенсорного вузла [19].

Реалізація в цієї розробки базується на Arduino® Uno та деяких сенсорах, з додаванням модуля передавача, щоб скористатися перевагами технології IEEE, протоколу Zigbee 802.15.4. Оскільки Arduino Uno не постачається з передавачем Zigbee, ми прикріплюємо до Arduino Uno екран XBee, щоб дозволити радіопередачі Zigbee та мати шлюз, який діятиме як приймач.

Запропоновано новий пристрій, який можна з'єднувати з подібними пристроями для формування бездротової мережі та який можна оснастити різними сенсорами для вимірювання значень майже всіх типів параметрів навколишнього середовища, таких як освітлення, вологість, температура тощо. Деякі мультимедійні програми потребують допоміжної камери для сприйняття та передачі зображень з цільових полів, інші вимагають використання різних сенсорів для досягнення того ж результату [20]. Ці інтелектуальні пристрої працюють разом, формуючи систему моніторингу для забезпечення розумного міста [21]. Можливими перевагами технології Zigbee є розмір, але вона також має численні обмеження. Ці мініатюрні пристрої мають низьку швидкість надсилання даних через прагнення до економії енергії. Сфера застосування також обмежена, щоб уникнути високого споживання енергії. Таким чином, ця технологія буде добре прийнята в різних галузях, таких як автоматизація, автомобілебудування, моніторинг усіх типів (сільськогосподарський, промисловий та санітарний), і почала конкурувати з іншими технологіями, які монополізували бездротові мережі (Wi-Fi, Bluetooth тощо). Arduino Uno має багато функцій, найважливішою з яких є мікроконтролер з відкритим вихідним кодом; Відкритий вихідний код означає, що він розроблений для спільного використання з іншими та може бути змінений відповідно до певних вимог. Ця робота полягає в розробці інфраструктури на базі бездротової сенсорної мережі (WSN) для моніторингу навколишнього середовища. Основними цілями цього проекту є наступне:

- Комплексний огляд літератури щодо сталого моніторингу навколишнього середовища на основі бездротової сенсорної мережі.
- Пропонування методології та структури моніторингу навколишнього середовища, типової для застосунків бездротової сенсорної мережі (WSN), що використовують IEEE 802.15.4, для оптимізації доступних ресурсів у мережі.
- Проведення реальних випробувальних експериментів для оцінки сталості дизайну моніторингу навколишнього середовища на основі бездротової сенсорної мережі (WSN).

У традиційних дротових мережах мережевий рівень відповідає за підтримку топології, а також зазвичай відповідає за вирішення питань безпеки. Те саме стосується і бездротових мереж, але це є серйозною проблемою для оптимізації енергозбереження. Очікується, що мережі, що будуються в рамках цього рівня стандарту IEEE 802.15.4, будуть організовані та підтримуватися таким чином, щоб зменшити загальні витрати для споживачів. Стандарт IEEE 802.15.4 підтримує різні топології для

формування мережі, включаючи мережу кластерного дерева, мережу зірки та мережеву мережу. Вибрана топологія є вибором проекту та залежить від цільової програми, наприклад, зіркоподібна топологія для різних периферійних пристроїв, підключених до батьківського вузла, підключеного до ПК, або мережева топологія для різних взаємопов'язаних вузлів для встановлення покриття периметра безпеки. На рис. 2.1 показано типи топологій.

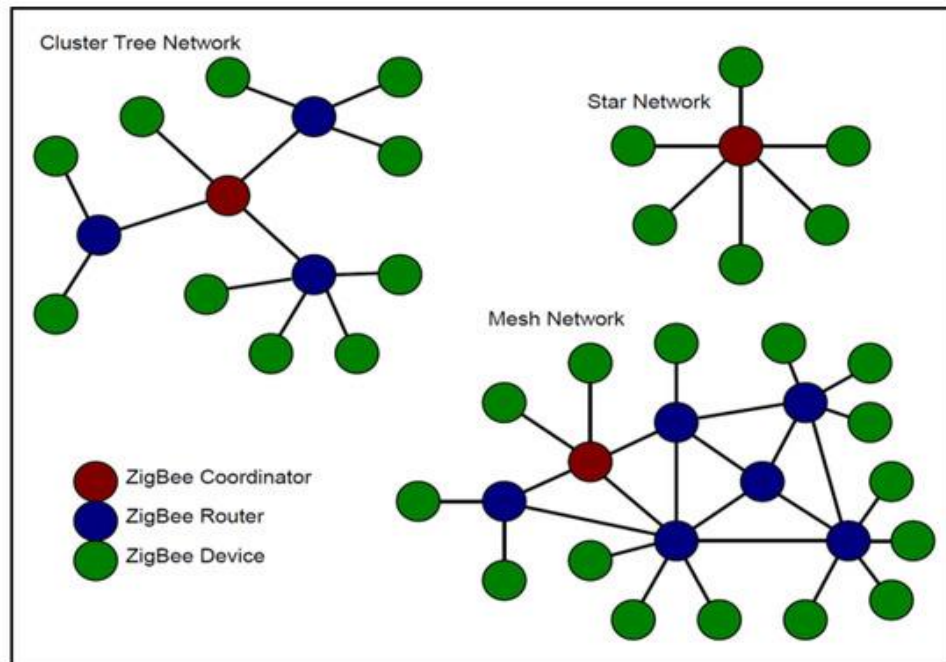


Рисунок 2.1 – Типи мережевих схем

Цей стандарт використовується для застосувань, що потребують низької швидкості передачі даних. Причиною використання бездротової технології є зниження витрат. Встановлення не вимагає перемонтажу, оскільки бездротові мережі забезпечують обмін інформацією з мінімальними зусиллями на встановлення. Ця тенденція зумовлена великою ємністю інтегрованих бездротових компонентів, які можна використовувати дешевше порівняно з іншими системами бездротового зв'язку та мобільною телефонією. Проект IEEE 802 DLL поділяється на два підрівні: MAC та LLC. LLC є спільним для всіх стандартів 802, тоді як апаратне забезпечення підрівня MAC варіюється залежно від фізичної реалізації цього рівня. На рис. 2.2 показано, як стандарт IEEE 802.15.4 базується на еталонній моделі Міжнародної організації зі стандартизації (ISO) для взаємодії відкритих систем (OSI). Характеристики IEEE 802.15.4 MAC: асоціація та дисоціація, кадр підтвердження доставки, механізми доступу до каналу, діаграма перевірки та інструкції з управління. Підрівні MAC надають два типи послуг

вищим рівням доступу через два SAP. Служба передачі даних MAC обслуговується загальною частиною підрівня (MCPS-SAP) [16].

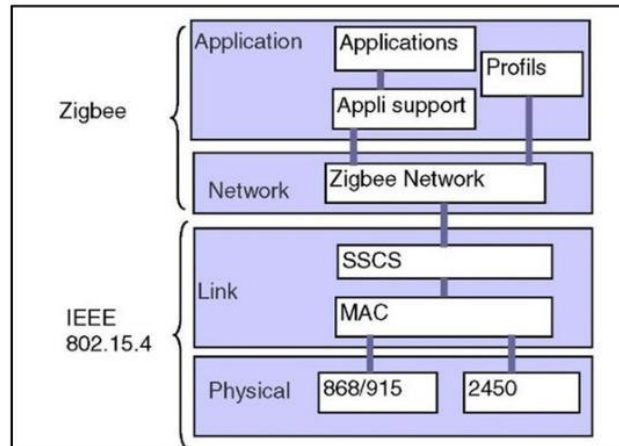


Рисунок 2.2 – Типи мережесхем

Доступ до сервісів MAC здійснюється через MLME SAP. Ці сервіси забезпечують інтерфейс між підрівнями SSC або іншими LLC та фізичними рівнями. Адміністратор сервісу MAC має 26 примітивів. Порівняно з 802.15.1 (Bluetooth), який має близько 131 примітиву у 32 подіях, MAC 802.15.4 дуже простий, що робить його дуже універсальним для застосувань, для яких він призначений [17].

Загальний формат MAC-кадру був розроблений таким чином, щоб бути достатньо гнучким та адаптуватися до вимог різних застосувань з різними топологіями мережі, зберігаючи при цьому простий протокол. Загальний формат MAC-кадру показано на рис. 2.3. MAC-кадр називається протоколом MPDU [18].

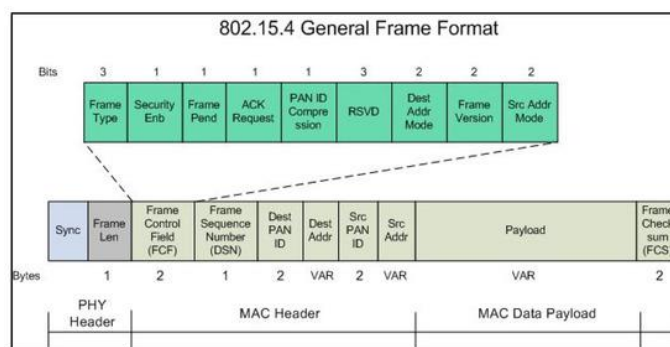


Рисунок 2.3 – MAC-кадр

Перше поле в заголовку кадру – це поле керування. Воно вказує тип MAC-кадру, що передається, визначає формат і напрямки поля та повідомлень керування, а також підтвердження (ACK). Коротше кажучи, поле керування визначає решту кадру даних та його вміст.

Розмір адреси може коливатися від 0 до 20 байт. Наприклад, кадр даних може містити інформацію про джерело та призначення, тоді як підтвердження (АСК) не містить жодної інформації в жодному напрямку. Крім того, один кадр маяка може містити лише інформацію про напрямок джерела. Така розтяжна збірка допомагає підвищити ефективність протоколу зберігання пакетів.

Поле корисного навантаження, куди надсилаються дані, має змінну довжину. Однак повний MAC-кадр не повинен перевищувати 127 байтів інформації. Корисне навантаження залежить від типу кадру. Стандарт IEEE 802.15.4 має чотири різні типи кадрів: кадр маяка, кадр даних, кадри підтвердження та кадри команд MAC.

Тільки кадри даних та маяк містять інформацію з вищих рівнів. Повідомлення АСК та команди MAC, що виходять з кадрів, використовуються для зв'язку MAC між вузлами.

Інші поля в MAC-кадрі - це FCS та порядковий номер заголовка, що посиляється на АСК-кадри з попереднім записом. Передача вважається успішною лише тоді, коли АСК-кадр має той самий порядковий номер, що й попередній переданий кадр.

IEEE 802.15.4 PHY пропонує два варіанти, що відповідають MAC, щоб дозволити широкий спектр мережевих застосувань. Обидва методи PHY базуються на DSSS. Це зроблено тому, що це призводить до низьких витрат на впровадження цифрових інтегральних схем, і обидва мають однакову базову структуру пакетів низькоциклової роботи з низьким споживанням енергії. Основна відмінність між двома PHY полягає в смузі частот. PHY 2,4 ГГц визначає роботу в діапазоні ISM, який практично доступний у всьому світі, тоді як PHY діапазону 868/915 МГц визначає роботу в діапазоні 865 МГц у Європі та 915 МГц у діапазоні ISM у Сполучених Штатах, тоді як мобільність між країнами не очікується для більшості мережевих застосувань [18].

Міжнародний діапазон 2,4 ГГц пропонує переваги з точки зору ринків та зниження виробничих витрат. Більше того, такі діапазони, як 868 МГц та 915 МГц, можуть бути альтернативою зростаючим та іншим супутнім перешкодам (таким як мікрохвильові печі тощо), пов'язаним з діапазоном 2,4 ГГц. Він також пропонує більшу дальність зв'язку, оскільки втрати на поширення сигналу менші. Другою відмінністю характеристик PHY є дальність передачі. PHY 2,4 ГГц забезпечує дальність передачі 250 кбіт/с, тоді як PHY 868/915 МГц забезпечує швидкості передачі 20 кбіт/с та 40 кбіт/с відповідно. Ця чудова дальність передачі в PHY 2,4 ГГц головним чином пояснюється модуляцією вищого порядку, в якій кожен символ представляє

кілька бітів. Різні діапазони передачі можуть бути використані для досягнення різноманітних розробок та застосувань. Наприклад, дані РНУ з низькою щільністю в діапазоні 868/915 МГц можуть бути зайняті для більшої чутливості та зон покриття, таким чином зменшується кількість вузлів, необхідних для покриття географічної області, тоді як передача верхнього діапазону в РНУ 2,4 ГГц може бути використана для досягнення пропускну здатності та низької затримки. Очікується, що застосування підходять для кожного РНУ та їх діапазонів передачі [18].

2.2 Бездротова сенсорна мережа

Бездротова сенсорна мережа (БСМ) розглядається як кілька сенсорних вузлів, випадково розподілених у цільовому полі для спільного моніторингу та запису його фізичних станів. Ця мережа включає сотні або тисячі інтелектуальних пристроїв із можливостями сенсорного та обробного зондування, які живляться від спеціального акумулятора. Ці пристрої повинні отримувати сигнали навколишнього середовища, включаючи вологість, температуру, світло та вібрації. Сенсорні вузли призначені для виявлення подій, передачі даних, агрегації та обробки пакетів у центральному місці, яке називається вузлом-приймачем [19]. Завдяки цим характеристикам БСМ використовуються в різних галузях, таких як охорона здоров'я, промисловість, моніторинг навколишнього середовища, дослідження та розробки [19]. У цьому контексті автори в [20] розглянули деякі програми, пов'язані з охороною здоров'я, та окреслили проблеми бездротових сенсорних мереж для підтримки високого рівня довіри та забезпечення конфіденційності та безпеки медичних даних. У [21] автори запропонували систему моніторингу здоров'я, здатну отримувати фізіологічні параметри з кількох тіл пацієнтів за допомогою бездротової мережі сенсорних систем (БМТ). Виявляючи аномальний стан, ця система подає сигнал тривоги пацієнту та надсилає SMS/електронний лист медичним працівникам. Систему було оцінено з точки зору покриття, споживання енергії та наскрізної затримки.

Фактично, бездротові сенсорні мережі підтримують багато типів застосувань: медичні, військові та цивільні. Ці застосування включають, але не обмежуються, моніторинг навколишнього середовища, медичний нагляд, спостереження та автоматизацію будинків, відстеження об'єктів та управління сільським господарством. Незважаючи на численні пропонувані послуги, бездротові сенсорні мережі (WSN) страждають від серйозних обмежень щодо енергетичних ресурсів на кожному сенсорному вузлі. Крім

того, часто незручно замінювати батареї вузлів. Тому використання методів збору енергії на основі навколишнього ресурсу може відігравати ключову роль у продовженні терміну служби батарей [22].

Структура Інтернету речей (IoT) встановлює зв'язок будь-кого з будь-чим у будь-якому місці для дуже масштабного Інтернету. Нещодавно кілька робіт почали вивчати безпеку комунікацій IoT, особливо їх поточний стан, складні архітектури та перспективні заходи [23]. По-перше, поточний стан IoT охоплює переважно його багаторівневі архітектури та їх вплив на запропоновані рішення. По-друге, розглядається кілька проблем IoT через обмежені можливості периферійних пристроїв, задіяні гетерогенні технології та відсутність безпеки. По-третє, були впроваджені перспективні заходи для вирішення проблем безпеки, характерних для шарів та пристроїв IoT, та для забезпечення сумісності в гетерогенному середовищі. Гетерогенна мережа на основі бездротової сенсорної мережі (WSN) та IoT розгортається для моніторингу здоров'я тварин з точним місцезнаходженням у [23].

Автори в [24] запропонували освітню модель Інтернету речей для проектування метеостанції на основі хмарних сервісів ThingSpeak. Їхня платформа включає як програмну, так і апаратну частини, зокрема сенсори DHT11 та BMP180, мікроконтролер Mega 2560, хмарні API-інтерфейси, скрипти MATLAB, а також додатки, реалізовані як на операційних системах Windows, так і на Android. Метеостанція вимірює події навколишнього середовища (температуру, вологість та тиск) та надсилає їх на сервер ThingSpeak через модуль WiFi ESP8266. Сервер ThingSpeak реалізує два канали. Канал Meteostanica використовується для зберігання вимірних даних, а також для візуалізації MATLAB. Другий канал дозволяє аналізувати дані MATLAB, обчислювати середні значення вимірних показників, а потім визначати їх поточний стан.

У роботі [24] автори представили інфраструктуру моніторингу навколишнього середовища з використанням архітектури на основі сенсорної мережі. Подібно до [24], ця робота використовує три основні компоненти: сенсори, шлюз та хмару. Дані (температура та вологість) вимірюються спеціальними сенсорами та направляються шлюзом до хмари, де дані доступні в режимі реального часу для візуалізації та аналізу за допомогою смартфонів. Ця архітектура інтегрує як пам'ять кнопок, так і аспекти μ Panel з різних причин. По-перше, пам'ять кнопок дозволяє цій архітектурі працювати навіть за відсутності живлення та підключення до Інтернету. По-друге, μ Panel розроблена для роботи з повільним та ненадійним підключенням до Інтернету. Крім того, хмарна інфраструктура на основі μ Panel здатна контролювати сенсори локально без постійного підключення до Інтернету.

Щодо результатів, автори продемонстрували ефективність μ Panel у підтримці легкого та швидкого розгортання складних систем моніторингу. Вони стверджують, що їхня компактна схема передачі на смартфонах, а також підтримка push-сповіщень є основними концепціями, що підсилюють роботу клієнтів у режимі реального часу, подібно до моніторингу на основі смартфонів.

Автори в [21] використовували як інтелектуальні сенсорні пристрої, так і хмарні застосунки для розробки гнучкого IoT API для підвищення безпеки наскрізного зв'язку. Головною метою цієї роботи є забезпечення безпечного наскрізного зв'язку, незважаючи на періодичні відключення мережі та обмеження пристроїв типу «туман», особливо з точки зору енергії, буфера, обчислювальної потужності та швидкості мережевого каналу. Для досягнення цих цілей проміжне програмне забезпечення реалізує два алгоритми: алгоритми відновлення сеансу та визначення оптимальної схеми. Будь-який пристрій, нещодавно відключений через ненадійне мережеве з'єднання, може відновити роботу за допомогою першого алгоритму. Більше того, щоб відповідати заданому обмеженню ресурсів, користувач використовує другий алгоритм для вибору найбільш підходящої схеми наскрізного захисту за допомогою машинного навчання з учителем. З точки зору результатів, ця робота продемонструвала, що використання статичних властивостей попередньо спільного ключа або сертифікатів може значно пришвидшити безпечний зв'язок.

У роботі [22] представлено основні технології, здатні вирішувати екологічні проблеми в розумних містах. Ця робота стосується бездротової сенсорної мережі (WSN), що включає вузли бездротових сенсорів, шлюз та хмарні сайти. Спочатку дані збираються з вузлів WSN за допомогою програм моніторингу інтелектуального середовища (SEM). Шлюз використовується для перетворення даних з пристроїв Інтернету речей та їх передачі до ядра Інтернету речей Google Cloud Platform (GCP), яке може виявляти величезні вразливості. Коли параметри відхиляються від нормальних значень, надсилається електронний лист із сповіщенням для виявлення аномалій у параметрах навколишнього середовища. Для керування доступом до Інтернету речей та запобігання конфліктам повідомлень MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) в ядрі Інтернету речей AWS (Amazon Web Service) розроблено функцію аудиту електронної пошти для перевірки безпеки та стану сертифікатів периферійних пристроїв через сповіщення електронною поштою SNS (Simple Notification Service). Обмеження цього механізму полягає в синхронізації даних між пристроєм і сервером, що вимагається сертифікатами X.509. Нове з'єднання між пристроєм Інтернету

речей та сервером GCP Core здійснюється за допомогою файлу сертифікації сервера для автентифікації. Крім того, у протоколі MQTT транспортного рівня використовуються кілька параметрів, таких як ідентифікатор, регіон та тема пристрою, для забезпечення більшої надійності та достовірності з'єднання. Основний результат цієї роботи обмежується порівнянням можливостей ядер Інтернету речей в AWS та GCP ідентифікувати доступні сервіси, а також як використовувати їх у хмарних додатках Інтернету речей.

У роботі [24] автори розробили систему зв'язку на основі бездротової сенсорної мережі (WSN) та хмарних обчислень, здатну контролювати якість навколишнього повітря. З одного боку, бездротова сенсорна мережа оснащена малопотужними ZigBee-модулями, що відповідають за вимірювання якості повітря в польових умовах та передачу даних до хмари через проміжний шлюз. З іншого боку, було розроблено підхід до хмарних обчислень для збору, моніторингу, обробки та візуалізації розподілу якості повітря на великих площах. Зібрані дані обробляються в хмарі за допомогою методів штучного інтелекту на основі розпізнавання образів та опорних векторів, які дозволяють виявляти забруднювачі та розрізняти сполуки ВТЕХ. Автори провели тематичне дослідження для оцінки роботи системи, яке продемонструвало хорошу продуктивність у виявленні, вимірюванні та розрізненні поширених летких органічних сполук. Їхні результати узагальнено коефіцієнтом дискримінації 93,05% та близько 0,99 для визначення коефіцієнтів.

2.3 Методологія, впровадження та результати

Існує багато типів мікроконтролерів з різними характеристиками та можливостями. У нашій платформі ми використовували ATmega328P, вбудований у плату Arduino Uno. Для передачі даних, радіозв'язку, ми обрали модуль XBee, включаючи IP-шлюз Digi XBee-Wi-Fi, як показано на рис. 2.4.

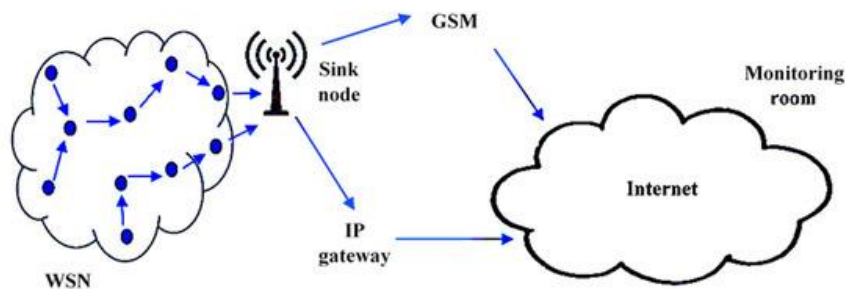


Рисунок 2.4 – Повна платформа

Сенсори є найважливішою частиною, коли йдеться про виявлення будь-якої події в будь-якому середовищі в будь-який момент часу. Завдяки новим технологіям ми змогли використовувати деякі сенсори для виявлення таких подій, як температура та вологість погоди, інтенсивність світла та деякі показники газу за допомогою сенсорів DHT11 та LDR, а також сенсорів MQ-2 та MQ-7. DHT, як показано на рис. 2.5, являє собою сенсор, що складається з двох частин: ємнісного сенсора вологості та термістора. Він також містить АЦП, який видає цифровий сигнал показників температури та вологості, що полегшує їх отримання мікроконтролером.

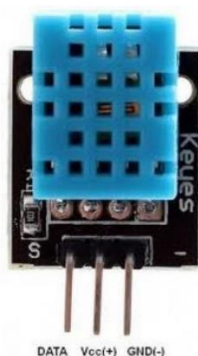


Рисунок 2.5 – Сенсор DHT

LDR, як показано на рис. 2.6, – це сенсор, який видає значення інтенсивності світла, що на нього падає. Він має два виходи: цифровий та аналоговий; ми використовуватимемо аналоговий сигнал для зчитування діапазону значень.



Рисунок 2.6 – Сенсор LDR

MQ2, як показано на рис. 2.7, є сенсором витoku газу; він може виявляти зріджений нафтовий газ (LPG), чадний газ (CO), дим та метан. Цей модуль здатний швидко вимірювати рівні витоків завдяки високій чутливості та швидкому латентному періоду. Ця характеристика зумовлена вбудованим потенціометром для регулювання чутливості сенсора.



Рисунок 2.7 – Сенсор MQ-2

Як показано на рис. 2.8, MQ-7 – це сенсор СО, придатний для вимірювання концентрації СО в повітрі. Він здатний виявляти концентрацію СО від 20 до 2000 ppm. Сенсор MQ-7 використовує метод циклічного підвищення напруги для виявлення СО. Цей сенсор інтегровано в побутові сигналізатори витоку СО, портативні детектори СО та промислові сигналізатори СО.



Рисунок 2.8 – Сенсор MQ-7

У цьому дослідженні платформа Arduino Uno використовується як основний компонент для підтримки зв'язку між різними типами комунікаційних пристроїв. Arduino Uno є найбільш підходящою платформою, оскільки це плата з відкритим вихідним кодом, яку можна легко використовувати та налаштовувати за допомогою оригінального програмного забезпечення Arduino IDE. Плата Arduino Uno, як показано на рис. 2.9, складається з мікроконтролера Atmega328, шести аналогових контактів, 14 цифрових контактів вводу/виводу, інтерфейсу USB, а також використовує контакти Rx та Tx для послідовного зв'язку.



Рисунок 2.9 – Плата Arduino Uno

Для передачі даних та подій модуль XBee, показаний на рис. 2.10, підтримує надсилання та отримання даних через протокол Zigbee. У поточному дослідженні модуль XBee використовується як передавач у наших пристроях бездротової сенсорної мережі (WSN). Модуль XBee можна підключити до платформи Arduino Uno через шилд (рис. 2.11), розроблений спеціально для цього модуля, або через USB-адаптер.



Рисунок 2.10 – Модуль XBee-PRO

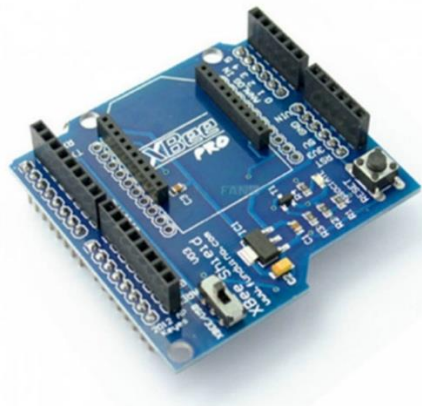


Рисунок 2.11 – Плата XBee для Arduino

Додано модуль GSM-передавача, щоб підвищити довговічність проекту та забезпечити додатковий канал із сервером для більшої гарантії доставки пакетів. Цей додатковий канал збільшує ймовірність збору подій на сервері, а також усуває помилки та швидко оновлює вимірювані показники (значення подій). SIM-карта STC вставляється в GSM-модуль для забезпечення підключення до Інтернету. GSM-модуль має багато чудових функцій, таких як зона покриття, яка може сягати 30 км, низьке енергоспоживання, оскільки наш модуль працює лише в мережі 2G, і найважливіше полягає в тому, що його можна легко інтерфейсувати з нашою платформою. Деякі модулі потребують більше енергії, ніж може забезпечити платформа, інші працюють добре без додаткового джерела живлення. Використання IP-шлюзу дуже важливе для доступу до даних через Інтернет, оскільки модуль XBee не працює на мережевому рівні; таким чином, він не може надсилати дані безпосередньо в Інтернет. Завдяки новим технологіям існує IP-шлюз,

показаний на рис. 2.12 , який може отримувати дані через протокол Zigbee, а потім використовує IP-протокол для передачі через Інтернет. Шлюз може підключатися до Інтернету або за допомогою кабелю Ethernet, або через канал Wi-Fi. Для досягнення цієї мети ми використовуватимемо канал Wi-Fi для підтримки портативності та мобільності застосунку. Загальна система продемонстрована за допомогою рис. 2.13 .



Рисунок 2.12 – IP-шлюз Digi Xbee

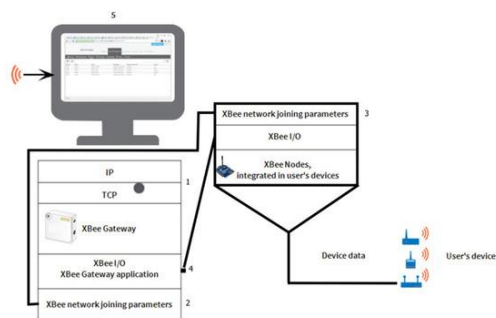


Рисунок 2.13 – Загальний потік системи

Відповідні пристрої для побудови бездротової сенсорної мережі повинні бути недорогими та мати низьке енергоспоживання. Першою пропозицією був TelosB mote, як показано на рис. 2.14 , який дійсно добре справляється з виявленням подій. TelosB mote має вбудований приймач Zigbee та налаштовується через порт USB. TelosB mote може працювати як з операційною системою на базі Windows, так і з операційною системою на базі Unix, але не з операційною системою Mac, що може бути складно для деяких застосувань. Ми вирішили замінити TelosB mote на плату Arduino Uno, оскільки оригінальне програмне забезпечення для TelosB mote більше не використовується та застаріло, як зазначено на їхньому веб-сайті.

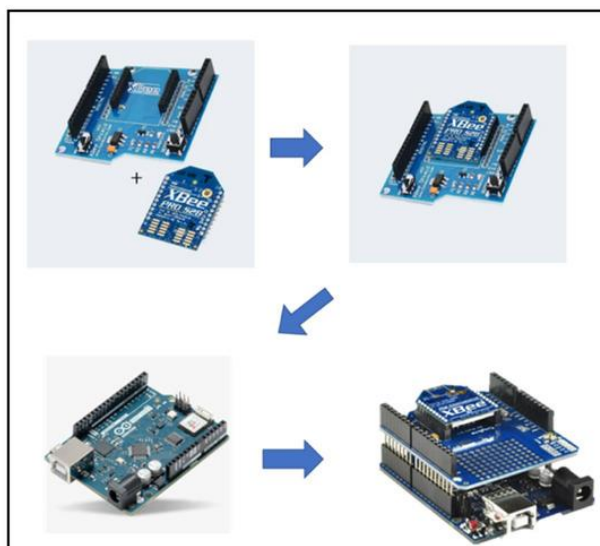


Рисунок 2.14 – Arduino Uno, підключений до XBee через шилд XBee

Arduino — це простий у використанні мікроконтролер. Перш ніж використовувати Arduino, нам потрібно додати периферійні пристрої та включити всі інші компоненти, такі як резистори, конденсатори та індуктивності. Сьогодні все це об'єднано в одну єдину платформу з простими інтерфейсами.

Модуль XBee підключено до платі, призначеної для взаємодії з Arduino Uno, як показано на рис. 2.14. Модуль XBee підключено до адаптера, який потім можна підключити до Arduino Uno, як показано на рис. 2.15. Адаптер є незалежним компонентом, тобто нам потрібно знати схему розташування контактів адаптера. Нам також потрібна бібліотека Software Serial, щоб надсилати дані з Uno до адаптера. Потім вони надсилаються до IP-шлюзу за допомогою модуля XBee.

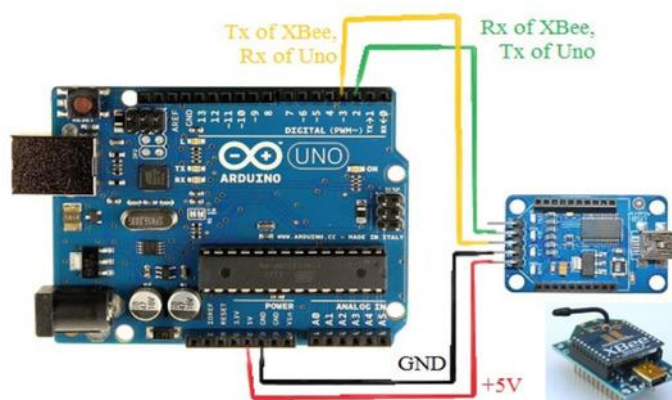


Рисунок 2.15 – Arduino Uno, підключений до XBee через шилд XBee

З двох вищезгаданих конструкцій (XBee shield, XBee adapter) та після їх спільного випробування ми вирішили використати другу конструкцію, включаючи XBee адаптер.

IP-шлюз відіграє роль координатора в нашій бездротовій сенсорній мережі (WSN), як показано на рис. 2.16. У WSN є один координатор та певна кількість сенсорних вузлів, відповідальних за виявлення подій навколишнього середовища. Потім координатор підключає WSN до Інтернету або через Wi-Fi, або через кабель Ethernet. Світлодіоди на пристрої, як показано на рис. 2.16, це: а - для живлення, b - для XBee (блимає, якщо підключено, і світиться постійно, якщо ні), c - для мережі (блимає жовтим - означає, що операційна система працює, але немає підключення, постійне жовте - означає, що шлюзу XBee призначено IP-адресу, блимає зеленим - означає спробу підключення до сервера віддаленого керування, швидше блимає зеленим - означає, що триває автентифікація на віддаленому сервері, постійне зелене - показує, що сервер віддаленого керування підключено).



Рисунок 2.16 – IP-шлюз, не підключений до інтернету (ліворуч)/та підключений до інтернету (праворуч)

Після використання IP-шлюз необхідно налаштувати, як показано на рис.2.17, використовуючи метод Wi-Fi для зручності використання та доступності. Налаштування включають отримання IP-адреси Wi-Fi за замовчуванням, встановлення назви за замовчуванням та брандмауера (необов'язково), як показано на рис. 2.17. Після підключення IP-шлюзу до Інтернету ми можемо отримати доступ до шлюзу, ввівши в адресний рядок IP-адресу за замовчуванням (198.168.100.1) та змінивши конфігурації, як показано на рис. 2.17, а також зберігши результат, як показано на рис.2.18. На рис. 2.17 червона рамка показує стан мережевого підключення крок за кроком, галочка з'являється сама по собі, як тільки крок завершено, а решта невиконаних завдань не відмічені.

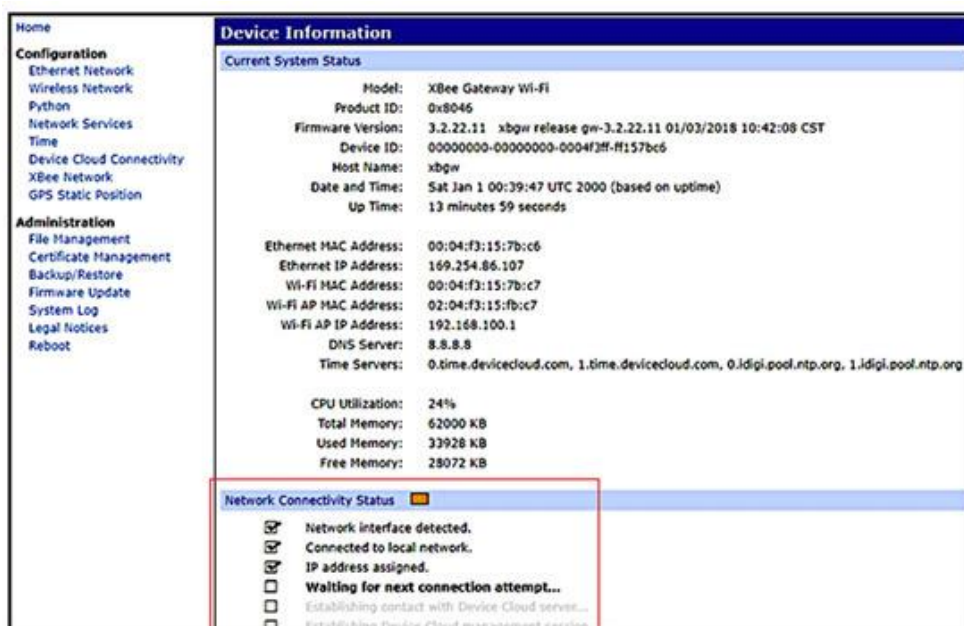


Рисунок 2.17 – Домашня сторінка IP-шлюзу до будь-яких змін у конфігураціях

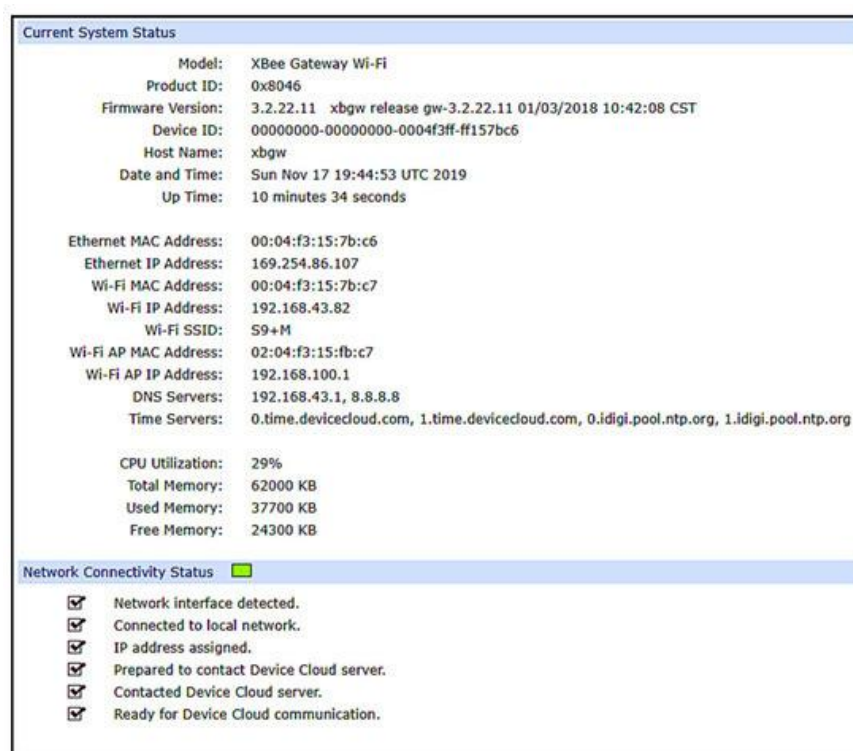


Рисунок 2.18 – IP-шлюз після налаштування

Тепер ми можемо перевірити, чи підключено пристрій до Інтернету, увійшовши в систему та додавши IP-шлюз за ідентифікатором пристрою, зазначеним за шлюзом на веб-сайті (devicescloud.digi.com, доступ 18 травня 2025 року), як показано на рис. 2.19. Після успішного підключення IP-шлюзу до Інтернету індикатор стану змінює колір на зелений, а стан на веб-сайті

змінюється з червоного та відключення на синій та підключення, як показано на рис. 2.19. Зверніть увагу на стан ліворуч від поля MAC-адреси, який показує, що підключення не встановлено.

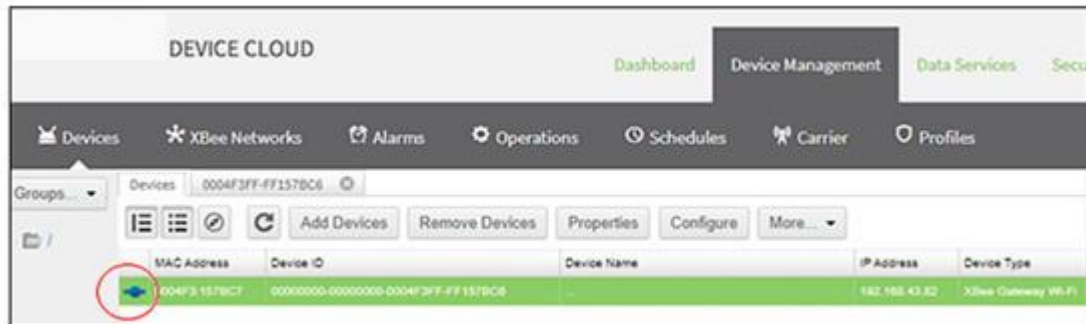


Рисунок 2.19 – Вебсайт, що показує онлайн-статус, коли IP-шлюз підключений до Інтернету

Головною метою цього проєкту є створення бездротової сенсорної мережі (WSN) для моніторингу навколишнього середовища. Нам вдалося успішно створити WSN за протоколом Zigbee. Однак, для передачі подій через мережу Інтернет до кімнати моніторингу необхідно прийняти деякі рішення/реакції. У цьому контексті підключення та налаштування IP-шлюзу є найважливішим внеском.

Бездротова сенсорна мережа (WSN) повинна мати можливість виявляти подію та надсилати певні дані до мережевого менеджера через Інтернет. Спочатку дані зчитуються сенсорами, якими керує Arduino. Потім оброблені дані передаються за допомогою протоколу Zigbee через модуль XBee. Далі вони надходять на IP-шлюз, який автоматично надсилає дані в Інтернет.

Після завантаження коду на платформу, настав час зняти показники сенсорів та перевірити, чи працюють вони правильно. Ми використовуємо лише два сенсори, DHT та LDR. Сенсор DHT використовується для зчитування як температури, так і вологості, тоді як сенсор LDR відповідає за вимірювання інтенсивності освітлення. Одиниця вимірювання вологості вказана у відсотках, де 100% означає максимальну вологість. Хоча температура буде зчитуватися в градусах Цельсія за допомогою послідовного монітора в Arduino IDE, ми можемо побачити показники DHT та LDR на рис.2.20. Якщо великий палець закриває сенсори, відбудеться зміна всіх показників. Вологість і температура збільшуються, а інтенсивність освітлення зменшується. Показники сенсорів будуть надіслані на IP-шлюз за допомогою модуля XBee.

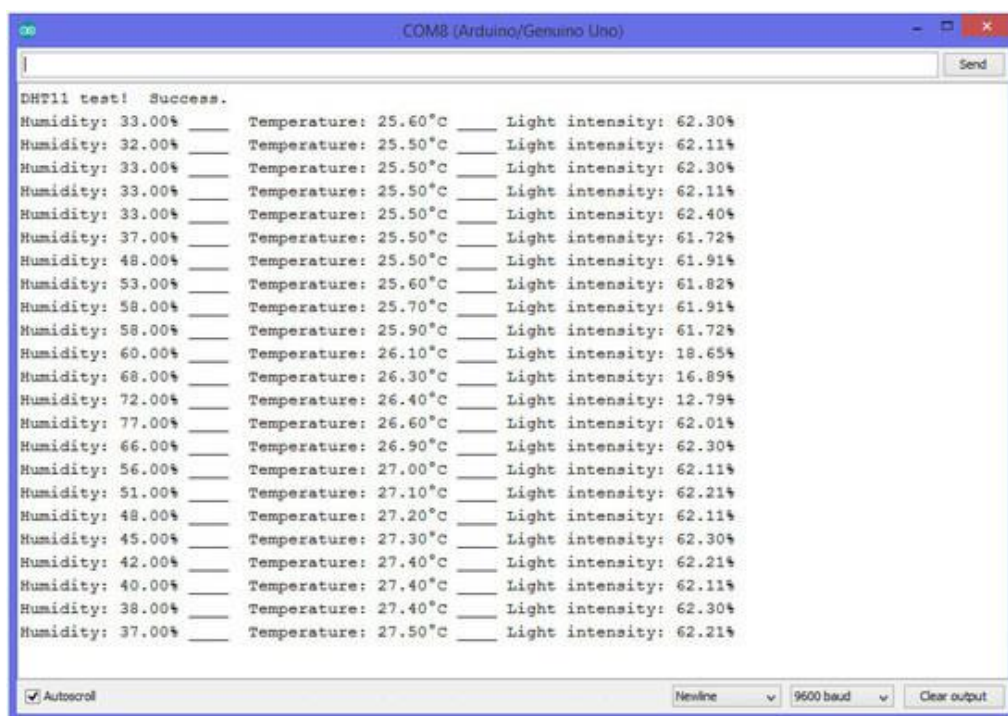


Рисунок 2.20 – Показники вологості, температури та інтенсивності освітлення в моніторі послідовного порту Arduino IDE

Для встановлення зв'язку зі шлюзом можна розглянути два способи: ручний або автоматичний. Оскільки в модулі XВee немає ІР-рівня, для ІР-зв'язку ми використовуватимемо MAC-адресацію. Таким чином, для передачі даних нам потрібно створити кадр, який буде передано на ІР-шлюз. Цей кадр створюється за допомогою програмного забезпечення ХСТУ, натиснувши кнопку «Закрити», обведену червоним колом, як показано на рис.2.21. Спочатку нам потрібно переконаватися, що модуль (маршрутизатор) XВee підключено до координатора ІР-шлюзу в «Режимі роботи мережі». Потім ми натискаємо (Ctrl + C) у ХСТУ, щоб переключитися в режим консолі. Далі ми відкриваємо з'єднання та створюємо кадр, назвемо його «frame_0», як показано на рис. 2.22.



Рисунок 2.21 – Створення фрейму в ХСТУ

XBee API Frames Generator
This tool allows you to generate any kind of API frame and copy its value. Just fill in the required fields.

Protocol: Zigbee Mode: API 1 - API Mode Without Escapes

Frame type: 0x10 - Transmit Request

Frame parameters:

Start delimiter	7E
Length	00 6C
Frame type	10
Frame ID	01
64-bit dest. address	00 13 A2 00 41 84 15 1C
16-bit dest. address	FF FE
Broadcast radius	00
Options	00
RF data	☒ ASCII ☐ HEX Hello, this message is sent from the XBee module to the IP-gateway without using the internet.

Generated frame:

```

7E 00 6C 10 01 00 13 A2 00 41 84 15 1C FF FE 00 00 48 65
6C 6C 6F 2C 20 74 68 69 73 20 6D 65 73 73 61 67 65 20 69
73 20 73 65 6E 74 20 66 72 6F 6D 20 74 68 65 20 58 42 65
  
```

Byte count: 112

Copy frame Close OK

Рисунок 2.22 – Тип, місце призначення та дані фрейму

Необхідні атрибути, виділені на рис. 2.22 червоним колом для налаштування, такі:

- Тип кадру має бути «Запит на передачу».
- «64-бітна адреса призначення» – це MAC-адреса IP-шлюзу.
- «Радіочастотні дані» – це повідомлення, яке має бути передано.

Після цього ми можемо передати кадр, як показано на рис. 2.23, а підтвердження показано на рис. 2.24.

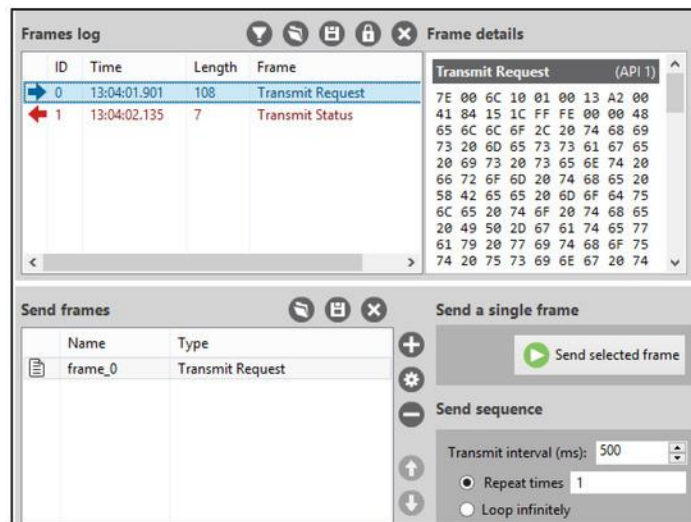


Рисунок 2.23 – Кадр передається, а відповідь отримано

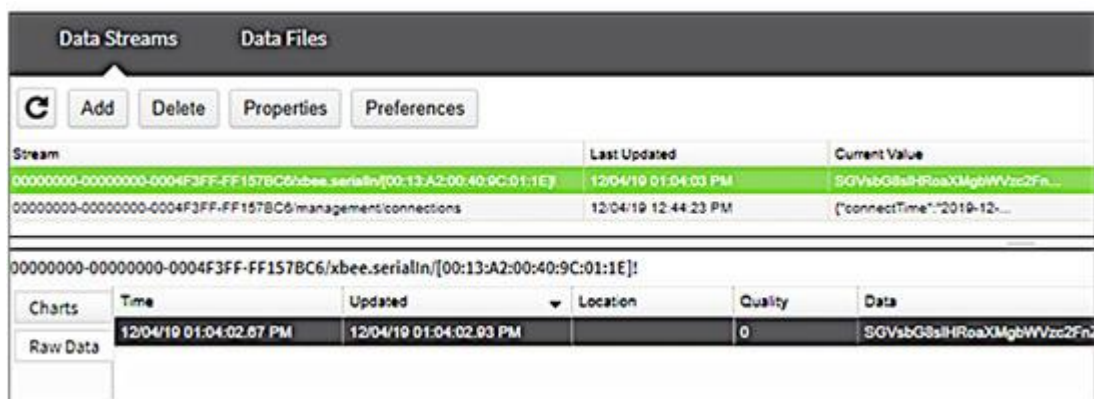


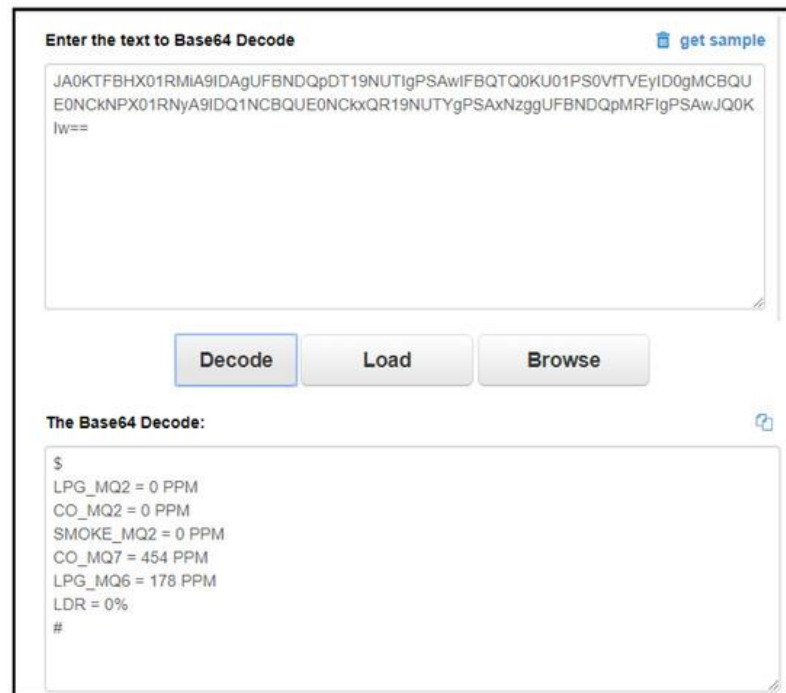
Рисунок 2.24 – Домашня сторінка даних IP-шлюзу після отримання “frame_0”

Автоматичне налаштування: автоматичне налаштування можна виконати шляхом інтеграції коду в платформу Arduino. Воно в основному спирається на бібліотеку Software Serial (див. вихідний код у Додатку В).

Примітка: ручне налаштування використовувалося лише для налагодження. IP-шлюз отримує дані у форматі base64. Отже, нам потрібно декодувати отримане повідомлення в текст, щоб зробити його читабельним для людей (адміністраторів). Існує багато інструментів, здатних кодувати/декодувати будь-яке повідомлення. Ми використали багато технічних деталей з цього приводу з наступного веб-сайту (<https://codebeautify.org/base64-decode> , дата звернення: 18 травня 2025 р.).

Отримані показники до та після процесу декодування показано на рисунку 2.25. Дистанційний моніторинг – це дуже цікава послуга, що надається цим проектом. У будь-який час та з будь-якої точки світу можливе керування та моніторинг бездротової сенсорної мережі (WSN). Ця послуга вимагає використання інтернет-сервера, до якого можна отримати доступ з

будь-якої кінцевої системи. Ми можемо порівняти результати з сервера з нашими результатами, як показано на рис. 2.26, на рівні платформи для аналізу ефективності системи. Відсоток вологості, показаний у нижньому правому куті рис. 2.26, надає користувачеві три рівні: зелений – норма, жовтий – для перевірки, а червоний – там, де користувачеві потрібно діяти серйозно.



Enter the text to Base64 Decode [get sample](#)

JA0KTFBHX01RMiA9IDAgUFBNDQpDT19NUTlgPSAwIFBQTQ0KU01PS0VFTVEyID0gMCBQU
E0NCkNPX01RMyA9IDQ1NCBQUE0NCkxQR19NUTYgPSAxNzggUFBNDQpMRFlgPSAwJQ0K
Iw==

[Decode](#) [Load](#) [Browse](#)

The Base64 Decode:

```
$
LPG_MQ2 = 0 PPM
CO_MQ2 = 0 PPM
SMOKE_MQ2 = 0 PPM
CO_MQ7 = 454 PPM
LPG_MQ6 = 178 PPM
LDR = 0%
#
```

Рисунок 2.25 – Отримані показники до та після декодування



Рисунок 2.26 – Результати вимірювання температури та вологості з сенсора DHT на сервері

У цьому контексті сервер є дуже важливим компонентом для доступу та керування WSN з віддаленого місця. Процес пошуку сервера повинен

враховувати деякі характеристики, придатні для бездротових сенсорних мереж. Спочатку ми дослідили особливості багатьох типів серверів, таких як веб-сервіси Amazon, Google Cloud та Microsoft Azure. Проблема з хмарними сервісами Саудівської Аравії полягає в тому, що вони не здаються в оренду приватним особам або для дослідницького використання. Тому нам довелося шукати інші рішення. На основі порівняння з іншими хмарними постачальниками ми обрали ThingSpeak для нашого проекту, оскільки ThingSpeak надає безкоштовну хмарну платформу для моніторингу та візуалізації даних у реальному часі. ThingSpeak підтримує мову програмування MATLAB, яка чудово підходить для аналізу графіків. Однак, як Google Cloud, так і Microsoft Azure вимагають деяких персональних даних, таких як інформація про кредитну картку, що дозволяє їм знімати гроші, на відміну від ThingSpeak, для якого потрібно було лише створити безкоштовний обліковий запис. На додаток до ThingSpeak, ми також використовуватимемо додаток Blynk як наш сервер у компоненті зв'язку GSM. Blynk доступний як на системах Android, так і на iOS. Сервер ThingSpeak дозволяє відображати дані сенсорів як у значеннях, так і в графіках.

Blynk – це застосунок, який можна завантажити на наші повсякденні пристрої з операційними системами Android та iOS. Він дозволяє користувачеві контролювати показання будь-якого сенсора. Він підтримує GSM, Wi-Fi, USB та багато інших способів підключення. Він також підтримує багато платформ (Arduino, RaspberryPi, Node MCU тощо). Щоб використовувати цей застосунок, ми завантажили його на цільовий пристрій та створили обліковий запис, використовуючи електронну пошту та пароль, у новому проекті. Ми вкажемо спосіб підключення для Arduino Uno та GSM. Токен автентифікації надсилається на електронну пошту. Цей токен дуже важливий, оскільки він є ключем до з'єднання. Моніторинг буде недоступний без цього ключа.

Щоб надсилати дані на наш сервер, нам потрібні два важливі параметри, оскільки вони є ключем до зв'язку. Ці параметри записуються як ключ API та ідентифікатор каналу. Обидва можна знайти на сторінці каналу. Ці два параметри потім додаються до вихідного коду Arduino Uno. На апаратній платформі нам потрібно вибрати, який контакт призначити кожному елементу панелі інструментів. Blynk надає три типи контактів: (1) Аналогові: безпосередньо з аналогового контакту платформи, (2) Цифрові: безпосередньо з цифрового контакту платформи та (3) Віртуальні: будь-яка змінна в коді. Ми будемо використовувати віртуальні контакти, оскільки

Blynk надає +1000 віртуальних контактів і не обмежується контактами GPIO платформи.

На рис. 2.27 показано моніторинг навколишнього середовища за допомогою серверів ThingSpeak та Blynk, які призначені для Zigbee та GSM відповідно. На рис. 2.27 температура та вологість відображаються в часовому діапазоні та миттєво. Спостереження в часовому діапазоні забезпечує чітку очікувану тенденцію для кожного показника навколишнього середовища, що може допомогти монітору швидко вжити заходів та запобігти подіям та катастрофам. Відсоток вологості, показаний у нижньому правому куті рис.2.27, надає користувачеві три рівні: зелений колір відповідає нормі, жовтий – для перевірки, а червоний – коли користувачеві потрібно діяти серйозно. Шлях GSM розглядається як альтернативний спосіб передачі подій, який особливо потрібен різним чутливим до втрат додаткам, і який демонструє стабільність та стійкість системи. Тому з удосконаленням технологій, навіть якщо локальний зв'язок не працює, старіші стільникові версії залишатимуться працездатними. Основна перевага нашого прототипу полягає в економічній ефективності та ефективності зв'язку. По-перше, всі використовувані пристрої дуже дешеві та доступні всюди. По-друге, їхні комунікаційні технології надійні та генерують дуже мале навантаження, яке може досягати сервера та кімнати моніторингу без падінь. Поточний прототип має високу масштабованість та адаптивність, що дозволяє підтримувати великомасштабну бездротову сенсорну мережу (WSN) та включати будь-які інші типи сенсорів.

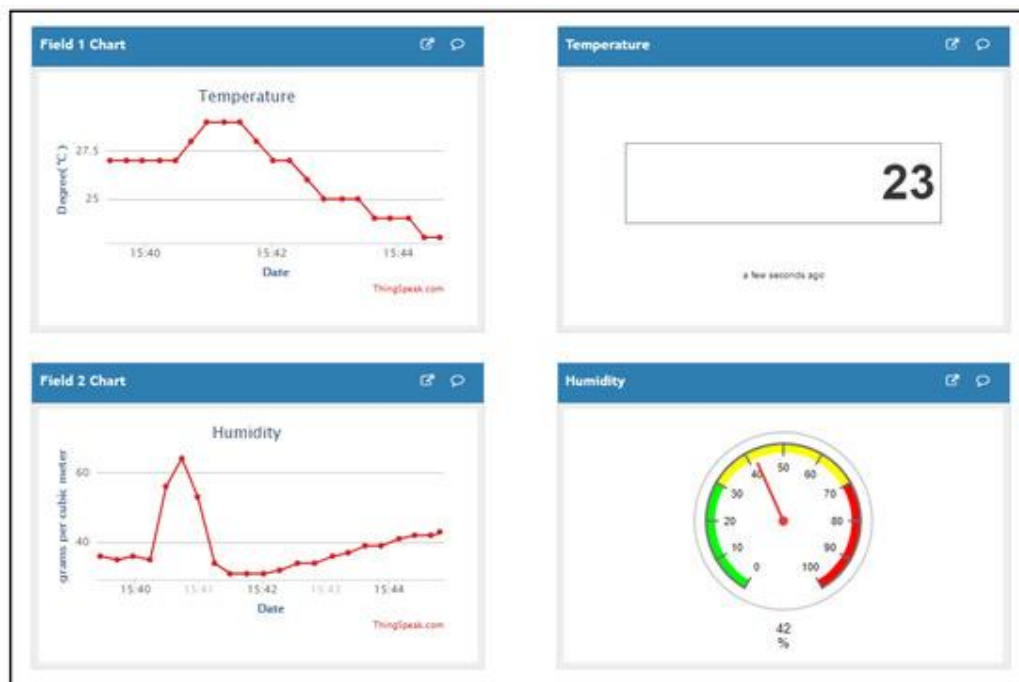


Рисунок 2.27 – Монітор ThingSpeak

2.4 Висновки до розділу

У цьому розділі дослідженні кілька концепцій, пов'язаних з бездротовими сенсорними мережами: архітектура, функції, компоненти та застосування. Ми виявили основні кроки, корисні для побудови бездротової сенсорної мережі. У цьому контексті ми реалізували коди для налаштування модуля передавача XBEE, IP-шлюзу та платформи, що включає різні сенсори. Ми також запропонували відповідне взаємозв'язування цих компонентів для формування цілісної та ефективної платформи для моніторингу екологічних подій. Внесок розпочався з пропозиції структури моніторингу навколишнього середовища на основі бездротових сенсорних мереж (WSN). WSN містить налаштовані сенсори та комунікаційні модулі, а також отримує показники сенсорів. Ми включили додатковий GSM-передавач для підтримки програм з високою чутливістю до втрат. Ми реалізували серверний компонент моніторингу, який дозволяє здійснювати дистанційне зондування звідусіль. Було виконано значну роботу для встановлення взаємозв'язку та сумісності всіх цих апаратних та програмних компонентів, що реалізує цілі цього дослідження. Зрештою, результати показують, що запропонована конструкція системи моніторингу є повністю стійкою.

Незважаючи на значну роботу та ефективні результати, все ще існує можливість покращити якість, масштаб та ефективність цього прототипу. Оскільки проєкт передбачається використовувати на відкритій місцевості або у важкодоступному місці (тобто у дикій природі), споживання енергії є дуже важливим параметром, який слід враховувати. Тому прототип може бути оснащений сонячними елементами для використання відновлюваної енергії сонця та продовження терміну служби мережі. Поглинання енергії сонячними елементами вимагає акумуляторних батарей, а також регуляторів потужності для забезпечення безпеки платформи.

З РОЗРОБКА БЕЗДРОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ТА ЇЇ ВПРОВАДЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ SSAIL

Технологія Інтернету речей (IoT) та її застосування перетворюють реальні речі на розумні об'єкти, інтегруючи все в рамках спільної інфраструктури для управління продуктивністю за допомогою програмного застосунку та пропонуючи своєчасне оновлення за допомогою інтегрованих веб-серверів. Якість життя, зелена економіка та управління забрудненням у суспільстві вимагають комплексних систем моніторингу навколишнього середовища з простими у використанні функціями та обслуговуванні. Це дослідження пропонує впровадження бездротової сенсорної мережі з вбудованими сенсорними вузлами, виготовленими з використанням технології вибіркової активації поверхні, індукованої лазером. Така технологія дозволяє інтегрувати електричні схеми з пластиком корпусом сенсора вільної форми. У цій роботі розроблено недорогий асинхронний веб-сервер для моніторингу сенсорів температури та вологості, підключених до Wi-Fi модуля ESP32. Дані з сенсорних вузлів по всьому об'єкту збираються та відображаються у вигляді графіків у режимі реального часу на веб-сервері. Кілька веб-клієнтів в одній мережі можуть отримати доступ до даних сенсорів. Енергія для сенсорних вузлів може живитися шляхом збору енергії з навколишніх джерел електромагнітного випромінювання. Ця автоматизована система з автономним живленням контролює фактори навколишнього середовища та клімату, допомагає своєчасно діяти та покращує конструкцію сенсорів, дозволяючи формувати антену та радіочастотні схеми на різних пластиках, навіть на самому корпусі пристрою. Вона також забезпечує більшу гнучкість у модифікації апаратного забезпечення та швидке масштабне розгортання.

3.1 Вибір типу бездротової сенсорної мережі

Бездротові сенсорні мережі (БСМ) стають дедалі поширенішими в різних сферах, включаючи промисловість, транспорт, навколишнє середовище та охорону здоров'я. Крім того, зростає використання технологій Інтернету речей (IoT) майже у всіх секторах [25] підтримує цю тенденцію. Основна увага в цьому дослідженні була зосереджена на вбудованій системі сенсорних вузлів з використанням технології селективної активації поверхні, індукованої лазером (SSAIL) [26] для моніторингу температури та вологості. За допомогою цієї технології антени та схеми

збору радіочастот можуть бути сформовані на різних пластиках, включаючи корпус пристрою. В результаті пристрій можна зменшити. Комунікаційний модуль, який підтримує схеми антен для збору енергії, дозволяє швидко та економічно ефективно виготовляти тривимірні схеми на гнучкому матеріалі. Крім того, навіть у складних умовах довготривала робота розподілених сенсорів може бути досягнута шляхом збору енергії з різних джерел електромагнітного випромінювання [27]. Крім того, збір енергії з навколишнього середовища може зменшити потребу в обслуговуванні сенсорних мереж, забезпечуючи їх достатню кількість енергії для тривалішого терміну служби, що призводить до багатьох переконливих екологічних переваг та переваг у розгортанні [28].

Швидкий розвиток пристроїв Інтернету речей (IoT) призвів до появи різноманітних можливостей вбудованих веб-серверів. Сучасні технологічні досягнення в галузі промислових бездротових мереж моніторингу (IWSN) в основному стосуються застосувань систем екстреної допомоги, систем регулювання та контролю, систем нагляду, систем керування з розімкнутим циклом, систем оповіщення та систем моніторингу [29]. Натомість, встановлення великомасштабних пристроїв IoT ускладнює використання систем керування на виробничих лініях, оскільки їхні величезні розміри та крихка структура роблять їх ще складнішими. Тому це дослідження дало змогу запропонувати одне з найдоступніших та найпоширеніших рішень для потреб суспільства. Сенсорну систему можна налаштувати за допомогою програмних та апаратних технологій, що спрощує її розгортання для моніторингу навколишнього середовища та забезпечує можливість збору енергії для живлення вузла в місцях, які достатньо рясніють навколишніми радіочастотними сигналами протягом тривалого часу.

Аналіз характеристик і параметрів вузлів сенсорної мережі, розподілених випадковим чином, економить багато часу та коштів для розгортання пристроїв Інтернету речей у реальному часі у великих масштабах. Для системи моніторингу було запропоновано архітектуру головного та підлеглого сенсорних вузлів. Було розроблено та протестовано комунікаційний модуль та антени для збору енергії. Було оцінено споживання енергії запропонованим сенсорним вузлом для забезпечення його довгострокової роботи. Було проведено дослідження одного з поширених комунікаційних протоколів, і результати були представлені в звіті. Загальне споживання енергії кожним сенсорним вузлом було виміряно за допомогою детермінованого режиму роботи. Моніторинг сенсорних вузлів здійснювався незалежно за допомогою високорівневої хостингової програми. Використання сонячної та вітрової енергії як джерела збору енергії було б

найкращим вибором у більш віддалених відкритих місцях. Бездротові сенсорні мережі, побудовані за цим підходом, можуть бути використані для моніторингу лісу, включаючи некартографовані ділянки після встановлення.

3.2 Досягнення у застосуванні бездротових сенсорних мереж (WSN)

У цьому розділі наведено огляд найновіших досягнень у застосуванні бездротових сенсорних мереж (WSN). Системи точного землеробства, промисловості, лісового господарства та моніторингу погоди можуть отримати вигоду від запропонованого методу. Індустрія 4.0 класифікує численні бездротові сенсорні мережі [30] за підходами до покриття, проблемами розгортання, моделями зондування та перешкодами для досліджень, включаючи сенсорні мережі, туман, периферійні обчислення, розподілені системи керування, цифрових двійників та кіберфізичні системи. Завдяки розміру та адаптивності нашої системи, вона здатна підтримувати швидке розгортання пристроїв Інтернету речей на конвеєрних стрічках з метою моніторингу процесу виробничих ліній або різних зон для моніторингу навколишнього середовища.

Застосування Інтернету речей (IoT) для управління лісовим господарством передбачає передачу даних для покриття місць, де сигнали 3G/4G недоступні. Автори використовували малопотужну широкосмугову мережу (LPWAN), NB-IoT (NB — вузькосмуговий), LoRa (далекий радіус дії) та відповідні сенсори для передачі даних [31]. Використовуючи цей підхід, вони застосовують два ретранслятори для покриття більшої відстані. Крім того, наявна в них сенсорна мережа добре працює для вимірювання тиску повітря, ультрафіолетового випромінювання та вуглекислого газу на схилах пагорбів. З огляду на результати попередніх досліджень було прийнято рішення встановити ретранслятори для покриття відстані, недоступної для каналів зв'язку.

Моніторинг атмосферного середовища відіграє важливу роль у моніторингу аерозолів, твердих частинок, серпанку, пилових бур, спалювання соломи та газоподібних забруднювачів, що сприяють глобальному потеплінню. Три типи атмосферного моніторингу використовують дистанційне супутникове зондування, а вдосконалені методи отримання даних, валідація продукції, локальне застосування, моніторинг якості повітря та контроль є частиною мережі [32]. Однак, на думку експертів, поточна точність моніторингу недостатня для задоволення потреб управління атмосферним середовищем.

Портативна система моніторингу погоди для теплиць для вимірювання температури, вологості та вологості представлена в [33]. Рішення пропонує простий пристрій, який може надійно та практично вимірювати такі характеристики. Зібрані значення сенсорів регулярно оновлюються за допомогою веб-сервісу ThingSpeak IoT. Однак цей підхід ненадійний у більшому регіоні. Запропонована в нашій роботі система з використанням PHP-додатку та бази даних MySQL забезпечує легке керування часовими рядами та може прогнозувати майбутні значення сенсорів на веб-сервері, а графіки в режимі реального часу можуть відображати максимум 150 точок даних.

Традиційні фермери отримують цінний технологічний інструмент, використовуючи Інтернет речей для моніторингу та контролю змінних навколишнього середовища врожаю кави через бездротову сенсорну мережу. Це дозволяє їм збільшити економічні вигоди, зменшити вплив на навколишнє середовище та покращити якість життя. Протокол Zigbee від Zigbee Alliance був запропонований у [34] серед інших бездротових технологій з еквівалентними можливостями через його низьку вартість. Однак через надмірну вологість на кавових плантаціях невиконання всіх передбачуваних вимірювань викликає труднощі з сенсорами та показаннями цієї системи моніторингу.

Оптимізація енергії для якості обслуговування (QoS) у бездротових сенсорних мережах є надзвичайно важливою та залежить від різних протоколів маршрутизації, таких як протокол RPAR (маршрутизація в реальному часі з урахуванням енергоспоживання), протокол GRPAR (жадібна маршрутизація в реальному часі з урахуванням енергоспоживання) [35] та протокол адаптивної кластеризації з низькою енергією (LEACH). Останній базується на кластеризації, і вузли можуть надсилати дані лише до головного вузла кластера (CH). Оскільки бездротові сенсорні мережі взаємодіють із середовищем, очікується, що їхні характеристики відрізнятимуться від характеристик традиційних мереж передачі даних. Підтримка QoS для мережі повинна враховувати деякі унікальні проблеми, такі як серйозні обмеження ресурсів, незбалансований трафік, надмірність даних, динаміка мережі, енергетичний баланс та масштабованість, кілька споживачів, типи трафіку та критичність пакетів. Коли визначається застосування сенсорної мережі, QoS допомагає підтримувати та долати вищезазначені проблеми.

По-перше, програми, що працюють на бездротових сенсорних мережах (WSN), не є наскрізними програмами, як це було раніше. По-друге, пропускна здатність не є головною проблемою для вузла з одним сенсором

[36]. Однак, пропускна здатність може бути суттєвою проблемою для групи сенсорів протягом певних періодів через пульсуючу природу трафіку сенсорів. По-третє, втрати пакетів у трафіку, що генерується одним сенсорним вузлом, можуть бути допустимі до певної міри, оскільки в даних завжди є надлишковість. Нарешті, більшість програм у WSN є критично важливими, що відображає важливість програм. Отже, вони впевнені, що підтримку QoS у WSN не можна оцінити, використовуючи лише показники QoS мережі від початку до кінця. Таким чином, існує прогалина в знаннях щодо параметрів QoS, які не стосуються наскрізного з'єднання, і які необхідно запропонувати. Параметри QoS разом називаються «колективними параметрами QoS», що стосується цих характеристик, які не стосуються наскрізного з'єднання. Це колективна затримка, колективна втрата пакетів, колективна пропускна здатність та пропускна здатність інформації [34].

У [37] розроблено гібридний кластерний підхід для однорідних та гетерогенних мереж з метою підвищення параметрів QoS бездротових сенсорних мереж на основі результатів моделювання в MATLAB. За параметрами пропускної здатності та терміну служби мережі запропонований енергоефективний протокол на основі QoS бездротової сенсорної мережі (WSN) перевершує ATEER (енергоефективна маршрутизація із середнім порогом), DEEC (розвинена розподілена енергоефективна кластеризація) та EDDEEC (вдосконалена розвинена розподілена енергоефективна кластеризація) на 10%, 26% та 63% відповідно. У дослідженні зроблено висновок, що протокол, заснований на параметрах пропускної здатності та терміну служби мережі, добре підходить та має хороші позиції для проектування WSN у реальних сценаріях та сценаріях реального часу.

У протоколі оптимізації маршруту на основі статусу вузла та оцінки (NSSROP) кожен вузол зберігає деякі додаткові дані для балансування навантаження маршрутизації між усіма вузлами [38]. Сенсорний вузол може мати найкоротший маршрут до базової станції в конфігурації Інтернету речей. Метод блочного списку бездротової сенсорної мережі (WSN) розроблений для роботи з вузлами, що не співпрацюють, і NSSROP досяг виняткових результатів з точки зору середнього споживання енергії, пропускної здатності та наскрізної затримки [36]. На відміну від інших стандартних протоколів маршрутизації, запропонована методика враховує різні критерії QoS, пов'язані з маршрутизацією та оптимізацією енергії в бездротових сенсорних мережах (WSN). Для визначення щільності вузлів кожен вузол оцінюється на основі його споживання енергії та кількості закритих сусідів (CN).

Досліджено гібридний метод отримання розподілу ймовірностей затримки звітів у протоколах бездротових сенсорних мереж (WSN) з довільним доступом (RA) [37], який є корисним для оцінки якості обслуговування (QoS) бездротових сенсорних мереж (WSN) у критичних застосунках. Таким чином, звітування про події є обмеженим у часі та чутливим до помилок. У певних застосунках, таких як відстеження та позиціонування цілей, для точної характеристики явищ, що відбуваються, необхідна передача певної кількості пакетів подій. Наша методологія враховує базову структуру, а розподіл кількості вузлів виявлення отримується шляхом моделювання, що дозволяє аналізувати бажані параметри QoS.

Більшість технологій бездротових сенсорних мереж (WSN) розроблені для ефективного моніторингу та управління різними процесами. «Розумне середовище» оснащене сенсорами, мікроконтролерами та адаптивним програмним забезпеченням для самозахисту та самомоніторингу. Для проектування WSN необхідно враховувати кілька факторів. Такі фактори включають масштабованість, відмовостійкість, високу точність вимірювання, недорогі витрати на розгортання, швидке масштабування та потреби застосувань. Сенсорні мережі стануть невід'ємною частиною нашого життя в майбутньому завдяки широкому спектру застосувань. Однак, перш ніж сенсорні мережі можна буде впровадити, необхідно врахувати такі обмеження, як вартість, апаратне забезпечення, зміна топології, середовище та споживання енергії. Крім того, чутливі мережі вимагають спеціальних протоколів бездротових спеціальних мереж через жорсткі обмеження.

Наша методологія проектування бездротової сенсорної мережі для моніторингу навколишнього середовища з використанням технології SSAIL зосереджена на недорогій вартості розгортання, швидкому масштабуванні та застосуванні на виробничих лініях заводів. Оскільки ця система дозволяє встановлювати будь-який тип сенсора, її також можна використовувати для зовнішнього моніторингу. Наш процес проектування сенсорного вузла сприяє:

- ✓ Апаратна модифікація комунікаційного модуля, що надає можливість використовувати схему радіочастотної антени;
- ✓ Проектування фрактальної антени для збору радіочастотного сигналу та дослідження характеристик моделювання та вимірювання антени;
- ✓ Моделювання випадково розподілених сенсорних вузлів для визначення положення сенсорів відповідно до параметрів довжини області, ширини,

очікуваних показників сенсорів за хвилину та розміру пакета даних. Аналізуються відокремлені вузли та шлях зв'язку;

- ✓ Архітектура сенсорного вузла та його специфічний режим роботи;
- ✓ Споживання енергії комунікаційним модулем та його режим роботи;
- ✓ Моделювання покращеного протоколу LEACH у порівнянні зі стандартним протоколом LEACH, який аналізується на предмет часу служби сенсорного вузла, загальної розсіяваної енергії та пропускну здатності;
- ✓ Оцінка загального споживання енергії на день аналізованою мережею, що складається з 10 сенсорних вузлів;
- ✓ Розміщення високорівневих РНР-застосунків з використанням бази даних MySQL та візуалізація даних у вигляді графіків у режимі реального часу на веб-сервері.

3.3 Комунікаційний модуль з використанням технології SSAIL

Наше дослідження було зосереджено на створенні різних рівнів технології, що складають стек протоколів сенсорної мережі, зборі енергії, ефективному алгоритмі маршрутизації та асинхронному веб-сервері для моніторингу навколишнього середовища, щоб задовольнити попит на рішення для моніторингу Інтернету речей у режимі реального часу.

Комунікаційний модуль було розроблено з використанням технології SSAIL. На фізичному рівні концепція 3D MID (електроніка, вбудована в полімерні компоненти вільної форми) може допомогти в розгортанні сенсорної мережі [38]. Ця технологія, що використовує лазерну обробку та селективне безструмове осадження металу, є перспективним підходом до створення сенсорних вузлів та систем збору енергії, об'єднаних в одному корпусі, що забезпечує більшу свободу форми, розміру та матеріалів [22].

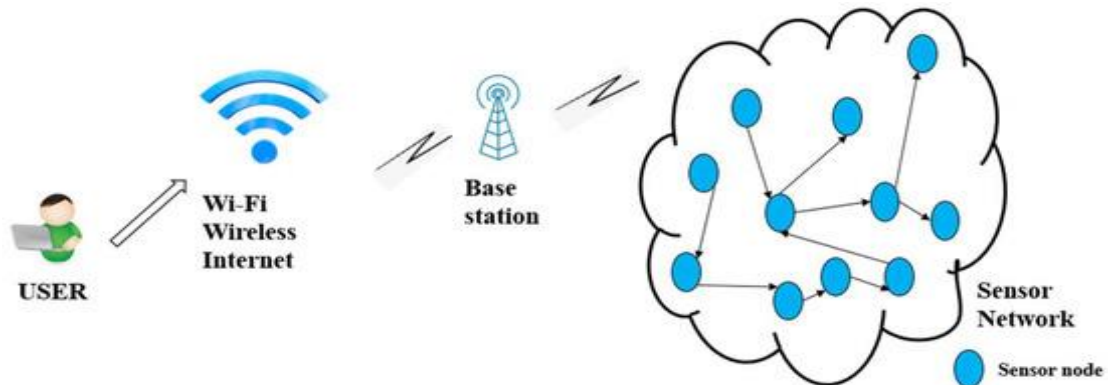


Рисунок 3.1 – Схема типової бездротової сенсорної мережі (WSN) з кількома вузлами

Мережа Інтернету речей для моніторингу температури та вологості за допомогою асинхронного веб-сервера налаштовується наступним чином:

- Розробка та розгортання асинхронного веб-сервера з використанням наступних технологій: ESP32, запрограмований за допомогою Arduino IDE, хостинг-сервер та доменне ім'я, а також скрипт препроцесора гіпертексту (PHP) для вставки даних у базу даних MySQL та відображення їх на веб-сторінці у вигляді діаграм.
- Оцінка споживання енергії сенсорним вузлом та аналіз його продуктивності в різних режимах роботи.
- Прототипування сенсорного вузла з підсистемами управління даними та збору енергії.

Користувач зв'язується через Інтернет з базовою станцією, прямо або опосередковано пов'язаною з усіма сенсорними вузлами, розподіленими в зоні моніторингу. На рисунку 3.1 зображено типову конструкцію бездротової сенсорної мережі (WSN) [39].

3.4 Проектування модуля Wi-Fi та сенсорного вузла

Мікроконтролер ESP32 від Espressif systems — це недорогий та малопотужний мікроконтролер з дворежимним Bluetooth та Wi-Fi, який використовує мікропроцесор Tensilica Xtensa LX6 з двома та одним ядрами. Модуль може функціонувати як клієнт, так і сервер, і працює від низького джерела живлення 3,3 В.

Гнучкий характер технології SSAIL дозволяє їй створювати електричні провідні лінії на будь-якій діелектричній поверхні, що дозволяє їй адаптуватися до геометрії мережевого вузла. Схема для модуля Wi-Fi була розроблена за допомогою програмного забезпечення Eagle. AutoCAD був використаний для внесення незначних коригувань до схеми, щоб гарантувати, що лазерний верстат створюватиме відповідну штрихування під час подальшої обробки. Процедура включає використання лазера ультракоротких імпульсів для модифікації поверхні епоксидного ламінату, армованого скловолокном FR4, хімічну активацію лазерно-модифікованих областей та хімічне осадження металу на локально активовану поверхню.

На рисунку 3.2а зображено макет друкованої плати модуля ESP32, який виконує всі функції сенсорного вузла.

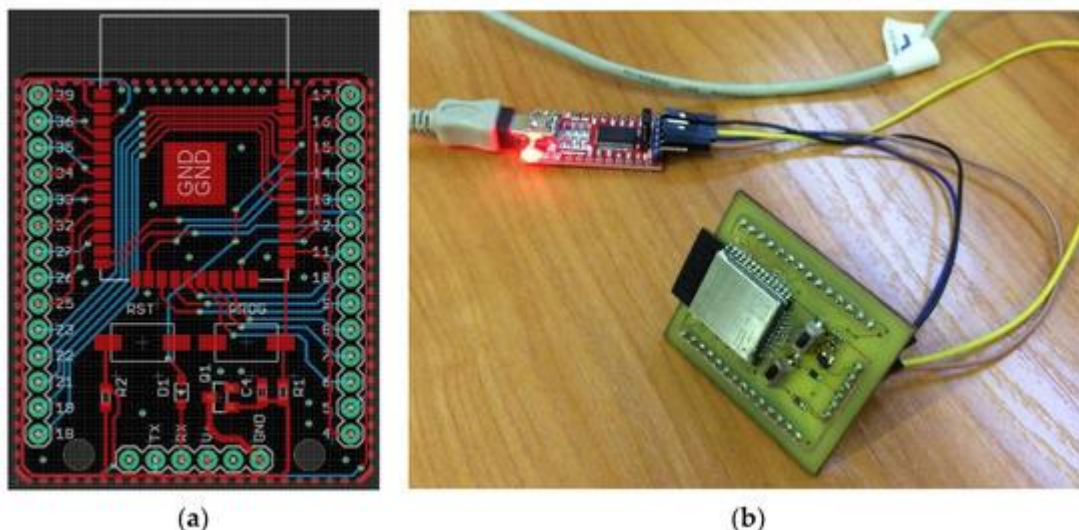


Рисунок 3.2 – Конструкція друкованої плати (а) та модифікованого прототипу модуля ESP32, виготовленого за технологією SSAIL (б)

На рисунку 3.2b показано схему зібраної друкованої плати з модифікованим прототипом модуля, виготовленим за технологією SSAIL, підключеним до бездоганної мікросхеми USB-інтерфейсу FTDI серії FT232, яка використовується для завантаження програмного коду до модуля Wi-Fi за допомогою Arduino IDE. Модифікований модуль зв'язку замінює стандартний модуль, який не може підтримувати антену для збору енергії в бездротових сенсорних мережах (WSN). Крім того, сенсори Adafruit DHT11 були підключені до мікроконтролера Espressif ESP-Wroom32, який керує асинхронним веб-сервером для моніторингу температури та вологості. Для попереднього тестування використовувалися модифіковані батареї прототипу. У порівнянні з продуктивністю стандартного модуля ESP32, результати продуктивності модифікованого прототипу є надзвичайно обнадійливими для досягнення наших цілей – об'єднання антен разом з ним.

Анени, що збирають енергію, можна використовувати замість блоку живлення в сенсорних вузлах, які є достатньо компактними, щоб задовольнити потреби сенсорних вузлів. Щоб задовольнити споживання енергії модулем Wi-Fi, розроблена антена повинна бути компактною та достатньою. Дослідники запропонували компромісний підхід до інтеграції комунікаційного модуля з модифікованим блоком живлення з використанням технології SSAIL. Компактна структура сенсорного вузла дозволяє встановлювати його в невеликій зоні, наприклад, на виробничому конвеєрі, для цілей моніторингу, що є абсолютно необхідним у міру розвитку досліджень.

На початкових етапах дослідження використовується цифровий сенсор температури та вологості Adafruit Industries LLC DHT11, який виявляє

критичні характеристики навколишнього середовища, такі як температура та вологість. Він використовує ємнісний сенсор вологості та термістор для контролю навколишнього повітря перед виведенням цифрових даних на вихід (аналогові інформаційні контакти не потрібні). Сенсор працює від напруги 3–5 В і може виявляти вологість повітря від 20% до 80% з точністю 5% та температуру від 0 °C до 50 °C з точністю 2 °C.

Процес зв'язку з мікроконтролером поділяється на три кроки. Перший - це надсилання запиту до сенсора DHT11. Сенсор надсилає зворотний імпульс, а потім надсилає дані загалом 40 біт до мікроконтролера, як показано на рисунку 3.3. Після передачі 40 біт даних сенсор DHT11 має низький рівень 54 мкс, а потім переходить у високий. Після цього він переходить у режим сну.

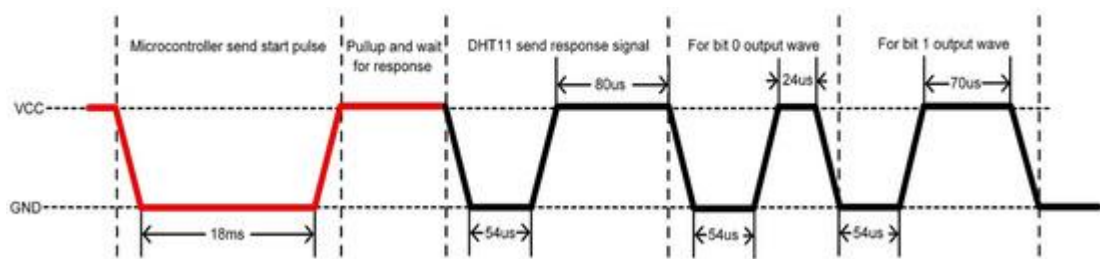


Рисунок 3.3 – Цикл зв'язку сенсора

3.5 Конструкція енергозбиральної антени

Електронні схеми можуть бути безпосередньо інтегровані на діелектричні підкладки 3D-форми, що робить литі з'єднувальні пристрої (MID) можливим рішенням для застосувань Інтернету речей [38]. Сенсорні вузли були реалізовані за допомогою методу SSAIL [32]. З'єднання з відмінною провідністю та стійкістю до екстремальних умов навколишнього середовища були створені за допомогою хімічного мідного, нікелевого та золотого покриття на активованій лазером поверхні. Електроніка сенсорного вузла була інтегрована всередину литого блоку.

Було схематично змодельовано та експериментально досліджено численні конструкції патч-антен та фрактальних антен для збору енергії, їх схеми узгодження з випрямлячем, а також схеми випрямлячів. Антени були сформовані на різних полімерних підкладках з різною діелектричною проникністю за допомогою технології SSAIL для формування доріжок електропровідності. Форма антени базується на фракталах, взятих з веб-сайту [20]. Вона схожа на добре відому прокладку Серпінського. Показано, що такий тип антени, виготовленої на підкладці FR4 товщиною 1,6 мм, має п'ять

різних резонансних частот [21]. На рисунку 3.4 показано розроблену та виготовлену фрактальну антену.

Однак розміри антени занадто великі (200 мм), і жодна з резонансних частот не відповідає нижньому робочому діапазону Wi-Fi роутера. Для адаптації до характеристик Wi-Fi діапазону антени було оптимізовано геометрію антени на пластику PREPERM[™] PPE440, який має діелектричну проникність 4,4 та товщину 3,2 мм. Для оптимізації було використано вирішувач FDTD, який моделював основні характеристики антени, такі як S_{11} та коефіцієнт підсилення. Оптимальними розмірами фрактальної антени було визначено наступне: ребра більшого трикутника повинні бути 30 мм, а ребра меншого трикутника - 18 мм. Співвідношення між ребрами меншого та більшого трикутників становить 0,6. Таким чином, розмір всієї антени на підкладці PPE440 становить 120 мм × 120 мм. Порт збудження зміщений вниз від кінчика більшого трикутника на 23,5 мм та вбік на 1,5 мм. Інша сторона підкладки заземлена суцільним шаром міді. Теоретичні розрахунки показали, що така антена має резонанси на частотах 2,43 ГГц та 5,78 ГГц, де S_{11} становить -30,3 дБ та -28,3 дБ відповідно, а максимальне посилення досягає 6,3 дБі та 4,33 дБі.

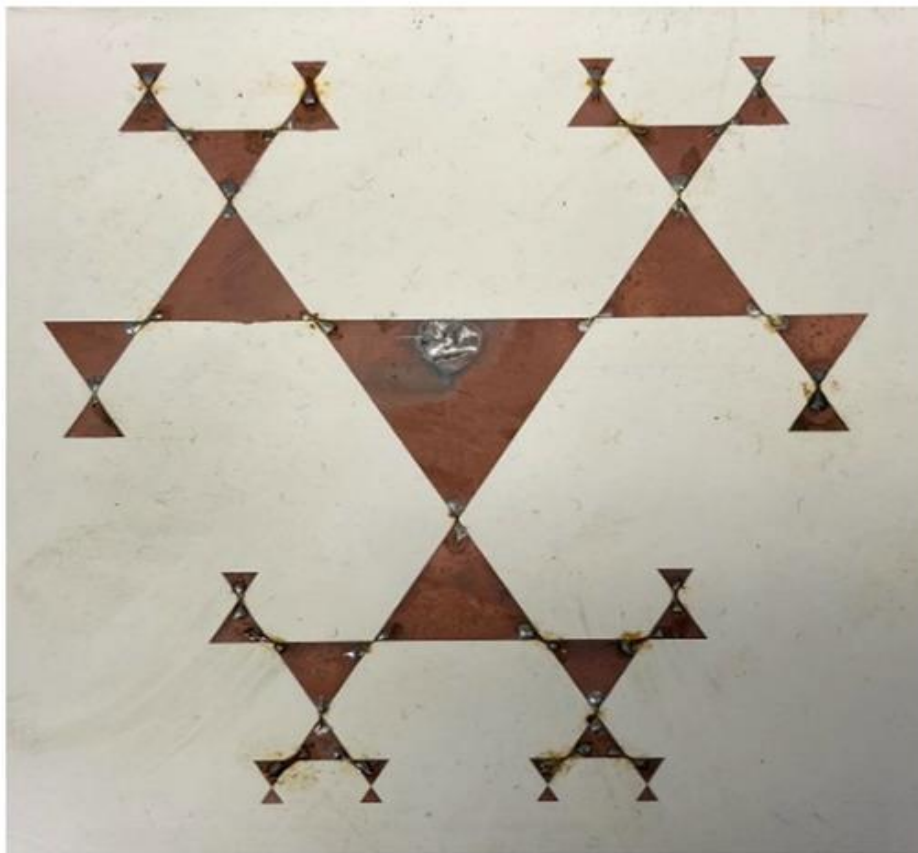


Рисунок 3.4 – Антена, що збирає енергію

3.6 Архітектура та реалізація сенсорного вузла

Головний вузол – це так звана базова станція, яка включає комп'ютер, маршрутизатор і мікроконтролер. Інші підлеглі сенсорні вузли підключені до головного вузла. Як показано на рис. 3.5, кожен підлеглий сенсорний вузол складається з сенсора, мікроконтролера та блоку живлення. Сенсор збирає дані з навколишнього середовища та надає їх мікроконтролеру для обробки. Підлеглий вузол надсилає дані, зчитані з сенсора, до головного вузла для додаткової обробки та зберігання для моніторингу в режимі реального часу. Нарешті, дані, отримані головним вузлом, зберігаються на персональному комп'ютері для подальшого вивчення та своєчасного реагування. Блок живлення міг би скомпрометувати збирач енергії для збору електромагнітного випромінювання для заряджання акумулятора. Експерименти проводилися з використанням чотирьох сенсорних вузлів, один з яких служив головним вузлом, а інші – підлеглими вузлами.

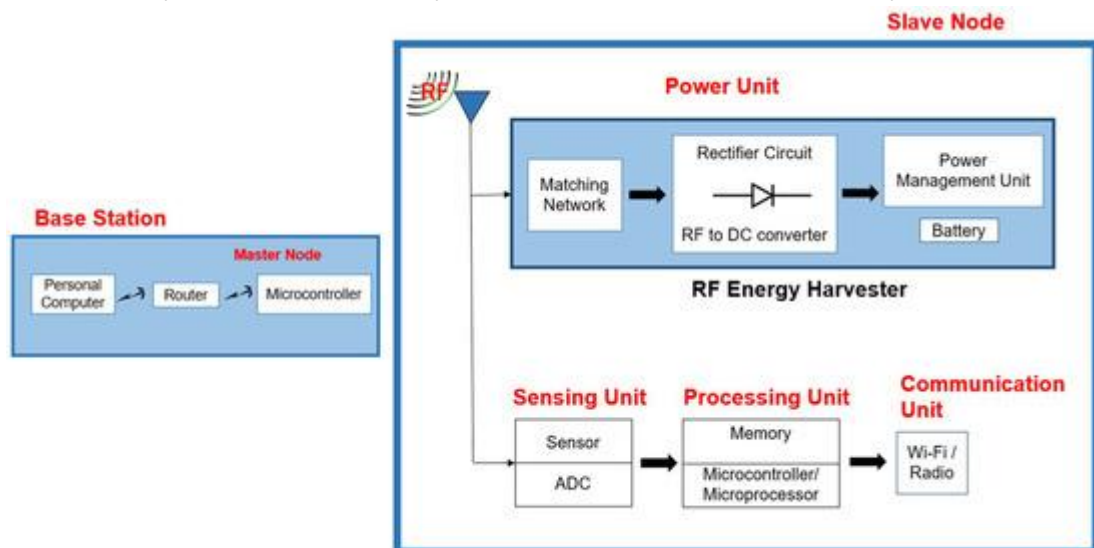


Рисунок 3.5 – Архітектура вузла сенсора

3.7 Моніторинг вузла сенсора

Сенсорний вузол, показаний на рисунку 3.2b, був запрограмований за допомогою середовища розробки Arduino IDE, що дозволяє програмувати та завантажувати файли на модуль Wi-Fi ESP32. Веб-браузери на смарт-гаджетах, які також називають веб-клієнтами, відповідають за асинхронний веб-сервер. Зв'язок між веб-клієнтом та веб-сервером, хостинг-сервером та доменним іменем встановлюється за допомогою протоколу передачі гіпертексту (HTTP). Веб-клієнти можуть підключатися до веб-сервера через маршрутизатор та Інтернет. Необхідні дії виконуються за допомогою

стандартної клієнт-серверної архітектури та створення клієнта, який запитує PHP-скрипт для публікації показань сенсорів у базі даних MySQL. Веб-сторінка відображає показання сенсорів у вигляді графіка, до якого можна отримати доступ з будь-якого місця. За допомогою цього методу дані сенсорів можуть передаватись з веб-сайтів на веб-клієнти. Ці дані потім можуть бути використані для оцінки, дослідження та вжиття необхідних заходів щодо змінних температури та вологості навколишнього середовища. Для побудови оптимізованої моделі зв'язку використовуються такі технології:

- Arduino IDE для програмування ESP32;
- Доменне ім'я та хостинг-сервер;
- PHP-скрипт для вставки даних у базу даних MySQL та відображення їх на веб-сторінці;
- База даних MySQL для зберігання показань;
- PHP-скрипт для відображення даних з бази даних у діаграми.

Дизайн програми включає структуру мови гіпертекстової розмітки (HTML), яка визначає, як має відображатися веб-сторінка. ESP32 повинен підключатися до відповідних сенсорів для моніторингу навколишнього середовища, щоб успішно завантажувати програмний код. Ця ідея спрямована на наявність доменного імені та облікового запису хостингу, що дозволяє нам зберігати показники сенсорів з ESP32. Він може візуалізувати показники з будь-якого місця, звертаючись до власного домену сервера. Для побудови діаграм було використано бібліотеку Highcharts. Вона показує дві діаграми: температури та вологості з плином часу. Діаграми відображають максимум 70 точок даних, і нові показники додаються кожні 30 секунд. Можливості точок даних можна змінювати будь-коли в коді. Веб-клієнт може отримати доступ до даних через веб-браузер завдяки розробці мережі Інтернету речей для моніторингу температури та вологості та її реалізації за допомогою веб-сервера. На рисунку 3.6 зображено загальний огляд розміщення PHP-додатків та бази даних MySQL.

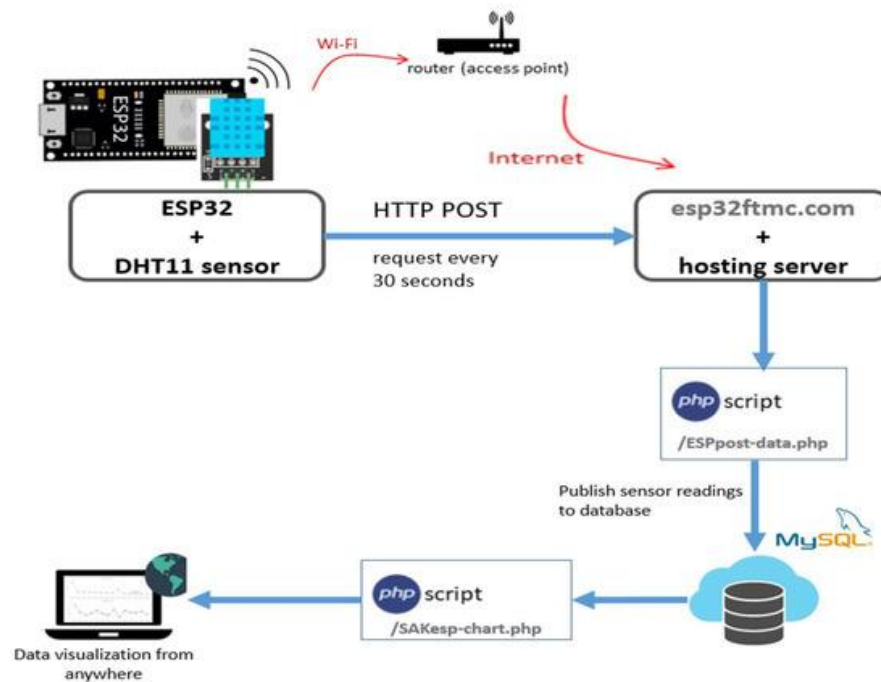


Рисунок 3.6 – Огляд хостингу PHP-додатку та бази даних MySQL

Запропонована система моніторингу температури та вологості на основі Інтернету речей складається з сенсорних вузлів з модулем Wi-Fi ESP32 та сенсора температури та вологості DHT11 з джерелом живлення. У цьому дослідженні використовувався мікроконтролер ESP32 з двоядерним процесором та підключенням до Wi-Fi. Сенсорні вузли підключаються до базової станції безпосередньо або через вузли з підтримкою Wi-Fi поблизу базової станції. Базова станція забезпечує підключення до Інтернету. Дані сенсорів можна отримати через підключення до Інтернету. Для виконання основного завдання використовується архітектура клієнт-сервер.

3.8 Моделювання вузла сенсорної мережі

У цьому підрозділі підсумовано результати моделювання, що включають аналіз характеристик і параметрів вузлів сенсорної мережі, розподілених випадковим чином, аналіз споживання енергії та інші фактори порівняно з моделюванням з використанням покращеного протоколу LEACH та стандартного протоколу LEACH, аналіз споживання енергії комунікаційним модулем, результати та обговорення енергозбиральної антени, загальне споживання енергії сенсорним вузлом та результати системи моніторингу веб-сервера.

Для аналізу розгортання сенсорної мережі в режимі реального часу з точки зору збільшення кількості вузлів, довжини та ширини області, було побудовано імітаційну модель вузлів сенсорної мережі за допомогою

MATLAB. Показники сенсорів час від часу, а також розмір пакета даних, можна передбачити за допомогою моделювання двох альтернативних кількості вузлів, 20 та 80, в області для моделювання бездротової сенсорної мережі. Відокремлені сенсорні вузли взаємодіють з іншими вузлами або базовою станцією в межах своєї робочої відстані. Таким чином, вузли, розташовані між базовою станцією та іншими вузлами, можна використовувати як ретранслятори.

На рисунку 3.7 зображено сенсорну мережу з випадково розподіленими вузлами. Додаткові критерії, що враховуються для моделювання мережі, включають довжину та ширину області, прогнозовані показники сенсорів за хвилину та розмір пакета даних. Суцільні сині лінії представляють прямий зв'язок, а пунктирні лінії – підтвердження, надіслане назад. Показано найкраще розташування базової станції та вузлів ретрансляції.

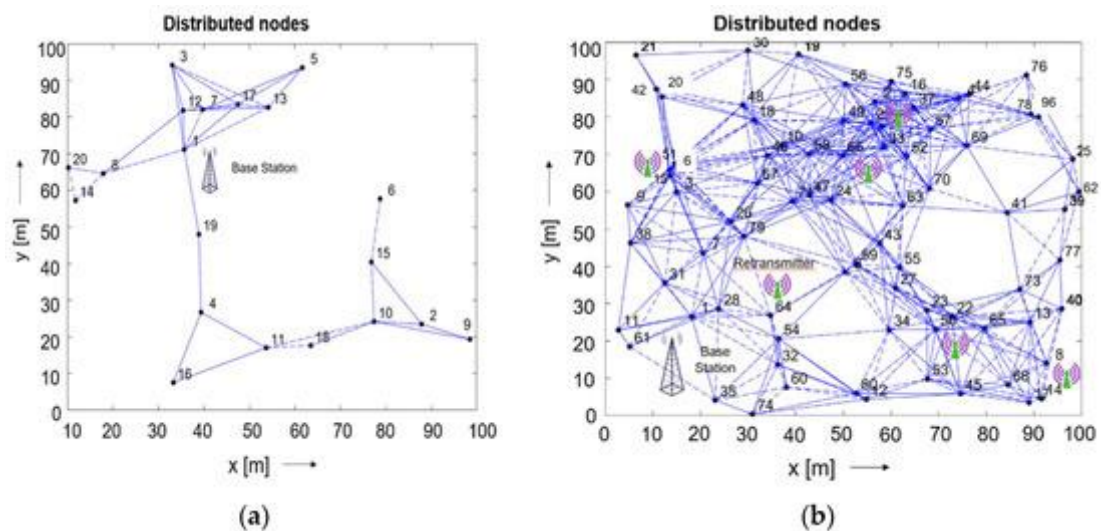


Рисунок 3.7 – Розподілена кількість вузлів, 20 та 80, у (**a** , **b**) відповідно. Довжина ділянки = 100 м, ширина ділянки = 100 м, очікувані показники сенсора = 100, а розмір пакета даних = п'ять байтів

Як видно на рисунку 3.7а , шлях передачі інформації до базової станції є відносно простим, коли використовується менша кількість вузлів. Коли відстань до базової станції коротка, мережа не використовує жоден із проміжних вузлів. Однак деякі вузли знаходяться поза досяжністю базової станції, яка зв'язується з нею лише через проміжні вузли. Тому для надійного з'єднання слід використовувати вузли з більшими робочими відстанями. Рисунок 3.7b показує, що коли кількість вузлів велика, існує багато способів передачі інформації до базової станції. У цьому конкретному випадку планується впровадити ретранслятори в кількох місцях, щоб зменшити навантаження на вузли.

Коли вузли мають кілька завдань, вони змушені перебувати у ввімкненому стані для виконання протоколів зв'язку. У цьому випадку споживається більше енергії. Ретранслятори є підходящим рішенням для зменшення споживання енергії. Вони зменшують навантаження на окремі вузли, зберігаючи при цьому специфічну пам'ять про раніше надіслані пакети даних, збільшуючи термін служби сенсорних вузлів. У майбутній роботі будуть розглянуті різні топології та методи збору даних для швидкого розгортання.

Моделювання та аналіз на основі протоколів маршрутизації

Для аналізу споживання енергії було розглянуто модифікований протокол LEACH, який використовується в бездротових сенсорних мережах (WSN) для збільшення терміну служби мережі. У цьому протоколі сенсори розташовуються в кластер, а один вузол виконує роль голови кластера. Голова кластера знаходить найменшу відстань до базової станції, щоб зменшити споживання енергії головними вузлами кластера та всією мережею. Удосконалений протокол LEACH (I-LEACH) був реалізований у зв'язку та порівняний зі стандартним протоколом LEACH. Після встановлення параметрів мережі моделювання виконується, доки всі вузли не розрядять свої батареї для цих двох алгоритмів. Потім будується графік аналізу поведінки мережі, який показує її термін служби та обсяг надісланих даних. Запропонований I-LEACH гарантує, що обрані голови кластера будуть рівномірно розподілені по мережі. Отже, немає можливості, що всі голови кластера будуть зосереджені в одній частині мережі.

Результати моделювання показують, що запропонований підхід до кластеризації є більш енергоефективним, масштабованим та ефективним у продовженні терміну служби мережі порівняно з протоколом LEACH. На рисунку 3.8а показано результат моделювання терміну служби 100 сенсорних вузлів (кількість активних сенсорних вузлів порівняно з часом), на рисунку 8b показано результат моделювання середнього споживання енергії (енергія порівняно з часом), а на рисунку 3.9 показано результат моделювання пропускної здатності між LEACH та I-LEACH 100 сенсорних вузлів (кількість пакетів порівняно з часом). Після завершення моделювання було оцінено продуктивність запропонованого протоколу I-LEACH. Дані на рисунках 3.8b та 3.9 доводять, що I-LEACH покращує споживання енергії приблизно на 43% та пропускну здатність на 40% у мережі розміром 100 вузлів.

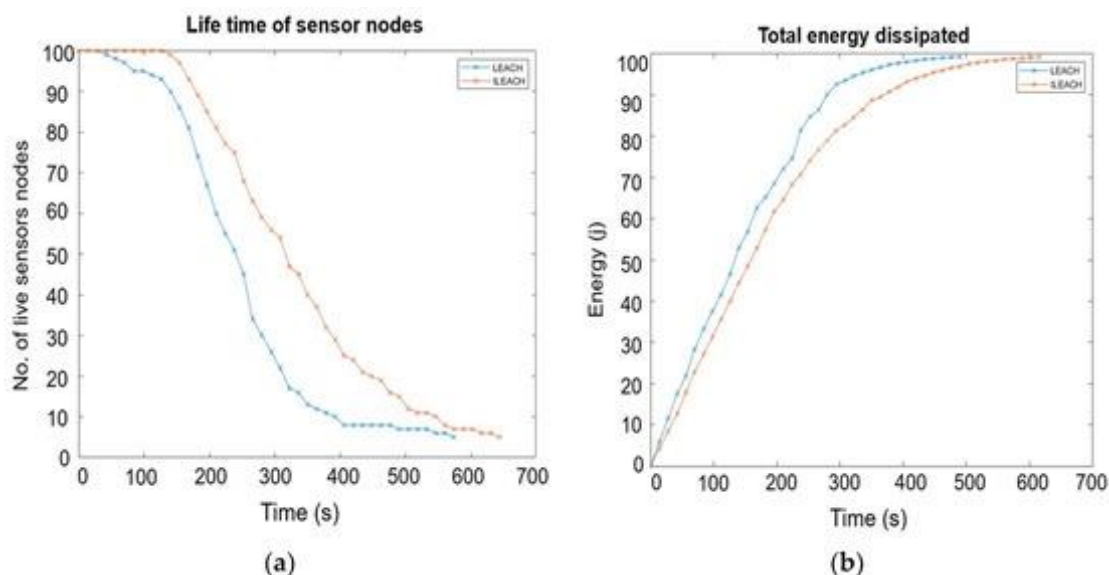


Рисунок 3.8 – Порівняння терміну служби та середнього споживання енергії сенсорними вузлами між стандартним та вдосконаленим протоколом LEACH у (а , b) відповідно

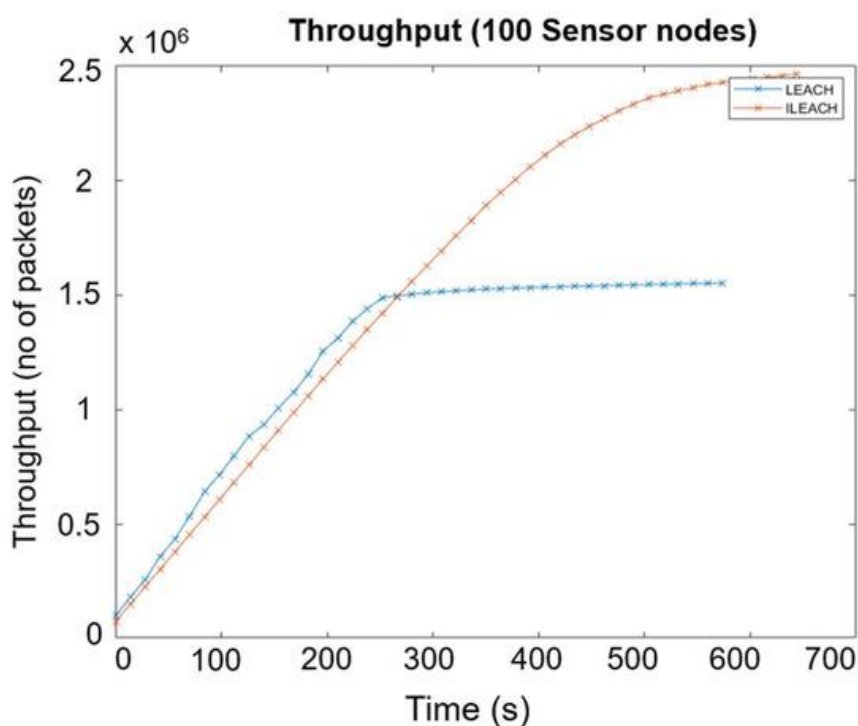


Рисунок 3.9 – Порівняння пропускної здатності між стандартним та покращеним протоколом LEACH

Вузли сенсорних пристроїв періодично вмикатимуть свої сенсори та передавачі, виявлятимуть навколишнє середовище та передаватимуть дані, що цікавлять, з постійним періодичним інтервалом часу. Протокол I-LEACH настійно рекомендується для мережевих сенсорних вузлів у режимі

реального часу, щоб збільшити термін служби мережі та підтримувати пропускну здатність.

3.9 Аналіз споживання енергії комунікаційним модулем

Споживання енергії оцінювалося шляхом вимірювання струму та напруги за допомогою мультиметра. ESP32 може бути відносно енергоємним пристроєм, залежно від його стану; на ранній стадії експерименту ESP32 живився від акумулятора ємністю 3200 мАг. Рішенням тут було зменшення споживання енергії ESP32 шляхом використання одного з його режимів сну. Термін служби акумулятора можна було значно подовжити, оскільки вузол не повинен завжди бути активним. Розширене керування живленням ESP32 пропонує п'ять налаштовуваних режимів живлення. Чіп може перемикатися між різними режимами живлення відповідно до потреб у енергії: активний режим, режим сну модему, режим легкого сну, режим глибокого сну та режим гібернації. Кожен режим має свої особливості та можливості енергозбереження.

Активний режим – це нормальний стан ESP32. У цьому режимі всі функції чіпа, особливо модуль Wi-Fi, процесорні ядра та модуль Bluetooth, постійно увімкнені. Для роботи чіпа в цьому стані потрібен струм понад 240 мА. З технічного опису ESP32 видно, що споживання енергії в режимі активного живлення, з працюючим радіочастотним сигналом, становить 13 дБмВт для передачі пакетів Wi-Fi, 160 мА для передавача та 120 мА для прийому та прослуховування Wi-Fi. Це найменш ефективний варіант, який споживатиме найбільше енергії. Для економії енергії необхідно вимикати їх, використовуючи один з інших режимів живлення, коли вони не використовуються.

У таблиці 3.1 показано різні режими живлення ESP32 та їх відповідне споживання енергії. У таблиці 3.1 показано, що ESP32 у режимі глибокого сну може бути задіяний, коли пристрій не використовується. У цьому режимі процесор, більша частина оперативної пам'яті та всі цифрові периферійні пристрої вимкнені. Якщо співпроцесор ULP увімкнено на 10 мкА, мікросхема споживає приблизно 0,15 мА.

Таблиця 3.1 – Споживання енергії модулем ESP32.

Modes	Energy Consumption
Active	528~858 mW
Modem Sleep	9.9~66 mW
Light Sleep	2.64 mW
Deep Sleep	33 μ W
Hibernation	8.25 μ W

Для передачі даних, для контролю струму в режимах прийому (Rx) та передачі (Tx), було представлено підхід з 10-хвилинними інтервалами, а різниця напруг між режимами Rx та Tx вимірювалася за допомогою осцилографа. Була виміряна різниця напруг (V) 640 мВ та 1920 мВ для режимів Rx та Tx. Припускаючи, що резистор (R) має опір 10 Ом, з'єднаний послідовно, було розраховано споживання струму 64 мА для режиму Rx та 192 мА для режиму Tx. На рисунку 3.10 зображено часову діаграму режиму роботи вузла сенсора.

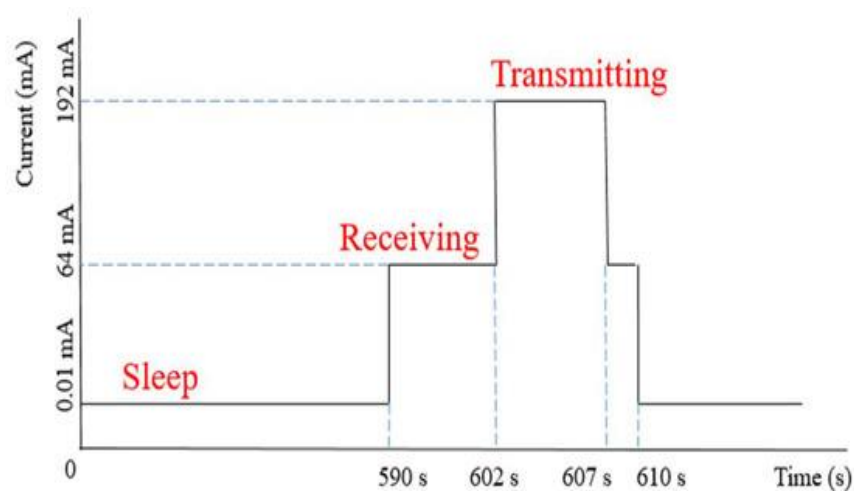


Рисунок 3.10 – Діаграма синхронізації роботи вузла сенсора

Сенсорний вузол налаштовано на роботу в три етапи: сплячий режим протягом 590 секунд, пробудження для збору даних з сенсорів, передача пакета даних до головного вузла та повторний сплячий режим після доставки даних. Між головним, проміжним та підлеглим вузлами передаються п'ять байтів даних сенсорів температури та вологості.

3.10 Антена для збору енергії з мережі Wi-Fi на частотах 2,4 ГГц та 5,0 ГГц

Для збору енергії з мережі Wi-Fi на частотах 2,4 ГГц та 5,0 ГГц було досліджено конструкцію фрактальної антени. На рисунку 3.11 показано результати моделювання та вимірювань S_{11} розробленої фрактальної антени.

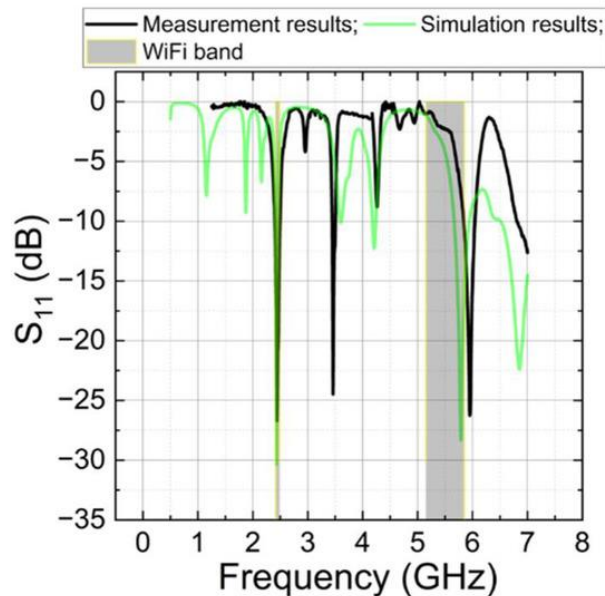


Рисунок 3.11 – Результати моделювання та вимірювань фрактальної антени, виготовленої за допомогою S11

Порівняння змодельованих та виміряних спектрів характеристики S_{11} антени показано на рис. 3.11. Чорна лінія відповідає результатам вимірювань, зелена лінія представляє результати моделювання, а сіра область вказує на діапазони частот Wi-Fi на частотах 2,4 ГГц та 5 ГГц. З рис. 3.11 видно, що між результатами моделювання та вимірювань існує ідеальна відповідність на частоті 2,43 ГГц. Виміряна смуга пропускання (на рівні -10 дБ) становить від 2,40 ГГц до 2,49 ГГц. Ця смуга пропускання повністю покриває нижню смугу частот Wi-Fi. Не така хороша відповідність спостерігається на вищих частотах. Очікуваний теоретичний мінімум відбиття на частоті 5,78 ГГц зміщений до 5,95 ГГц, а виміряна смуга пропускання для верхньої смуги частот Wi-Fi становила від 5,8 ГГц до 6,04 ГГц. З рис. 3.11 видно, що можна використовувати лише невелику частину верхньої смуги частот Wi-Fi. Тим не менш, щонайменше дев'ять каналів Wi-Fi повинні поміститися в цю смугу частот. Щоб узгодити спектральні характеристики антен з частотами, що використовуються Wi-Fi, необхідно враховувати діелектричні властивості полімерних матеріалів, що використовуються в підкладках.

Було проведено додаткове дослідження того, як робочі частоти фрактальної антени залежать від двох її основних параметрів – розміру найбільшого трикутника та співвідношення ребер інших трикутників. Верхня межа простору параметрів обмежена розміром підкладки RPE440. Всі інші параметри фіксовані. Результати моделювання представлені на рис. 3.12 – збільшення розміру трикутників або співвідношення між ребрами трикутників зменшує резонансну частоту антени в обох діапазонах. Залежності близькі до лінійних. Співвідношення між двома частотними діапазонами збільшується від 2,24 до 2,41 при збільшенні A та від 2,29 до 2,53 при збільшенні співвідношення між ребрами трикутників. Це дозволяє нам точніше контролювати резонансні частоти обох діапазонів, вибираючи відповідні розміри антени та незначне роздільне налаштування обох резонансних частот.

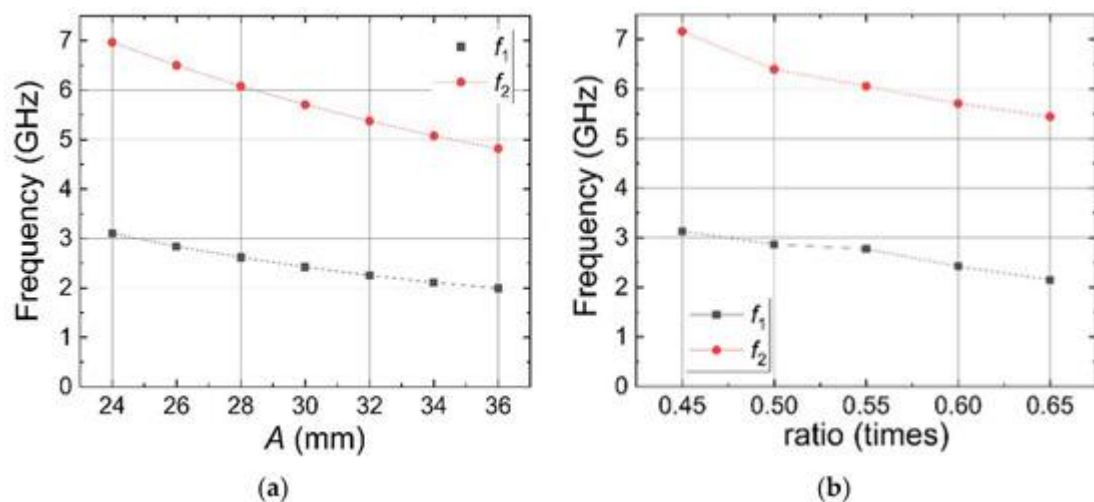


Рисунок 3.12 – Залежність резонансних частот антени від розміру ребра найбільшого трикутника (а) та залежність резонансних частот антени від співвідношення між ребрами фрактальних трикутників (б)

Для мікрохвильового випрямлення були застосовані діоди Шотткі SMS7630 від Skyworks. При оптимальному опорі навантаження на виході схеми випрямляча можна очікувати напругу близько 0,5 В. Ця напруга занадто низька для живлення мікроконтролерів (потрібно 3–5 В), тому для заряджання акумулятора до джерела живлення слід підключити додатковий модуль керування живленням. Модуль керування живленням BQ25570, вироблений Texas Instruments, був обраний, оскільки він має низьку вхідну напругу та високий коефіцієнт корисної дії. Можна очікувати, що коли схема збору енергії опромінюється максимально допустимою щільністю потужності мікрохвиль 10 Вт/м², вихідний сигнал згенерованого збирача енергії може забезпечити збалансовану потужність 5 мВт. Розробка збирачів

енергії для інших спектральних діапазонів триває. Однак початкові результати збору енергії з електромагнітних хвиль, що існують у навколишньому середовищі, є багатообіцяючими. Інші види енергії (сонячна, вітрова тощо) можуть бути використані для живлення окремих сенсорних вузлів у бездротовій сенсорній мережі (WSN). Технологію SSAIL можна використовувати для інтеграції будь-якої з цих антен для збору енергії з модулем Wi-Fi, використовуючи відповідну конструкцію, що відповідає вимогам.

Оцінка споживання енергії сенсорним вузлом

Очікуване загальне споживання енергії сенсорною мережею з десятима вузлами представлено в таблиці 3.2 нижче. З огляду на численні канали зв'язку, для обговорення було винесено її робочі цикли. Цей конкретний режим роботи має робочий цикл з інтервалом 10 хвилин.

Таблиця 3.2 – Споживання енергії сенсорною мережею.

Nodes	If One Duty Cycle is 10 min, mW	If One Duty Cycle is 1 h, mW	Overall Consumption per Day, mW
1 (Cluster head)	8.450	1.408	33.792
2	0.845	0.142	3.408
3	0.845	0.142	3.408
4	0.845	0.142	3.408
5	0.845	0.142	3.408
6	0.845	0.142	3.408
7	0.845	0.142	3.408
8	0.845	0.142	3.408
9	0.845	0.142	3.408
10	0.845	0.142	3.408
Time synchronisation	-	-	0.845
Overall power consumption			65.31

Вузол 1 розташований найближче до базової станції, а вузол 10 — найдалше від неї в зірковій топології, коли є десять сенсорних вузлів. Вузли, які здійснюють ретрансляцію, відомі як ретранслятори. У кластері є два типи вузлів: «відокремлені вузли» та «шлюзові вузли» (вузол 1). Вузол 1 з'єднується з іншими вузлами для підтвердження як головний вузол кластера та діє як шлюзовий вузол для передачі даних сенсорів до базової станції. З іншого боку, відокремлені вузли відповідають виключно за збір та передачу даних до головного вузла кластера.

Виходячи зі стовпця 4, сенсорна мережа з десяти вузлів споживає загалом 65,31 мВт/день, якщо вузли надсилають один фрагмент інформації за годину для вибраного режиму роботи. Враховуючи цей факт, можна оцінити термін служби різних типів батарей. Збірник радіочастотної енергії, який може служити основним джерелом зарядки акумулятора для бездротової

сенсорної мережі, може використовуватися для роботи в кількох режимах роботи.

3.11 Результат реалізації сенсорного вузла

Показники сенсорів відображаються на сервері, доступ до якого можна отримати з будь-якого місця. Створена база даних відображає результат роботи сенсорів DHT11 у двох діаграмах у режимі реального часу: одна показує показники температури, а інша – показники вологості. На рис.3.13 показано результат моніторингу температури та вологості на веб-сервері за допомогою веб-клієнта.

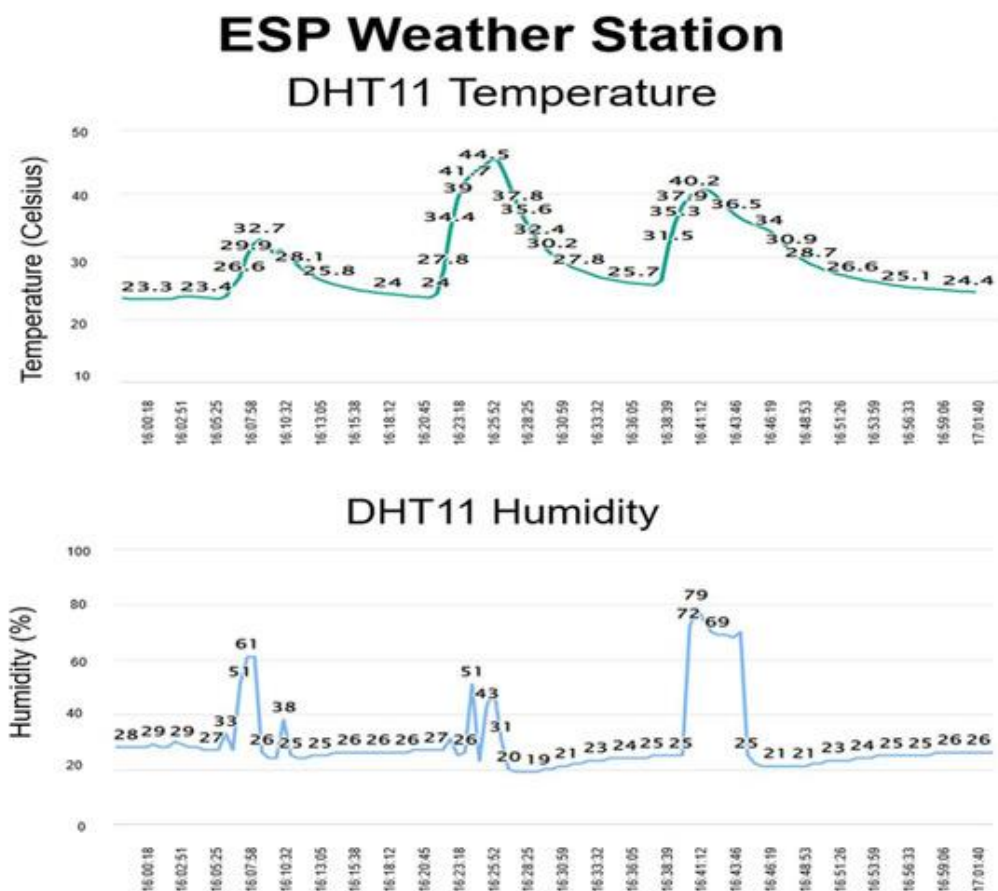


Рисунок 3.13 – Показники сенсорів у вигляді графіків у режимі реального часу на веб-сервері, до якого здійснюється доступ через веб-клієнт

Завдяки такій конфігурації користувач має повний контроль над сервером і може легко перемикаватися між хостами, якщо це необхідно. Існує безліч безкоштовних і платних хмарних сервісів для публікації показників, але кожен з них має свої недоліки, такі як обмеження щодо кількості опублікованих показників, кількості підключених пристроїв і того, хто може переглядати дані. Крім того, хмарний сервіс можна змінити або припинити

використовувати в будь-який момент. Вихідні дані максимально прості для розуміння, і їх можна перепрограмувати для зміни макета веб-сторінки, публікації значень різних сенсорів, публікації з численних плат ESP тощо.

Для безбатарейної багатовузлової сенсорної системи [41] система була розроблена з використанням технології SSAIL [42] та перевірена для сценаріїв впровадження в суворих умовах. Для методу збору енергії [43], дослідницькі проблеми топологій та системи управління енергією [44], а також запропонована оптимізація системи, підвищать надійність та масштабованість системи. Наше обговорення зосереджується на класифікації покриття [45, 46, 47], практичних проблемах розгортання бездротових сенсорних мереж (WSN) [48], підтримці якості обслуговування (QoS) [49], моделях сенсорних систем та дослідницьких проблемах у бездротових сенсорних мережах (WSN) [50].

Архітектура сенсорного вузла, запропонована для системи, складається з базової станції, яка зв'язується з кількома підлеглими вузлами. Підлеглий вузол має бути оснащений сенсорним блоком, що містить сенсори, модифікованим процесорним блоком, який підтримує ідею ввімкнення схем збору радіочастотної енергії, Wi-Fi для зв'язку з головним вузлом та джерелом живлення. Крім того, для дослідження та порівняння терміну служби сенсорних вузлів, загальної розсіюваної енергії та пропускну здатності 100 сенсорних вузлів за вдосконаленим протоколом LEACH зі стандартним протоколом LEACH було використано імітаційну модель. Сенсор передає п'ять байтів даних до модуля Wi-Fi, який працює в режимі глибокого сну, щоразу, коли він активується. Це перша демонстрація багатовузлової сенсорної системи, розробленої з використанням технології SSAIL. На відміну від рішень, що залежать від різних джерел енергії [41-48], сам блок живлення для збору радіочастотної енергії інтегрований та розроблений як компонент системи, що забезпечує повний контроль над кількістю доступної енергії та безперервну роботу бездротових сенсорних вузлів.

В результаті моделювання та вимірювань фрактальної антени S_{11} нам вдалося знайти конструкцію з вимірюною смугою пропускання, яка повністю охоплює нижній діапазон частот Wi-Fi. Антена резонує на п'яти різних частотах, що призводить до більшого накопичення енергії. На відміну від [41], було проведено додаткове дослідження робочих частот фрактальної антени залежно від розміру найбільшого трикутника та співвідношення ребер інших трикутників. На рівні -10 дБ вимірювана смуга пропускання становить від 2,40 ГГц до 2,49 ГГц. З рисунка 3.12 видно, що збільшення розміру трикутників або співвідношення між ребрами трикутників зменшує

резонансну частоту антени в обох діапазонах. Залежності близькі до лінійних. Співвідношення між двома діапазонами частот збільшується від 2,24 до 2,41 при збільшенні A та від 2,29 до 2,53 при збільшенні співвідношення між ребрами трикутників. Це дозволяє нам точніше контролювати резонансні частоти обох діапазонів, вибираючи правильні розміри антени та окреме налаштування обох резонансних частот.

Наші оцінки показують, що якщо бездротова мережа з десяти вузлів надсилає один фрагмент інформації за годину, вона споживає загалом 65,31 мВт/день для вибраного режиму роботи. Однак споживання енергії кожним вузлом протягом різних робочих циклів в таких умовах, як типи трафіку, втрата пакетів під час передачі даних та точність даних, є основними проблемами для майбутньої роботи.

3.12 Висновки до розділу

Дослідження було зосереджено на вбудованій системі сенсорних вузлів для моніторингу температури та вологості з використанням електронних схем та антен, виготовлених за технологією SSAIL. Ця технологія покращує конструкцію сенсорів, дозволяючи формувати антену та схему збору радіочастотних сигналів на різних пластиках, навіть на корпусі пристрою. Таким чином, пристрої можна мініатюризувати. Було розроблено та протестовано частину вузла, що містить збирач енергії та комунікаційну частину. Комунікаційний модуль, що використовується для підтримки схем антени, що збирає енергію, був розроблений для забезпечення швидкого та економічно ефективного виготовлення схем на гнучкому матеріалі у трьох вимірах. Результати моделювання та вимірювань фрактальної антени показують ідеальну відповідність на частоті 2,43 ГГц, і вона повністю охоплює нижній діапазон частот Wi-Fi.

Сенсорну мережу з випадково розподіленими вузлами було показано за допомогою моделювання в MATLAB на основі таких параметрів, як довжина області, ширина області, очікувані показники сенсорів та розмір пакета даних. Були проаналізовані різні режими роботи модуля Wi-Fi, і було зроблено висновок, що режим глибокого сну використовує найменшу кількість енергії. Результати моделювання вдосконаленого протоколу LEACH та стандартного протоколу LEACH показують, що I-LEACH зменшує споживання енергії приблизно на 43% та збільшує пропускну здатність на 40% у мережі зі 100 вузлів. Загальне споживання енергії сенсорною мережею з десяти вузлів оцінювалося в 65,31 мВт на день за заданого режиму роботи. Моніторинг сенсорних вузлів здійснювався

незалежно за допомогою високорівневого хостингового додатку PHP та бази даних MySQL. Дані сенсорів, отримані веб-клієнтом, відображалися у вигляді графіків у режимі реального часу на веб-сервері. Таким чином, ця модель є перспективною для моніторингу параметрів повітря в містах та промислових зонах.

Майбутні дослідження включатимуть зв'язок між кількома вузлами мережі сенсорів у різних місцях, оцінку параметрів, врахування радіоканалів та збір даних у режимі реального часу через веб-клієнти. Крім того, завдяки розвитку бездротових мереж та сенсорних технологій існує привабливий потенціал для агрегації даних, моделювання та тестування маршрутизації та географічного покриття з урахуванням терміну служби.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Гарантування безпеки праці передбачає застосування найбільш ефективних технологічних рішень та оптимальну організацію виробничого процесу. Особливого значення набувають такі чинники, як організація робочих процесів, розподіл обов'язків між працівниками, режим праці та відпочинку, дотримання трудової дисципліни, створення сприятливого психологічного клімату в колективі, а також належне санітарно-побутове забезпечення. Крім того, при формуванні безпечних умов праці необхідно враховувати медичні протипоказання до залучення працівників до певних технологічних операцій та проводити систематичне навчання й інструктажі з безпечних методів виконання робіт. Комплексний підхід до цих аспектів є запорукою зниження ризику травматизму та професійних захворювань, а також підвищення загальної ефективності праці.

На розробника сенсорів температури для бездротових IoT систем, відповідно до Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена чи понижена іонізація повітря; недостатня освітленість робочої зони; відсутність чи нестача природного освітлення [51].

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

4.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи

4.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Дотримання вимог щодо організації робочого місця є важливим з таких ключових причин [52]:

1. Збереження здоров'я працівника. Неправильна ергономіка робочого місця при роботі з комп'ютером може спричинити розвиток професійних

захворювань, таких як остеохондроз, міозит та інші порушення опорно-рухового апарату та нервової системи.

2. Підвищення продуктивності праці. Комфортні та ергономічно оптимізовані умови праці сприяють підвищенню концентрації, зниженню стомлюваності та, як наслідок, збільшенню ефективності та продуктивності працівника.

3. Зменшення ризику нещасних випадків. Незручно облаштоване робоче місце може стати причиною травмування, включаючи падіння, удари та травми рук, що призводить до нещасних випадків на виробництві. Таким чином, інвестиції в належну організацію робочого місця є важливим внеском у здоров'я та безпеку працівників, а також у підвищення ефективності їхньої праці.

Обладнання приміщення та робочого місця під час виконання роботи має відповідати вимогам гігієни праці та сприяти створенню комфортних умов для роботи:

1) вимоги до приміщення. Приміщення для працівників з ПК має бути добре освітленим, мати достатню вентиляцію і опалення. Площа приміщення повинна бути не менше 6 м² на одного працівника;

2) вимоги до робочого місця. Робоче місце працівника має бути обладнане таким чином, щоб забезпечити зручне положення тіла і мінімізувати ризик розвитку професійних захворювань.

Основні елементи робочого місця:

- робочий стіл повинен бути зручним і регульованим по висоті. Висота робочої поверхні столу повинна відповідати росту працівника і забезпечувати йому правильне положення рук і плечей;

- стілець має бути ергономічним і регульованим по висоті, ширині і куту нахилу спинки;

- комп'ютерна техніка повинна бути встановлена на рівні очей працівника;

- освітлення робочого місця має бути достатнім, але не занадто яскравим. Світло має бути рівномірно розподілене по робочій поверхні;

- допоміжне обладнання робочого місця може включати в себе підставки для паперів, клавіатури, монітора та інші пристрої, які допомагають працівнику організувати робочий процес.

Основні ергономічні вимоги до робочого місця включають: регульовану висоту робочої поверхні столу в діапазоні 72-75 см для забезпечення зручного положення рук; висоту спинки стільця в межах 30-35 см для належної підтримки попереку; кут нахилу спинки стільця в межах 100-110°

для зменшення навантаження на хребет; відстань між очима працівника та екраном монітора в межах 50-70 см для оптимального зорового сприйняття; а також розташування верхнього краю монітора на рівні очей або трохи нижче для запобігання перенапруженню шії.

Дотримання цих вимог до облаштування приміщення та організації робочого місця сприяє створенню комфортного та ергономічного робочого середовища, що суттєво знижує ризик розвитку професійних захворювань, пов'язаних з тривалою роботою в сидячому положенні та використанням комп'ютерної техніки.

4.1.2 Електробезпека приміщення

Електробезпека – це комплекс організаційних та технічних заходів і засобів, спрямованих на захист людей від шкідливого та небезпечного впливу електричного струму, електричної дуги, статичної електрики та електромагнітного поля. Дотримання вимог електробезпеки є надзвичайно важливим, оскільки вплив електричного струму може призвести до серйозних уражень, включаючи опіки, судоми, порушення серцевої діяльності тощо. Електрична дуга, що виникає при коротких замиканнях або інших несправностях, може стати джерелом займання та призвести до пожежі або вибуху, а також завдати значної шкоди обладнанню та іншій інфраструктурі підприємства, спричиняючи значні матеріальні збитки. Відтак, неухильне дотримання правил електробезпеки є першочерговим завданням для забезпечення безпеки персоналу, запобігання надзвичайним ситуаціям та збереження матеріальних цінностей [53].

В робочому приміщенні місцях знаходиться 4 комп'ютери. Напруга джерела живлення комп'ютерів – 220 В. За небезпекою ураження електричним струмом, таке приміщення належить до приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом працюючих.

Для запобігання електротравмам у приміщенні впроваджено наступні заходи безпеки [54]:

1) Усі струмоведучі частини електрообладнання мають надійну ізоляцію. Електропроводка та контакти, які можуть становити ризик ураження електричним струмом, мають бути якісно ізольовані, а стан ізоляції регулярно перевіряється на відсутність пошкоджень.

2) Встановлено систему захисного заземлення, призначену для безпечного відведення електричного струму в землю у випадку виникнення аварійної ситуації та ураження людини. Для цього використовуються як природні заземлювачі (металеві комунікації, арматура будівель), так і

спеціальні заземлювальні пристрої, що відповідають вимогам Правил улаштування електроустановок (ПУЕ).

3) Для всіх працівників, які працюють з електрообладнанням, проводяться систематичні інструктажі з питань електробезпеки. Ці інструктажі охоплюють правила безпечної експлуатації електрообладнання, основні причини електротравматизму та заходи їхнього запобігання.

4) На робочих місцях забезпечується неухильне виконання правил електробезпеки. Це включає заборону на використання несправного електрообладнання, роботу з електроприладами вологими руками, самостійне втручання в електромережу та інші дії, що можуть призвести до ураження електричним струмом.

5) Регулярно проводяться кваліфікованими фахівцями перевірки електрообладнання на відповідність чинним вимогам безпеки, виявляються та усуваються можливі несправності та дефекти. Результати перевірок фіксуються у відповідних протоколах.

Комплексне застосування цих заходів дозволяє значно мінімізувати ризик електротравматизму та забезпечити безпечні умови праці в приміщенні.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

В даному пункті розглянуто організацію праці розробника та умови виробничого приміщення, де здійснювалися теоретичні пошуки.

4.2.1 Мікроклімат

Мікрокліматичні умови на робочому місці, що включають температуру повітря та поверхонь, відносну вологість, швидкість руху повітря та теплове випромінювання, мають вирішальне значення для збереження здоров'я та підтримки належного рівня працездатності працівників. Тривалий вплив несприятливих метеорологічних факторів може призвести до погіршення самопочуття, зниження продуктивності праці та підвищити ризик розвитку різноманітних захворювань і порушень здоров'я. Тому забезпечення оптимальних мікрокліматичних параметрів є ключовим аспектом створення безпечних та комфортних умов праці.

Робота розробника відноситься до категорії 1а Нормується мікроклімат на робочому місці згідно ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.4.1. [55]

Таблиця 2.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для досягнення встановлених нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні використовується природна вентиляція. Повітря поступає через спеціальні отвори у дверях, і влітку, для покращення циркуляції повітря, також через віконні кватирки. У приміщенні діє загальна система опалення, і проводиться регулярне утримання оптимальної вологості повітря за допомогою систематичного прибирання [55].

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Шкідливі речовини, що можуть бути присутні у повітрі робочої зони, можуть мати різний агрегатний стан: газоподібний, пароподібний, рідкий (у вигляді крапель) або твердий (у формі дрібних частинок). Для оцінки потенційного ризику для здоров'я працівників та встановлення безпечних меж їхньої присутності необхідно ретельно контролювати концентрацію цих сполук у повітрі виробничих приміщень і визначати їхній токсичний вплив на організм, а також гранично допустимі концентрації (ГДК). Засоби та методи контролю повинні забезпечувати ідентифікацію конкретних видів шкідливих речовин, навіть за наявності інших сполук у повітрі, та дозволяти кількісно визначати їхню концентрацію в робочому середовищі. Регулярний та точний моніторинг шкідливих речовин є важливим елементом системи охорони праці, спрямованим на запобігання професійним захворюванням та підтримання здорових умов праці.

В приміщенні, де виконується робота, можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил, озон та вуглекислий газ. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, згідно ДСН 3.3.6.042-99, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2. [56]

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	10	4	4
Озон	0,16	0,03	4
Вуглекислий газ	3	1	4

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл.4.3) [57].

Таблиця 2.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для підтримки допустимих значень мікроклімату та концентрації позитивних та негативних іонів необхідно передбачати установки або прилади зволоження та/або штучної іонізації, кондиціювання повітря.

4.2.3 Виробниче освітлення

Ефективне освітлення робочого місця є одним з ключових факторів, що визначають продуктивність праці, а також сприяють зниженню рівня травматизму та професійної захворюваності. Належним чином організоване освітлення створює оптимальні умови для виконання робочих завдань, підвищує працездатність та загальну продуктивність. Освітлення, призначене для робочого місця розробника, повинно відповідати таким критеріям, щоб працівник міг виконувати свої обов'язки без зайвого напруження зору. Втома очей може бути спричинена різними факторами, серед яких недостатній рівень освітленості, надмірне освітлення та неправильний напрямок світлового потоку. Тому, при організації освітлення робочого місця необхідно враховувати всі ці аспекти для забезпечення комфортних та безпечних умов праці.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та сумісному освітленні відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 зазначені у таблиці 4.4: [58]

Таблиця 4.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнювання	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Високі точності	Від 0,3 до 0,5	III	г	великий	світлий	800	300	7	2,5	4,2	1,5

Робоче місце розташовано таким чином, щоб природне світло надходило переважно з лівого боку, що є оптимальним для праворуких користувачів та зменшує утворення тіней. Розташування робочого місця з комп'ютером сплановано таким чином, щоб уникнути прямого потрапляння променів світла в очі працівника, що може викликати дискомфорт та засліплення. Штучні світильники розміщено з обох боків екрана монітора паралельно напрямку зору, що забезпечує рівномірне освітлення робочої зони та зменшує контраст між екраном та оточенням. Для мінімізації відблисків від екрана, клавіатури та освітлювальних приладів, а також для запобігання потраплянню прямих сонячних променів в очі, передбачено використання антиблікових сіток, захисних козирків на світильниках та жалюзі на вікнах. Комплексне застосування цих заходів сприяє створенню комфортного та безпечного для зору робочого середовища.

4.2.4 Виробничий шум

Виробничий шум – це комплекс різноманітних за гучністю та частотою звуків, що виникають внаслідок коливальних рухів різних об'єктів і поширюються через повітряне середовище. Шум має негативний вплив перш за все на органи слуху. Шум також знижує концентрацію уваги, уповільнює психомоторні реакції, сприяє швидкій стомлюваності, порушує серцевий

ритм та дихання, а також впливає на метаболічні процеси. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку регламентуються Державними санітарними нормами ДСН 3.3.6.037-99. Допустимі рівні звукового тиску для умов виконання конкретної роботи наведені у таблиці 4.5. [59].

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення нормованих рівнів шуму у виробничих приміщеннях та на робочих місцях застосовуються шумопоглинальні засоби, вибір яких обґрунтовується спеціальними інженерно-акустичними розрахунками.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Тривалий вплив електромагнітних полів може спричинити ряд негативних змін у стані організму, включаючи підвищену втомлюваність, дратівливість, головні болі, сонливість, порушення сну, зниження артеріального тиску, коливання температури тіла та інші симптоми, що свідчать про розлади центральної нервової та серцево-судинної систем.

Електромагнітні поля високої частоти також можуть викликати в організмі ряд змін, включаючи зміни у складі крові, розвиток катаракти (помутніння кришталика ока), втрату нюху та, в окремих випадках, трофічні порушення, такі як випадіння волосся та ламкість нігтів. Ці функціональні порушення, спричинені впливом електромагнітних полів, зазвичай є тимчасовими і зникають після припинення опромінення. Однак слід враховувати, що здатність до відновлення не є безмежною і залежить від інтенсивності випромінювання, тривалості його впливу та індивідуальних особливостей організму. Відповідно до стандартів, електромагнітне випромінювання повинне бути виміряне в діапазоні частот від 5 Гц до 400кГц. Гранично допустимі рівні електромагнітного поля для працівника становлять наведені в таблиці 4.6. [60].

Таблиця 4.6 – Допустимі параметри електромагнітних неіонізуючих випромінювань і електростатистичного поля

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/кв.м
	за електричною складовою (Е), В/м	за магнітною складовою (Н), А/м	
Напруженість електромагнітного поля			
60 кГц до 3 мГц	50	5	
3 кГц до 30 мГц	20	-	
30 кГц до 50 мГц	10	0,3	
30 кГц до 300 мГц 5	5	-	
300 кГц до 300 гГц	-	-	
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру			
УФ-С (220 – 280 нм)			0,001
УФ-В (280 – 320 нм)	-	-	0,01
УФ-А (320 – 400 нм)			10,0
в видимій частині спектру 400 – 760 нм			10,0
0,76 – 10,0 мкм			35,0 – 70,0
Напруженість електричного поля ВДТ			20кВ/м

Для ефективної профілактики професійних захворювань необхідно не лише розробляти та впроваджувати технічні засоби захисту від електромагнітного випромінювання, але й вживати відповідних організаційних заходів, таких як обмеження часу перебування в зоні впливу, використання засобів індивідуального захисту та проведення регулярних медичних оглядів.

4.3 Пожежна безпека

Приміщення, де здійснюється робота, відноситься до категорії пожежної безпеки В (табл.4.1) [61].

Таблиця 4.1 - Категорія приміщення за вибухопожежною і пожежною небезпекою

Категорія приміщення	Характеристика речовин і матеріалів, що знаходяться (обертаються) у приміщенні
В Пожежонебезпечна	Тверді горючі та важкогорючі речовини і матеріали, за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться, не відносяться до категорій А, Б і питома пожежна навантага для твердих і рідких легкозаймистих та горючих речовин на окремих ділянках площею не менше 10 м ² кожна перевищує 180 МДж/м ² .

Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 конструкція будівлі, де розміщено приміщення, відноситься до II-го ступеня вогнестійкості (будівля з несучою конструкцією з природних матеріалів або штучного каменю, бетону або залізобетону з застосуванням листових і плиткових негорючих матеріалів).

Згідно з правилами улаштування електроустановок, приміщення відноситься до класу II-Па пожежної небезпеки (приміщенні, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали).

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

До причин, що можуть спричинити пожежу в приміщенні, відносяться:

- короткі замикання;
- перевантаження електромережі і перегріву струму несучих частин та з'єднань;
- порушення правил техніки безпеки [62].

При виникненні аварійних ситуацій відбувається різке виділення теплової енергії, яка може стати причиною виникнення пожежі.

Заходи щодо запобігання пожежі:

- систематична перевірка на справність струмоведучих частин обладнання;
- систематичне проведення протипожежного інструктажу;
- дотримання вимог пожежної безпеки на робочому місці.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

У приміщенні можливе використання системи автоматичного пожежогасіння. Також потрібно використовувати установку порошкового

пожежогасіння, що використовує у якості вогнегасної речовини спеціальний порошок, який є нетоксичним. Для подачі сигналів про пожежу у приміщенні встановлено пожежну сигналізацію.

Після закінчення роботи від усіх електроприладів, а також з мереж їх живлення повинна бути відключена напруга (за винятком протипожежних та охоронних установок). Електропроводи для підключення комп'ютерів, приладів повинні прокладатися по негорючих конструктивних елементах.

Згідно норм НАПБ Б.01.008-2018 [63] на кожні 20 м² площі приміщення вказаних категорії та класу пожежовибухонебезпеки та можливих класів пожеж – А, В і Е розміщується один порошковий або вуглекислотний вогнегасник з масою заряду від 3 до 5 кг. Крім того на поверсі, де знаходиться приміщення слід забезпечити наявність двох порошкових вогнегасників з масою заряду 10 кг.

Тому в приміщенні буде розташовуватися два порошкових вогнегасники, які будуть розміщуватись в різних його кінцях, на висоті не більше 1,5 м від рівня підлоги до нижнього торця вогнегасника і на відстані від дверей, достатній для їх повного відчинення. Підходи до місця розташування вогнегасників мають бути завжди вільними. Для зазначення місцезнаходження вогнегасників буде встановлений вказівний знак. Знак розташовують на видних місцях на висоті 2,0 - 2,5 м від рівня підлоги.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного аналізу джерел, можна зробити висновок, що для інтелектуальних сенсорів та MEMS найпоширенішими елементами для вимірювання температури є транзистори, термопари та термобатареї, оскільки ці елементи можна реалізувати за допомогою технології ІС. На системному рівні також важливими є платинові резистори, термістори та ІЧ-сенсори. Представлено порівняння властивостей чотирьох типів чутливих елементів. Термобатареї використовуються для вимірювання різниці температур і дуже підходять для теплових сенсорів, які вимірюють фізичну величину, спочатку перетворюючи сигнали в теплові величини, а потім перетворюючи теплові величини в електричні величини. Зазвичай у таких сенсорах також вимірюється опорна температура, наприклад, за допомогою біполярного транзистора. Для діапазону температур від -55°C до $+150^{\circ}\text{C}$ біполярні транзистори дуже добре підходять для використання як сенсори температури завдяки їхній низькій вартості, хорошій довготривалій стабільності та високій чутливості. Ці транзистори також можуть бути виготовлені за стандартною біполярною, BiCMOS та CMOS технологією, разом з аналоговими та цифровими електронними схемами. З цих причин для багатьох інтелектуальних сенсорів та MEMS ці елементи є кращими при реалізації систем сенсорів температури.

Ці концепції були застосовані в інтелектуальному сенсору температури з виходом DCM сигналу. Показано, що за допомогою таких інтелектуальних сенсорів можна досягти високої надійності та точності за низьких витрат. Крім того, споживання енергії цими сенсорами може бути дуже низьким, що важливо для обмеження самонагріву. Вихідні сигнали DCM підходять не тільки для безпосереднього зчитування мікроконтролером, але й можуть використовуватися в аналогових застосуваннях без будь-яких мікроконтролерів або цифрових схем.

У другому розділі дослідженні кілька концепцій, пов'язаних з бездротовими сенсорними мережами: архітектура, функції, компоненти та застосування. Виявлені основні кроки, корисні для побудови бездротової сенсорної мережі. У цьому контексті реалізовано коди для налаштування модуля передавача XBEE, IP-шлюзу та платформи, що включає різні сенсори. Запропоновано відповідне взаємозв'язування цих компонентів для формування цілісної та ефективної платформи для моніторингу екологічних подій. Реалізовано серверний компонент моніторингу, який дозволяє здійснювати дистанційне зондування звідусіль. Було виконано значну роботу

для встановлення взаємозв'язку та сумісності всіх цих апаратних та програмних компонентів, що реалізує цілі цього дослідження.

В третьому розділі була зосереджена увага на розробці вбудованої системи сенсорних вузлів для моніторингу температури та вологості з використанням електронних схем та антен, виготовлених за технологією SSAIL. Ця технологія покращує конструкцію сенсорів, дозволяючи формувати антену та схему збору радіочастотних сигналів на різних пластиках, навіть на корпусі пристрою. Таким чином, пристрої можна мініатюризувати. Було розроблено та протестовано частину вузла, що містить збирач енергії та комунікаційну частину. Комунікаційний модуль, що використовується для підтримки схем антени, що збирає енергію, був розроблений для забезпечення швидкого та економічно ефективного виготовлення схем на гнучкому матеріалі у трьох вимірах. Результати моделювання та вимірювань фрактальної антени показують ідеальну відповідність на частоті 2,43 ГГц, і вона повністю охоплює нижній діапазон частот Wi-Fi.

Сенсорну мережу з випадково розподіленими вузлами було показано за допомогою моделювання в MATLAB на основі таких параметрів, як довжина області, ширина області, очікувані показники сенсорів та розмір пакета даних. Були проаналізовані різні режими роботи модуля Wi-Fi, і було зроблено висновок, що режим глибокого сну використовує найменшу кількість енергії. Результати моделювання вдосконаленого протоколу LEACH та стандартного протоколу LEACH показують, що I-LEACH зменшує споживання енергії приблизно на 43% та збільшує пропускну здатність на 40% у мережі зі 100 вузлів. Загальне споживання енергії сенсорною мережею з десяти вузлів оцінювалося в 65,31 мВт на день за заданого режиму роботи. Моніторинг сенсорних вузлів здійснювався незалежно за допомогою високорівневого хостингового додатку PHP та бази даних MySQL. Дані сенсорів, отримані веб-клієнтом, відображалися у вигляді графіків у режимі реального часу на веб-сервері. Таким чином, ця модель є перспективною для моніторингу параметрів повітря в містах та промислових зонах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kanoun, O.; Bradai, S.; Khriji, S.; Bouattour, G.; El Houssaini, D.; Ben Ammar, M.; Naifar, S.; Bouhamed, A.; Derbel, F.; Viehweger, C. Energy-Aware System Design for Autonomous Wireless Sensor Nodes: A Comprehensive Review. *Sensors* 2021, 21, 548.
2. Creemer, J.F., Fruett, F., Meijer, G.C.M., French, P.J., 2001. The piezjunction effect in silicon sensors and circuits and its relation to piezoresistance. *IEEE Sensors Journal* 1, 98e108.
3. Fruett, F., Meijer, G.C.M., 2002. The Piezo Junction Effect in Silicon Integrated Circuits and Sensors. Kluwer Academic Publishers, Boston. Herwaarden van, A.W., 2008. Thermal sensors. In: Meijer, G.C.M. (Ed.), *Smart Sensor Systems*. Wiley, Chichester, pp. 151e183.
4. Huijsing, J.H., 2014. Precision instrumentation amplifiers. In: Meijer, G.C.M., Pertijs, M.A.P., Makinwa, K.A.A. (Eds.), *Smart Sensor Systems: Emerging Technologies and Applications*. Wiley, Chichester, pp. 42e67.
5. Jong de, P.C., Meijer, G.C.M., 1998. A 300_C dynamic-feedback instrumentation amplifier. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 33, 1999e2009.
6. Khadouri, S.H., Meijer, G.C.M., van der Goes, F.M.L., 1997. A CMOS interface for thermocouples with reference-junction compensation. *Analog Integrated Circuit and Signal Processing* 14, 235e248.
7. Makinwa, K.A.A., 2010. Smart temperature sensors in standard CMOS. In: *Proc. Euroensors*, pp. 930e939.
8. Meijer, G.C.M., 2008a. Smart temperature sensors and temperature-sensor systems. In: Meijer, G.C.M. (Ed.), *Smart Sensor Systems*. Wiley, Chichester, pp. 151e183.
9. Meijer, G.C.M., 2008b. Universal asynchronous sensor interfaces. In: Meijer, G.C.M. (Ed.), *Smart Sensor Systems*. Wiley, Chichester, pp. 279e311.
10. Michalski, L., Eckersdorf, K., Kucharski, J., McGhee, J., 2001. *Temperature Measurement*, second ed. Wiley, Chichester. Razavi, B., 2001. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*. McGraw Hill, New York, pp. 390e392.
11. Paolini, G.; Guermandi, M.; Masotti, D.; Shanawani, M.; Benassi, F.; Benini, L.; Costanzo, A. RF-Powered Low-Energy Sensor Nodes for Predictive Maintenance in Electromagnetically Harsh Industrial Environments. *Sensors* 2021, 21, 386.
12. Razooqi, Y.S.; Al-Asfoor, M. Intelligent Routing to Enhance Energy Consumption in Wireless Sensor Network: A Survey. In *Mobile Computing and Sustainable Informatics*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2022; pp. 283–300.
13. Saleem, K.; Fisal, N.; Al-Muhtadi, J. Empirical Studies of Bio-Inspired Self-Organized Secure Autonomous Routing Protocol. *IEEE Sens. J.* 2014, 14, 2232–2239.
14. Saleem, K.; Derhab, A.; Al-Muhtadi, J.; Shahzad, B.; Orgun, M.A. Secure transfer of environmental data to enhance human decision accuracy. *Comput.*

- Hum. Behav. 2015, 51, 632–639.
15. Lim, H.; Kim, T. Smartphone-Based Data Collection System for Repetitive Concrete Temperature Monitoring in High-Rise Building Construction. *Sustainability* 2019, 11, 5211.
 16. Yaseen, M.; Saleem, K.; Orgun, M.A.; Derhab, A.; Abbas, H.; Al-Muhtadi, J.; Iqbal, W.; Rashid, I. Secure sensors data acquisition and communication protection in eHealthcare: Review on the state of the art. *Telemat. Inform.* 2018, 35, 702–726.
 17. López-Ardao, J.C.; Rodríguez-Rubio, R.F.; Suárez-González, A.; Rodríguez-Pérez, M.; Sousa-Vieira, M.E. Current trends on green wireless sensor networks. *Sensors* 2021, 21, 4281.
 18. Marques, G.; Saini, J.; Dutta, M.; Singh, P.K.; Hong, W.-C. Indoor Air Quality Monitoring Systems for Enhanced Living Environments: A Review toward Sustainable Smart Cities. *Sustainability* 2020, 12, 4024.
 19. Majid, M.; Habib, S.; Javed, A.R.; Rizwan, M.; Srivastava, G.; Gadekallu, T.R.; Lin, J.C.-W. Applications of wireless sensor networks and internet of things frameworks in the industry revolution 4.0: A systematic literature review. *Sensors* 2022, 22, 2087.
 20. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, “Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем”, – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 275 с, 1999.
 21. О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, “Дослідження генератора електричних коливань на основі тунельно-резонансного діода”, Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 31 (70). №4. с.279-286, 2020.
 22. О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, “Дослідження реактивних властивостей тунельно-резонансного діода”, Вісник Хмельницького національного університету, №4 (287), с.160-167, 2020.
 23. О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, “Дослідження сенсора температури з частотним виходом на основі квантової гетероструктури з від’ємним диференційним опором”, Вісник Хмельницького національного університету, №2 (295), с.156-164, 2021.
 24. A.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.A. Osadchuk, O.O. Seletska, P. Kisała, K. Nurseitova, “Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors”, in *Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 111761I (2019), 2019
 25. О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, С.В. Ліхашорський, “Дослідження температурної нестабільності в активних НВЧ фільтрах та методи її зменшення”, Вісник Вінницького політехнічного інституту, № 3, с.127-133, 2021.
 26. О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, В.К. Скошук, “Удосконалення багатоканальної радіотехнічної системи на FPGA для частотних перетворювачів фізичних величин підтримкою цифрових сенсорів”, Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, №2, с.72-82, 2023.

27. Я.О. Осадчук, “Автогенераторні мікроелектронні сенсори магнітного поля з біполярним і польовим магніточутливими транзисторами”, Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 34(73), №1, с.354-363, 2023.
28. Я.О. Осадчук, “Мікроелектронні автогенераторні сенсори концентрації газу з частотним виходом”, Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 34(73), №2, с.266-275, 2023.
29. Я.О. Осадчук, “Мікроелектронні автогенераторні сенсори температури”, Вісник Хмельницького національного університету, №1, Т.1, (317), с. 237-247, 2023.
30. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, С. В. Барабан, Радіовимірювальні перетворювачі на основі транзисторних структур з від’ємним опором для неруйнівного теплового контролю. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2015.
31. O.V. Osadchuk, V.S. Osadchuk, I.O. Osadchuk, A.O. Semenov, V.V. Martyniuk, M.O. Prytula, “Investigation of a radio-frequency temperature transducer with a thermosensitive resistive element based on a complex compound of heterometallic β -diketonate”, ICEMS-BIOMED-2022 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1254 012027, 2022.
32. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Н. С. Кравчук, “Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом”, Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, с.162, 2006.
33. О.В. Осадчук, В.С. Осадчук, Я.О. Осадчук, “Дослідження сенсора температури з частотним виходом на основі квантової гетероструктури з диференційним від’ємним опором”, Вісник Хмельницького національного університету, №2, (295) с.156-164, 2021.
34. A.V. Osadchuk, I.O. Osadchuk, A.O. Semenov, “The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance”, Journal of Nano-and Electronic Physics. Scientific journal. Vol. 13 No 4, 04001(6 pp), 2021.
35. Priyadarshi, R.; Gupta, B.; Anurag, A. Deployment techniques in wireless sensor networks: A survey, classification, challenges, and future research issues. J. Supercomput. 2020, 76, 7333–7373.
36. Chen, S.T.; Hua, C.C.; Chuang, C.C. Forest management using Internet of Things in the Fushan botanical garden in Taiwan. J. Adv. Artic. Life Rob. 2021, 2, 78–82.
37. В. Вуйцік, З. Готра, О. Готра та ін. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. В 3-ох т., Львів, Україна: Ліга-Прес, 2003.
38. Я.І. Лепіх та ін., Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління. Одеса, Україна: Астропрінт, 2011.
39. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від’ємним опором. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2000. –303с.
39. І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева, Автоматичне управління технологічними об’єктами. Київ, Україна: НАУ, 2018.

- 40.Осадчук В.С., Осадчук О.В., Вербицький В.Г. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2001. –195 с.
- 41.Мікроелектронні сигнальні перетворювачі теплових сенсорів потоку. / Готра Г.Ю., Павлов С.В., Осадчук О.В., Голяка Р.Л., Вуйчик В., Куленко С.С. –Вінниця: ВНТУ, 2012. – 240 с.
- 42.Wang, Z.; Ma, P.; Zhang, L.; Chen, H.; Zhao, S.; Zhou,W.; Chen, C.; Zhang, Y.; Zhou, C.; Mao, H.; et al. Systematics of atmospheric environment monitoring in China via satellite remote sensing. J. Air Qual. Atmos. Health 2021, 14, 157–169.
- 43.Martínez,W.R.; Gutiérrez, Y.D.; Escobar, R.F.; Pallares, L. Application of the Internet of Things through a Network of Wireless Sensors in a Coffee Crop for Monitoring and Control its Environmental Variables. J. Technol. 2019, 22, 155–170.
- 44.Sharma, N.; Singh, B.M.; Singh, K. QoS-based energy-efficient protocols for wireless sensor network. J. Sustain. Comput. Inform. Syst. 2021, 30, 100425.
- 45.Kim,W.; Umar, M.M.; Khan, S.; Khan, M.A. Novel Scoring for Energy-Efficient Routing in Multi-Sensored Networks. Sensors 2022, 22, 1673.
- 46.Mayorga, I.L.; Pla, V.; Bauset, J.M.; Angeles, M.E.R. A hybrid method for the QoS analysis and parameter optimization in time-critical random access wireless sensor networks. J. Net. Comp. Appl. 2017, 83, 190–203.
- 47.Franke, J. Three-Dimensional Molded Interconnect Devices (3D-MID): Materials, Manufacturing, Assembly and Applications for Injection Molded Circuit Carriers; Hanser Publications; Elsevier Inc.: Munich, Germany, 2013; pp. 23–61.
- 48.Ali, A.; Ming, Y.; Chakraborty, S.; Iram, S. A Comprehensive Survey on Real-Time Applications of WSN. J. Future Internet 2017, 9, 77.
- 49.Asamnet. Goldene Fraktale, Goldenes Quadratfraktal, Goldenes Dreiecksfraktal, Goldenes Baumfraktal. Available online: <http://www.asamnet.de/~{}hollwecm/section/fraktal.htm> (accessed on 18.05.2025).
- 50.Çelik, K.; Kurt, E. Design and simulation of the antenna for RF energy harvesting systems. In Proceedings of the 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG), Istanbul, Turkey, 25–26 April 2018; pp. 148–150.
- 51.НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_праор_0_00-7_15-18_01_ua.php
- 52.ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги - [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028
- 53.Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

54. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14_nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html
55. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
56. СанПіН 2.2.4.1294-03 «Фізичні фактори виробничого середовища. Гігієнічні вимоги до аероіонного складу повітря виробничих і громадських приміщень» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.ionization.ru/issue/iss5.htm>
57. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
58. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>
59. ДСанПіН 3.3.6.096-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>
60. НАПБ Б.01.008-2018 Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників - [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82176
61. ДБН В.2.5-56:2014 Системи протипожежного захисту. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: - [Електронний ресурс] - https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=59526
62. НАПБ А.01.001-14 Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z1410-04>
63. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759
64. ДБН В.1.1.7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002..pdf

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ ІОТ СИСТЕМ

Виконав: студент 2(4)-го курсу, гр. РТ-23мс
спеціальності 172 « Електронні комунікації
та радіотехніка» ОП - («Радіотехніка»)

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Власюк О.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н. доцент каф. ІРТС

Осадчук Я.О.
(прізвище та ініціали)

« 11 » 06 2025 р.

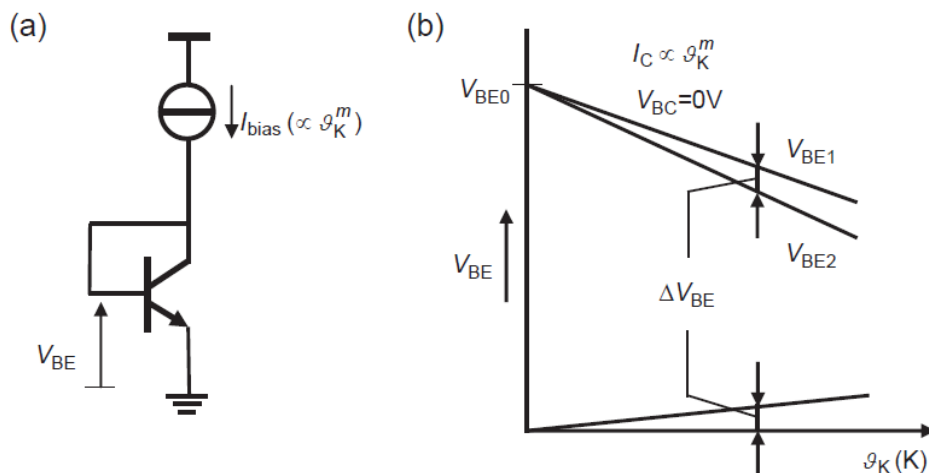


Рисунок 1 – (а) Біполярний транзистор (BJT) з короткозамкненим колектором та базою, що працює з постійним струмом I_{bias} ; (б) Напруга база-емітер V_{BE} зменшується майже лінійно з температурою w_K , тоді як різниця (ΔV_{BE}) між двома біполярними транзисторами, зміщеними різним струмом густини лінійно зростають з абсолютною температурою w_K

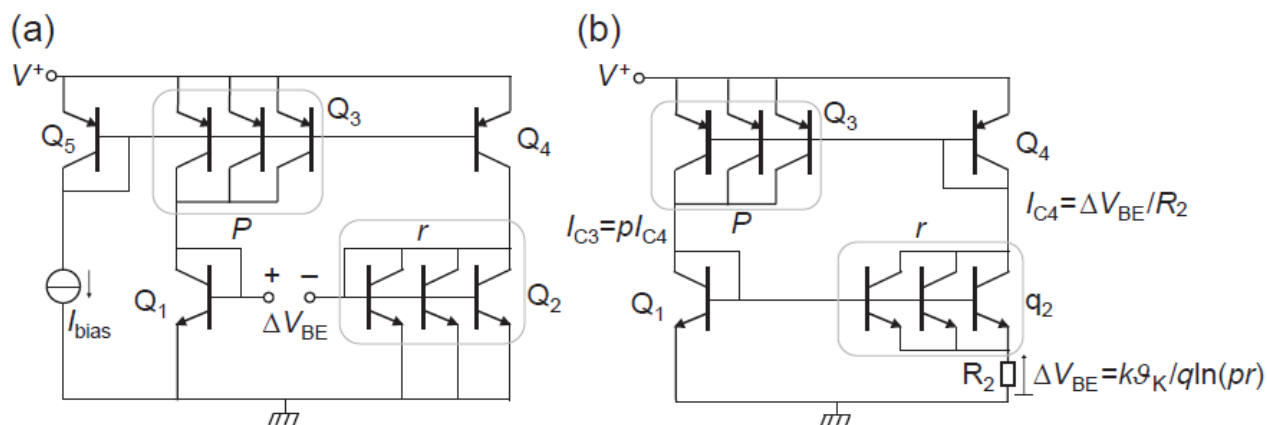


Рисунок 2 (а) Принцип схеми для генерації різниці ΔV_{BE} між напругами база-емітер двох транзисторів Q_1 та Q_2 , (б) Просте джерело струму, пропорційне абсолютній температурі

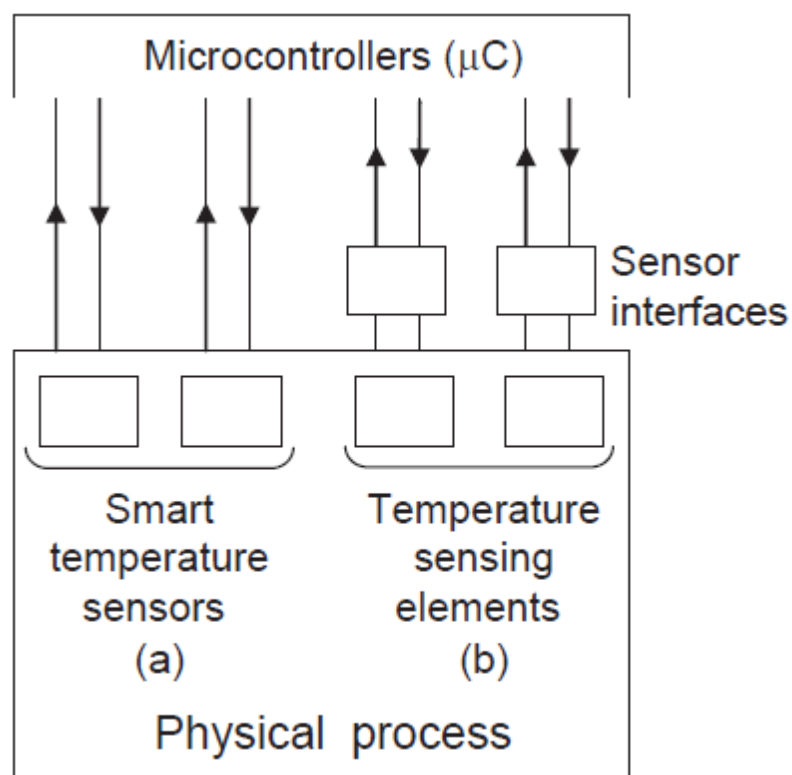


Рисунок 3 – Можлива конфігурація системи з мікроконтролером, деякими інтелектуальними сенсорами температури та дискретними елементами вимірювання температури з окремими інтерфейсами сенсорів

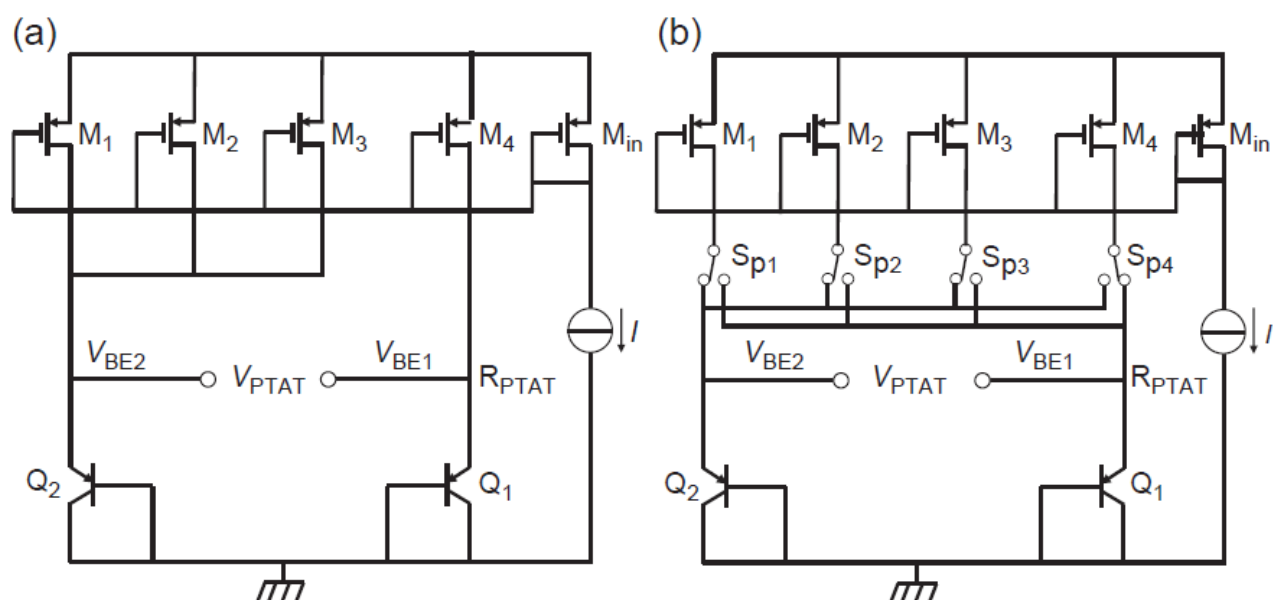


Рисунок 4 – Схеми, що генерують напруги, пропорційні абсолютній температурі, за допомогою КМОП-технології: (a) Базова схема; (b) Аналогічна схема з динамічним узгодженням елементів Р-канальних МОН-транзисторів (PMOS)

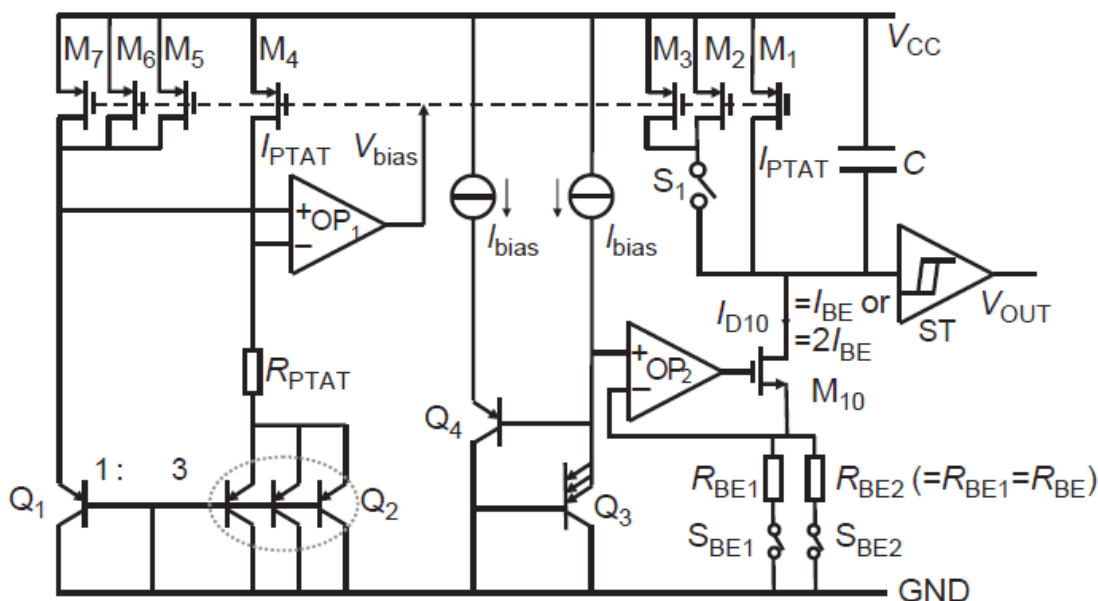


Рисунок 5 – Спрощена схема CMOS-сенсора температури

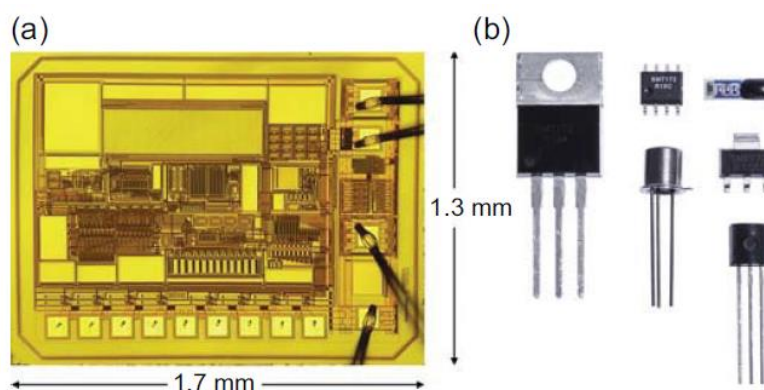


Рисунок 6 – (а) Фотографія мікросхеми, (б) сенсор температури в різних корпусах. Відтворено з дозволу Smartec

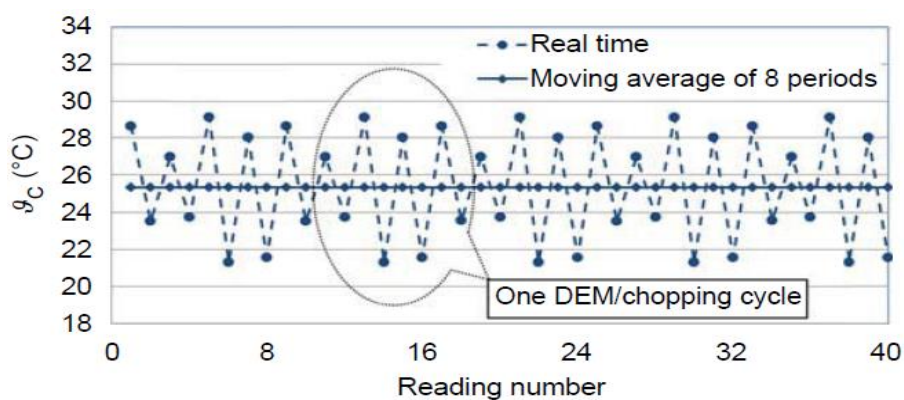


Рисунок 7 - Виміряні показники температури за кімнатної температури ($w_{C,ref} = 25,356^{\circ}\text{C}$). DEM, динамічне зіставлення елементів

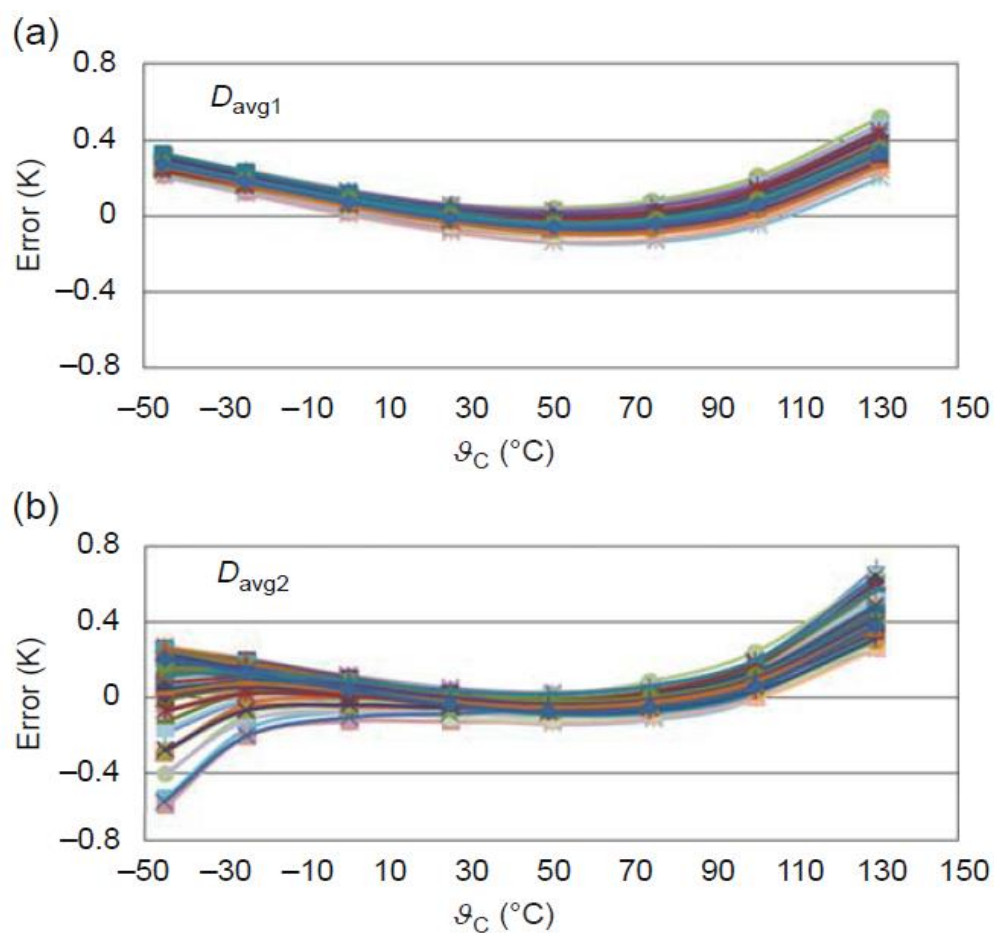


Рисунок 8 – Систематичні похибки в залежності від температури

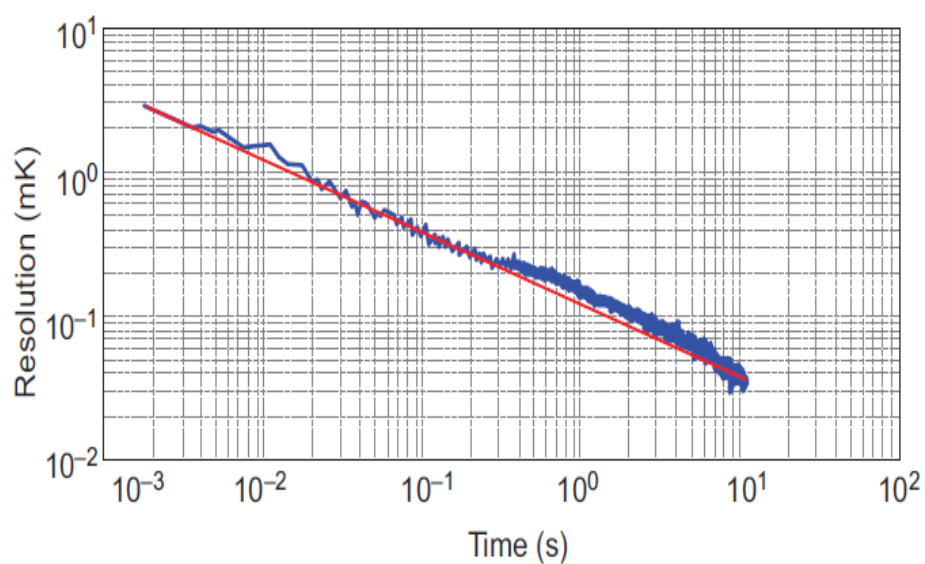


Рисунок 9 – Виміряна роздільна здатність (стандартне відхилення) в залежності від часу вимірювання (частота дискретизації 72 МГц)

Таблиця 1 - Основні характеристики розумного біполярного транзисторного сенсора температури

Назва	SMT172
Напруга живлення (В)	2.7...5.5
Струм живлення (мА)	42...75
Кількість штифтів	3
Діапазон температур (°C)	від -45 до +130
Вихідний сигнал	Модульований робочий цикл
Мінімальний час вимірювання (мс)	1e22
Чутливість до напруги живлення (°C/V)	0,1
Найкраща точність (°C) (діапазон температур [°C])	0,1 (-20 до +60)
	0,3 (-45 до +130)
Роздільна здатність під час вимірювання	0,00017°C за 1 с 0,003°C за 1,8 мс

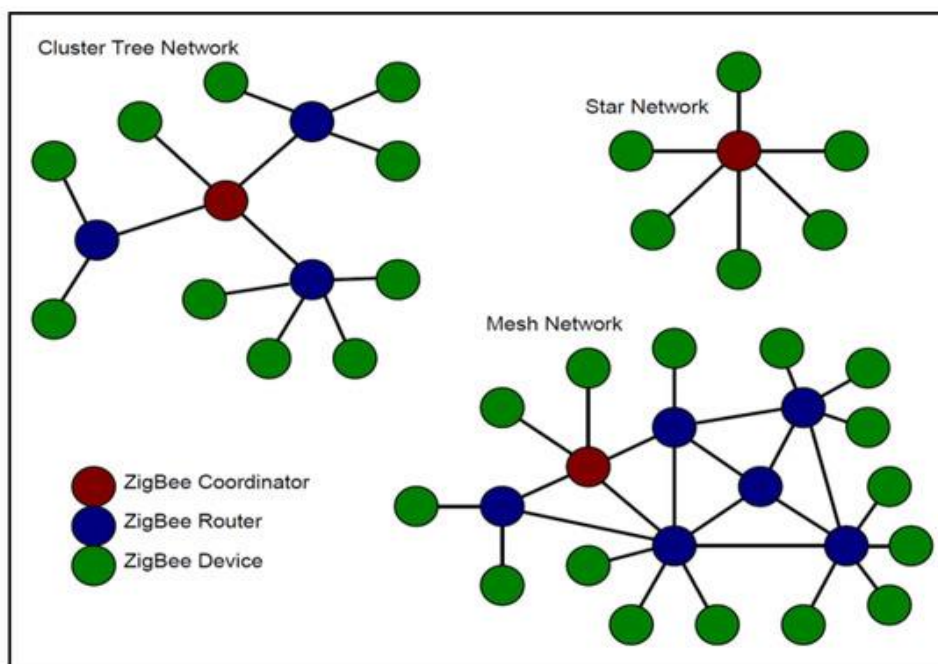


Рисунок 10 – Типи мережевих схем

Enter the text to Base64 Decode [get sample](#)

```
JA0KTFBHX01RMIA9IDAgUFBNDQpDT19NUTlgPSAwlFBQTQ0KU01PS0VTVEyID0gMCBQU
E0NCkNPX01RNYA9IDQ1NCBQUE0NCkxQR19NUTYgPSAxNzggUFBNDQpMRFlgPSAwJQ0K
lw==
```

Decode **Load** **Browse**

The Base64 Decode:

```
$
LPG_MQ2 = 0 PPM
CO_MQ2 = 0 PPM
SMOKE_MQ2 = 0 PPM
CO_MQ7 = 454 PPM
LPG_MQ6 = 178 PPM
LDR = 0%
#
```

Рисунок 11 – Отримані показники до та після декодування



Рисунок 12 – Результати вимірювання температури та вологості з сенсора DHT на сервері

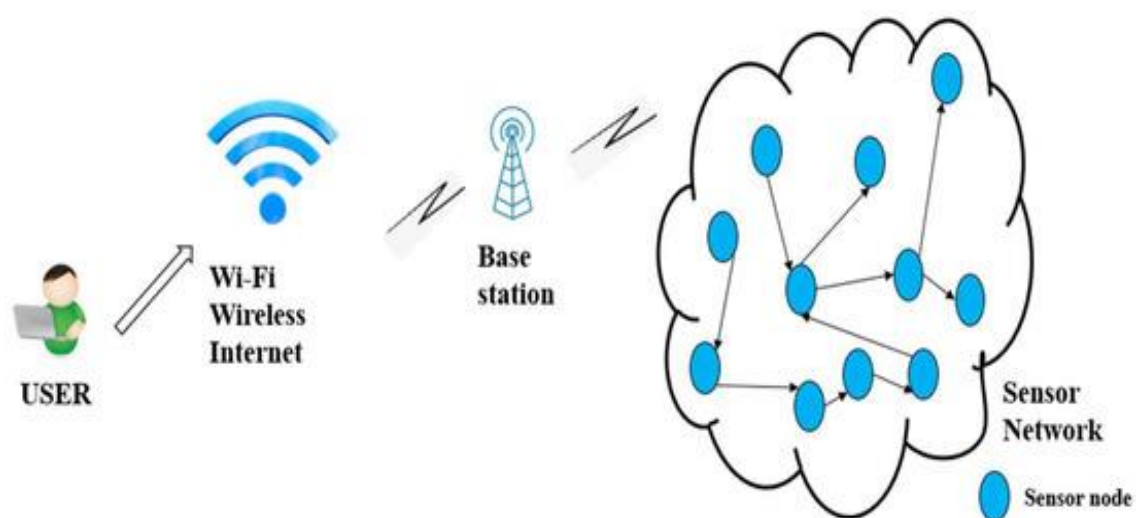
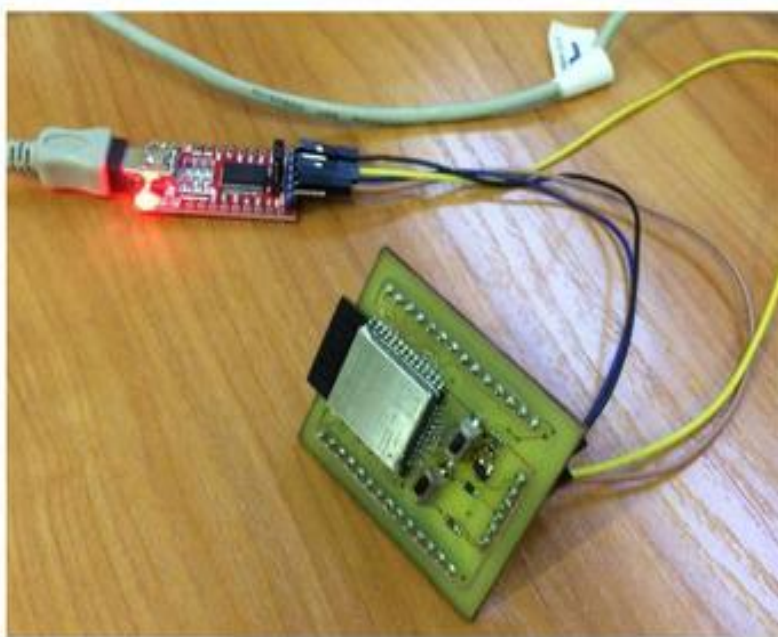


Рисунок 13 – Схема типової бездротової сенсорної мережі (WSN) з кількома вузлами



(a)



(b)

Рисунок 14 – Конструкція друкованої плати (а) та модифікованого прототипу модуля ESP32, виготовленого за технологією SSAIL (б)

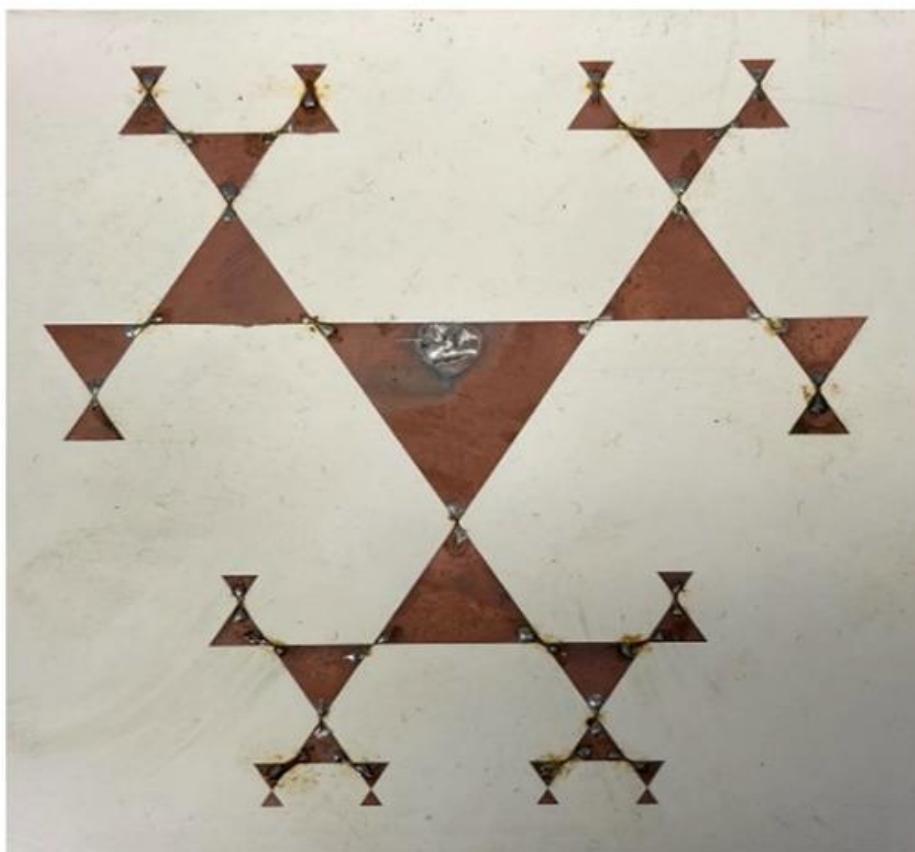


Рисунок 15 – Антена, що збирає енергію

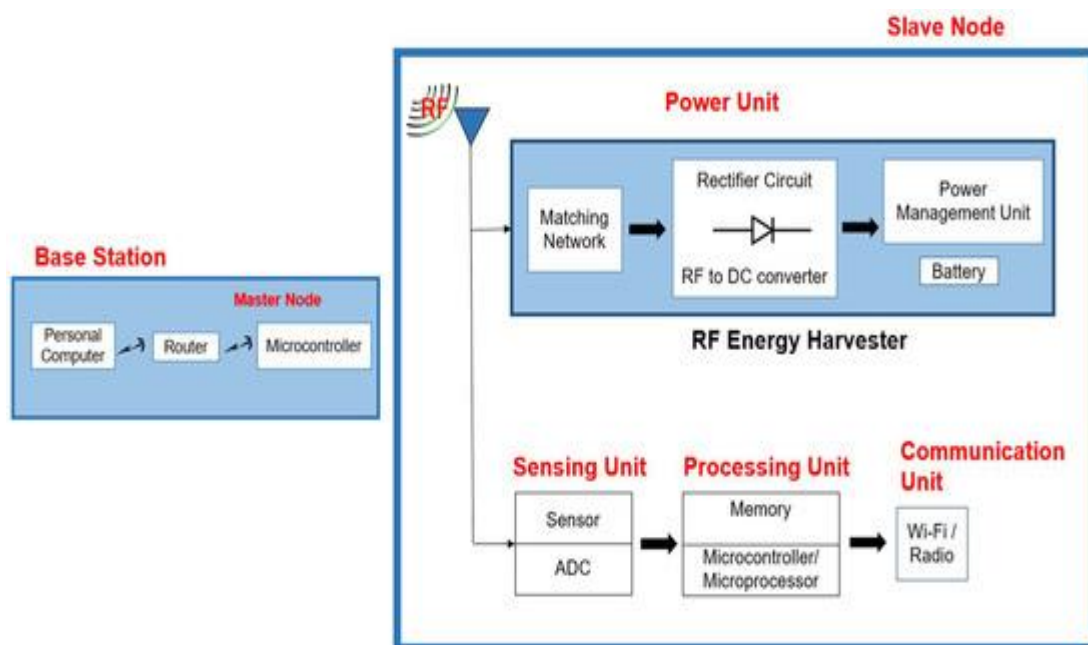


Рисунок 16 – Архітектура вузла сенсора

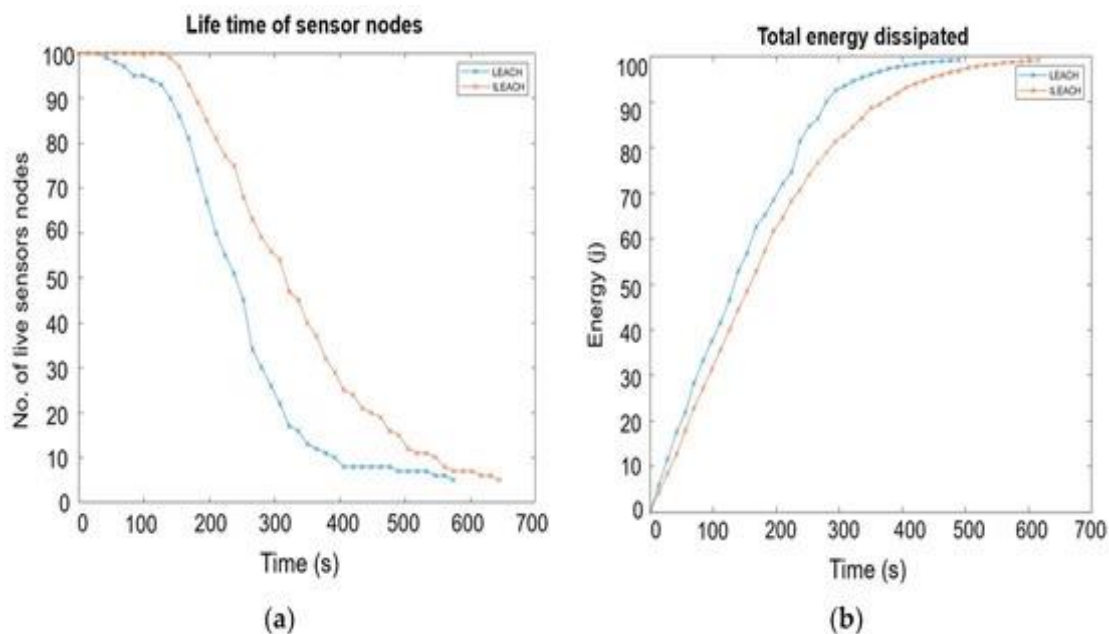


Рисунок 17 – Порівняння терміну служби та середнього споживання енергії сенсорними вузлами між стандартним та вдосконаленим протоколом LEACH у (а , b) відповідно

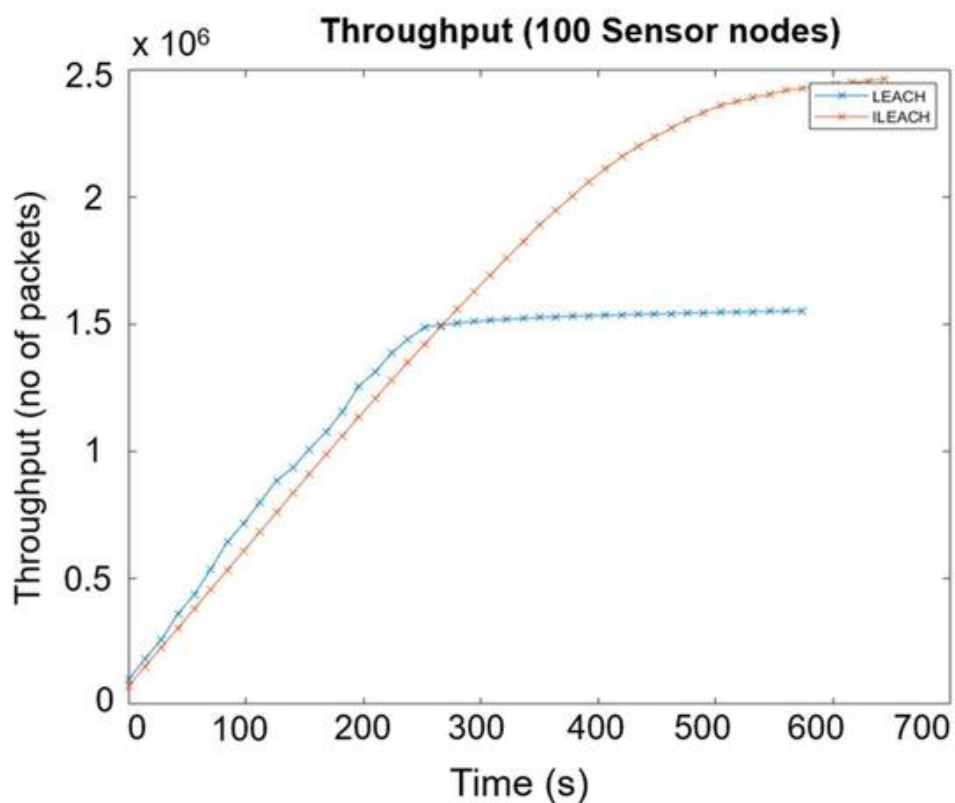


Рисунок 18 – Порівняння пропускної здатності між стандартним та покращеним протоколом LEACH

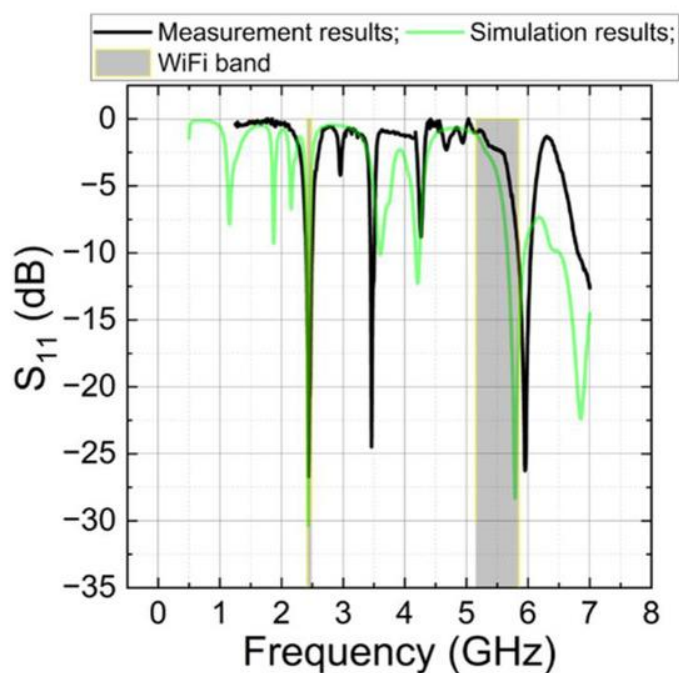


Рисунок 19 – Результати моделювання та вимірювань фрактальної антени, виготовленої за допомогою S11

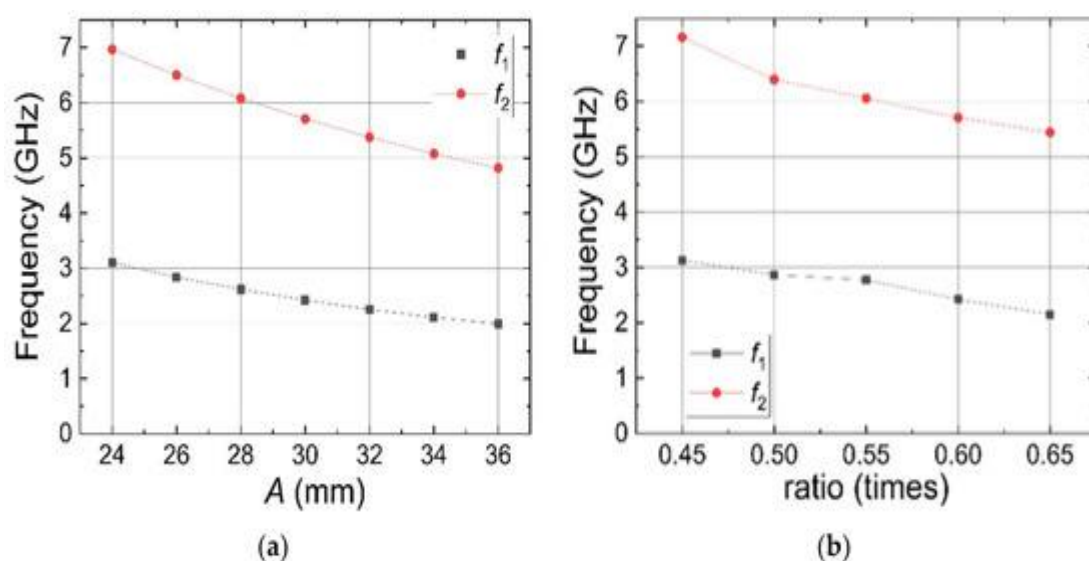


Рисунок 20 – Залежність резонансних частот антени від розміру ребра найбільшого трикутника (а) та залежність резонансних частот антени від співвідношення між ребрами фрактальних трикутників (б)

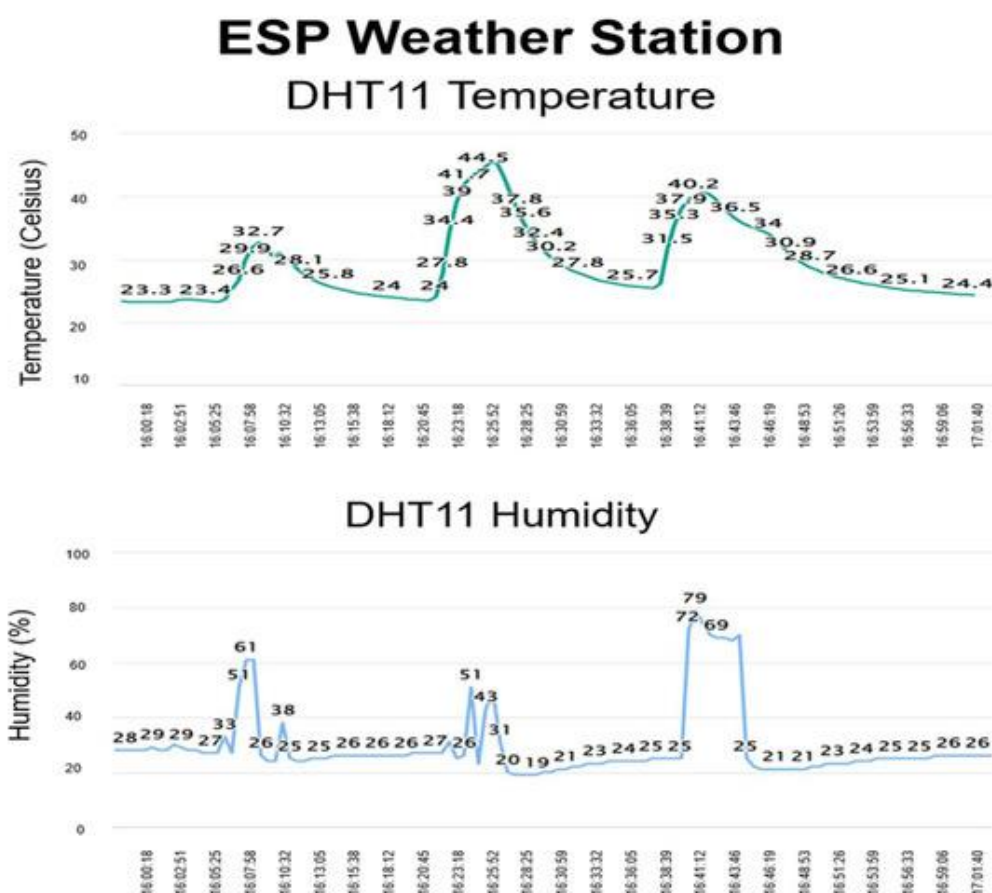


Рисунок 21 – Показники сенсорів у вигляді графіків у режимі реального часу на веб-сервері, до якого здійснюється доступ через веб-клієнт

Додаток Б
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (БАКАЛАВРСЬКОЇ)
КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

СЕНСОРИ ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ ІОТ СИСТЕМ

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Сенсори температури для бездротових IoT систем»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ Кафедра ІРТС
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 0,34%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Воловик А.Ю. – д.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Осадчук О.В. – д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

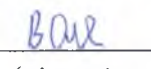
Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Семенов А.О.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

Осадчук Я.О. – д.т.н., доцент каф. ІРТС
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Власюк О.В.
(прізвище, ініціали)

Додаток В
(довідниковий)
Лістинги програм
XBee Arduino

```
#include<XBee.h>
#include <MQ2.h>
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial xbe(2, 3);
XBee xbee = XBee();
int Analog_Input_MQ2 = 0;
int Analog_Input_MQ7 = 1;
int Analog_Input_LDR = 2;
int Analog_Input_MQ6 = 3;
MQ2 mq2(Analog_Input_MQ2);
int LPG_MQ2 = 0;
int CO_MQ2 = 0;
int SMOKE_MQ2 = 0;// MQ2 Sensor (Methane, Butane, LPG, Smoke)
int MQ7 = 0;// MQ7 Sensor (Carbon Monoxide)
int LDR = 0;// LDR Sensor (Light Dependant Resistor)
int LPG_MQ6 = 0;// MQ6 Sensor (LPG, Butane)
void setup() {
  xbe.begin(9600);
  Serial.begin(9600);
  xbee.setSerial(xbe); }
void loop() {
  LDR = analogRead(Analog_Input_LDR);
  LPG_MQ6 = analogRead(Analog_Input_MQ6);
  LPG_MQ2 = mq2.readLPG();//lpg = values[0];
  CO_MQ2 = mq2.readCO();//co = values[1];
  SMOKE_MQ2 = mq2.readSmoke();//smoke = values[2];
  MQ7 = analogRead(Analog_Input_MQ7);// MQ7 Sensor (Carbon Monoxide)
  LDR = analogRead(Analog_Input_LDR);
  LPG_MQ6 = analogRead(Analog_Input_MQ6);
  LDR = (1024 - LDR) / 1024 * 100;
  xbe.println('$');
  xbe.print("LPG_MQ2 = ");
  xbe.print(LPG_MQ2);
  xbe.println(" PPM");
  xbe.print("CO_MQ2 = ");
  xbe.print(CO_MQ2);
  xbe.println(" PPM");
  xbe.print("SMOKE_MQ2 = ");
```

```

xbe.print(SMOKE_MQ2);
xbe.println(" PPM");
xbe.print("CO_MQ7 = ");
xbe.print(MQ7);
xbe.println(" PPM");
xbe.print("LPG_MQ6 = ");
xbe.print(LPG_MQ6);
xbe.println(" PPM");
xbe.print("LDR = ");
xbe.print(LDR);
xbe.println("%");
xbe.print('#');
delay(2000); }

```

ThingSpeak Arduino source code.

```

#include <DHT.h> // Including library for dht
#include <MQ2.h>
#include "ThingSpeak.h"
String apiKey = "8CQG1FS4M1H0GZ04";
const char* server = "api.thingspeak.com";
ThinkSpeak client;
int LDR_A = 0;//pin where the dht11 is connected
int LDR_D = 0;//pin where the dht11 is connected
int MQ6_D = 0;//pin where the dht11 is connected
int MQ2_pin = 4;// pin D2 is GPIO 2
int MQ7_pin = 5;// pin D1 is GPIO 5
int LDR_pin = 14;// pin D5 is GPIO15
int MQ6_pin = 12;// pin D6 is GPIO14
MQ2 mq2(MQ2_pin);
int MQ2_LPG_val = 0;
int MQ2_CO_val = 0;
int MQ2_SMOKE_val = 0;// MQ2 Sensor (Methane, Butane, LPG, Smoke)
int MQ7_CO_val = 0;// MQ7 Sensor (Carbon Monoxide)
float LDR_val = 0;// LDR Sensor (Light Dependant Resistor)
int MQ6_LPG_val = 0; // MQ6 Sensor (LPG, Butane)
void setup(){
  Serial.begin(115200);
  delay(10);
}
void loop(){
  LDR_A = 1024 - analogRead(A0);
  MQ2_LPG_val = 1 - mq2.readLPG();//lpg = values[0];
  MQ2_CO_val = 1 - mq2.readCO();//co = values[1];

```

```

MQ2_SMOKE_val = 1 - mq2.readSmoke();//smoke = values[2];
MQ7_CO_val = 1 - digitalRead(MQ7_pin);
LDR_val = 1 - digitalRead(LDR_pin) ;
MQ6_LPG_val = 1 - digitalRead(MQ6_pin);
if (client.connect(server, 80)){// "184.106.153.149" or
api.thingspeak.com
String postStr = apiKey;
postStr += "&field1=";
postStr += String(DHT_Temperature);
postStr += "&field2=";
postStr += String(DHT_Humidity);
postStr += "&field3=";
postStr += String(LDR_A);
postStr += "&field4=";
postStr += String(MQ2_LPG_val);
postStr += "&field5=";
postStr += String(MQ2_CO_val);
postStr += "&field6=";
postStr += String(MQ2_SMOKE_val);
postStr += "&field7=";
postStr += String(MQ6_LPG_val);
postStr += "&field8=";
postStr += String(MQ7_CO_val);
postStr += "\r\n\r\n";
client.print("POST /update HTTP/1.1\n");
client.print("Host: api.thingspeak.com\n");
client.print("Connection: close\n");
client.print("X-THINGSPEAKAPIKEY: " + apiKey + "\n");
client.print("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded\n");
client.print("Content-Length: ");
client.print(postStr.length());
client.print("\n\n");
client.print(postStr);
Serial.print("analog LDR IS: ");
Serial.print(LDR_A);
Serial.print(" & digital LDR is: ");
Serial.print(LDR_D);
Serial.println(" Send to Thingspeak.");
}
client.stop();
// thingspeak needs minimum 15 sec delay between updates
delay(1000); }

```



```

#define BLYNK_PRINT Serial
#define TINY_GSM_MODEM_SIM900
#define BLYNK_HEARTBEAT 8
#define SerialAT Serial1
#include <TinyGsmClient.h>
#include <BlynkSimpleTinyGSM.h>
#include <SoftwareSerial.h>
char auth[] = "wMeQ5t_Ya2nFDD2AQwtaqwt_85le6DOg";
char apn[] = "jawalnet.com.sa"; //"zain internet"; //"zain-gprs";
char user[] = "";
char pass[] = "";
SoftwareSerial SerialAT(3,4); // RX, TX
TinyGsm modem(SerialAT);
int Analog_Input_MQ2 = A0;
int Analog_Input_MQ7 = A1;
int Analog_Input_LDR = A2;
int Analog_Input_MQ6 = A3;
MQ2 mq2(Analog_Input_MQ2);
int LPG_MQ2 = 0;
int CO_MQ2 = 0;
int SMOKE_MQ2 = 0; // MQ2 Sensor (Methane, Butane, LPG, Smoke)
int MQ7 = 0; // MQ7 Sensor (Carbon Monoxide)
float LDR = 0; // LDR Sensor (Light Dependant Resistor)
int LPG_MQ6 = 0; // MQ6 Sensor (LPG, Butane)
BlynkTimer timer;
void sendSensor(){
  delay(500);
  take_readings();
  correct_values();
  Blynk.virtualWrite(V1, LPG_MQ2);
  Blynk.virtualWrite(V2, CO_MQ2);
  Blynk.virtualWrite(V3, SMOKE_MQ2);
  Blynk.virtualWrite(V4, MQ7);
  Blynk.virtualWrite(V5, LDR);
  Blynk.virtualWrite(V6, LPG_MQ6);
}
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  delay(10);
  SerialAT.begin(115200);
  delay(3000);
  Serial.println("Initializing modem...");
  modem.restart();
  // modem.simUnlock("****"); // Unlock your SIM card with a PIN

```

```
Blynk.begin(auth, modem, apn, user, pass); //,
IPAddress(188,166,206,43), 8080); Blynk.begin(auth, modem, apn, user,
pass);
timer.setInterval(1000L, sendSensor);
}
void loop(){
  LPG_MQ2 = mq2.readLPG();//lpg = values[0];
  CO_MQ2 = mq2.readCO();//co = values[1];
  SMOKE_MQ2 = mq2.readSmoke();//smoke = values[2];
  MQ7 = analogRead(Analog_Input_MQ7);// MQ7 Sensor (Carbon Monoxide)
  LDR = analogRead(Analog_Input_LDR);// LDR Sensor (Light Dependant
  Resistor)
  LPG_MQ6 = analogRead(Analog_Input_MQ6); Blynk.run();
  timer.run();
}
```