

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))

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем»

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-22м  
спеціальності 172 – Телекомунікації  
та радіотехніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Андрєнков М.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС

Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«16» 12 2023 р.

Опонент: доцент каф. ІКСТ, к.т.н., доц

Семенова О.О.

(прізвище та ініціали)

«17» 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«17» 12 2023 р.

Вінниця ВНТУ - 2023 рік

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інформаційних електронних систем  
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем  
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)  
Галузь знань – 17 Електроніка та телекомунікації  
Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка  
Освітньо-професійна програма – Радіотехніка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завидувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«16» вересня 2023 року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**  
Андреєнкову Максиму Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем»

керівник роботи д.т.н., проф., зав. кафедри ІРТС Осадчук О.В.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «18» 09.2023 р. №247.

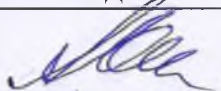
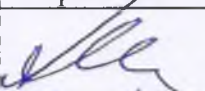
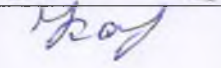
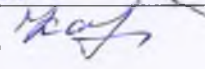


2. Строк подання студентом роботи 15.12.2023р.

3. Вихідні дані до роботи: Робочий діапазон частот від 100 кГц до 5 МГц. Напруга живлення 3,3-5В. Струм споживання 15-150мА. Діапазон вимірювання концентрації газу 0-5000 ppm.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Аналіз існуючого стану радіотехнічних пристроїв вимірювання для IoT систем. Розробка та дослідження радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів на основі SiC-FET. Розробка радіотехнічного пристрою визначення якості повітря з MODBUS RTU на ESP8266. Економічна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Архітектура бездротової сенсорної мережі (WSN). Застосування бездротової сенсорної мережі (WSN). Види комунікаційних технологій. Електрична схема автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів на основі двох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом. Теоретична та експериментальна залежність вихідної частоти автогенераторного перетворювача від концентрації метану. Вид поперечного перерізу SiC-FET із двополюсним виснаженням. Поперечний переріз SiC-FET із виснаженням трьох контактів. Схема підключення датчика CCS811 та перетворювача UART-RS485. Зовнішній вигляд Wiren Board.

6. Консультанти розділів роботи

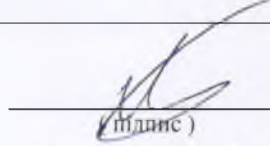
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав,	виконання прийняв
Основна частина	д.т.н., проф., зав каф. Осадчук О.В.		
Економічна частина	доцент каф. ЕПВМ, доцент, к.е.н., Кавецький В.В.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	професор кафедри БЖДПБ, професор, д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 17.09.2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

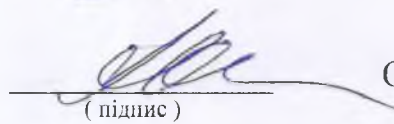
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2023-07.09.2023	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2023-17.09.2023	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.	18.09.2023-27.09.2023	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	28.09.2023-10.10.2023	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	11.10.2023-04.11.2023	
6.	Розробка графічної частини МКР.	05.11.2022-18.11.2022	
7.	Економічна частина.	19.11.2023-25.11.2023	
8.	Охорона праці (ОП).	26.11.2022-30.11.2022	
9.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	01.12.2023-12.12.2023	
10.	Нормоконтроль.	13.12.2023-16.12.2023	
11.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	17.12.2023-18.12.2023	
12.	Захист МКР ЕК.	19.12.2023-21.12.2023	

Студент

  
(підпис)

Андрєєнков М.А.

Керівник роботи

  
(підпис)

Осадчук О.В.



## АНОТАЦІЯ

УДК 621.382

Андреевков М.А. Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем: магістерська кваліфікаційна робота – Вінниця: ВНТУ 2023 р. – 139 стор., 51 рис., 58 бібл., 15 табл. – українською мовою.

В магістерській кваліфікаційній роботі проводились дослідження радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів. Також представлений аналіз сучасного стану пристроїв вимірювання концентрації газу для IoT систем.

У магістерській кваліфікаційній роботі в науковому плані розроблено математичні моделі радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів та біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, в яких на відміну від існуючих, враховано вплив концентрації газу на елементи нелінійних еквівалентних схем, що дало змогу отримати аналітичні вирази чутливості та функції перетворення концентрації газу у частоту. Удосконалено математичну модель резистивного елемента, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховані фізичні процеси, що приводять до зміни опору поверхні газочутливого напівпровідника від кількості адсорбованих молекул газу.

Отримано аналітичні вирази для функції перетворення і чутливості розробленого радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів та біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, які можуть бути використані для інженерного розрахунку первинних вимірювальних пристроїв концентрації газів.

Представлено дослідження газочутливого SiC-FET з двох, трьох та багато електродному вигляді для моніторингу вихлопних газів, виявлення NOx та для застосування вимірювання якості повітря в приміщенні.

Розроблено радіотехнічний пристрій визначення якості повітря з Modbus RTU на ESP8266.

Ключові слова: IoT система; радіотехнічний пристрій визначення якості повітря; від'ємний диференційний опір; концентрація газів; функція перетворення.

## ABSTRACT

Andreyenkov M.A. Radio-technical devices for measuring the concentration of gases for IoT systems: Master's works - Vinnytsia: VNTU 2023 – 139 pp., 51fig., 58 bibl., 15 table. - in the Ukrainian language.

In the master's qualification thesis, research was carried out on radio-technical devices for measuring the concentration of gases for IoT systems based on metal-dielectric-semiconductor gas-sensitive elements. An analysis of the current state of gas concentration measuring devices for IoT systems is also presented.

In the master's qualification work in the scientific plan, mathematical models of radio engineering devices for measuring gas concentration for IoT systems based on metal-dielectric-semiconductor gas-sensitive elements and a bipolar transistor structure with negative differential resistance were developed, in which, unlike the existing ones, the effect of gas concentration is taken into account on the elements of nonlinear equivalent circuits, which made it possible to obtain analytical expressions of sensitivity and the function of converting gas concentration into frequency. The mathematical model of the resistive element has been improved, which differs from the existing ones in that it takes into account physical processes that lead to a change in the surface resistance of a gas-sensitive semiconductor depending on the number of adsorbed gas molecules.

Analytical expressions for the conversion function and sensitivity of the developed radio engineering gas concentration measuring devices for IoT systems based on metal-dielectric-semiconductor gas-sensitive elements and bipolar transistor structure with negative differential resistance were obtained, which can be used for engineering calculation of primary gas concentration measuring devices.

A study of two-, three-, and multi-electrode gas-sensing SiC-FETs for exhaust gas monitoring, NO<sub>x</sub> detection, and indoor air quality measurement applications is presented.

A radio engineering device for determining air quality with Modbus RTU on ESP8266 was developed.

**Keywords:** IoT system; radio technical device for determination of air quality; negative differential resistance; gas concentration; conversion function.



## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇ ВИМІРЮВАННЯ ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ</b> .....	8
1.1 Індустрія 4.0 на основі Інтернет речей (ІоТ) .....	8
1.2 Введення в бездротові технології .....	15
1.3 Бездротові локальні мережі .....	25
1.4 Стандарти IEEE 802.11 .....	31
1.5 Топологія мережі .....	36
1.6 Висновки до розділу .....	45
<b>2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ НА ОСНОВІ SiC-FET</b> .....	46
2.1 Розробка автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів .....	46
2.2 Дослідження газочутливого SiC-FET .....	54
2.3 Температурна модуляція SiC-FET .....	60
2.4 Розрізнення та кількісна оцінка .....	63
2.5 Модуляція зсуву затвора SiC-FET .....	65
2.6 Моніторинг вихлопних газів – виявлення NO <sub>x</sub> .....	69
2.7 SiC-FETs для застосування вимірювання якості повітря в приміщенні .....	72
2.8 Висновки до розділу .....	77
<b>3 РОЗРОБКА РАДІОТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ З MODBUS RTU НА ESP8266</b> .....	79
3.1 Modbus RTU .....	79
3.2 Принцип роботи програм .....	82
3.3 Висновки до розділу .....	92
<b>4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b> .....	93
4.1 Оцінювання наукового ефекту .....	93
4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи .....	96
4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи .....	108
4.4 Висновок до розділу .....	109
<b>5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b> .....	110
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи .....	110
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії .....	113
5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи	

в умовах дії загрозливих факторів НС .....	119
5.4 Висновок до розділу .....	121
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	122
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	123
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративна частина .....	128
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки магістерської кваліфікаційної роботи .....	134
Додаток В (довідниковий) Лістинг програми на ESP8266 .....	136

## ВСТУП

**Актуальність.** У 21 столітті відбуваються швидкі зміни в технологіях, промисловості та соціальних моделях. Більшість галузей промисловості перейшли до автоматизації, а людське втручання зменшилося, що призвело до революції в галузях, названої четвертою промисловою революцією (Індустрія 4.0). Індустрія 4.0 або четверта промислова революція (IR 4.0) значною мірою покладається на Інтернет речей (IoT) і бездротові сенсорні мережі (WSN). IoT і WSN використовуються в різних системах управління, включаючи моніторинг навколишнього середовища, домашню автоматизацію та виявлення хімічних/біологічних атак. Пристрої та додатки IoT використовуються для обробки даних, отриманих із пристроїв WSN, і передачі їх у віддалені місця. Цей систематичний огляд літератури пропонує широкий спектр інформації про Індустрію 4.0, знаходить прогалини в дослідженнях і рекомендує майбутні напрямки.

Розумні технології відіграють вирішальну роль у стабільному економічному зростанні. Вони перетворюють будинки, офіси, фабрики і навіть міста в автономні, самокеровані системи без втручання людини. Ця сучасна тенденція автоматизації та дедалі більше використання передових технологій сприяють розвитку світової економіки. Інтернет речей (IoT) і бездротові сенсорні мережі (WSN) відіграють життєво важливу роль у цій модернізації. IoT – це галузь техніки, яка головним чином займається пропонуванням тисяч мініатюрних, фізичні пов'язані об'єкти, які можуть співпрацювати для досягнення спільної мети. Інтернет речей набув великого значення завдяки широкому використанню цих крихітних мережевих пристроїв. Це розумні, але базові речі, які можуть сприймати та спілкуватися без проводів. WSN — це набір датчиків і вузлів маршрутизації, які можна об'єднати в навколишнє середовище для прогнозування фізичних умов, таких як вітер, температура та багато інших. Ці мережі збирають і обробляють дані з крихітних вузлів, а потім передають їх операторам. Сенсорні мережі використовуються в різноманітних системах керування, включаючи екологічний моніторинг, домашню автоматизацію, хімічного та біологічного виявлення нападів, розгортання розумної мережі, стеження та багато іншого. WSN також відіграє важливу роль в аквакультури та нафтовій промисловості, включаючи збір даних, морську розвідку, запобігання катастрофам, тактичне спостереження та моніторинг забруднення.

Одним із перспективних наукових напрямків у розробці вимірювальних пристроїв є використання залежності реактивних властивостей і від'ємного диференційного опору транзисторних структур від



впливу зовнішніх факторів та створення на їх основі нового класу автогенераторних пристроїв вимірювання концентрації газу. У таких пристроях відбувається перетворення концентрації газу на частоту, що дозволяє виконувати первинні вимірювальні пристрої за інтегральною технологією, і дає можливість підвищити точність і чутливість, розширити діапазон вимірюваних величин.

#### **Мета і задачі дослідження.**

*Метою роботи* є покращення параметрів радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів, технологічно сумісного з сучасною мікро- та наноелектронною елементною базою, принцип роботи якого базується на використанні функціональної залежності реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференційним опором від концентрації газів, що надає можливість створення та виготовлення конкурентно спроможних зразків пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем.

*Об'єктом дослідження* є процес перетворення концентрації газів у частотний сигнал в радіотехнічних пристроях вимірювання концентрації газів для IoT систем.

*Предметом дослідження* – статичні і динамічні характеристики радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів та біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором.

Поставлена мета у магістерській кваліфікаційні роботі розв'язуються на основі таких *задач*:

- проаналізувати існуючі пристрої Інтернет речей (IoT) і бездротових сенсорних мереж (WSN) та обґрунтувати переваги радіотехнічних автогенераторних пристроїв вимірювання концентрації газу по відношенню до існуючих;
- розробити математичні моделі радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів та біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, на основі яких отримати аналітичні залежності функції перетворення та рівняння чутливості;
- розробити радіотехнічний пристрій вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів та з активним індуктивним елементом;

- виконати експериментальну перевірку математичних моделей і дослідити властивості радіотехнічної пристрій вимірювання концентрації газів для IoT систем.
- провести дослідження газочутливого SiC-FET з двох, трьох та багато електродному вигляді для моніторингу вихлопних газів, виявлення NOx та для застосування вимірювання якості повітря в приміщенні.
- розробити радіотехнічну пристрій визначення якості повітря з modbus rtu на ESP8266.

*Методи дослідження* ґрунтуються на використанні:

- рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів;
- основних положень теорії функції комплексної змінної для визначення функції перетворення та рівняння чутливості;
- диференціального та інтегрального числення для створення математичної моделі резистивного газочутливого елементу;

### **Наукова новизна одержаних результатів**

*Наукова новизна* роботи полягає в отриманні наступних результатів:

1. Розроблено математичні моделі радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів та біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, в яких на відміну від існуючих, враховано вплив концентрації газу на елементи нелінійних еквівалентних схем, що дало змогу отримати аналітичні вирази чутливості та функції перетворення концентрації газу у частоту.
2. Удосконалено математичну модель резистивного елементу, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховані фізичні процеси, що приводять до зміни опору поверхні газочутливого напівпровідника від кількості адсорбованих молекул газу.
3. Представлено дослідження газочутливого SiC-FET з двох, трьох та багато електродному вигляді для моніторингу вихлопних газів, виявлення NOx та для застосування вимірювання якості повітря в приміщенні.

### **Практичне значення одержаних результатів**

*Практична цінність роботи* полягає в тому, що:

1. У результаті математичного моделювання отримані аналітичні вирази, які можуть бути використаними для інженерного розрахунку основних параметрів радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів та біполярної транзисторної структури з від'ємним

диференційним опором, що забезпечують вибір оптимального режиму їх електричного живлення.

2. Отримано аналітичні вирази для функції перетворення і чутливості розробленого радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів та біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, які можуть бути використані для інженерного розрахунку первинних вимірювальних пристроїв концентрації газів.
3. Розроблено радіотехнічний пристрій визначення якості повітря з Modbus RTU на ESP8266.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором самостійно.

**Структура і обсяг роботи.** Магістерська кваліфікаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, додатків та переліку посилань.



# 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇ ВИМІРЮВАННЯ ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ

## 1.1 Індустрія 4.0 на основі Інтернет речей (ІоТ)

У 21 столітті відбуваються швидкі зміни в технологіях, промисловості та соціальних моделях. Більшість галузей промисловості перейшли до автоматизації, а людське втручання зменшилося, що призвело до революції в галузях, названої четвертою промисловою революцією (Індустрія 4.0). Індустрія 4.0 або четверта промислова революція (ІР 4.0) значною мірою покладається на Інтернет речей (ІоТ) і бездротові сенсорні мережі (WSN). ІоТ і WSN використовуються в різних системах управління, включаючи моніторинг навколишнього середовища, домашню автоматизацію та виявлення хімічних/біологічних атак. Пристрої та додатки ІоТ використовуються для обробки даних, отриманих із пристроїв WSN, і передачі їх у віддалені місця. Цей систематичний огляд літератури пропонує широкий спектр інформації про Індустрію 4.0, знаходить прогалини в дослідженнях і рекомендує майбутні напрямки.

Розумні технології відіграють вирішальну роль у стабільному економічному зростанні. Вони перетворюють будинки, офіси, фабрики і навіть міста в автономні, самокеровані системи без втручання людини [1]. Ця сучасна тенденція автоматизації та дедалі більше використання передових технологій сприяють розвитку світової економіки [2]. Інтернет речей (ІоТ) і бездротові сенсорні мережі (WSN) відіграють життєво важливу роль у цій модернізації [3]. ІоТ – це галузь техніки, яка головним чином займається пропонуванням тисяч мініатюрних, фізичні пов'язані об'єкти, які можуть співпрацювати для досягнення спільної мети. Інтернет речей набув великого значення завдяки широкому використанню цих крихітних мережевих пристроїв. Це розумні, але базові речі, які можуть сприймати та спілкуватися без проводів [4]. WSN – це набір датчиків і вузлів маршрутизації, як показано на рис.1.1, (та наведено в додатку А рис.1), які можна об'єднати в навколишнє середовище для прогнозування фізичних умов, таких як вітер, температура та багато інших. Ці мережі збирають і обробляють дані з крихітних вузлів, а потім передають їх операторам. Рис.1.2 (що наведений в додатку А рис.2) ілюструє, що сенсорні мережі використовуються в різноманітних системах керування, включаючи екологічний моніторинг, домашню автоматизацію, хімічного та біологічного виявлення нападів, розгортання розумної мережі [5], стеження та багато іншого. WSN також відіграє важливу роль в аквакультурі та

нафтовій промисловості, включаючи збір даних, морську розвідку, запобігання катастрофам, тактичне спостереження та моніторинг забруднення [6].

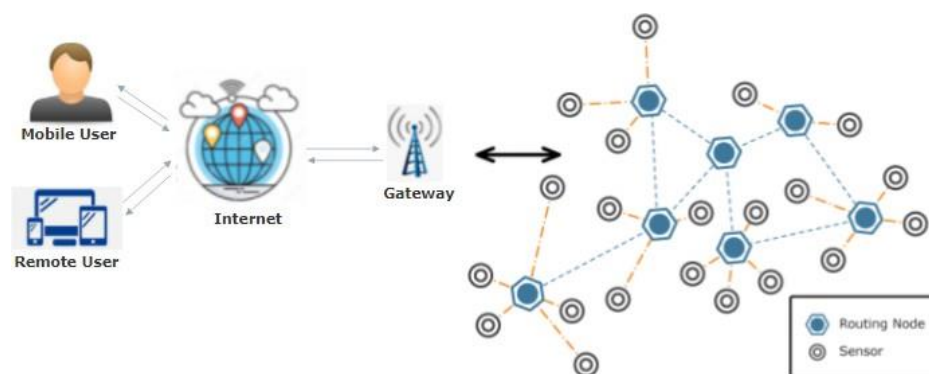


Рисунок 1.1 - Архітектура бездротової сенсорної мережі (WSN)

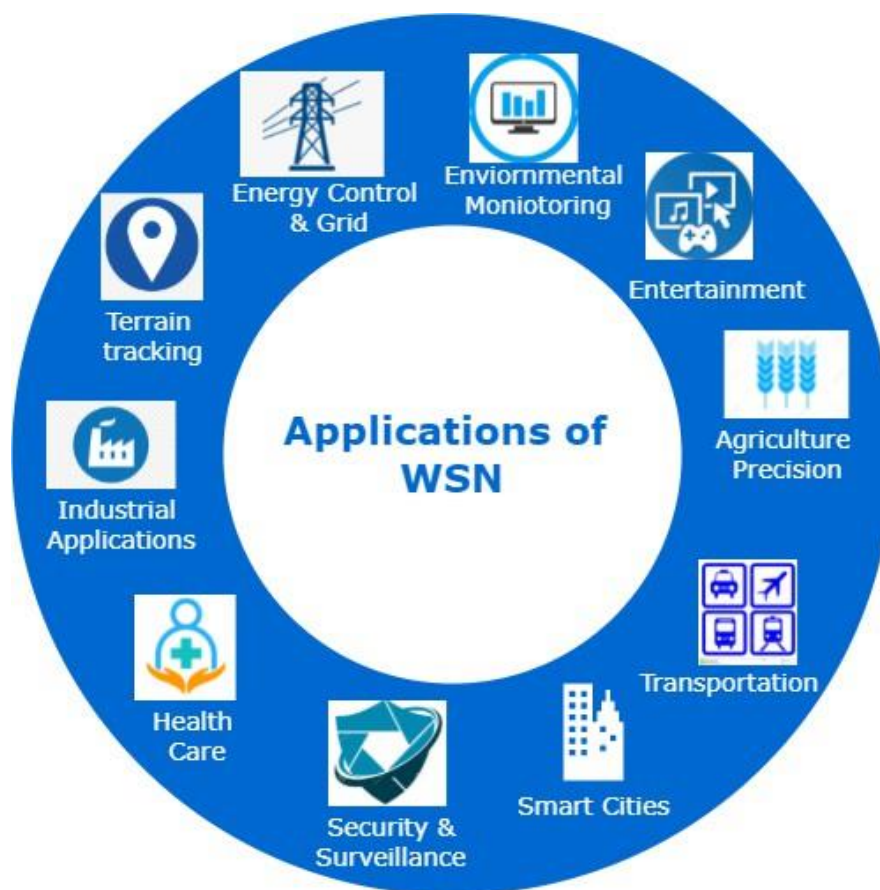


Рисунок 1.2 – Застосування бездротової сенсорної мережі (WSN)

WSN часто розгортають у віддалених районах, де втручання людини неможливе для обслуговування після розгортання. Тому докладаються зусилля для підвищення їх ефективності та довговічності [7]. Існує багато перешкод для розгортання WSN, наприклад, споживання електроенергії –

розгортання на великій відстані. Завдяки тенденціям автоматизації та розробленим додаткам ці перешкоди більше не є перешкодами для широкомасштабного віддаленого розгортання. Загалом WSN дотримується зіркоподібної топології, щоб зменшити ймовірність збою мережі шляхом підключення всіх систем до центрального вузла. У той час як мережі ad-hoc дотримуються сітчастої топології, де кожен вузол керується людиною [8].

У фізичних виробничих системах мережеві та енергозберігаючі програми мінімізують енергетичні ресурси та шумове забруднення. За останні кілька десятиліть транспорт значно покращився завдяки використанню інтелектуальних пристроїв IoT, таких як сигнали та камери високої роздільної здатності на дорогах, що призвело до збільшення транспортного потоку. Зчитувачі RFID встановлюються на пунктах оплати проїзду, які автоматично знімають плату після зчитування тегів RFID на транспортних засобах. У транспортному секторі розумні транспортні засоби скорочують час у дорозі, а також споживання палива з низькою вартістю мобільності та зменшенням людських зусиль [9], моніторинг атмосфери зменшує забруднення, а програми спостереження знижують злочинність. Сьогодні WSN також відіграє важливу роль у точному землеробстві. З іншого боку, програми WSN полегшують наше повсякденне життя, роблячи його більш комфортним, наприклад програми охорони здоров'я, які покращують наше здоров'я та довголіття.

Крім WSN, IoT також відіграє важливу роль у житті людини. Інтернет речей і цифрова епоха відіграють важливу роль у подоланні соціальних і фізичних бар'єрів і забезпеченні легкості та мобільності для людей, що призводить до покращених і рівних можливостей і доступу до інформації [10]. IoT також має багато сфер застосування, як-от агробізнес, клімат, клініка, освіта, транспорт і фінанси, як показано на рис.1.2.

Що стосується інформаційно-комунікаційних технологій, дослідники приваблюють IoT [11]. Використовуючи цю важливу технологію, компанії стали розумнішими, конкуренто спроможними, автоматизованими та сталими в глобальному ланцюжку поставок. На сучасному конкурентному ринку ланцюги постачань відчують труднощі, конкуруючи між собою. Таким чином, пристрої IoT є ефективним способом автентифікації, моніторингу та відстеження продуктів за допомогою GPS і багатьох технологій [12]. Industry 4.0 означає четверту промислову революцію в епоху цифрових технологій, пов'язану з віртуалізацією реальних сценаріїв виробництва та обробки без втручання людини. Цей віртуальний світ пов'язаний із пристроями



IoT, що дозволяє створювати кіберфізичні системи для спілкування та співпраці [13]. Ця повністю підключена виробнича система, яка працює без втручання людини, генерує, передає, отримує й обробляє дані, необхідні для виконання всіх необхідних завдань для виробництва всіх видів товарів, є однією з ключових «конструкцій» Індустрії 4.0. Концепція Industry 4.0 базується на поєднанні трьох основних елементів: людей, речей, і бізнес [14]. Повна кіберфізична виробнича система, створена шляхом інтеграції пристроїв, речей і об'єктів (IoT), сенсорних вузлів (WSN) і людей, показана на рис.1.3 CPS є типовим прикладом Industry 4.0. IoT – це підключення розумних пристроїв, об'єктів або машин в Інтернеті та один з одним. У системах WSN немає прямого підключення цих пристроїв до Інтернету. Ці системи можуть надсилати свої дані в Інтернет, підключивши кілька вузлів датчиків до центрального вузла маршрутизації. У той час як системи CPS включають інтеграцію пристроїв IoT, обчислень, мереж і фізичних процесів, IoT є важливим компонентом CPS. Системи CPS є ключовими елементами реалізації IP 4.0 [15]. Industry 4.0 — це мережева організація, яка автоматизує весь процес виробництва, об'єднуючи бізнес і процеси. Вимоги ринку та розвиток нових технологій перетворюють бізнес-операції виробничих компаній на розумні фабрики та склади. Завдяки цій автоматизації пристрої IoT щодня створюють величезну кількість даних, відомих як великі дані [16]. Статистика показує, що на кінець 2021 року у всьому світі було понад 10 мільярдів активних пристроїв IoT. Очікується, що до 2030 року кількість активних пристроїв IoT перевищить 10-25,4 мільярда. До 2025 року дані, створені пристроями IoT, досягнуть 73,1 ZB (дзета байт) [17]. За прогнозами, у 2020 році галузь Інтернету речей принесе понад 450 мільярдів доларів США, включаючи обладнання, програмне забезпечення, системну інтеграцію, і служби передачі даних. На кінець 2022 року він досяг \$520 млрд. Очікується, що у 2023 році на IoT буде витрачено 1 трильйон доларів США. Прогнозується, що галузь IoT до 2027 року зросте до понад 2 трильйонів доларів США [18]. Зростаюча кількість пристроїв і їх використання людьми показує важливість пристроїв IoT; більше того, галузь розвивається та отримує дохід.

Основною мотивацією для виконання SLR є постійно зростаюча тенденція до автоматизації в Industry 4.0. Індустрія 4.0 складається з технології WSN та IoT для оцифровки роботи. З часом ми бачимо, як цифровізація та технології замінюють людей на робочому місці та різко змінюють робочу силу в усьому світі. Технологія полегшила людське життя та підвищила ефективність речей, зробивши їх екологічно чистими, гнучкішими та продуктивнішими. Завдяки інтелектуальному використанню

IoT, WSN і IR 4.0 відбулися кардинальні зміни від розумних міст до розумних галузей. Наприклад, розумна фабрика об'єднує віртуальні та фізичні системи та калібрувальні прилади для негайного запису їх показань. Коротше кажучи, інтеграція IoT та WSN з Industry 4.0 зменшила потреби в робочій силі, звільнила людей від роботи низького рівня кваліфікації та покращила кількість і якість роботи. Тому щоб досягти кращих результатів аналізу, ми систематично проаналізували майже всі дослідницькі дані, пов'язані з доменами IoT та WSN в Industry 4.0.

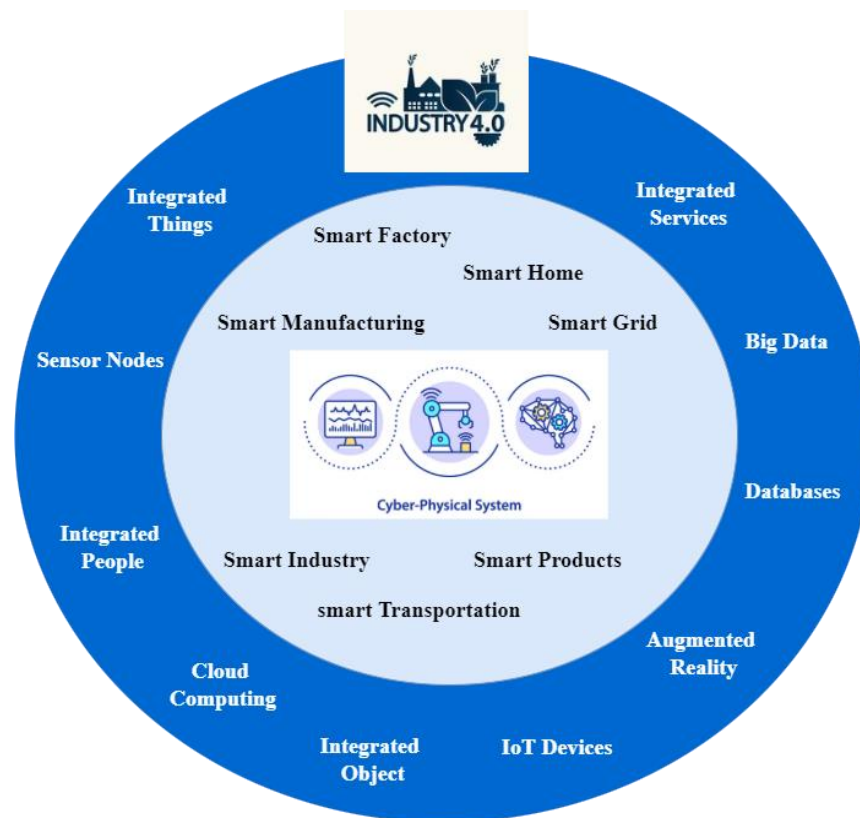


Рисунок 1.3 – Система CPS – інтеграція IoT, бездротових пристроїв і людей в Індустрію 4.0

У цьому розділі ми аналізуємо найсучасніші дослідження IoT та WSN. З четвертою індустріальною революцією спостерігається помітне зниження витрат на зв'язок, обчислення та зберігання, що робить інтеграцію IoT та WSN можливий і економічно ефективний у всьому світі. Ми вивчили багато оглядових статей та оригінальних досліджень. У існуючих оглядових статтях у багатьох аспектах відсутні дослідницькі виклики, проблеми, обмеження та майбутні напрямки IoT та WSN, але систематичний огляд літератури (SLR), поданий у цій роботі, є достатньо точним, щоб мати справу з аспектами IoT та WSN. Далі наведено пов'язану

роботу з оглядовими роботами.

Автори в [1] обговорили саму нову технологію «WiFi». Вони обговорили, як ця технологія допомагає пристроям Інтернету речей, які використовуються в різних програмах, таких як розумні міста, системи охорони здоров'я та розумні будинки, ефективно спілкуватися. Landaluce та ін. [4] детально обговорили технології RFID та WSN. Вони обговорили, як RFID використовуються для відстеження пристроїв, тоді як WSN збирає інформацію про них із підключених пристроїв. Автори також обговорили перешкоди та виклики, такі як споживання енергії, стійкість до відмов, перешкоди комунікації та доцільність витрат, а також детальні опитування. Вони надали переваги та обмеження переносних сенсорних пристроїв. Споживання енергії зростає з кожним днем. Тому Дайліпі [4] досліджував, як еволюція IoT керувала процесом споживання електроенергії та надавала багато переваг мережевим станціям, споживачам і постачальникам. Вони також обговорили питання безпеки та виклики після впровадження пристроїв Інтернету речей у розумних мережах.

У роботі [6], автори обговорили, як просування WSN відіграло значну роль у UASN. Вони відстежили розташування сенсорних вузлів, розміщених під водою в океані, використовуючи алгоритми локалізації. Вони розглянули багато застосувань UASN, їх переваги та недоліки. Вони також обговорили проблеми, з якими вони зіткнулися під час розгортання, і представили майбутні напрямки в акустичній сфері. У роботі [10] дослідники обговорювали додатки та переваги WSN, які розгортаються всюди завдяки їх гнучкості та динамічності. Вони обговорили кожне застосування WSN у міських районах та їхні рішення. Вони проаналізували, як розгортання WSN у міських районах вимагало набагато більше уваги та уваги через сувору погоду та погані умови каналу.

WSN застосовний у багатьох сферах, таких як промислова автоматизація, і виявлення вимог промислового процесу відрізняється від загальних зборів вимог WSN. У роботі [17], автори представили деякі стандартні протоколи, які використовувалися для вимірювання вимог промислових застосувань. Вони також пропонують рішення для протоколів WSN, детально обговорюючи MAC, маршрутизацію та транспорт. Вони також детально обговорили питання безпеки та визначили невирішені проблеми, які виникли під час розробки стандартних протоколів. в [18], автори провели SLR, який в основному зосереджений на визначенні обсягу, концепції, огляді літератури, аналізі, синтезі та майбутніх напрямках досліджень. Їх вибране дослідження сприяло восьми тематичним аспектам: інтелектуальні фабрики, CPS, обробка даних, IT-інфраструктура, цифрова



трансформація, HCI, IoT та хмара [18].

У зв'язку зі стрімким розвитком IoT та WSN технології стають більш вразливими до загроз безпеці [19]. Тому автори в [20] представив моделі загроз для безпеки комунікації пристроїв WSN та IoT. У роботі [21], автори обговорювали програми IoT, переваги, проблеми та проблеми безпеки як з технологічної, так і з соціальної точки зору. Дослідники надали детальну архітектуру IoT та WSN та обговорили системні протоколи IDS. Вони також обговорили проблеми безпеки та атаки на комунікаційні пристрої IoT та WSN. Крім того, в [22], автори провели широке дослідження, пов'язані з розумними будинками, програмами та IoT. Вони зібрали більше 200 статей, ретельно їх проаналізували та розділили на чотири категорії. Вони обговорювали додатки IoT для розумного дому в першій категорії. Друга категорія стосується додатків Інтернету речей у технології розумного будинку. У третій категорії вони розробили структуру для подальшої роботи. У четвертій категорії вони розробили розумні домашні програми IoT.

IoT кардинально змінив життя людини, особливо щодо комунікаційних пристроїв, які інтегрують технології. Традиційна індустрія змінюється в цифровій індустрії, а WSN і бездротові мережі датчиків і приводів (WSAN) є основними частинами Індустрії 4.0. У статті [23], автори детально обговорили промислову бездротову сенсорну мережу (IWSN) і промислову бездротову мережу датчиків і приводів (IWSAN). Вони детально обговорили вимоги IWSAN, програми, виклики, рішення та майбутні напрямки. IWSN/IWSAN є переконливими технологіями завдяки їхнім багатообіцяючим перевагам, таким як низька вартість розгортання, менша складність і підтримка мобільності.

В роботі [24], автори обговорили, як IoT відіграє життєво важливу роль у наближенні фізичного світу до цифрового. Вони обговорювали технології, різноманітні виклики, майбутні напрямки та різноманітні додатки Інтернету речей (IoT).

У роботі [25], Шарма та ін. описали сенсорні вузли відповідно до точки зору покриття. Вони проаналізували проблеми з повним покриттям, враховуючи тип вузла, тип розгортання, діапазон зв'язку та зондування, а також незалежні алгоритми на основі позиціонування. Вони також обговорили дослідницькі проблеми WSN. Автори [25] описали детальний огляд систем IDS і представив методи, запропоновані для IoT. Використовуючи міжплатформний розподілений підхід, вони проаналізували систему IDS, відмінності між платформами та поточні тенденції досліджень у IDS. У роботі [26], автори проаналізували та

обговорили рішення для ідентифікації та виявлення атак у вигляді воронки в домені WSN. Вони також обговорили переваги та недоліки запропонованого рішення. У [27], автори представили детальний огляд атак на безпеку WSN та IoT разом із запобіжними заходами, пом'якшенням та механізмами виявлення. Вони заявили, що інтеграція IoT і WSN породила нові виклики та відкриті питання безпеки. Незважаючи на розвиток технологій, вони стали схильними до зовнішніх атак.

У роботі [28], автори представили огляд безпеки мобільних мереж. Вони обговорили інтеграцію WSN з IoT через Інтернет і те, як взаємопов'язані пристрої захищають мережі від зовнішніх атак, зберігаючи маршрутизатор у безпечному та захищеному середовищі. Вони обговорили атаки та механізми їх виявлення Інтернет. Так само автори в [29] обговорили атаку через червоточину та її вирішення в доменах IoT та WSN. Вони заявили, що алгоритм виявлення працює набагато краще для IoT (70%), ніж для WSN (20%). Автори проаналізували існуючі протоколи для безпечного зв'язку між пристроями IoT. Вони також обговорили відкриті питання та виклики, що виникають під час комунікації пристроїв IoT та майбутні напрямки в IoT. Автори у роботі [30] представив детальний огляд схем розгортання, класифікації, роботи та порівняльного аналізу сенсорних вузлів. Ця зростаюча технологічна тенденція об'єднала «світогляд» від традиційних систем до CPS – цей перехід називається Індустрія 4.0. Автори в [30] провели бібліометричний огляд 12 різних підходів критичних аспектів Індустрії 4.0.

З наведеного вище детального огляду літератури ми помітили, що автори та дослідники працювали над IoT та WSN, але інтеграція як IoT, так і WSN з Industry 4.0 є безпечною. Вони обговорили їхні програми, атаки на безпеку, переваги та обмеження на кожному рівні.

## 1.2 Введення в бездротові технології

Термін бездротовий зв'язок означає передачу інформації за допомогою електромагнітних (ЕМ) або акустичних хвиль над атмосферою, а не за допомогою будь-якого середовища розповсюдження, яке використовує дроти. Не потребує явної мережі проводів і дозволяє зв'язок під час руху. На щастя, електромагнітні хвилі поширюються зі швидкістю світла у вільному просторі та всередині середовища (кабелів) – із часом затримки = довжина кабелю/С. Це забезпечує дуже швидкий зв'язок. Бездротові технології дозволяють одному або декільком пристроям спілкуватися без фізичних з'єднань. Бездротові технології використовують радіочастотну передачу як засіб передачі даних, тоді як дротові технології використовують кабелі.

Бездротові мережі часто поділяють на три групи залежно від діапазону покриття: бездротові глобальні мережі (WWAN), бездротові локальні мережі (WLAN) і бездротові персональні мережі (WPAN). WLAN - це система передачі даних, розроблена для забезпечення незалежного від розташування мережі доступу між обчислювальними пристроями за допомогою радіохвиль, а не кабельної інфраструктури. Термін бездротовий зв'язок означає зв'язок або передачу інформації на відстань без використання проводів, кабелів чи будь-яких інших електричних провідників. Бездротовий зв'язок є одним із важливих засобів передачі даних або інформації на інші пристрої. Зв'язок встановлюється, і інформація передається по повітрю, не вимагаючи жодних кабелів, за допомогою електромагнітних хвиль, наприклад радіочастот, інфрачервоного випромінювання, супутника тощо, у бездротовій мережі зв'язку. Наприкінці 19-го століття були представлені перші системи бездротового зв'язку, і технологія значно розвинулася протягом наступних і наступних років. Сьогодні термін бездротовий зв'язок стосується різноманітних пристроїв і технологій, починаючи від смартфонів і закінчуючи ноутбуками, планшетами, комп'ютерами, принтерами, Bluetooth тощо. Типи технологій бездротового зв'язку останнім часом технологія бездротового зв'язку стала невід'ємною частиною кількох типів комунікаційних пристроїв, оскільки це дозволяє користувачам спілкуватися навіть із віддалених районів. Для бездротового зв'язку використовуються бездротові телефони, мобільні телефони, пристрої GPS, технологія ZigBee, бездротові комп'ютерні частини, супутникове телебачення тощо.



Рисунок 1.4 – Види комунікаційних технологій

### **Супутник:**

Супутниковий зв'язок є однією з бездротових технологій, яка широко поширенапоширюється по всьому світу, дозволяючи користувачам залишатися на зв'язку практично в будь-якій точці Землі. Супутники, які



використовуються в цьому режимі зв'язку, спілкуються безпосередньо з орбітальними супутниками через радіосигнали. Портативні супутникові телефони та модеми мають потужніші можливості мовлення, ніж стільникові пристрої, оскільки вони мають великий радіус дії, крім того, що вони дорожчі з точки зору вартості, ніж їхні аналоги. Наприклад, для обладнання корабля через супутниковий зв'язок традиційна система зв'язку підключається до одного супутника, що дозволяє кільком користувачам використовувати одне й те саме обладнання для трансляції.

### **Бездротова мережа:**

Бездротові мережеві технології з'єднують кілька комп'ютерів, системи та пристрої разом, не вимагаючи дротів чи кабелів: бездротова локальна мережа або WLAN підходять до Wi-Fi.

### **WiMAX:**

Існують бездротові широкосмугові системи, які пропонують швидкий веб-серфінг без підключення через кабель або DSL (прикладом бездротового широкосмугового з'єднання є WiMAX). Хоча WiMAX потенційно може забезпечувати швидкість передачі даних понад 30 мегабіт на секунду, проте провайдери пропонують середню швидкість передачі даних 6 Мбіт/с і часто надають менше, що робить послугу значно повільнішою, ніж провідний широкосмуговий зв'язок. Фактична вартість даних, доступних за допомогою WiMAX, значно змінюється залежно від відстані від передавача. WiMAX також є однією з версій бездротового зв'язку 4G, доступного в телефонах як технологія 4G від Sprint.



Рисунок 1.5 – Бездротова мережа

### Wi-Fi:

Wi-Fi — це форма бездротового зв'язку з низьким енергоспоживанням, яка використовується багатьма електронними пристроями, такими як ноутбуки, системи, смартфони тощо. У налаштуваннях Wi-Fi бездротовий маршрутизатор служить центром зв'язку. Діапазон цих мереж надзвичайно обмежений через низьку потужність передачі, що дозволяє користувачам підключатися лише в безпосередній близькості від маршрутизатора або повторювача сигналу. Wi-Fi – звичайне явище вдома мережеві програми, яка забезпечує мобільність без будь-яких кабелів. З міркувань безпеки мережі Wi-Fi мають бути захищені пароллями, щоб інші не мали доступу до них.

### Бездротова мережа (Wi-Fi): переваги

- Простота інтеграції та зручність– Бездротова природа таких мереж дозволяє користувачам отримувати доступ до мережевих ресурсів практично з будь-якого зручного місця.
- Мобільність – з появою загальнодоступних бездротових мереж користувачі можуть отримати доступ до Інтернету навіть за межами свого звичайного робочого середовища.
- Можливість розширення – бездротові мережі здатні обслуговувати раптово збільшену кількість клієнтів за допомогою існуючого обладнання. У дротовій мережі для додаткових клієнтів потрібна додаткова проводка.

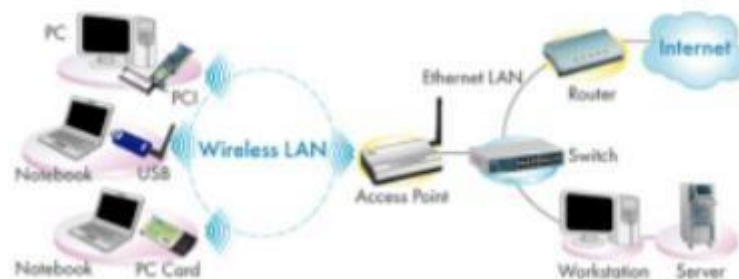


Рисунок 1.6 – Бездротова мережа WiFi

### Недоліки:

- Бездротові локальні мережі можуть бути небажаними з кількох причин.
- Радіочастотна передача та бездротові мережеві сигнали зазнають різноманітних перешкод, включаючи складні ефекти розповсюдження, які знаходяться поза контролем адміністратора мережі.
- Проблеми з безпекою – бездротові мережі можуть використовувати деякі з різних технологій шифрування.
- Для більшої конструкції радіусу дії буде недостатньо – і, щоб збільшити його радіус дії, доведеться докуповувати повторювачі або додаткові точки

доступу.

- Швидкість у більшості бездротових мереж буде нижчою, ніж у найповільніших звичайних дротових мережах.
- Встановлення бездротової мережі на основі інфраструктури є складним завданням.

### Технологія Bluetooth

Технологія Bluetooth дозволяє бездротове підключення різноманітних електронних пристроїв до системи для передачі та обміну даними, і це основна функція Bluetooth. Стільникові телефони підключаються до гарнітури, бездротової клавіатури, миші та мікрофона до ноутбуків за допомогою Bluetooth, оскільки він передає інформацію з одного пристрою на інший. Технологія Bluetooth має багато функцій, і вона найчастіше використовується на ринку бездротового зв'язку.



Рисунок 1.7 – Технологія Bluetooth

особливості:

- Технологія Bluetooth використовує радіохвилі для зв'язку між пристроями. Більшість цих радіохвиль мають діапазон 15-50 футів.
- Згідно з офіційним веб-сайтом Bluetooth, Bluetooth використовує сигнал малої потужності з максимальним радіусом дії 50 футів із достатньою швидкістю для передачі даних.
- Процес створення пари ідентифікує та з'єднує будь-які два пристрої один з одним. Це також запобігає перешкодам від інших несполучених пристроїв Bluetooth у цьому регіоні.
- Він використовує максимальну потужність лише тоді, коли це необхідно, зберігаючи таким чином час роботи акумулятора.

### ZigBee

ZigBee — це стандарт бездротового зв'язку, розроблений для задоволення

унікальних потреб малопотужних, недорогих бездротових датчиків і мереж керування. ZigBee можна використовувати майже скрізь, оскільки його легко впровадити та для роботи потрібно мало енергії. Zigbee було розроблено з огляду на потреби передачі даних із простою структурою, як дані з датчиків.

Особливості технології Zigbee

- Пристрої ZigBee розроблені для низького енергоспоживання.
- ZigBee використовується в комерційних програмах, як-от датчики та моніторинг.
- ZigBee споживає дуже низьку енергію та надзвичайно довго працює від батареї пристрою.
- ZigBee забезпечує гнучкість, щоб робити більше завдяки надійній бездротовій роботі та роботі від акумулятора. Види бездротової передачі даних

Бездротова технологія визначає електронікупристрої, які спілкуються в повітрі без кабелів за допомогою радіочастотних сигналів. Бездротова технологія використовується в різноманітних сучасних пристроях і забезпечує більшу мобільність. Бездротові пристрої відіграють важливу роль у голосовому та Інтернет-зв'язку.

Бездротовий маршрутизатор

Бездротові маршрутизатори приймають вхідне підключення до Інтернету та надсилають дані у вигляді радіочастотних сигналів на інші бездротові пристрої, розташовані поблизу маршрутизатора. Мережа, налаштована за допомогою бездротового маршрутизатора, називається бездротовою локальною мережею (WLAN). Багато маршрутизаторів мають вбудовані функції безпеки, такі як брандмауери, які допомагають захистити пристрої, підключені до маршрутизатора, від шкідливих даних, таких як комп'ютерні віруси.





Рисунок 1.8 – Бездротовий маршрутизатор

### **Бездротовий маршрутизатор**

У багатьох будинках для підключення комп'ютерів до Інтернету використовується бездротовий маршрутизатор.

### **Бездротові адаптери**

Бездротові адаптери – це апаратні пристрої, які встановлюються всередині комп'ютерів і забезпечують бездротове з'єднання. Якщо на комп'ютері немає бездротового адаптера, він не зможе підключитися до маршрутизатора для доступу до Інтернету. Деякі комп'ютери мають бездротові адаптери, вбудовані безпосередньо в материнську плату, але також можна встановити автономні бездротові адаптери, щоб додати можливість бездротового зв'язку до комп'ютера, який не має вбудованого засобу.

### **Бездротовий повторювач**

Бездротовий повторювач — це бездротовий мережевий пристрій, який використовується для розширення радіусу дії бездротового маршрутизатора. Ретранслятор приймає бездротові сигнали, підсилює їх силу, а потім повторно випромінює їх. Потужність сигналу можна підвищити, розмістивши між роутером і підключеним до роутера комп'ютером повторювач.



Рисунок 1.9 – Бездротовий повторювач

### **Мікрохвильова система передачі**

Мікрохвильова система передачі — це ефективний тип бездротової передачі даних, який передає інформацію за допомогою двох окремих методів. Одним із методів, який використовується для передачі даних через бездротове середовище мікрохвильової печі, є супутниковий метод, який передає інформацію через супутник, який обертається на висоті 22 300 миль над Землею. Наземні станції надсилають і приймають сигнали даних на супутник і з нього на частоті від 11 ГГц до 14 ГГц і зі швидкістю передачі від 1 Мбіт/с до 10 Мбіт/с. Іншим методом є наземний метод, у якому використовуються дві мікрохвильові вежі з чіткою лінією видимості між ними, що гарантує відсутність перешкод для порушення цієї лінії видимості. З метою конфіденційності використовується часто. Частота передачі даних для наземних систем зазвичай становить від 4 ГГц до 6 ГГц або від 21 ГГц до 23 ГГц, а швидкість зазвичай становить від 1 мегабіт на секунду (Мбіт/с) до 10 Мбіт/с.

### **Інфрачервоний (ІЧ)**

Інфрачервоний порт – це система передачі даних, яка передає сигнали даних через світлодіоди (світлодіоди) або лазери. Інфрачервоне випромінювання – це електромагнітна енергія з довжиною хвилі, яка є більшою за хвилю червоного світла. Інформація не може проходити крізь перешкоди в інфрачервоній системі, але її може перешкоджати світло. Одним із типів інфрачервоного зв'язку є система «точка-точка», в якій передача можлива між двома точками, обмеженими дальністю та лінією видимості. Частота сигналу для передачі в системі «точка-точка» становить від 100 ГГц до 1000 терагерц (ТГц), а швидкість — від 100 Кбіт/с до 16 Мбіт/с.

Інший спосіб передачі інфрачервоного випромінювання включає систему ширококомовної передачі – і в цьому методі відбиваючий матеріал або блок передачі посилює та ретранслює сигнал даних на кілька інших

пристроїв. Нормальна частота системи інфрачервоного мовлення становить від 100 ГГц до 1000 ТГц з обмеженою швидкістю 1 Мбіт/с.



Рисунок 1.10 – Інфрачервоний

### **Типи бездротових пристроїв радіо**

Радіосистема — це один із видів бездротової передачі даних, і це бездротове середовище, яке передає дані за допомогою електромагнітних хвиль із низькими частотами у віддалені місця через електричний провідник і антену. Любителі радіолюбителів обмінюються інформацією та служать засобами екстреного зв'язку під час катастроф за допомогою свого потужного радіоаматорського обладнання та можуть навіть передавати цифрові дані через радіоспектр.

Громадянський діапазон і морські радіостанції забезпечують зв'язок для водіїв вантажівок і моряків. Частота передачі інформації, що передається через радіосистему, становить від 10 кілогерц (кГц) до 1 гігагерца (ГГц), і частоти регулюються Федеральною комісією зв'язку (FCC).

### **Бездротові телефони**

Еволюція стільникових мереж перераховується поколіннями. Багато різних користувачів спілкуються в одній частотній смузі за допомогою стільникових і бездротових телефонів. Стільникові та бездротові телефони є ще двома прикладами пристроїв, які використовують бездротові сигнали. Бездротові телефони мають обмежений радіус дії, але стільникові телефони зазвичай мають набагато більший діапазон, ніж місцеві бездротові мережі, оскільки мобільний телефон використовує великі телекомунікаційні вежі для забезпечення покриття стільникового зв'язку. Деякі телефони використовують для зв'язку сигнали від супутників, подібно до пристроїв глобальної системи позиціонування (GSP).



Рисунок 1.11 Бездротові телефони

### **Інші пристрої**

Все, що використовує для зв'язку радіосигнали, можна вважати бездротовим пристроєм. Звичайні пристрої, такі як двері гаража, радіоняні, певні ігрові консолі та рації, використовують бездротові технології.

### **Переваги та недоліки бездротового зв'язку**

#### **Переваги**

- Будь-яка інформація може бути передана або передана швидко і з високою швидкістю.
- Доступ до Інтернету можна отримати з будь-якого місця та в будь-який час без необхідності носити з собою кабелі чи дроти, що покращує легкий доступ і продуктивність.
- Корисно для лікарів, робітників та інших спеціалістів, які працюють у віддалених районах, оскільки вони можуть зв'язуватися з медичними центрами через бездротовий зв'язок.
- Про надзвичайні ситуації можна повідомити за допомогою бездротового зв'язку. Постраждалим регіонам можна надати підтримку за допомогою цих сповіщень через бездротовий зв'язок.
- Бездротові мережі коштують менше за встановлення та обслуговування.

#### **Недоліки**

- Хакер може легко перехопити бездротові сигнали, які поширюються по повітрю.
- Дуже важливо захистити бездротову мережу, щоб інформація не могла бути використана неавторизованими користувачами, і це також збільшує ризик втрати даних або інформації.

Таким чином, бездротові мережі є однією з найбільш швидкозростаючих технологій на телекомунікаційному ринку. WiMax, Bluetooth, Wi-Fi, Femtocell і 4G є одними з найважливіших стандартів бездротових технологій для наступних поколінь. Радіо, мобільні пристрої,

Інтернет тощо використовують технологічні досягнення в системах бездротової передачі даних, які несуть невидимі електромагнітні хвилі для передачі даних на великі відстані за короткий проміжок часу.

### 1.3 Бездротові локальні мережі

Бездротовий LAN (WLAN) — це бездротова комп'ютерна мережа, яка з'єднує два або більше пристроїв за допомогою бездротового зв'язку для створення локальної мережі (LAN) у межах обмеженої території, наприклад у домі, школі, комп'ютерній лабораторії, кампусі, офісній будівлі тощо. можливість пересуватися в межах території і при цьому бути підключеним до мережі. Через шлюз WLAN також може забезпечити підключення до широкого Інтернету. Більшість сучасних мереж WLAN базуються на стандартах IEEE 802.11 і продаються під торговою маркою Wi-Fi. Бездротові локальні мережі стали популярними для використання вдома завдяки простоті встановлення та використання. Вони також популярні в комерційних приміщеннях, які пропонують бездротовий доступ своїм співробітникам і клієнтам. Норман Абрамсон, професор Гавайського університету, розробив першу в світі бездротову мережу комп'ютерного зв'язку ALOHA net. Система почала працювати в 1971 році і включала сім комп'ютерів, розгорнутих на чотирьох островах для зв'язку з центральним комп'ютером на острові Оаху без використання телефонних ліній. Обладнання бездротової локальної мережі спочатку коштувало стільки, що використовувалося лише як альтернатива кабельній локальній мережі в місцях, де підключення кабелю було складним або неможливим. Рання розробка включала галузеві рішення та власні протоколи, але наприкінці 1990-х років вони були замінені стандартами, насамперед різними версіями IEEE 802.11 (у продуктах, що використовують торгову марку Wi-Fi). Починаючи з 1991 року Європейський інститут стандартів телекомунікацій (ETSI) розробляв європейську альтернативу, відому як HiperLAN/1, першу версію якої було схвалено в 1996 році. За цим послідувала функціональна специфікація HiperLAN/2 із впливом АТМ, завершена в лютому 2000 року. Стандарт досяг комерційного успіху 802.11, хоча велика частина роботи над HiperLAN/2 збереглася у 15 фізичній специфікації (PHY) для IEEE 802.11a, яка майже ідентична PHY HiperLAN/2. У 2009 році 802.11n було додано до 802.11. Він працює в діапазонах частот 2,4 ГГц і 5 ГГц з максимальною швидкістю передачі даних 600 Мбіт/с. Більшість нових маршрутизаторів можуть використовувати обидва бездротові діапазони, відомі як дводіапазонні. Це дозволяє передачі даних уникнути переповненого



діапазону 2,4 ГГц, який також використовується для пристроїв Bluetooth і мікрохвильових печей. Діапазон 5 ГГц також ширший, ніж діапазон 2,4 ГГц, з більшою кількістю каналів, що дозволяє більшій кількості пристроїв спільно використовувати простір. Не всі канали доступні в усіх регіонах. Група Home RF була створена в 1997 році для просування технології, призначеної для домашнього використання, але вона розпалася наприкінці 2002 року. Архітектура Станції Усі компоненти, які можуть підключатися до бездротового середовища в мережі, називаються станціями (STA). Усі станції оснащені контролерами інтерфейсу бездротової мережі (WNIC). Бездротові станції діляться на дві категорії: бездротові точки доступу та клієнти. Точки доступу (AP), зазвичай бездротові маршрутизатори, є базовими станціями бездротової мережі. Вони передають і приймають радіочастоти для бездротових пристроїв, з якими можна спілкуватися. Бездротовими клієнтами можуть бути мобільні пристрої, такі як ноутбуки, персональні цифрові помічники, IP-телефони та інші смартфони, або непортативні пристрої, такі як настільні комп'ютери, принтери та робочі станції, які оснащені інтерфейсом бездротової мережі. Базовий набір послуг Базовий набір послуг (BSS) — це набір усіх станцій, які можуть спілкуватися одна з одною на рівні РНУ. Кожен BSS має ідентифікатор (ID), який називається BSSID, який є MAC-адресою точки доступу, що обслуговує BSS. Існує два типи BSS: незалежний BSS (також відомий як IBSS) та інфраструктурний BSS. Незалежний BSS (IBSS) — це спеціальна мережа, яка не містить точок доступу, що означає, що вони не можуть підключитися до будь-якого іншого базового набору послуг. Розширений набір послуг Розширений набір послуг (ESS) — це набір підключених BSS. Точки доступу в ESS з'єднані системою розподілу. Кожен ESS має ідентифікатор, який називається SSID, який є 32-байтовим (максимум) рядком символів. Система розподілу Система розподілу (DS) з'єднує точки доступу в розширений набір послуг. Концепція DS може бути використана для збільшення покриття мережі через роумінг між стільниками. DS може бути дротовим або бездротовим. Поточні системи бездротового розподілу здебільшого базуються на протоколах WDS або MESH, хоча використовуються й інші системи. Типи бездротових локальних мереж IEEE 802.11 має два основних режими роботи: інфраструктурний і спеціальний режим. У режимі ad hoc мобільні пристрої передають безпосередньо одноранговий зв'язок. У режимі інфраструктури мобільні пристрої спілкуються через точку доступу, яка служить мостом до інших мереж (таких як Інтернет або LAN). Оскільки бездротовий зв'язок використовує більш відкрите середовище для зв'язку порівняно з дротовими локальними мережами, розробники 802.11 також включили механізми

шифрування: Wired Equivalent Privacy (WEP, зараз незахищений), Wi-Fi Protected Access (WPA, WPA2, WPA3) для захисту бездротових комп'ютерних мереж. Багато точок доступу також пропонують Wi-Fi Protected Setup, швидкий (але зараз небезпечний) метод приєднання нового пристрою до зашифрованої мережі. Інфраструктура Більшість мереж Wi-Fi розгортаються в режимі інфраструктури. У режимі інфраструктури базова станція діє як концентратор бездротової точки доступу, а вузли обмінюються даними через концентратор. Зазвичай, але не завжди, концентратор має дротове або оптоволоконне підключення до мережі та може мати постійне бездротове підключення до інших вузлів. Бездротові точки доступу зазвичай стаціонарні та надають послуги своїм клієнтським вузлам у межах досяжності. Бездротові клієнти, такі як ноутбуки, смартфони тощо, підключаються до точки доступу, щоб приєднатися до мережі. Іноді мережа матиме кілька точок доступу з однаковим «SSID» і системою безпеки. У цьому випадку підключення до будь-якої точки доступу в цій мережі приєднує клієнта до мережі. У цьому випадку програмне забезпечення клієнта спробує вибрати точку доступу, щоб надати найкращий сервіс, наприклад точку доступу з найсильнішим сигналом. Однорангова мережа Спеціальна мережа (не те саме, що мережа WiFi Direct, це мережа, де станції спілкуються лише однорангові (P2P). Немає бази, і ніхто не дає дозволу на розмову. Це досягається за допомогою Незалежний базовий набір послуг (IBSS).

BSS може існувати як з AP, так і без нього. BSS без точки доступу не може надсилати дані іншій BSS. Отже, це відоме як автономна мережа або спеціальна архітектура. У цьому типі архітектури станції можуть формувати мережу без використання точки доступу.

Розширений набір послуг (ESS): розширений набір послуг складається з двох або більше BSS з точками доступу. BSS у цій системі з'єднані одна з одною через систему розподілу, яка зазвичай є дротовою локальною мережею. Система розподілу з'єднує точки доступу один з одним. Система розподілу може бути будь-яким типом локальної мережі, наприклад Ethernet, тому ESS містить два типи станцій:

- Мобільна станція
- Стаціонарна з нерухомих станцій

Однорангова або спеціальна бездротова локальна мережа. Мережа WiFi Direct — це ще один тип мережі, де станції спілкуються однорангово. У групі Wi-Fi P2P власник групи працює як точка доступу, а всі інші пристрої є клієнтами. Існує два основних способи встановлення власника групи в групі Wi-Fi Direct. В одному підході користувач налаштовує власника групи P2P

вручну. Цей метод також відомий як автономний власник групи (автономний GO). У другому методі, який також називається створенням групи на основі переговорів, два пристрої конкурують на основі значення наміру власника групи. Пристрій із вищим значенням наміру стає власником групи, а другий пристрій стає клієнтом. Значення наміру власника групи може залежати від того, чи виконує бездротовий пристрій перехресне з'єднання між інфраструктурною послугою WLAN і групою P2P, залишкової потужності в бездротовому пристрої, чи бездротовий пристрій уже є власником групи в іншій групі та/або отриманого сигналу потужність першого бездротового пристрою. Однорангова мережа дозволяє бездротовим пристроям безпосередньо спілкуватися один з одним. Бездротові пристрої в радіусі дії один одного можуть виявляти та спілкуватися безпосередньо без залучення центральних точок доступу. Цей метод зазвичай використовується двома комп'ютерами, щоб вони могли з'єднатися один з одним для створення мережі. В основному це може статися в пристроях у закритому діапазоні. Якщо в цій ситуації використовується вимірювач потужності сигналу, він може неточно зчитувати потужність і вводити в оману, оскільки реєструє потужність найсильнішого сигналу, яким може бути найближчий комп'ютер. IEEE 802.11 визначає фізичний рівень (PHY) і рівні MAC (контроль доступу до середовища) на основі CSMA/CA (множинний доступ із визначенням несучої з уникненням зіткнень). Це на відміну від Ethernet, який використовує CSMA-CD (множинний доступ із визначенням несучої мережі з виявленням зіткнень). Специфікація 802.11 містить положення, призначені для мінімізації зіткнень, оскільки обидва мобільні пристрої можуть перебувати в зоні дії загальної точки доступу, але поза зоною дії один одного. Міст Міст можна використовувати для з'єднання мереж, як правило, різних типів. Бездротовий міст Ethernet дозволяє підключати пристрої дротової мережі Ethernet до бездротової мережі. Міст діє як точка підключення до бездротової локальної мережі. Система бездротового розподілу Бездротова система розподілу (WDS) забезпечує бездротове з'єднання точок доступу в мережі

Мережа IEEE 802.11. Це дозволяє розширювати бездротову мережу за допомогою кількох точок доступу без необхідності використання дротової магістралі для їх з'єднання, як це традиційно потрібно. Помітна перевага WDS перед іншими рішеннями полягає в тому, що він зберігає MAC-адреси клієнтських пакетів у зв'язках між точками доступу. Точка доступу може бути основною, релейною або віддаленою базовою станцією. Основна базова станція зазвичай підключається до дротового Ethernet. Ретрансляційна базова станція передає дані між віддаленими базовими станціями, бездротовими

клієнтами або іншими ретрансляційними станціями на головну або іншу ретрансляційну базову станцію. Віддалена базова станція приймає з'єднання від бездротових клієнтів і передає їх на ретрансляційні або головні станції. З'єднання між клієнтами здійснюється за допомогою MAC-адрес, а не за допомогою призначення IP-адрес. Усі базові станції в WDS мають бути налаштовані на використання одного радіоканалу та спільні ключі WEP або WPA, якщо вони використовуються. Вони можуть бути налаштовані на різні ідентифікатори наборів послуг. 19 WDS також вимагає, щоб кожна базова станція була налаштована на пересилання іншим у системі, як зазначено вище. Функцію WDS також можна назвати режимом ретранслятора, оскільки він, здається, одночасно з'єднує та приймає бездротових клієнтів (на відміну від традиційного мосту). Пропускна здатність у цьому методі зменшується вдвічі для всіх клієнтів, підключених бездротовим способом. Коли важко з'єднати всі точки доступу в мережі дротами, можна також поставити точки доступу як повторювачі.

### **Роумінг**

#### **Роумінг між бездротовими локальними мережами**

Існує два визначення роумінгу бездротової локальної мережі:

1. Внутрішній роумінг: мобільна станція (MS) переміщується з однієї точки доступу (AP) до іншої точки доступу в домашній мережі, якщо потужність сигналу надто слабка. Сервер автентифікації (RADIUS) виконує повторну автентифікацію MS через 802.1x (наприклад, за допомогою PEAP). Тарифікація QoS відбувається в домашній мережі. Мобільна станція, що переміщується від однієї точки доступу до іншої, часто перериває потік даних між мобільною станцією та програмою, підключеною до мережі. Мобільна станція, наприклад, періодично контролює наявність альтернативних точок доступу (таких, які забезпечать кращий зв'язок). У якийсь момент на основі власних механізмів мобільна станція вирішує повторно зв'язатися з точкою доступу, яка має сильніший бездротовий сигнал. Проте мобільна станція може втратити з'єднання з точкою доступу до того, як зв'яжеться з іншою точкою доступу. Щоб забезпечити надійне з'єднання з програмами, мобільна станція, як правило, повинна містити програмне забезпечення, яке забезпечує постійність сеансу.

2. Зовнішній роумінг: MS (клієнт) переходить до мережі WLAN іншого постачальника послуг бездротового Інтернету (WISP) і користується їхніми послугами (точка доступу). Користувач може використовувати чужу мережу незалежно від своєї домашньої мережі, за умови, що чужа мережа допускає 20 відвідувачів у своїй мережі. Для послуг мобільного зв'язку в чужій мережі повинні бути спеціальні системи автентифікації та білінгу.

Програми Бездротові локальні мережі мають багато застосувань. Сучасні реалізації WLAN варіюються від невеликих домашніх мереж до великих мереж розміром із кампус та повністю мобільних мереж у літаках і поїздах. Користувачі можуть отримати доступ до Інтернету з точок доступу WLAN у ресторанах, готелях, а тепер і за допомогою портативних пристроїв, які підключаються до мереж 3G або 4G. Часто ці типи публічних точок доступу не потребують реєстрації чи пароля для приєднання до мережі. Інші доступні після реєстрації та/або сплати комісії. Існуючу інфраструктуру бездротової локальної мережі також можна використовувати для роботи в якості внутрішніх систем позиціонування без модифікації наявного обладнання.

### **Переваги WLAN**

Хоча найбільш очевидним є мобільність, є також переваги в побудові та обслуговуванні бездротової мережі.

#### **мобільність:**

Мобільність є значною перевагою WLAN. Користувач може отримати доступ до спільних ресурсів, не шукаючи місця для підключення, будь-де в організації. Бездротова мережа дозволяє користувачам бути дійсно мобільними, якщо мобільний термінал знаходиться в зоні покриття мережі.

**Діапазон покриття:** Відстань, на яку можуть передаватися радіочастотні та інфрачервоні хвилі, залежить від конструкції виробу (включно з переданою потужністю та конструкцією приймача) і шляху розповсюдження, особливо всередині приміщень. Взаємодія з типовими будівельними об'єктами, такими як стіни, метал і навіть люди, може вплинути на поширення енергії, а отже, на діапазон і охоплення системи. ПЧ блокується твердими предметами, що створює додаткові обмеження. Більшість систем бездротової локальної мережі використовують РЧ, оскільки радіохвилі можуть проникати через стіни та поверхні багатьох приміщень. Радіус дії типового вузла WLAN становить близько 100 м. Покриття можна розширити, а завдяки роумінгу можна отримати справжню свободу мобільності. Це означає використання точок доступу для покриття області таким чином, щоб їх покриття накладалося одне на одне. Таким чином, користувач може блукати та переходити із зони покриття однієї точки доступу до іншої, навіть не підозрюючи про це, і в той же час безперешкодно підтримувати зв'язок між своїм вузлом і точкою доступу.

#### **Простота використання:**

WLAN проста у використанні, і користувачам потрібно дуже мало нової інформації, щоб скористатися перевагами WLAN. Оскільки мережа WLAN є прозорою для мережевої операційної системи користувача, програми працюють так само, як і в дротових локальних мережах.



Швидкість, простота та гнучкість встановлення Встановлення системи WLAN може бути швидким і легким і позбавить від необхідності протягувати кабель через стіни та стелю. Крім того, бездротова локальна мережа дозволяє налаштовувати мережі там, де неможливо встановити дроти. Масштабованість Бездротові мережі можуть бути надзвичайно простими або складними. Бездротові мережі можуть підтримувати велику кількість вузлів і великих фізичних областей шляхом додавання точок доступу для розширення покриття.

#### 1.4 Стандарти IEEE 802.11

IEEE в основному використовується для WLAN, тобто бездротової локальної мережі. Він надає обмежені в часі та асинхронні служби для різної швидкості завантаження та вивантаження з обмеженням за часом. Це стандартний протокол, який використовується в усьому світі. 802.11 відповідає найпопулярнішій специфікації IEEE для бездротової локальної мережі. Він охоплює фізичний рівень і рівень каналу передачі даних. Ця публікація містить примітки щодо бездротового зв'язку щодо стандартів IEEE 802.11 для WLAN для студентів, щоб допомогти студентам із комунікацій успішно скласти іспити та співбесіди.

802.x належить до різних сімейств протоколу IEEE, де x позначає типи послуг. Для різних служб використовуються такі протоколи:

- 802.11 використовується для Wi-Fi.
- 802.15 використовується для Bluetooth.
- 802.16 використовується для Wi-Max

#### **Архітектура IEEE 802.11**

IEEE 802.11 визначає два типи послуг

- 1) Базовий набір послуг (BSS)
- 2) Розширений набір послуг (ESS)

Базовий набір послуг (BSS): IEEE 802.11 визначив BSS як базовий будівельний блок бездротової локальної мережі. BSS складається зі стаціонарних або рухомих бездротових станцій і центральної базової станції, яка називається точкою доступу (AP).

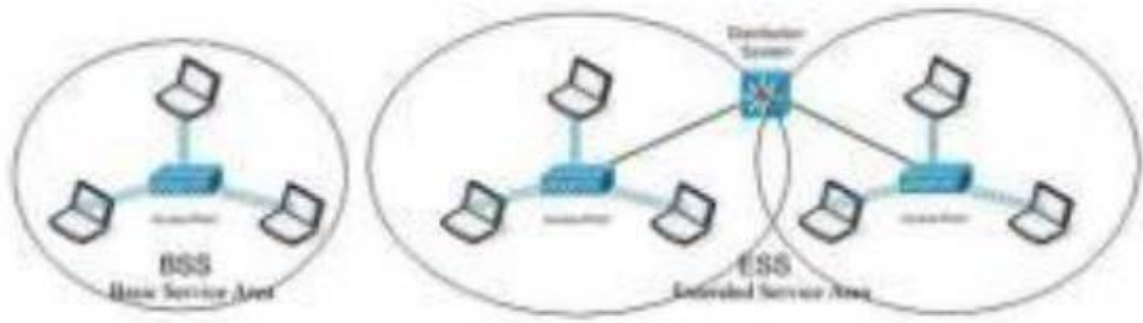


Рисунок 1.12 – Точка доступу

BSS може існувати як з AP, так і без нього. BSS без точки доступу не може надсилати дані іншій BSS. Отже, це відоме як автономна мережа або спеціальна архітектура. У цьому типі архітектури станції можуть формувати мережу без використання точки доступу.

Розширений набір послуг (ESS): розширений набір послуг складається з двох або більше BSS з точками доступу. BSS у цих системах з'єднані одна з одною через систему розподілу, яка зазвичай є дротовою локальною мережею. Система розподілу з'єднує точки доступу один з одним. Система розподілу може бути будь-яким типом локальної мережі, наприклад Ethernet, таким чином ESS містить два типи станцій.

- Мобільні станції
- Стаціонарна з нерухомих станцій

З них нерухомі станції — це точки доступу, які є частиною дротової локальної мережі, тоді як мобільні станції — це ті, що містяться в BSS. BSS з'єднані один з одним, утворюючи мережу, яка називається інфраструктурною мережею. У таких мережах станції, розташовані поруч одна з одною, можуть спілкуватися за допомогою точок доступу. Але якщо дві станції розташовані в двох різних BSS, бажають спілкуватися одна з одною, вони повинні робити це через точки доступу. Цей вид зв'язку дуже схожий на такий у стільниковому зв'язку. BSS діє як стільник, а AP як базова станція.

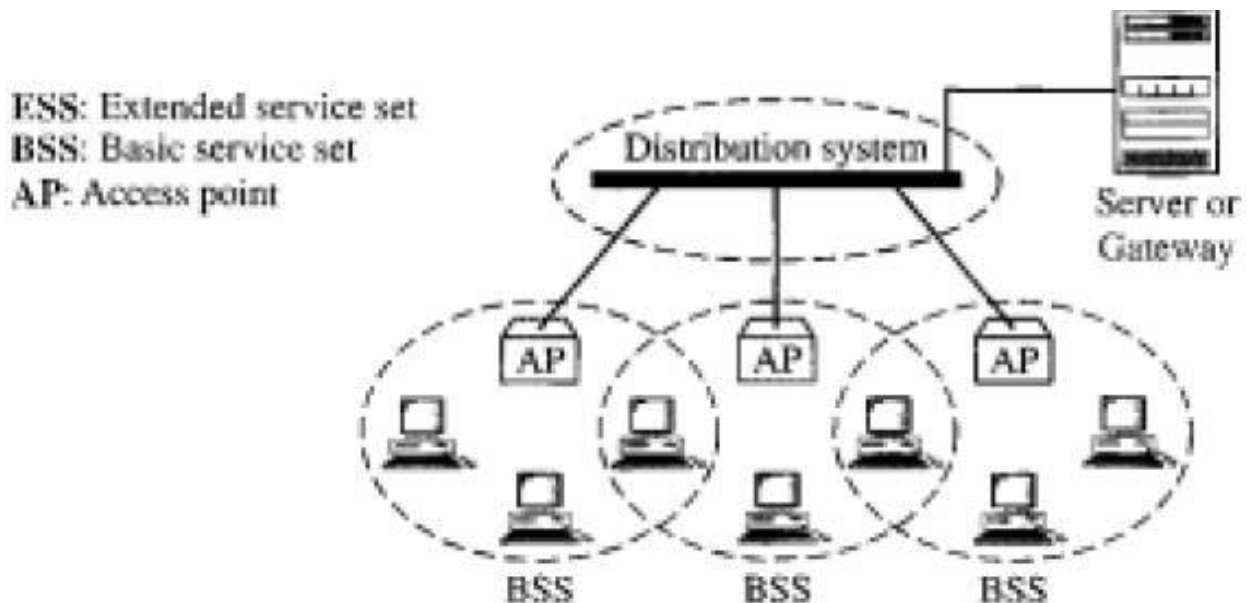


Рисунок 1.13 – Система розподілу

#### Типи станцій в ESS:

Стандарт IEEE 802.11 визначає три типи станцій залежно від їх мобільності в бездротовій локальній мережі.

- 1) Мобільність без переходу: визначається як станція, яка є нерухомою (стаціонарною) або рухається лише всередині BSS.
- 2) Перехідна мобільність BSS: Станція, що має перехідну мобільність BSS, це та, яка може переходити від BSS до іншої, але не переміщується за межі однієї ESS.
- 3) Мобільність переходу ESS: станція, що має мобільність переходу ESS, це та, яка може переходити від однієї ESS до іншої. Але IEEE 802.11 не гарантує зв'язку, коли станція рухається.

#### Системи та діапазони частот 802.11

Використовується кілька різних варіантів 802.11. Різні варіанти 802.11 використовують різні діапазони. Короткий перелік діапазонів, які використовуються системами 802.11, наведено нижче:

Таблиця 1.1 Діапазон частот

IEEE 802.11 FREQUENCY BANDS USED VARIANT	
802.11a	5GHz
802.11b	2.4GHz
802.11g	2.4GHz
802.11n	2.4 & 5 GHz
802.11ac	Below 6GHz
802.11ad	Up to 60 GHz
802.11af	TV white space (below 1 GHz)
802.11ah	700 MHz, 860MHz, 902 MHz, etc. ISM bands dependent upon country and allocations

### Підстандарти (a,b,g,n)

IEEE802.11a Стандарт IEEE802.11a був випущений у вересні 1999 року. Мережі, що використовують 802.11a, працюють на радіочастоті 5 ГГц або 3,7 ГГц і смузі пропускання 20 МГц. Специфікація використовує схему модуляції, відому як мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM), яка особливо добре підходить для використання в офісних умовах. У 802.11a можлива швидкість передачі даних до 54 Мбіт/с. У цьому стандарті використовуються технології антени з одним входом і одним виходом (SISO), а внутрішня/зовнішня діапазони від 35 м до 125 м для робочої частоти 5 ГГц. Зовнішній діапазон досягає 5 км для робочої частоти 3,7G. IEEE802.11a менш схильний до перешкод порівняно з 802.11b завдяки високій робочій частоті 5 ГГц.

### IEEE 802.11b

Стандарт IEEE 802.11b також був випущений у вересні 1999 року. Цей стандарт забезпечує передачу 11 Мбіт/с (з резервною швидкістю до 5,5, 2 і 1 Мбіт/с) на робочій частоті 2,4 ГГц і смузі пропускання 22 МГц. 802.11b використовує лише техніку модуляції DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Цей стандарт також використовує антенну технологію SISO, як у стандарті IEEE802.11a. Стандарт IEEE802.11b був ратифікований у 1999 році на основі оригінального стандарту IEEE802.11, який дозволяв

бездротова функціональність, порівнянна з Ethernet. Стандарт IEEE802.11b схильний до більших перешкод через те, що частотний діапазон 2,4 ГГц стає переповненим несучими, отже, підвищується ризик перешкод. Діапазони для цього стандарту в приміщенні та на вулиці становлять від 35 до 140 м

**IEEE 802.11g**

Стандарт 802.11g був ратифікований у 2003 році як стандарт IEEE для бездротових мереж Wi-Fi і підтримує максимальну пропускну здатність мережі 54 Мбіт/с порівняно з 11 Мбіт/с для 802.11b. Цей стандарт працює на частоті 2,4 ГГц і смузі пропускання 20 МГц. Цей стандарт використовує схеми модуляції OFDM або DSSS. У цьому стандарті використовуються технології антени SISO, а її радіус дії в приміщенні/зовні становить від 38 м до 140 м відповідно.

**IEEE 802.11n**

Стандарт 802.11n був ратифікований у 2009 році, і він використовує кілька бездротових антен у тандемі для передачі та отримання даних. Стандарт IEEE802.11n використовує техніку модуляції OFDM. Технологія антени, яка використовується зі стандартом IEEE802.11n, відома як множинні входи, множинні виходи (MIMO). Ця технологія стосується здатності 802.11n і подібних технологій координувати кілька одночасних радіосигналів. MIMO збільшує діапазон і пропускну здатність бездротової мережі. Додаткова техніка, яка використовується 802.11n, передбачає збільшення смуги пропускання каналу з 20 МГц до 40 МГц. Стандарт 802.11n підтримує максимальну теоретичну пропускну здатність мережі до 300 Мбіт/с. Діапазони IEEE802.11n для приміщень і поза приміщеннями становлять 75 м і 250 м відповідно.

**IEEE 802.11ac**

IEEE 802.11ac — це п'яте покоління мережевих стандартів Wi-Fi, випущене в грудні 2013 року [5-6]. Ця стандартна робоча частота становить 5 ГГц, а смуга пропускання – 20, 40, 80, 160 МГц. Діапазон швидкості потоку для цих секторів пропускну здатності становить 7,2–96,3 Мбіт/с для 20 МГц, 15–200 Мбіт/с для 40 МГц, 32,5–433,3 Мбіт/с для 80 МГц і 65–866,7 Мбіт/с для 160 МГц. Цей стандарт демонструє кращу продуктивність і краще покриття порівняно зі стандартами IEEE 802.11a, b, g і n. Стандарт 802.11ac використовує ширший канал і вдосконалену схему модуляції, яка також підтримує більше клієнтів. Стандарт IEEE 802.11ac використовує техніку модуляції, відому як багатокористувацька MIMO. Ця техніка дозволяє набору користувачів або бездротових терміналів, кожен з яких має одну або більше антен, о спілкуватися один з одним. Радіус дії в приміщенні становить 35 м, а максимальна відстань на відкритому повітрі не вказана.



## 1.5 Топологія мережі

Топологія мережі – це фізичне розташування комп'ютерів, кабелів та інших компонентів у мережі. Існує кілька різних топологій мережі, і мережа може бути побудована з використанням кількох топологій. Різні типи компонування мережі: топологія шини, топологія зірки, топологія Mesh, топологія кільця, топологія гібриду та топологія бездротового зв'язку.

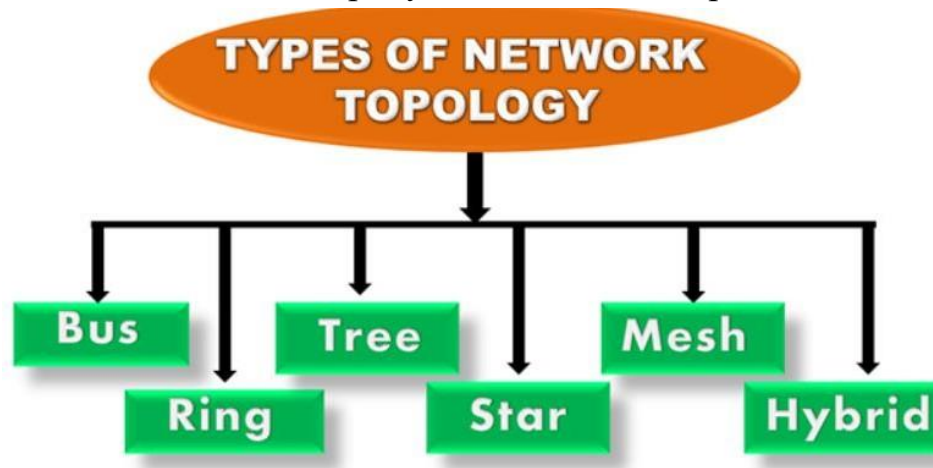


Рисунок 1.14 – Топологія мережі

### Топологія шини

Топологія шини складається з основної лінії кабелю з термінатором на кожному кінці. Усі вузли, такі як робочі станції, принтери, ноутбуки, сервери тощо, підключаються до лінійного кабелю. Термінатор використовується для поглинання сигналу, коли сигнал досягає кінця, запобігаючи відскоку сигналу. Під час використання шинної топології, коли комп'ютер надсилає сигнал, сигнал поширюється по кабелю в обох напрямках від комп'ютера-відправника. Коли сигнал досягає кінця довжини кабелю, він повертається назад і повертається в тому напрямку, звідки надійшов. Це називається відскоком сигналу. Відбій сигналу може створити проблеми в комп'ютерній мережі, тому що якщо інший сигнал надсилається по кабелю одночасно, два сигнали зіштовхнуться. Колізії в комп'ютерній мережі можуть різко знизити продуктивність комп'ютерної мережі.

- Топологія шини розроблена таким чином, що всі станції з'єднані одним кабелем, відомим як магістральний кабель.
- Кожен вузол або підключений до магістрального кабелю за допомогою роз'ємного кабелю, або безпосередньо підключений до магістрального кабелю.
- Коли вузол хоче надіслати повідомлення через мережу, він розміщує повідомлення через мережу. Усі станції, доступні в мережі, отримують

повідомлення незалежно від того, було воно адресоване чи ні.

- Топологія шини в основному використовується в стандартних мережах 802.3 (ethernet) і 802.4.
- Конфігурація шинної топології є досить простою порівняно з іншими топологіями.
- Магістральний кабель розглядається як "єдина смуга", через яку повідомлення транслюється на всі станції.
- Найпоширенішим методом доступу до шинних топологій є CSMA (Carrier Sense Multiple Access).
- **CSMA:** Це контроль доступу до середовища, який використовується для керування потоком даних, щоб підтримувати цілісність даних, тобто пакети не втрачалися. Існує два альтернативних способи вирішення проблем, які виникають, коли два вузли надсилають повідомлення одночасно.
- **CD CSMA:** CSMA CD (виявлення зіткнень) — це метод доступу, який використовується для виявлення зіткнень. Після виявлення конфлікту відправник припинить передачу даних. Тому працює на «відновлення після зіткнення».
- **CSMA CA:** CSMA CA (уникнення зіткнень) це метод доступу, який використовується для уникнення зіткнень шляхом перевірки, чи зайняте середовище передачі чи ні. Якщо зайнято, то відправник чекає, доки медіа стане неактивним. Ця техніка ефективно знижує ймовірність зіткнення. Не працює на «відновлення після зіткнення».



Рисунок 1.15 – Топологія шини

### Переваги:

#### Кільцева топологія

Фізична форма мережі не обов'язково має бути кільцевою або круговою. Кільцевою топологією може бути логічне коло, яке не має ні початку, ні кінця. Термінатори не потрібні в кільцевій топології. Сигнали переміщуються в одному напрямку по кільцю, переходячи від одного

комп'ютера до іншого. Кожен пристрій у кільцевій топології може регенерувати сигнал даних, щоб сигнал даних міг подолати необхідну відстань без погіршення якості сигналу.



Рисунок 1.16 – Топологія кільця

- Кільцева топологія схожа на топологію шини, але має з'єднані кінці.
- Вузол, який отримує повідомлення від попереднього комп'ютера, буде повторно передавати на наступний вузол.
- Дані надходять в одному напрямку, тобто є односпрямованими.
- Дані передаються в один безперервний цикл, відомий як нескінченний цикл.
- Він не має кінцевих кінців, тобто кожен вузол з'єднаний з іншим вузлом і не має кінцевої точки.
- Дані в кільцевій топології передаються за годинниковою стрілкою.
- Найпоширенішим методом доступу кільцевої топології є передача маркерів.
- **Передача маркера:** Це метод доступу до мережі, при якому маркер передається від одного вузла до іншого вузла.
- **Токен:** Це кадр, який циркулює по мережі.

#### **Робота передачі маркерів:**

- Маркер рухається по мережі та передається від комп'ютера до комп'ютера, поки не досягне місця призначення.
- Відправник змінює маркер, додаючи адресу разом із даними.
- Дані передаються з одного пристрою на інший, доки адреса призначення не збігається. Після того, як маркер отримано пристроєм призначення, він надсилає підтвердження відправнику.
- У кільцевій топології маркер використовується як носій.

### **Переваги кільцевої топології:**

- **Керування мережею:** Несправні пристрої можна видалити з мережі, не відключаючи мережу.
- **Наявність товару:** Доступно багато апаратних і програмних засобів для роботи в мережі та моніторингу.
- **Вартість:** Кабель з витотою парою недорогий і легкодоступний. Тому вартість установки дуже низька.
- **Надійний:** Це більш надійна мережа, оскільки система зв'язку не залежить від одного головного комп'ютера.

### **Недоліки кільцевої топології:**

- **Складне усунення несправностей:** Для визначення несправності кабелю потрібне спеціальне тестове обладнання. Якщо в кабелі станеться будь-яка несправність, це порушить зв'язок між усіма вузлами.
- **Помилка:** Поломка однієї станції призводить до виходу з ладу всієї мережі.
- **Переконфігурація складна:** Додавання нових пристроїв до мережі сповільнить роботу мережі.
- **Затримка:** Затримка зв'язку прямо пропорційна кількості вузлів. Додавання нових пристроїв збільшує затримку зв'язку.

### **Зіркова топологія**

Зіркова топологія розроблена з кожним вузлом (наприклад, робочими станціями, принтерами, ноутбуками, серверами тощо), підключеним безпосередньо до центрального пристрою, який називається мережевим комутатором. Кожна робоча станція має кабель, який іде від картки мережевого інтерфейсу (NIC) до мережевого комутатора. Найпопулярніша та найпоширеніша технологія локальної мережі Ethernet працює в топології Star або Star-Bus.

- Топологія типу «зірка» — це структура мережі, в якій кожен вузол підключений до центрального концентратора, комутатора або центрального комп'ютера.

- Центральний комп'ютер відомий як сервер, а периферійні пристрої, підключені до сервера, відомі як клієнти.

- Для підключення комп'ютерів використовується коаксіальний кабель або кабелі RJ-45.

- Концентратори або комутатори в основному використовуються як з'єднувальні пристрої у фізичній зіркоподібній топології.

- Зірчаста топологія є найпопулярнішою топологією в реалізації мережі.

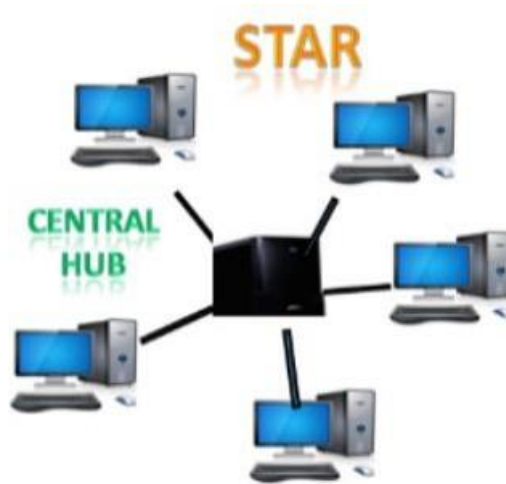


Рисунок 1.17 – Зіркоподібна топологія

Переваги зіркової топології:

- **Ефективне усунення несправностей:** Пошук і усунення несправностей є досить ефективним у зіркоподібній топології порівняно з шинною. У топології шини менеджер повинен перевірити кілометри кабелю. В зіркоподібна топологія, всі станції підключені до централізованої мережі. Тому мережевий адміністратор має звернутися до однієї станції, щоб усунути проблему.
- **Контроль мережі:** Складні функції керування мережею можна легко реалізувати в топології типу «зірка». Будь-які зміни, внесені в зіркоподібну топологію, враховуються автоматично.
- **Обмежена помилка:** Оскільки кожна станція підключена до центрального концентратора власним кабелем, тому збій в одному кабелі не вплине на всю мережу.
- **Знайома технологія:** Зіркоподібна топологія є знайомою технологією, оскільки її інструменти є економічно ефективними.
- **Легко розширюється:** Його легко розширити, оскільки до відкритих портів концентратора можна додавати нові станції.
- **Економічно ефективним:** Мережі з топологією «зірка» рентабельний, оскільки використовує недорогий коаксіальний кабель.
- **Висока швидкість передачі даних:** Він підтримує пропускну здатність приблизно 100 Мбіт/с. Ethernet 100BaseT є однією з найпопулярніших мереж топології Star.

Недоліки зіркоподібної топології:

- **Центральна точка невдачі:** Якщо центральний концентратор або

комутатор вийде з ладу, то всі підключені вузли не зможуть спілкуватися один з одним.

- **Кабель:** Іноді прокладання кабелю стає складним, коли потрібна значна кількість прокладок.

### Топологія дерева

У топології дерева пристрої розташовані у вигляді дерева, подібного до гілок дерева. Пристрої нижчого рівня підключаються до пристроїв наступного вищого рівня, що нагадує деревоподібну структуру. На вищих рівнях дерева часто використовуються з'єднання точка-точка або точка-багато точок

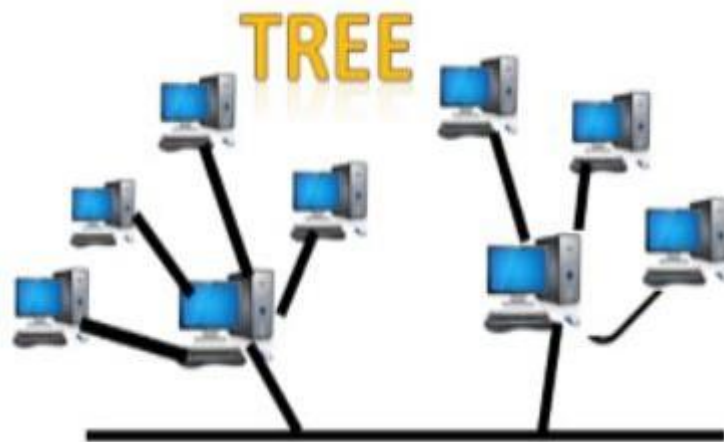


Рисунок 1.18 – Топологія дерева

- Деревоподібна топологія поєднує характеристики шинної топології та зіркової топології.
- Деревоподібна топологія — це тип структури, у якій усі комп'ютери з'єднані один з одним у ієрархічний спосіб.
- Самий верхній вузол у топології дерева називається кореневим вузлом, а всі інші вузли є нащадками кореневого вузла.
- Існує лише один шлях між двома вузлами для передачі даних. Таким чином, він формує ієрархію «батьки-діти».

### Переваги топології дерева

- **Підтримка широкопasmової передачі:** Деревоподібна топологія в основному використовується для забезпечення широкопasmової передачі, тобто сигнали надсилаються на великі відстані без ослаблення.
- **Легко розширюється:** Ми можемо додати новий пристрій до існуючої мережі. Тому можна сказати, що топологія дерева легко розширюється.



- **Легко керований:** У деревоподібній топології вся мережа розділена на сегменти, відомі як зіркові мережі, якими можна легко керувати та підтримувати.
- **Виявлення помилок:** Виявлення та виправлення помилок дуже прості в топології дерева.
- **Обмежена помилка:** Поломка однієї станції не впливає на всю мережу.
- **Проводка точка-точка:** Він має двоточкову проводку для окремих сегментів.

### Недоліки топології дерева

- **Складне усунення несправностей:** Якщо у вузлі виникає якась несправність, усунути проблему стає важко.
- **висока вартість:** Пристрої, необхідні для широкосмугової передачі, дуже дорогі.
- **Помилка:** Деревоподібна топологія в основному залежить від кабелю основної шини, а збій кабелю основної шини пошкодить всю мережу.
- **Переконфігурація складна:** Якщо додаються нові пристрої, то стає важко переналаштувати.

### Топологія сітки:

- Меш-технологія — це мережева структура, у якій комп'ютери з'єднані один з одним за допомогою різноманітних резервних з'єднань.
- Існує кілька шляхів від одного комп'ютера до іншого.
- Він не містить комутатора, концентратора чи будь-якого центрального комп'ютера, який діє як центральна точка зв'язку.
- Інтернет є прикладом сітчастої топології.
- Меш-топологія в основному використовується для реалізацій WAN, де збої зв'язку є критичною проблемою.
- Меш-топологія в основному використовується для бездротових мереж.
- Мештопологію можна сформувати за допомогою формули:

$$\text{Кількість кабелів} = (n*(n-1))/2;$$

де n – число вузлів, які представляють мережу.

У дротовій топології повної сітки кожен пристрій у мережі з'єднаний разом, створюючи з'єднання між усіма пристроями в мережі. Топологія Full-Mesh забезпечує надзвичайний рівень резервування в порівнянні з іншими мережевими топологіями. Основна перевага повної сітки полягає в тому, що якщо будь-яке з'єднання між двома пристроями вийшло з ладу, завжди існує

альтернативний шлях для досягнення пункту призначення.

Топологія Full-Mesh добре працює в невеликій мережі. приклад; менше п'яти пристроїв. Але зі збільшенням кількості пристроїв у мережі на основі топології Full-Mesh стають складнішими. З'єднати 500 комп'ютерів у топологію full-mesh нелегко.

### Гібридна топологія

- Комбінація різних топологій відома як гібридна топологія.
- Гібридна топологія – це з'єднання між різними посланнями та вузлами для передачі даних.
- Коли дві або більше різних топологій поєднуються разом, це називається гібридною топологією, і якщо подібні топології з'єднані одна з одною, це не призведе до гібридної топології. для

Наприклад, якщо існує кільцева топологія в одній філії банку ICICI та топологія шини в іншій філії банку ICICI, з'єднання цих двох топологій призведе до гібридної топології.

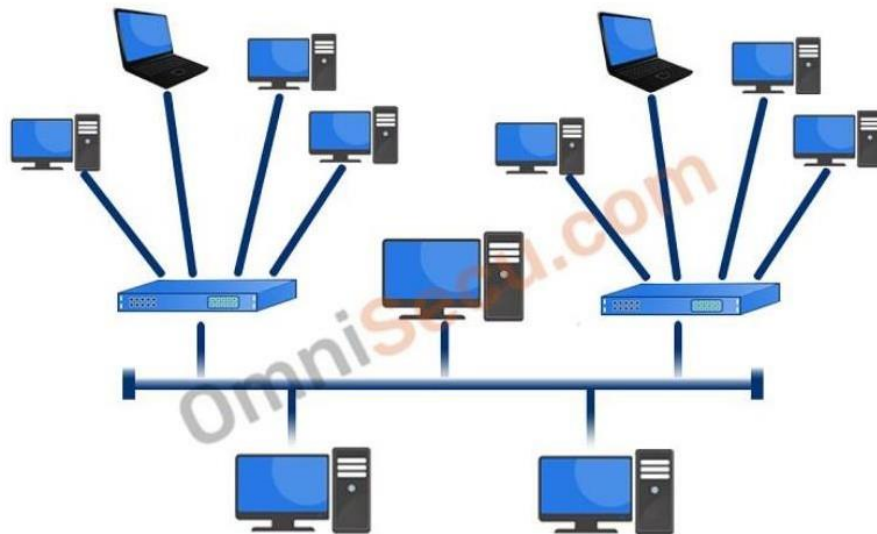


Рисунок 1.19 – Гібридна топологія

### Переваги гібридної топології:

- **Надійний:** Якщо виникає несправність у будь-якій частині мережа не вплине на роботу решти мережі.
- **Масштабований:** Розмір мережі можна легко розширити, додавши нові пристрої, не впливаючи на функціональність існуючої мережі.
- **гнучкий:** Ця топологія є дуже гнучкою, оскільки її можна спроектувати відповідно до вимог організації.
- **Ефективний:** Гібридна топологія дуже ефективна, оскільки її можна

спроєктувати таким чином, щоб потужність мережі була максимальною, а слабкість мережі мінімізованою

### **Недоліки гібридної топології**

- **Комплексна конструкція:** Головним недоліком гібридної топології є дизайн гібридної мережі. Дуже складно спроєктувати архітектуру гібридної мережі.
- **Дорогий центр:** Концентратори, які використовуються в гібридній топології, дуже дорогі, оскільки ці концентратори відрізняються від звичайних концентраторів, що використовуються в інших топологіях.
- **Дорога інфраструктура:** Вартість інфраструктури дуже висока, оскільки для гібридної мережі потрібно багато кабелів, мережевих пристроїв тощо.

### **Клієнт-серверне керування мережею для WLAN**

Системи керування мережею відіграють важливу роль в інформаційних системах. Існують різні системи керування мережею, такі як віддалений моніторинг, спільне використання робочого столу, керування смугою пропускання тощо. У ньому докладно розглядаються вищезазначені проблеми, тобто спільне використання віддаленого робочого столу, керування смугою пропускання та віддалений моніторинг, які накопичуються в одній системі керування мережею. Спільний доступ до віддаленого робочого столу — це технологія, яка забезпечує віддалений доступ і віддалену співпрацю на комп'ютері користувача. Спільний доступ до віддаленого робочого столу надає можливість консультантам з технологій, адміністраторам або будь-кому отримати повний доступ і дистанційний контроль над домашніми комп'ютерами, офісними робочими станціями та серверами. Іншим додатком у мережевій системі є керування смугою пропускання.

- Система мережевого зв'язку клієнт-сервер реалізована за допомогою .Net framework і мови C# для інтерфейсу програми та використання для виявлення мережевої функції та використання SQL для зберігання важливих даних системи.

- Ця система використовує Wi-Fi для з'єднання різних комп'ютерів у мережі. Ця система використовує протокол TCP/IP для мережевих транзакцій.

- Клієнт надсилає запит на спільний доступ до робочого столу, а сервер відповідає на запит клієнта та ініціює спільний доступ до робочого столу. Подібним чином у віддаленому моніторингу використовується метод запит-відповідь.

- Мережева комунікаційна система означає різні речі для різних людей. У деяких випадках це передбачає мережевого консультанта, який стежить за мережевою активністю за допомогою застарілого аналізатора протоколів.

- В інших випадках мережева система включає в себе розподілену базу даних, автоматичне опитування мережевих пристроїв і робочі станції високого класу, які генерують графічні представлення в реальному часі змін топології мережі та трафіку. Загалом, мережева комунікаційна система – це служба, яка використовує різноманітні інструменти, програми та пристрої для допомоги мережевим менеджерам у моніторингу та обслуговуванні мереж.

## 1.6 Висновки до розділу

На основі проведеного аналізу літературних джерел можна зробити наступні висновки, що розумні технології відіграють вирішальну роль у стабільному економічному зростанні. Вони перетворюють будинки, офіси, фабрики і навіть міста в автономні, самокеровані системи без втручання людини. Ця сучасна тенденція автоматизації та дедалі більше використання передових технологій сприяють розвитку світової економіки. Інтернет речей (IoT) і бездротові сенсорні мережі (WSN) відіграють життєво важливу роль у цій модернізації. На підставі вище написаного необхідно швидко і якісно розробляти радіотехнічні пристрої вимірювання з покращеними метрологічними та економічними показниками для бездротових сенсорних мереж.

## 2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ГАЗІВ НА ОСНОВІ SIC-FET

Характеристики радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів визначають точність і надійність систем контролю і регулювання пристроїв моніторингу технологічних процесів, характеристики навколишнього середовища, безпеку промислових установок і т.д. Тому до радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів пред'являються жорсткі вимоги. Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів повинні бути економічними, забезпечувати високу чутливість і точність вимірювань, мати мінімальні розміри та вагу, а також невелику енергоємність, бути сумісними з сучасними бездротовими радіотехнічними системами вимірювання та мати можливість виготовлення за стандартною комплексною інтегральною технологією [31-34].

У даний час існуючі напівпровідникові сенсори концентрації газу не зовсім відповідають вищезазначеним вимогам. Вони мають низький вихідний сигнал, низьку точність і чутливість, вимагають аналого-цифрових перетворювачів і підсилювачів для подальшої обробки сигналу. Перспективним науковим напрямком, який дозволяє усунути недоліки існуючих аналогових радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів, є створення радіотехнічних пристроїв вимірювання, що реалізують принцип перетворення «концентрація газу – частота» на основі автогенераторних напівпровідникових структур.

### 2.1 Розробка автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів

Розробка автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів з частотним вихідним сигналом вимагає знання зміни імпедансу первинних напівпровідникових газових перетворювачів від зміни концентрації газу, тобто реактивного ефекту газу, оскільки ці процеси викликають зміну параметрів коливального контуру автогенераторів, що в свою чергу визначає залежність вихідної частоти автогенераторного пристрою [35-38]. Таким чином, даний підрозділ присвячений вивченню математичної моделі газового реактивного ефекту в напівпровідникових газових сенсорах, тобто залежності їх загального вихідного опору від концентрації газу, яка визначається процесами на поверхні напівпровідника. У роботі розглянуто механізм формування імпедансу напівпровідникових газових сенсорів, у яких активна складова визначається поверхневим опором,

а реактивна – поверхневою ємністю. Залежність величини імпедансу від зміни концентрації активних газів характеризує сутність газореактивного ефекту датчиків, який однозначно змінює вихідну частоту автогенераторних газових перетворювачів.

Запропоновано та досліджено схеми частотних мікроелектронних перетворювачів концентрації газу на основі транзисторних структур з негативним опором. На спадаючій ділянці вольт-амперної характеристики вибирається робоча точка приладу, яка забезпечує самозбудження автогенератора перетворювача. Втрати енергії в коливальному контурі автогенератора поповнюються негативним опором. Запропоновано методику розрахунку функцій перетворення та чутливості приладів. Розрахунки базуються на математичних моделях перетворювачів, які впливають з рівнянь Кірхгофа. Рівняння складені на основі нелінійних схем заміщення частотних пристроїв. Мікроелектронний частотний перетворювач концентрації газу працює в коливальному режимі генератора завдяки правильному вибору постійної напруги джерела живлення.

Під газовим реактивним ефектом розуміється залежність загального опору напівпровідникових первинних аналогових газочутливих датчиків від зміни вимірюваних газів. Зміна активної складової повного опору призводить до зміни негативного диференціального опору, а зміна реактивної складової змінює ємність коливального контуру автогенераторних газових перетворювачів, що в кінцевому підсумку призводить до однозначної залежності вихідної частоти від автогенераторні пристрої від зміни концентрації вимірюваних газів. Напівпровідникові аналогові датчики газу мають ряд недоліків, таких як низький вихідний сигнал, низька точність і чутливість, необхідність підсилювальних пристроїв і аналого-цифрових перетворювачів при подальшій обробці сигналу, паразитний вплив одного вимірювального каналу на інший, що можна усунути за допомогою методу перетворення фізичної величини в частоту [32, 37, 38]. При використанні методу перетворення частоти необхідно знати залежність імпедансу первинних аналогових напівпровідникових газових датчиків від дії вимірюваних газів і вплив цього впливу на вихідну частоту автогенераторних газових перетворювачів.

Фізичні процеси, що відбуваються на поверхні напівпровідникових газочутливих сенсорів при їх взаємодії з вимірюваними газами, описуються рівнянням Пуассона. Це рівняння описує розподіл електростатичного потенціалу в шарі просторового заряду в приповерхневому шарі напівпровідника. Зразок напівпровідника газочутливого елемента в нормальних умовах повинен бути електрично нейтральним. Звідки випливає,



що поверхневий заряд  $Q_p$  повинен бути компенсований рівним і протилежним за знаком заряду в приповерхневому шарі напівпровідника. Цей заряд екранує об'єм напівпровідника від проникнення в нього електричного поля і складається з розташованих в об'ємі напівпровідника іонізованих донорів і акцепторів і рухомих електронів і дірок. Таким чином, поверхневий шар напівпровідника - це шар просторового заряду, який екранує об'єм напівпровідника від електричного поля поверхневого заряду, і це екранування здійснюється за рахунок того, що рівноважна концентрація електронів і дірок в шар відрізняється від основної маси. Більш повний і точний розв'язок рівняння Пуассона зроблено в роботі Гаррета і Браттейна, переклад якої зроблено в монографії [39]. У цій роботі ми розглядаємо загальний випадок напівпровідника, який знаходиться під впливом збуджуючих факторів, таких як освітлення, випромінювання.

Повний приповерхневий опір напівпровідникового датчика газу  $Z_S$  у загальному вигляді, припускаючи, що він являє собою паралельне з'єднання приповерхневої ємності  $C_S$  та активного опору поверхня-земля  $R_S$  визначається виразом

$$Z_S = \frac{R_S}{1 + (\omega C_S R_S)^2} + \frac{R_S^2 \omega C_S}{1 + (\omega C_S R_S)^2}, \quad (2.1)$$

де  $\omega$  – кругова частота. Поверхневий ( $\text{Ом}/\text{см}^2$ ) активний опір у загальному випадку має вигляд [40]

$$R_S = [q\mu_{ns}n_s(y_s, \gamma, \alpha) + q\mu_{ps}p_s(y_s, \gamma, \alpha)]^{-1}, \quad (2.2)$$

де  $q$  – заряд електрона,  $\mu_{ns}, \mu_{ps}$  – рухливість електронів і дірок,  $n_s, p_s$  – надмірний удар електронів і дірок у приповерхневому шарі напівпровідникового матеріалу,  $y_s$  – поверхню тривимірного електростатичного потенціалу,  $\gamma$  – безрозмірний коефіцієнт, що характеризує об'ємні властивості напівпровідника автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів,  $\alpha$  – безрозмірний коефіцієнт для автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів, який характеризує ступінь порушення термодинамічної рівноваги в напівпровідниковому матеріалі. Концентрація надлишкових електронів і дірок у напівпровідниковій структурі автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів описується виразом [40]

$$n_s(y_s, \gamma, \alpha) = \frac{1}{2} n_0 (\gamma^{-1} + \alpha) L_D \int_{y_s}^0 \frac{(e^y - 1)}{f(y, \gamma, \alpha)} dy, \quad (2.3)$$

$$p_s(y_s, \gamma, \alpha) = \frac{1}{2} p_0 (\gamma + \alpha) L_D \int_{y_s}^0 \frac{(e^{-y} - 1)}{f(y, \gamma, \alpha)} dy, \quad (2.4)$$

де  $n_0, p_0$  – рівноважна концентрація електронів і дірок в об'ємі напівпровідникового матеріалу автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів,  $y$  – безрозмірний електростатичний потенціал, таким чином, функція  $f(y, \gamma, \alpha)$  має вигляд [40]

$$f(y, \gamma, \alpha) = \mp \left[ (\gamma + \alpha)(e^{-y} - 1) + (\gamma^{-1} + \alpha)(e^y - 1) + (\gamma - \gamma^{-1})y \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.5)$$

$$L_D = \left( \frac{\varepsilon \varepsilon_0 k T}{2 \pi q^2 n_i} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.6)$$

де  $\varepsilon, \varepsilon_0$  – діелектричні проникності напівпровідника і вакууму,  $k$  – постійна Больцмана,  $n_i$  – концентрація електронів у власному напівпровіднику,  $L_D$  – відстань проникнення електричного поля у власний напівпровідник,  $T$  – абсолютна температура. Слід зазначити, що у виразі (2.5) мінус перед квадратною дужкою відповідає позитивному знаку, а позитивний знак – негативному значенню безрозмірного електростатичного потенціалу для автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів. Підстановка виразів (2.3) та (2.4) в рівняння (3.2) описує питомий опір автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів

$$R_s(y_s, \gamma, \alpha) = \left[ \frac{1}{2} q n_i \mu_{ps} L_D \int_{y_s}^0 \frac{(\gamma + \alpha)(e^{-y} - 1) + b_s (\gamma^{-1} + \alpha)(e^y - 1)}{f(y, \gamma, \alpha)} dy \right]^{-1}, \quad (2.7)$$

де  $b_s = \mu_{ns} / \mu_{ps}$  – відношення рухливості електронів до рухливості дірок у транзисторній структурі автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів. Інтеграл у виразі (2.7) не має розв'язки в аналітичній формі і повинен розраховуватися чисельно, але при значному значенні поверхневого потенціалу для електронного напівпровідника автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів інтеграл набуває приблизного значення, а питомий приповерхневий

опір має вигляд

$$R_{sn} = \left[ q\mu_{ns}n_0L_D(\gamma^{-1} + \alpha)^{\frac{1}{2}} e^{\frac{1}{2}y_s(w)} \right]^{-1}, \quad (2.8)$$

а для діркового напівпровідника у транзисторній структурі автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів при значних від'ємних значеннях поверхневого потенціалу  $y_s$  приповерхневий активний опір описується

$$R_{sp} = \left[ q\mu_{ps}p_0L_D(\gamma + \alpha)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{1}{2}y_s(w)} \right]^{-1}, \quad (2.9)$$

де  $w$  – концентрація активних газів на автогенераторному радіотехнічному пристрої вимірювання концентрації газів. Аналіз залежності приповерхневого активного опору напівпровідникового матеріалу автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів від поверхневого потенціалу для електронного напівпровідника показує, що при значних позитивних значеннях  $y_s$ , коли є великий надлишок електронів у приповерхневому шарі збагачення, цей надлишок електронів визначатиме приповерхневий питомий опір, експоненціально залежний від індексу, який дорівнює половині значення  $y_s$ . При зниженні  $y_s$  спочатку спостерігається зростання приповерхневого опору напівпровідникового матеріалу автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів за цим законом. В області малих позитивних значень  $y_s$  зростання активного опору автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів сповільнюється, оскільки заряд шару просторового заряду стає все більш важливим для заряду іонізованих донорів у напівпровідниковому матеріалі автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів.

Переходимо до визначення питомої ємності (пФ/см<sup>2</sup>) приповерхневого шару просторового заряду напівпровідникового матеріалу автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів. Зв'язок між зарядом і потенціалом буде нелінійний, що визначає диференційну ємність шару просторового заряду напівпровідникового матеріалу автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів. З розв'язку рівняння Пуассона та загального визначення ємності напівпровідникового матеріалу автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання

концентрації газів отримуємо значення питомої ємності просторового заряду [40]

$$C_{np.zap} = \frac{q^2 n_i L_D \left[ (\gamma^{-1} + \alpha) e^{y_s(w)} - (\gamma + \alpha) e^{-y_s(w)} + (\gamma - \gamma^{-1}) \right]}{2kTf(y_s(w), \gamma, \alpha)}. \quad (2.10)$$

Для власного напівпровідника, який використовується в автогенераторному радіотехнічному пристрої вимірювання концентрації газів, коли  $\gamma = 1$  і  $\alpha = 0$ , вираз (2.10) набагато простіший

$$C_{sp.ch} = \frac{1}{2} \frac{q^2 n_i L_D \left[ e^{y_s(w)} - e^{-y_s(w)} \right]}{kT \left[ \left( e^{y_s(w)} - e^{-y_s(w)} + 2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]}. \quad (2.11)$$

Аналіз формули (2.11) показує, що диференціальна ємність просторового заряду автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів набуває мінімального значення  $y_s = 0$ , коли немає вигину енергетичних зон. Його величина зростає як при позитивних, так і при негативних значеннях поверхневого потенціалу автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів. При значеннях  $y_s \geq 3$  пропорційно зростає диференціальна ємність  $\exp\left(\frac{1}{2} y_s\right)$ . У випадку домішкових зразків напівпровідника автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів, залежність  $C_{sp.ch}$  на поверхневий потенціал  $y_s(w)$  має схожий характер.

Підстановка формул (2.8) і (2.11) для напівпровідника з електронним типом провідності автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів у вираз (2.1) дозволяє отримати залежність його повного опору від поверхневого потенціалу, який, у свою чергу, однозначно залежить від концентрації вимірюваної газової суміші. Теоретичні залежності питомої ємності та провідності автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів від поверхневого потенціалу для різних напівпровідників з різними типами провідності представлені у роботі [40]. Теоретичну та експериментальну залежність вихідної частоти від зміни концентрації газів можна отримати на основі автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів, схема якого представлена на рис. 2.1 [51, 52].

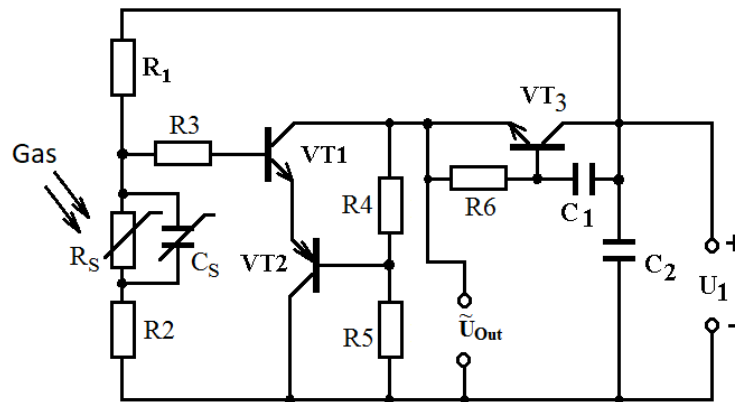


Рисунок 2.1 – Електрична схема автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів на основі двох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом

Створення перетворювача концентрації газу з частотою вихідного сигналу у вигляді інтегральної схеми вимагає використання плівкової технології для виготовлення пасивного індуктивного елемента у вигляді спіралі, але його якість не має великого значення, а по-друге, розміри на частотах до  $10^6$  Гц несумісні з розміром інтегральної схеми автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів. Тому для вирішення цієї проблеми було запропоновано використати індуктивний характер повного опору біполярного транзистора з  $RC$  – схема, яка легко виконується у вигляді інтегральної мікросхеми [48]. Біполярні транзистори  $VT1, VT2$  і  $VT3$  реалізувати автогенераторний радіотехнічний пристрій вимірювання концентрації газів, в якому коливальний контур утворений ємністю складовою імпедансу транзисторної структури на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів  $VT1, VT2$  та індуктивна складова повного опору на електродах емітер-колектор біполярного транзистора  $VT3$  автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів.

На електродах автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів колектор-колектор транзисторів  $VT1$  і  $VT2$  виникає негативний диференціальний опір, який реалізується на спадаючій ділянці вольт-амперної характеристики автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів. Сама вольт-амперна характеристика автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів розраховується на основі нелінійної еквівалентної схеми пристрою із системи рівнянь Кірхгофа. Діапазон падіння знаходиться в діапазоні від 3В до 16В зі зміною струмів від 1мА до 8,5мА. Негативний диференціальний опір перетворює енергію постійного

електричного поля в енергію змінного електричного поля автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів, що дозволяє компенсувати втрати енергії в коливальному контурі пристрою.

Функція перетворення автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів, що описує залежність вихідної частоти пристрою від зміни концентрації газу, визначається на основі нелінійної схеми заміщення змінного струму, заснованої на електричній схемі (рис. 2.1) (та наведена в додатку А рис.4). Із системи рівнянь Кірхгофа, складених на основі нелінійної схеми заміщення пристрою на змінному струмі, загальний вихідний опір розраховується на електродах колектор-колектор транзисторів  $VT1$  і  $VT2$ . Систему рівнянь Кірхгофа було розв'язано за допомогою Matlab 9.4, що дозволило отримати значення повного вихідного імпедансу автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна складова імпедансу носить ємнісний характер. З рівняння, коли реактивна складова імпедансу автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів дорівнює нулю, визначаємо залежність вихідної частоти  $F_0(w)$  пристрою на зміну концентрації газу, який має вигляд

$$F_0(w) = \frac{1}{2\pi R_g(w)C_{ekv}(w)} \left[ \frac{R_g^2(w)C_{ekv}(w)}{L} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.12)$$

де  $R_g(w)$  – диференціальний негативний опір коливального контуру автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів,  $C_{ekv}(w)$  – еквівалентна ємності коливального контуру автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів,  $L$  – значення активної індуктивності автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів,  $w$  – концентрація вимірюваного газу. На рис. 2.2 (та показана в додатку А рис.5) наведено залежність вихідної частоти автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів від зміни концентрації газу метану  $CH_4$ . Газочутливий елемент виконаний на основі каналу SiC-FET, дослідження чого буде представлено в наступних підрозділах.

Чутливість перетворювача визначається на основі виразу (2.12) диференціюванням його аргументу  $w$  і описується формулою



$$S_{F_0}^W = \frac{R_g(w)C_{ekv}(w)\frac{dR_g(w)}{dw} + R_g^2(w)\frac{dC_{ekv}(w)}{dw}}{4\pi R_g(w)C_{ekv}(w)L\left[\frac{R_g^2(w)C_{ekv}(w)}{L} - 1\right]^{\frac{1}{2}}} - \frac{\left[\frac{R_g^2(w)C_{ekv}(w)}{L} - 1\right]^{\frac{1}{2}}\frac{dR_g(w)}{dw}}{2\pi R_g^2(w)C_{ekv}(w)} - \frac{\left[\frac{R_g^2(w)C_{ekv}(w)}{L} - 1\right]^{\frac{1}{2}}\frac{dC_{ekv}(w)}{dw}}{2\pi R_g(w)C_{ekv}^2(w)}. \quad (2.13)$$

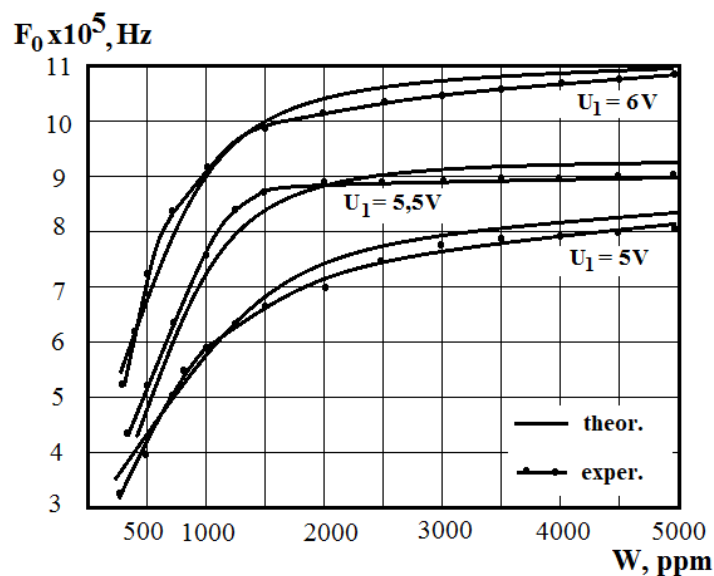


Рисунок 2.2 – Теоретична та експериментальна залежність вихідної частоти автогенераторного перетворювача від концентрації метану

Розрахунки показали, що за формулою (2.13) чутливість приладу знаходилася в діапазоні від 300 ppm до 1000 ppm 270 Гц/ppm, а в діапазоні від 1000 ppm до 5000 ppm – 120 Гц/ppm. Необхідні значення параметрів для теоретичних розрахунків отримано з [44, 45].

## 2.2 Дослідження газочутливого SiC-FET

На самому початку тестуються прості SiC-FET з двома контактами виснаженого типу, де затвор з'єднаний з джерелом, як показано на рис. 2.3., (та наведена в додатку А рис.6). Як можна побачити, конструкція включає заглиблений канал, що забезпечує більшу стабільність і міцність у суворих умовах, але ускладнює структуру.

Пристрій було розроблено та виготовлено фірмою ASCATRON AB,

Швеція. Датчики створені на пластинах SiC р-типу, а контактні площадки виготовлені з платини та титану. Кожна матриця містить три транзисторні структури з затвором, підключеним до джерела на рівні мікросхеми, а також тестову структуру, яка не використовується в цьому проекті, див. Рис. 2.3б. Розмір чіпа 2,1 мм x 1,9 мм. В якості каталітичної металізації затвора використовується пориста платинова плівка товщиною 25 нм, нанесена методом розпилення в атмосфері аргону при 50 мТорр. Сенсорний чіп наклеєний на керамічний нагрівач (Heraeus Holding GmbH, Ханану, Німеччина) разом з датчиком температури Pt-100 і встановлений на 16-контактному корпусі ТО-8.

Фотографія чутливого елемента показано на рис. 2.4. Електричні контакти між польовим транзистором і роз'ємом реалізуються за допомогою з'єднання золотого дроту. Використовуваний нагрівач Pt-6.8 із зовнішнім розміром 9,5 мм x 1,9 мм. Термічна постійна часу,  $\tau_{63}$ , становить від 2 до 3 секунд. Датчик температури Pt-100 використовується як еталонний датчик і для налаштування калібрувальної кривої нагрівача. Однак виміряна температура, очевидно, не є точною температурою чутливого шару.

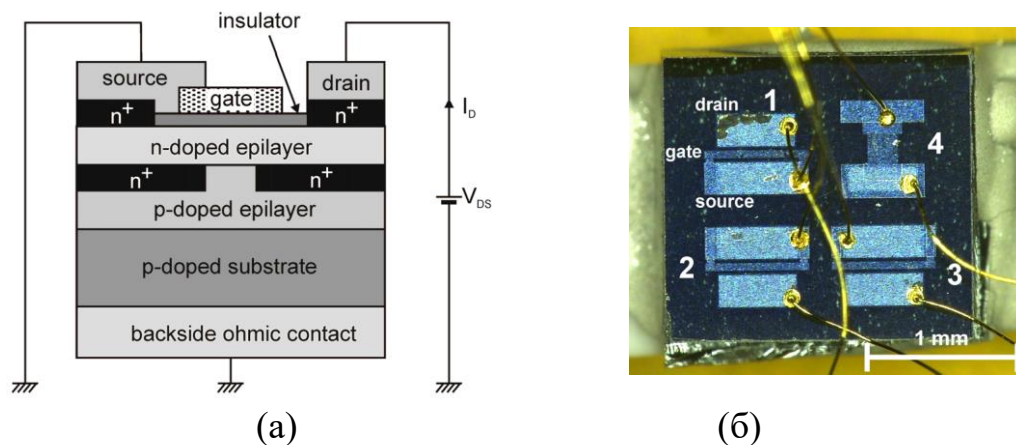


Рисунок 2.3 – (а) Вид поперечного перерізу SiC-FET із двополюсним виснаженням і (б) зображення матриці SiC, що містить три транзисторні структури (1–3) і одну тестову структуру (4)

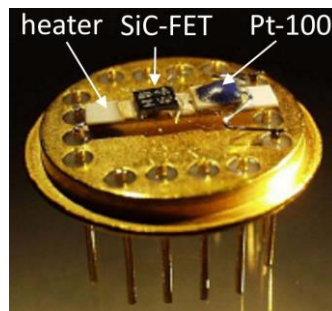


Рисунок 2.4 – Фотографія SiC-FET, встановленого на роз'єм ТО-8. Окрім вище наведених SiC-FET, також були використані SiC-FET

покращеного типу, як показано на рис. 2.5. Металізація затвора - 25 нм платина або 30 нм іридій. Обидва осаджені методом розпилення в атмосфері аргону при 50 мТорр. Монтаж такий же, як і для датчиків виснаженого типу. Приклад IV-кривої наведено на рис. 2.6, що показує вплив температури та реакцію на 500 ppm монооксиду вуглецю, CO. Зазвичай цей тип SiC-FET працює при постійному струмі витoku, наприклад, 100 мкА. Результуюче падіння напруги стік-витік реєструється як сигнал датчика.

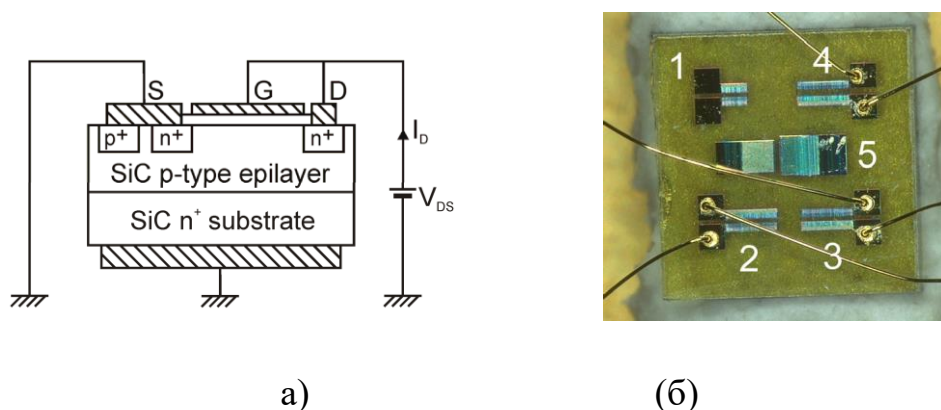


Рисунок 2.5 – (а) Вид поперечного перерізу SiC-FET з двома контактами та (б) зображення матриці SiC, що містить три транзисторні структури (2–4) і дві тестові структури (1, 5)

Розглянемо триконтактні транзисторні пристрої, як показано на рис. 2.6. (та наведена в додатку А рис.7) Датчики комерційно доступні через SenSiC AB, Kista, Швеція, а детальний опис процесу виробництва можна

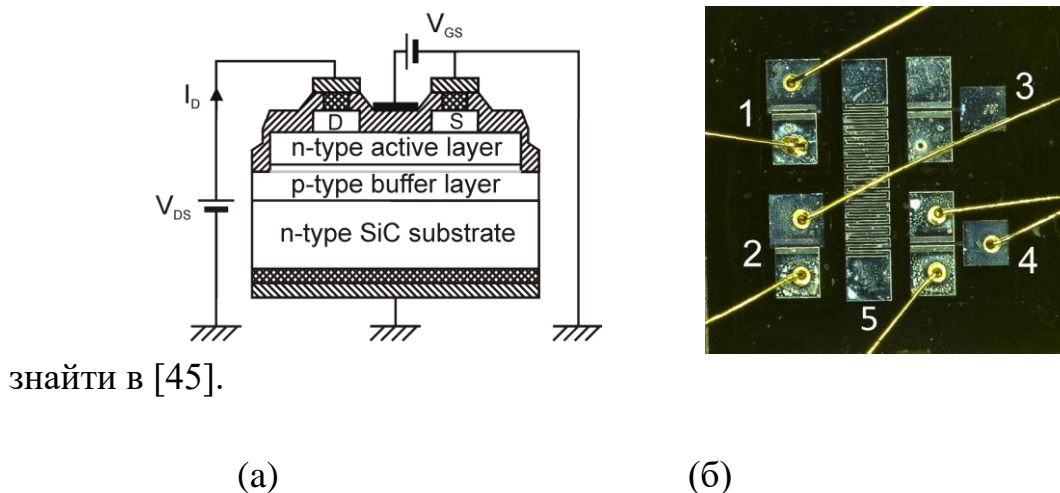


Рисунок 2.6 – (а) Поперечний переріз SiC-FET із виснаженням трьох контактів і (б) зображення матриці SiC, що містить дві транзисторні структури з двома висновками (1, 2) і дві транзисторні структури з трьома висновками (3, 4) і платиновий датчик температури (5)

Каталітична металізація затвора - пориста платина або іридій товщиною 25 нм і 30 нм відповідно. Пористий шар, включаючи тріщини, які з'являються під час осадження та відпалу, має розмір пор у діапазоні 0–30 нм завширшки та 0–200 нм завдовжки. Довжина затвора становить 10 мкм, а ширина затвора становить 300 мкм.

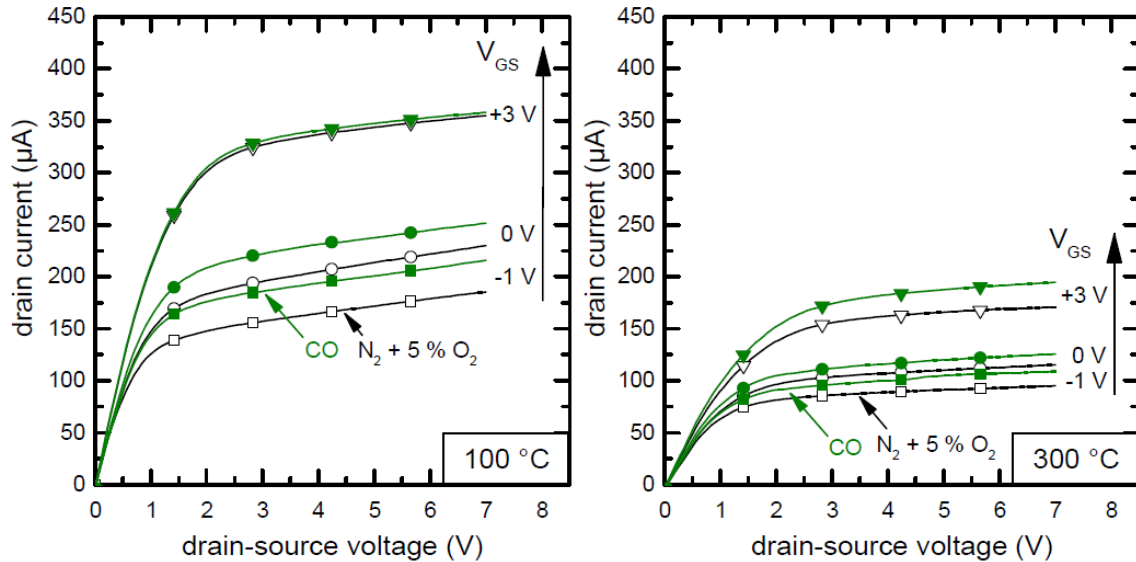


Рисунок 2.7 – Крива струм-напруга, IV, трививодного SiC-FET з виснаженням з платиновим затвором. Чорні відкриті символи позначають відповідь у сухому азоті з 5 % кисню, а зелені суцільні символи позначають відповідь з додатковими 500 ppm монооксиду вуглецю. (а) при 100 °C і (б) при 300 °C

На рис. 2.7 показані приклади вольт-напруги, IV, кривих платинового затвора SiC-FET. Як видно, струм насичення зменшується зі збільшенням температури і збільшується зі збільшенням зміщення затвора  $V_{GS}$ . Область насичення починається від 1 В до 2 В залежно від застосованого зміщення затвора та температури. На реакцію на окис вуглецю, CO, також впливає застосоване зміщення.

Слід зазначити, що значення струму насичення відрізняється від зразка до зразка, що мало впливає на поведінку датчика, це пов'язано з виробничим процесом. Деякі відмінні концентрації легування або товщини шару можуть викликати відмінності в струмі насичення.

Оскільки польові транзистори в найзагальнішому випадку є пристроями з чотирма полюсами (сток, витік, затвор і контакт підкладки), можливі кілька режимів роботи, наприклад постійний струм стоку або постійна напруга сток-витік. Стандартний MISFET має дві основні робочі області в залежності від зміщення затвора: лінійну область і область

насичення. Таким чином, перше питання, яке необхідно вирішити, полягає в тому, в якій області повинен працювати транзистор, тобто датчик. З теоретичної точки зору, слід віддавати перевагу області насичення, оскільки, взаємодія газу з датчиком змінює порогову напругу пристрою або, іншими словами, взаємодія газу призводить до внутрішнього зміщення затвора на додаток до зовнішнього зміщення.

Однак IV-крива MISFET майже плоска в області насичення, що вимагає постійної напруги стік-витік ( $V_{DS} = const$ ). Струм зміщення  $I_D$  записується як сигнал датчика. Не тільки зсув затвора впливає на ВАХ, але також і температура, яка справді зміщує ВАХ. Особливо, коли температура модулюється, робочу точку транзистора потрібно вибирати ретельно.

Нижче коротко описано різні режими роботи та їх переваги та недоліки для певних застосувань.

Стандартним режимом роботи для двополюсних пристроїв є вимірювання напруги стік-витік при постійному струмі, див. Рис. 2.8а. Крім того, часто зручніше вимірювати напругу з високою роздільною здатністю, ніж струм. У випадку двополюсного пристрою затвор підключається або до стоку, тобто до польового транзистора з виснаженням, або до витіку, тобто до польового транзистора з посиленням, що призводить до того, що транзистор завжди працює на початку насичення.

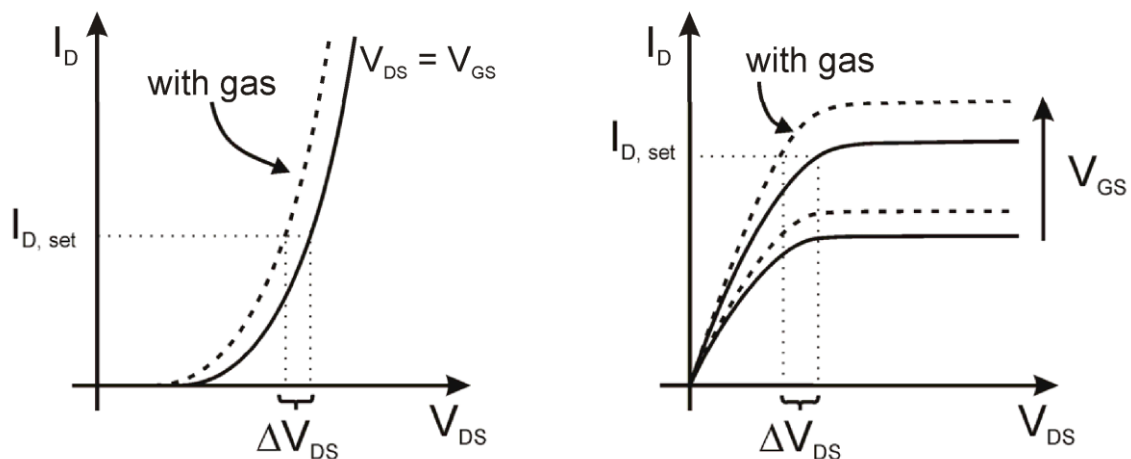


Рисунок 2.8 – Схема пояснення режиму роботи постійного струму стоку. (а) Для пристрою з двома клемми, де затвор з'єднаний зі стоком, і (б) для пристрою з трьома клемми

На відміну від цього, три кінцеві пристрої можуть працювати лише з постійним струмом витіку в лінійній області, оскільки IV-крива майже плоска в насиченні це залежить від  $V_{DS}$  в лінійній області, очевидно, що

вищий відгук можна отримати в кінці лінійної області, тобто на початку насичення. Для динамічної роботи, тобто коли або температура,  $i$  / або зміщення затвора модулюється, цей режим роботи незручний у використанні. Як показано на рис. 2.8b, вплив зсуву затвора на IV-криву набагато вищий, ніж зсув через реакцію газу. Те саме стосується температури, але в протилежному напрямку, тобто підвищення температури знижує IV-криву. Таким чином, при модулюванні температури або зміщення, коли струм стоку підтримується постійним, датчик може залишити лінійну область. Оскільки вольт-амперна крива є плоскою при насиченні, виміряна напруга стік-витік легко виходить за межі діапазону.

Розглянемо вплив постійної напруги витік-витік. Окрім струму стоку, також можна підтримувати постійну напругу стоку-витоку, що можливо в обох областях транзистора, див. Рис. 2.9. Однак, як обговорювалося раніше, робота в умовах насичення є кращим режимом через підвищений відгук датчика, див. Рис. 2.9b. Під час вимірювання насичення за допомогою трьохполюсних пристроїв напруга сток-джерело повинна підтримуватися постійною, а зміна струму витіку реєструється як сигнал датчика. Зазвичай робоча точка вибирається при глибокому насиченні, зазвичай  $V_{DS} = 4\text{ V}$ , особливо при зміні температури та/або зсуву. Для двополюсних пристроїв режим постійного струму є кращим через проблеми зі стабільністю, про які повідомлялося.

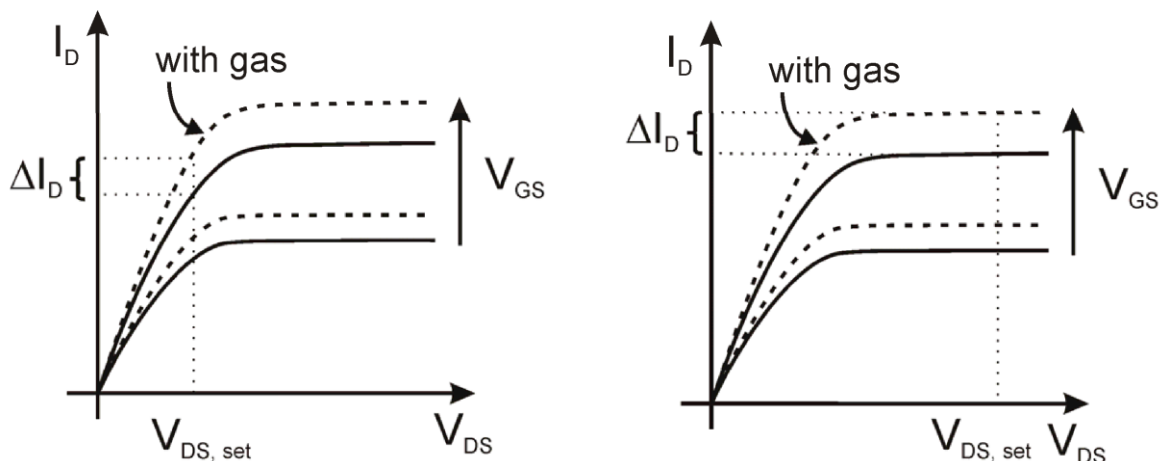


Рисунок 2.9 – Схема пояснення режиму постійної напруги стік-витік. (а) в лінійній області та (б) в області насичення

Регулювання зсуву воріт. Для триполюсних пристроїв є і третій варіант. І струм стоку, і напруга стік-джерело підтримуються постійними. Зміна IV-кривої через газову реакцію або зміну температури компенсується регулюванням застосованого зсуву затвора. Отже, реакцією датчика є зміна



зміщення затвора  $\Delta V_{GS}$ . В принципі, цей режим роботи безпосередньо вимірює зміну порогової напруги пристрою. Однак, оскільки зміщення затвора змінюється безперервно в цьому режимі, це позбавляє можливості модулювати цей параметр за наміром. Таким чином, цей режим роботи є більш науково актуальним для вивчення механізму чутливості на поверхні. Його не можна використовувати для підвищення селективності або для вивчення впливу застосованого зміщення затвора.

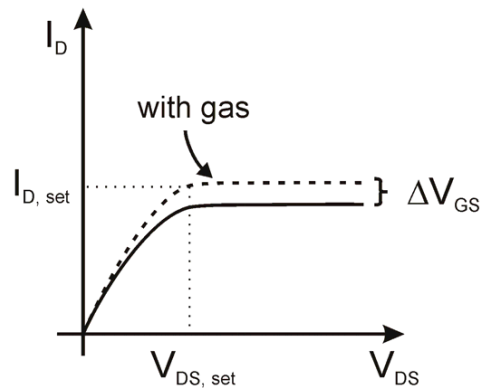


Рисунок 2.10 – Схема пояснення постійного режиму роботи, відповідно постійного струму стоку та постійної напруги стік-витік шляхом регулювання зміщення затвора

Вибір режиму роботи є вирішальним моментом і залежить від конкретних обставин, наприклад від того, який тип датчика FET використовується та чи він працює в статичному чи динамічному режимі. Для двополосників слід вибрати режим постійного струму через підвищену стабільність. Це справедливо як для постійної температури, так і для модуляції температури. У разі трьохполосних пристроїв датчик повинен працювати в режимі насичення, особливо якщо температура та/або зсув модулюються. Потім потрібно вибрати режим постійної напруги, де вимірюється струм стоку. Однак у деяких випадках, коли явно потрібен постійний струм або якщо струм не можна виміряти з високою роздільною здатністю, датчик може працювати в кінці лінійної області, тобто на початку насичення, у режимі постійного струму.

### 2.3 Температурна модуляція SiC-FET

Вибираючи температурний цикл для застосування, є деякі аспекти, які необхідно враховувати. Зазвичай цикл має охоплювати широкий температурний діапазон, щоб бути вибіркоким для різноманітних газів. Ця

вимога часто суперечить прийнятній довжині циклу. Оскільки концентрація досліджуваного газу повинна бути постійною протягом циклу, існує сильна потреба в розробці досить коротких циклів. Для сенсорів із довгою температурною константою часу, наприклад через товсту підкладку, типова тривалість циклу становить від 20 до 90 секунд, тоді як для тонкоплівкових або мембранних датчиків цикли часто не перевищують кількох секунд. Важлива не тільки довжина, але і форма циклу. Для застосувань, де температура навколишнього середовища та/або потік змінюються, різні температури, що охоплюються циклом, повинні підходити по нахилу, а не різким крокам. Завдяки досить повільним змінам температура датчика завжди знаходиться під контролем і, отже, менш чутлива до змін навколишнього середовища. Це особливо важливо для охолодження після фази високої температури. Однак часто багато інформації отримують, коли температура швидко змінюється.

Щоб дослідити, чи взагалі можлива температурна модуляція для газочутливих польових транзисторів, використовується досить простий цикл, показаний на рис. 2.11а. Цикл складається з чотирьох температурних плато, що охоплюють діапазон температур від 100 °C до 330 °C. Цей цикл використовується для вимірювання типових вихлопних газів, наприклад, монооксиду азоту, NO, монооксиду вуглецю, CO, пропену, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> як вуглеводень, а також аміаку, NH<sub>3</sub>, який становить інтерес для селективного каталітичного відновлення, SCR, систем, де є сечовина. впорскується у вихлоп, щоб зменшити оксиди азоту. Крім того, водень, H<sub>2</sub>, також використовується, оскільки перший газовий датчик FET був представлений як датчик водню. На рис. 2.11b наведено динамічний відгук датчика, який в основному показує, як форма відгуку змінюється під час впливу газу.

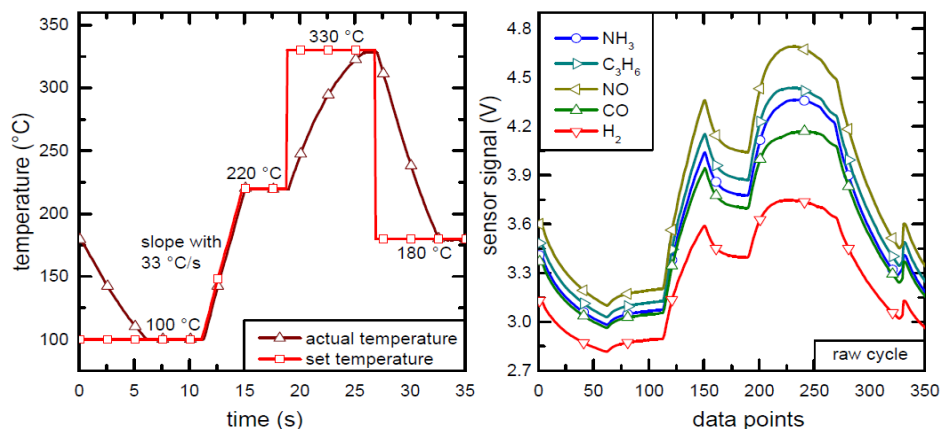


Рисунок 2.11 - (а) Застосований температурний цикл, що показує задану температуру (червоний) і фактичну температуру, виміряну додатковим Pt-100 (коричневий) і (б) динамічний відгук датчика для 25 ppm NH<sub>3</sub>, 75

ppm C3H6, 100 ppm NO, 400 ppm CO та 400 ppm H2 в сухому азоті

Щоб зменшити вплив дрейфу, спочатку дані нормалізуються. У режимі роботи з температурним циклом, TCO, нормалізація здійснюється на циклічній основі, що означає, що кожен цикл нормалізується окремо. Через те, що нормалізація підкреслює певні частини циклу, тоді як інші частини застосована нормалізація, яка повинна бути ретельно обрана. Оскільки в цьому дослідженні методологія TCO застосована до датчиків FET вперше, використовуються стратегії нормалізації, відомі для датчиків MOX. Найпоширеніша нормалізація для датчиків оксиду металу – встановлення середнього значення циклу на одиницю.

Відповідний нормалізований динамічний відгук датчика наведено на рис. 2.12a. Різниця у відгуках датчиків газів зменшується порівняно з необробленим сигналом, див. Рис. 2.12b, але все ще значний. Типовим явищем є те, що нормалізація може зменшити дрейф датчика, але в той же час деяка інформація втрачається. Загалом, для датчиків SiC-FET вплив температури на сигнал датчика є набагато сильнішим, ніж зміна через газову реакцію. Це робить визначення інтервали, де іноді складно виділити ознаки. Таким чином, може бути корисним подивитися на сигнал датчика різниці, як показано на рис. 2.12b. Спочатку відповідь датчика нормалізується, наприклад, шляхом встановлення середнього значення циклу до одиниці, а потім із кожного циклу віднімається середній еталонний цикл. Як правило, еталонним є фон, тобто газ-носіє, але не обов'язково.

Різниця (нормалізована) відповідь датчика розраховується як

$$\Delta V_{DS} = V_{DS}^{normalized}(gas) - V_{DS}^{normalized}(reference)$$

Завдяки цьому зміни, спричинені газовою реакцією, висвітлюються, а вплив зміни робочої температури або застосованого зміщення затвора зникає, що значно полегшує визначення інтервалів.

Щоб розрізнити вибрані гази за допомогою розпізнавання образів, важливо спочатку виділити ознаки. Можна використовувати саму відповідь датчика як вхідні дані для розпізнавання образів, але в контрольованому навчанні, наприклад, LDA, завжди існує проблема надмірної підгонки. Таким чином, розмірність вхідних даних має бути невеликою порівняно з кількістю спостережень. Як згадувалося раніше, існує кілька способів виділення ознак, і одним із найбільш перспективних методів є використання характеристик, що описують форму, наприклад, нахилів і середніх значень у вибраних частинах. Тому цикл ділиться, наприклад, на вісім інтервалів, як показано на

рис. 2.12. У кожному з цих інтервалів нахил і середнє значення відгуку датчика обчислюються та витягуються як характеристики. Потім ці функції використовуються для розпізнавання образів з метою розрізнення. Для дискримінації не має значення, якщо такі характеристики, як середні значення та нахили, обчислюються з нормалізованої реакції датчика, див. Рис. 2.12a, або з різницевого сигналу після нормалізації, див. Рис. 2.12b.

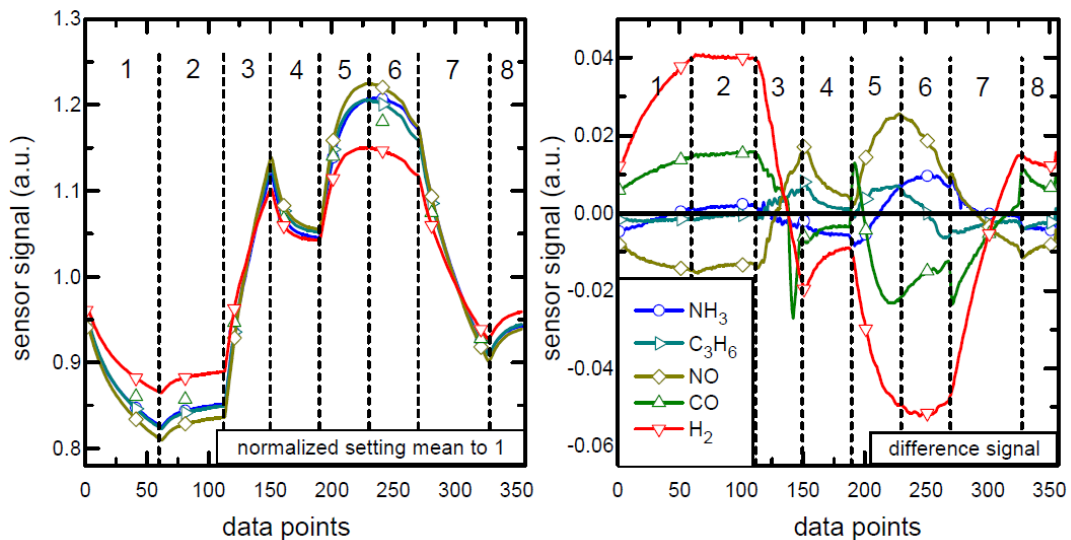


Рисунок 2.12 (а) Нормована динамічна відповідь датчика при встановленні середнього значення циклу до одиниці з інтервалами ознак, і (b) різниця (нормалізована) відповідь датчика

#### 2.4 Розрізнення та кількісна оцінка

Після виділення ознак із динамічної реакції датчика дискримінація виконується за допомогою лінійного дискримінантного аналізу (LDA). На першому етапі п'ять вибраних газів розділяються. Як видно на рис. 2.13a, можливе розрізнення 400 ppm H<sub>2</sub>, 400 ppm CO, 75 ppm C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, 100 ppm NO та 25 ppm NH<sub>3</sub> у сухому азоті. Групи добре розділені на діаграмі розсіювання LDA. Водень і аміак розташовані далі від інших груп, що вказує на те, що датчик має вищу селективність до аміаку та водню. Можливе не лише розрізнення п'яти газів, а й кількісне визначення, як показано для прикладу аміаку на рис. 2.13b.

LDA спочатку тренується з 12,5, 25, 37,5 і 50 ppm аміаку (відкриті символи). Групи знову добре розділені першою дискримінантною функцією DF1. На наступному кроці отримані коефіцієнти LDA, тобто навчальні дані, використовуються для алгоритму для проектування невідомих точок даних на ту саму діаграму розсіювання. Нові точки, що відповідають 0 ppm, тобто

чистого азоту (напівтверді символи), були спроектовані поруч із найнижчою концентрацією, 12,5 ppm, яка використовується для навчання. Це тест правдоподібності та хороший показник стабільності дискримінації. Якщо група 0 ppm буде розташована в іншому місці на діаграмі розсіювання, дискримінація може ґрунтуватися не на реакції газу, а на шумі чи дрейфі. Визначення концентрації можна було б виконати лише за допомогою значення DF1. Це також можливо для інших газів, а також з киснем у фоновому режимі.

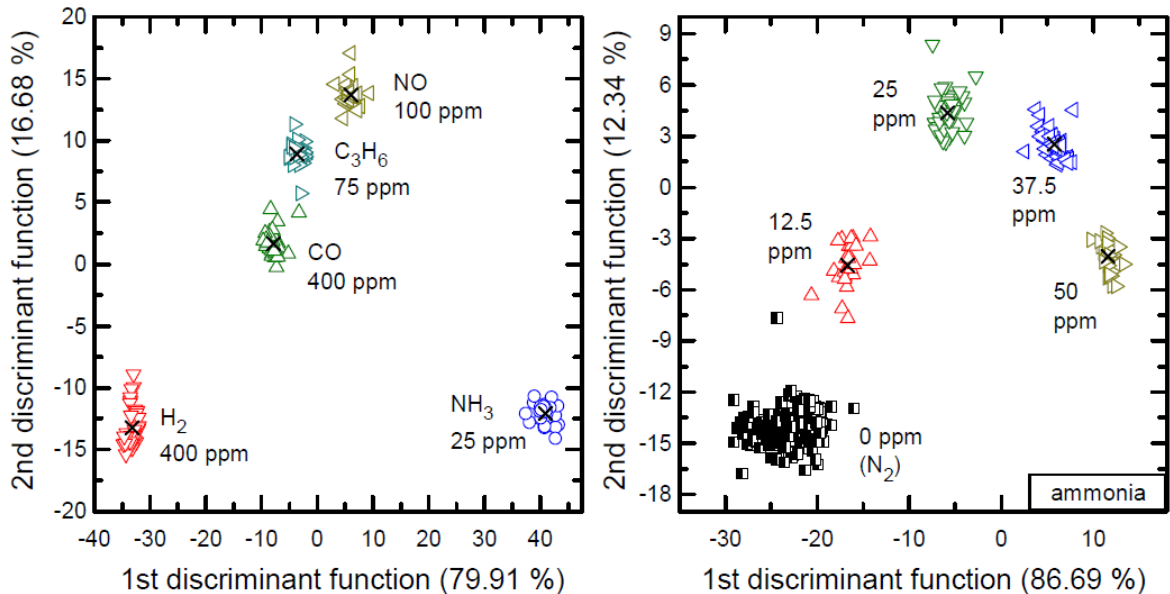


Рисунок 2.13 - (а) Дискримінація  $H_2$ ,  $CO$ ,  $C_3H_6$ ,  $NO$  та  $NH_3$  у сухому азоті та (б) кількісне визначення різних концентрацій  $NH_3$ . Група 0 ppm, тобто чистий азот

Щоб підтвердити запропонований підхід ТСО, розрізнення п'яти газів див. Рис. 2.13а, де кожна група містить лише одну концентрацію, розглядається знову. Отримані LDA-коефіцієнти від цієї дискримінації тепер застосовуються до різних, невідомих концентрацій пропену (напівтверді символи на рис. 2.14а). Можна помітити, що прогнозовані групи, що представляють 25, 50 і 100 ppm  $C_3H_6$ , є досить близькими до групи навчання (75 ppm  $C_3H_6$ ). Класифікатор k-Nearest Neighbor, kNN, з  $k = 3$  дає правильний рівень класифікації 82,3 %. Таким чином, підхід ТСО з вибраними характеристиками представляє характеристики газу.

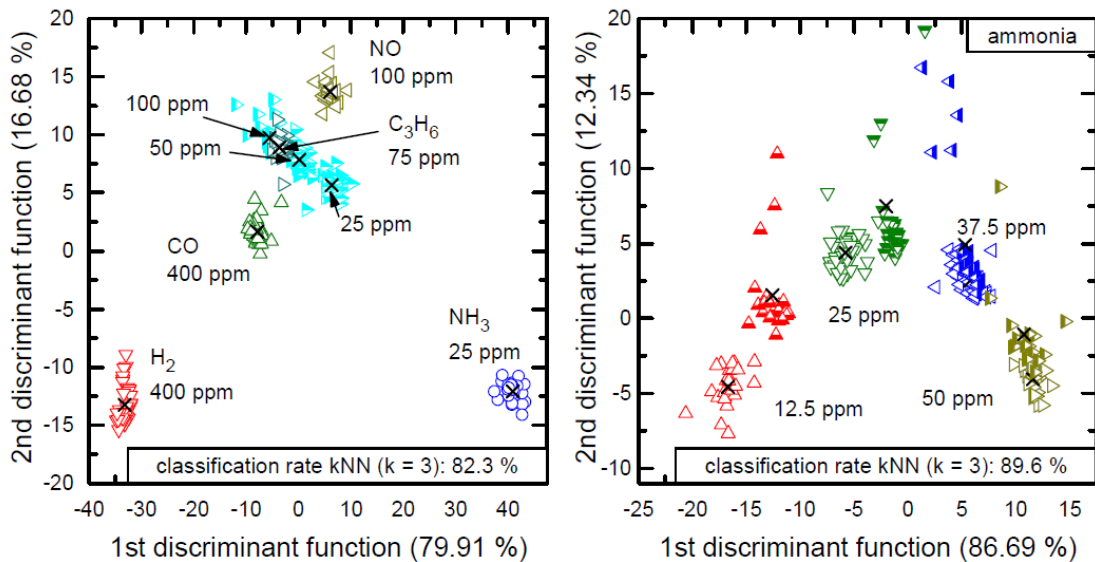


Рисунок 2.14 - (а) Перевірка підходу ТСО та (б) дослідження стабільності.

Навчальні дані позначені відкритими символами, прогнозовані дані – напівсуцільними символами у сухому азоті

Повторюваність і стабільність розрізнення досліджується на основі кількісного визначення аміаку, як показано на рис. 2.13. Вимірювання було повторено через вісім днів, і нові дані проєктуються з використанням коефіцієнтів LDA від дискримінації, показаної на рис. 2.14. Можна спостерігати, див. На рис. 2.14b видно, що проєктовані групи (напівсуцільні символи) розташовані близько до відповідної навчальної групи (відкритий символ). Видно невеликий дрейф і є кілька викидів, які, ймовірно, є першими циклами кожного впливу газу, коли датчик ще не стабілізовано. Однак це лише процес обкатки. KNN-класифікатор з  $k = 3$  призводить до правильного рівня класифікації 89,6 %.

## 2.5 Модуляція зсуву затвора SiC-FET

Зміщення затвора впливає на чутливі властивості газочутливого польового транзистора. Крім того, значуща для газу інформація міститься в перехідній реакції датчика при зміні прикладеного зсуву. Для більш систематичного вивчення впливу змінного затвора його лінійно змінюють від -3 В до +7 В і знову знижують протягом 900 с кожен, див. Рис. 2.15 синя крива (та наведена в додатку А рис.8). Цей симетричний цикл зміщення затвора у формі піраміди дозволяє вивчати ефекти гістерезису. Поява гістерезису в ТСО є хорошим показником того, що додаткова інформація міститься в перехідній поведінці датчиків, яку можна використовувати для підвищення селективності.



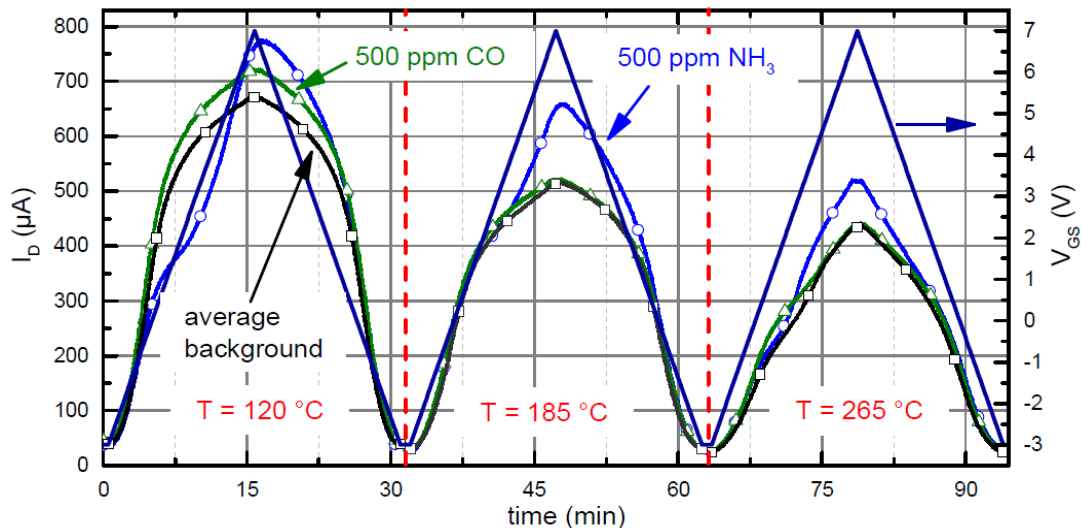


Рисунок 2.15 – Застосована розгортка зсуву затвора (синій) і відповідна відповідь датчика на 500 ppm аміаку та 500 ppm монооксиду вуглецю в сухому синтетичному повітрі при трьох температурах

Згаданий цикл зміщення затвора повторюється тричі при 120 °C. Потім температуру підвищують до 185 °C, цикл зміщення затвора повторюють тричі, перш ніж температуру підвищують до 265 °C. Під час другого циклу зміщення при кожній температурі датчик піддається впливу тестового газу. На рис. 2.15 показано лише другий цикл при 120 °C, 185 °C і 265 °C відповідно. Для кожної температури надається відповідна відповідь датчика в газі-носії (сухе синтетичне повітря), 500 ppm монооксиду вуглецю та 500 ppm аміаку. Можна спостерігати, що відгук датчика для двох газів змінюється по-різному із застосованим зміщенням. Уже тут можна побачити, що датчик показує залежний від газу гістерезис.

При побудові графіка струму витік-витік від прикладеного зміщення затвора гістерезис датчика стає чітко видимим, як показано на рис. 2.16а і с. Для чистого азоту гістерезис майже не помітний, тоді як для 500 ppm аміаку або 500 ppm монооксиду вуглецю гістерезис виражений з максимальною висотою 80 мкА і 140 мкА відповідно, при зміщенні затвора близько +3,5 В і 185 °C. Для вищої температури, наприклад 265 °C, ширина та висота гістерезису зменшуються. Щоб висвітлити газову залежність кривої гістерезису, різницевий сигнал  $\Delta I_D$  було розраховано наступним чином

$$\Delta I_D = I_D(gas) - I_D(background)$$

де  $I_D(gas)$  – крива гістерезису в атмосфері тестового газу, а  $I_D(background)$  крива гістерезису у фоновому режимі, наприклад, у сухому азоті. Відповідні різницеві криві гістерезису для NH<sub>3</sub> і CO в сухому азоті подано на рис. 2.16b



і d. Близько 0 В стає очевидним пік, який можна інтерпретувати як ефект, що залежить від полярності, наприклад, перевертання станів пастки [116]. При 265 °С точки перетину з'являються як для аміаку, так і для монооксиду вуглецю, що вказує на те, що задіяні принаймні два різні та, ймовірно, конкуруючі процеси з різними постійними часу. Не тільки температура впливає на форму кривої гістерезису, але також рівень кисню та вологості, див. Рис. 2.16. Кисневий фон і сильна вологість впливають на реакцію CO, як показано на рис. 2.16а, тоді як вони мають лише незначний вплив на реакцію NH<sub>3</sub>.

Однією з причин цього може бути те, що CO як дуже реакційно здатний відновний газ взаємодіє з негативно зарядженими іонами кисню на поверхні датчика. При низьких температурах і досить високій концентрації CO платинова поверхня транзистора повністю покрита CO, тобто адсорбований кисень відсутній, тоді як при високих температурах або низькому співвідношенні CO/O<sub>2</sub> вона майже повністю покрита адсорбованим киснем. За наявності вологості див. Рис. 2.16b, NH<sub>3</sub>, особливо, для негативного прикладеного зміщення воріт значно змінюється.

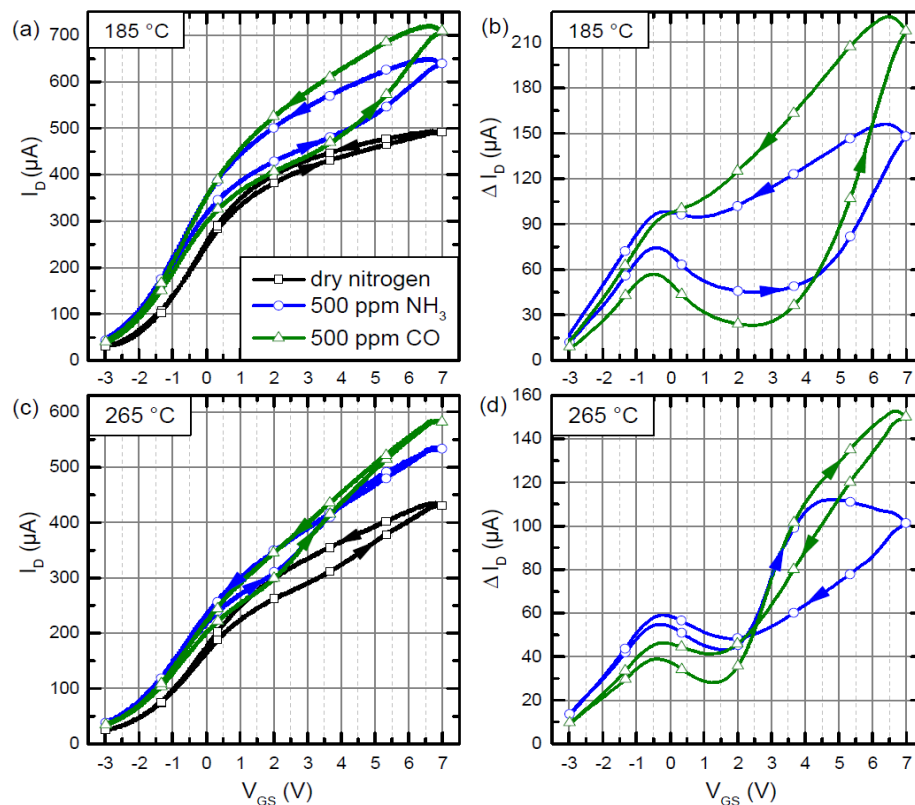


Рисунок 2.16 – Гістерезис криві для NH<sub>3</sub> і CO в сухому N<sub>2</sub> при розгортці зсуву затвора від -3 В до +7 В за 900 с і назад. (а) Абсолютний сигнал при 185 °С, (б) різницевий сигнал при 185 °С, абсолютний сигнал при 265 °С і (д) різницевий сигнал при 265 °С

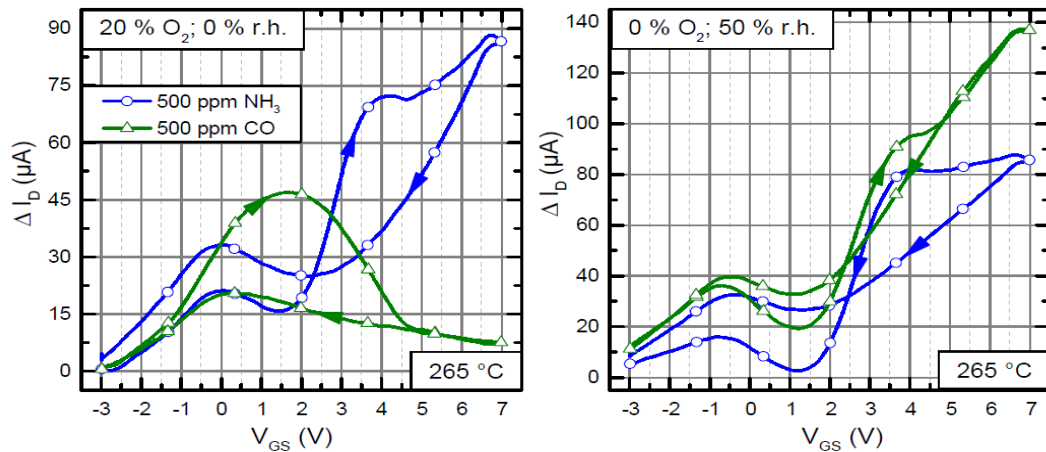


Рисунок 2.17 – Різницеві криві гістерезису для NH<sub>3</sub> і CO при 265 °C при зміні зсуву затвора від -3 В до +7 В за 900 с і назад. (а) У сухому синтетичному повітрі, тобто 20 % O<sub>2</sub> та 0 % вологості, та (б) в азоті з відносною вологістю 50 % при 20 °C

При безперервній зміні прикладеного зміщення затвора спостерігається залежний від газу гістерезис. Поки що не зовсім зрозуміло, що викликає гістерезис і що відбувається при зміні зсуву. Однак є кілька можливих пояснень, які будуть розглянуті далі. Загалом, явище гістерезису також спостерігається для інших датчиків ефекту поля, наприклад, підвісних затворів або пристроїв нанопольових транзисторів. У випадку SiC-FET, молекули також можуть безпосередньо адсорбуватися на ізоляторі. Як обговорювалося, можуть мати місце різні види адсорбції, тоді як тільки хемосорбція включає інжекцію заряду в ізолятор, тобто оксид, що призводить до поверхневих заповнених станів. При зміні застосованого зсуву затвора ці пастки можна частково перевернути. Усі вони впливають на напругу плоскої смуги  $V_{FB}$  і, отже, на порогову напругу  $V_{th}$  пристрою. Якщо через будь-який зовнішній вплив щільність цих зарядів змінюється, IV-крива датчика зміниться. Повідомлялося, що на  $Q_f$ ,  $Q_{it}$  і  $Q_m$  не впливає зміщення затвора. Тим не менш, у випадку сенсорного пристрою, де оксид піддається впливу навколишнього середовища і, таким чином, може взаємодіяти з газами, щільність деяких із цих зарядів може змінюватися, зокрема пасток інтерфейсу  $Q_{it}$  та оксидних пасток  $Q_{ot}$ .

SiC-FET, які використовуються в цьому дослідженні, мають пористі платинові затвори. У атмосфері, що містить кисень, поверхня частково покрита іонами кисню, хемосорбованими як платиною, так і ізолятором. Хоча основний напрямок перпендикулярний до поверхні, електричне поле може призвести до перетікання адсорбованого кисню з платини на ізолятор і навпаки, тобто з ізолятора на платину (зворотне перетікання). Цей рух іонів

на поверхні також змінює електричне поле в ізоляторі, що лежить під ним, і, отже, носії заряду в каналі транзистора. Однак, оскільки гістерезис у повітрі невеликий порівняно з атмосферою тестового газу, це може мати лише незначний вплив. Вплив кисню на каталізатор або з нього також передбачає зміну активних центрів на каталізаторі. Це безпосередньо впливає на реакцію на різні гази, так що зміна застосованого зсуву впливає на поведінку датчика. Крім кисню, в принципі, кожна адсорбована речовина на поверхні може рухатися, і якщо цей рух призводить до зміни електричного поля, це впливає на IV-криву FET. Цей ефект зазвичай не сильно залежить від полярності, а скоріше залежить від градієнта зсуву.

Інша теорія передбачає реструктуризацію поверхні сенсора. Оскільки каталітичний шар дуже пористий і має товщину лише 25 нм, прикладене поле може переміщувати атоми платини на поверхні. Це означає, що структура каталізатора змінюється, а разом з тим і кількість центрів адсорбції або їх каталітична активність. Рух заряду, наприклад, іонів кисню або атомів, наприклад, платини, на поверхні зазвичай залежить не дуже від полярності зміщення, а скоріше від градієнта зсуву на відміну від перевертання станів пастки.

Усі запропоновані процеси є повільними, починаючи від кількох секунд до навіть хвилин, що відповідає спостережуваним ефектам. Однак для пояснення гістерезису необхідні більш глибокі дослідження. Особливо, оскільки на кривих гістерезису також з'являються точки перетину, ймовірно, задіяно кілька процесів на різних часових масштабах. Наприклад, криві гістерезису в сухому азоті, див. на рис. 2.15 показана залежність від випробувального газу в максимум одній точці перетину, тоді як на кривих гістерезису з відносною вологістю 50 % див. рис. 2.16, видно дві точки перетину. Таким чином, кілька процесів, які залежать від умов навколишнього середовища, відбуваються під час розгортки застосованого зсуву затвора.

## 2.6 Моніторинг вихлопних газів – виявлення NOx

На основі результатів попередніх досліджень, для моніторингу вихлопів використовується циклічна робота SiC-FET. У цьому дослідженні використовуються датчики SiC-FET з двома контактами. Далі показані лише результати SiC-FET з платиновим затвором, тоді як результати SiC-FET з іридієвим затвором. Датчики працювали в режимі постійного струму, тобто  $I_D = const. = 100 \text{ мкА}$ . Як цільові гази монооксид азоту, NO, і діоксид азоту, NO<sub>2</sub>, вибираються. Тестовий профіль визначається з постійним

співвідношенням 3:1 між NO та NO<sub>2</sub> 10:1, у подальшому називається NO<sub>x</sub>, охоплюючи діапазон концентрацій від 50 ppm до 200 ppm NO з кроком 25 ppm, що відповідає 5 ppm до 20 ppm NO<sub>2</sub>. В якості заважаючих газів обрано типові компоненти вихлопних газів, такі як окис вуглецю, CO, етен, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, як представники вуглеводнів, а також аміак, NH<sub>3</sub>, який використовується в системах селективного каталітичного відновлення, SCR.

Визначається стандартна фонові суміш, що складається з типових вихлопних газів, тобто 600 ppm CO, 50 ppm C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> і 60 ppm NH<sub>3</sub>; пор. Рис. 2.17 позначка «стандарт». Газ-носіє – це 10 % кисень в азоті з відносною вологістю 50 %, rh, при 20 °C. На початку кожного профілю NO<sub>x</sub> короткий вплив NO<sub>x</sub> використовується як початковий пік, щоб мати чітко визначену початкову ситуацію, див. Рис. 2.17. Однак цей початковий вплив не використовується для оцінки. Стандартний профіль випробувань, як описано вище, використовується для визначення відповідного температурного циклу. Однак у реальному застосуванні фон може змінитися. Щоб імітувати мінливий фон, стандартний тестовий профіль розширено, див. Рис. 2.17 (та наведена в додатку А рис.9). Для кожного з трьох фонових газів, тобто CO, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> і NH<sub>3</sub>, використовуються чотири концентрації, відмінні від стандартної суміші, див. Таблиця 7. У кожному модифікованому фоні три NO<sub>x</sub>, тобто концентрації NO/NO<sub>2</sub> 50/5 ppm, 125/12,5 ppm і 200/20 ppm, застосовуються до датчика, як показано на рис. 2.18. Цей розширений газовий профіль використовується для дослідження впливу мінливого фону.

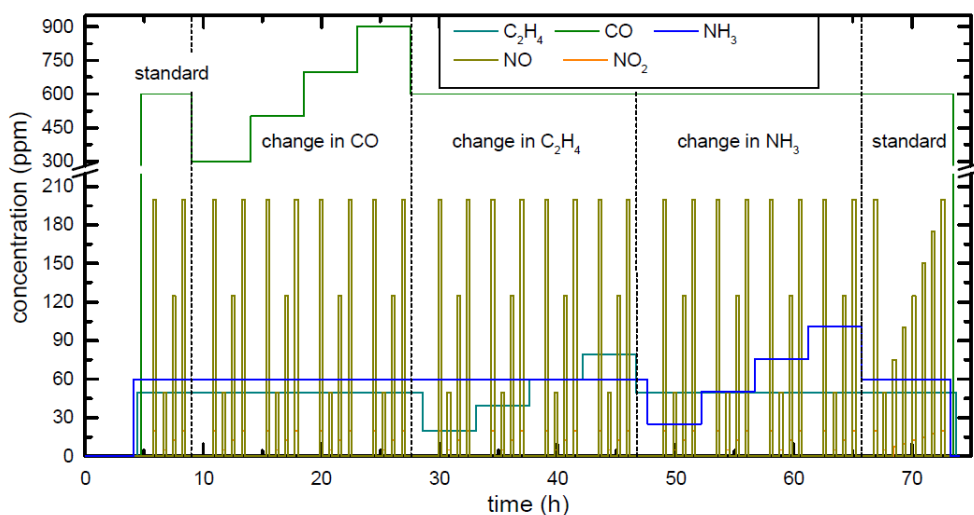


Рисунок 2.18 – Профіль тестового газу. Співвідношення між NO і NO<sub>2</sub> зберігається на постійному рівні 10:1. Діапазон концентрацій NO/NO<sub>2</sub> починається з 50/5 ppm і збільшується з кроком 25/2,5 ppm до 200/20 ppm. Стандартна суміш складається з 600 ppm CO, 50 ppm C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> і 60 ppm NH<sub>3</sub> в атмосфері 10 % кисню в азоті

У розширеному профілі передбачається, що концентрація лише одного з фонових газів змінюватиметься одночасно. Це спрощення, щоб розробити методологію без значного розширення профілю газу та часу вимірювання. Крім того, співвідношення між NO та NO<sub>2</sub> залишається постійним, що може бути не так у реальному застосуванні.

Однією з можливостей пристосувати цикл до конкретного застосування є використання точок максимуму чутливість/відповідь на тестові гази як плато в циклі. Щоб знайти відповідний температурний цикл, відповідь датчика на 100 ppm NO і 10 ppm NO<sub>2</sub> у стандартній суміші інших вихлопних газів, вивчається як функція робочої температури. Для цього температура безперервно підвищується від 100 °C до 400 °C протягом 45 хв, тобто 6,7 °C/хв, див. Рис. 2.18. Щоб підкреслити точки максимального відгуку датчика, різницю сигналу датчика  $\Delta V_{DS} = V_{DS\text{mixture}} - V_{DS\text{NO/NO}_2}$  для NO і NO<sub>2</sub> показано на рис. 2.19. На основі різницевого сигналу виділяються температури високого відгуку датчика.

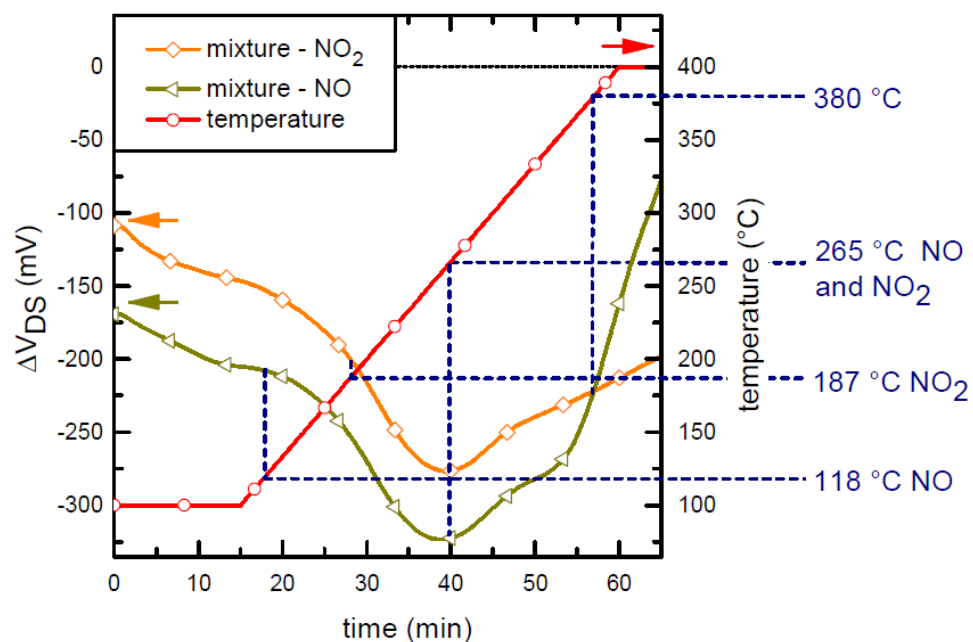


Рисунок 2.19 – Різниця у відгуку датчика між сумішшю 600 ppm CO, 50 ppm C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>i 60 ppm NH<sub>3</sub>i 100 ppm NO (жовті трикутники) або 10 ppm NO<sub>2</sub>(апелсиналмази) у вологій атмосфері, тобто 50 % відносної вологості, 10 % кисню в азоті. Температура лінійно підвищується від 100 °C до 400 °C за 45 хв (червоні кола)

При 118 °C різницевий сигнал для NO залишається майже постійним для невеликого температурного діапазону, а потім показує точку перегину, яка є ознакою того, що ця температура, можливо, представляє дискримінаційну інформацію. Також визначається температура 187 °C,

оскільки різницевий сигнал для NO<sub>2</sub> має великий градієнт. Максимальний відгук датчика для NO та NO<sub>2</sub> досягається при 265 °С. Для температури

У циклічній роботі часто корисно включити фазу високої температури в цикл, щоб «очистити» поверхню датчика. При високих температурах швидкість десорбції адсорбованих речовин, які просто блокують місця адсорбції на поверхні сенсора, вища. Хоча карбід кремнію стабільний до 1000 °С, найбільшою проблемою для виготовлення високотемпературних пристроїв є омичні контакти, а вище 400 °С пориста платина на затворі польового транзистора починає реструктуризуватися. Таким чином, вибирається температура очищення 380 °С, яка є компромісом для достатньо високої температури та температури, яка не змінює морфологію чутливого шару. Крім того, відгук датчика при 380 °С все ще досить високий, тому дані цієї частини температурного циклу також можна використовувати для дискримінації. Фактично, криві відповіді для NO та NO<sub>2</sub> перетинаються при 380 °С із зменшенням відповіді для NO, див. рис. 2.18, з якого видно, що чутливість до NO при цій температурі нижча, ніж для NO<sub>2</sub>.

## 2.7 SiC-FETs для застосування вимірювання якості повітря в приміщенні

У цьому підрозділі досліджуються польові транзистори на основі карбиду кремнію, SiC-FET, для застосування в якості повітря в приміщеннях, де необхідно виявити леткі органічні сполуки, ЛОС, у низькому діапазоні часток на мільярд, часток на мільярд. Дискримінація виконується за допомогою лінійного дискримінантного аналізу (LDA) і часткового найменшого квадрата – дискримінантного аналізу (PLS-DA). Кількісне визначення ЛОС виконується за допомогою LDA та часткової регресії найменших квадратів.

Виявлення летких органічних сполук. У цьому дослідженні використовуються триконтактні сенсори SiC-FET типу виснаження з пористою платиною товщиною 25 нм або пористим іридієм товщиною 30 нм. Датчики працюють у лінійній області на початку насичення, що дозволяє працювати з постійним струмом. Причина вибору лінійної області замість області насичення пояснюється вимірювальним обладнанням, а не фізикою датчика. Область насичення теоретично забезпечує вищу чутливість SiC-FET, але вимагає постійної роботи напруги. Через те, що використовувані апаратні плати використовують лише 10-бітний АЦП для вимірювання струму, але 14-бітний АЦП для вимірювання напруги, більш висока роздільна здатність може бути досягнута, коли датчик працює в режимі

постійного струму, що неможливо в насиченості. Оскільки очікувана відповідь датчика для низьких концентрацій ЛОС досить мала, робота постійного струму на початку насичення є обраною. Попередні результати з модифікованою апаратною платою та SiC-FET, які працюють в області насичення.

Польові транзистори з карбіду кремнію досі не досліджувалися для виявлення низьких концентрацій летючих органічних сполук. Таким чином, для перших досліджень використовуються досить прості температурні цикли. Кожен цикл складається з трьох температурних плато, кожне з яких має довжину 15 с, як показано на рис. 2.19. Для SiC-FET з платиновим затвором 220 °C, 200 °C і 180 °C, а для SiC-FET з іридієвим затвором 350 °C, 300 °C і 250 °C вибрано через те, що ці датчики зазвичай демонструють хорошу чутливість до різних газів у цьому діапазоні температур. Оскільки датчики повинні працювати на початку насичення, яке починається близько 1 В, див. На рис. 2.20 можливий температурний діапазон обмежений, оскільки зміна температури сильно впливає на базову лінію датчика. У будь-якому випадку, цикли використовуються з метою розрізнення, а не пошук оптимальної робочої температури – принаймні в цьому підрозділі, в якому вивчається придатність SiC-FET для застосування в якості повітря в приміщенні, IAQ. Базову лінію можна регулювати за допомогою встановленого струму стоку та застосованого зміщення затвора та/або підкладки. Однак, оскільки зміщення затвора також впливає на чутливість датчиків, залишається обґрунтованим, щоб обмежити кількість відкритих параметрів для перших досліджень. Як показано на рис. 2.20а, сигнал датчика (чорні кружечки) слідує за зміною температури з максимумом 0,95 В при 220 °C і мінімумом приблизно 0,55 В при 180 °C.

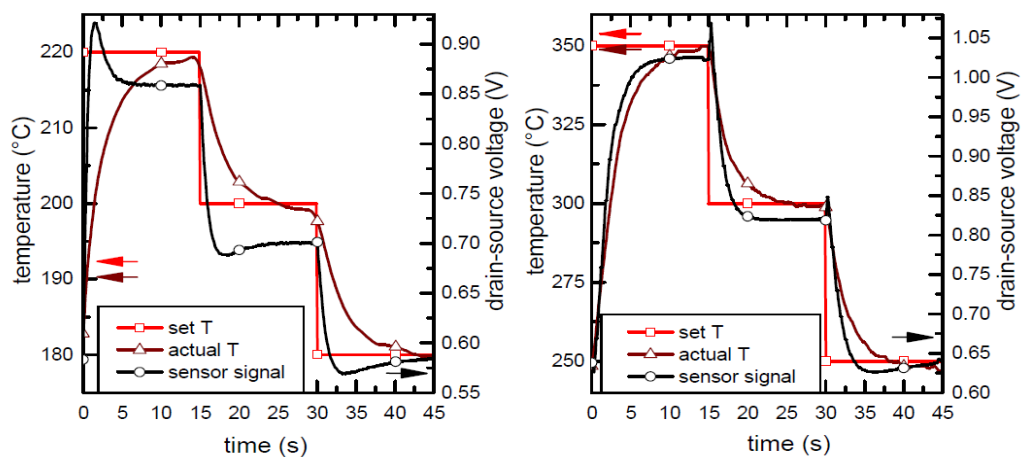


Рисунок 2.20 – Застосовується температурні цикли із заданою та фактичною температурами, а також сигнал датчика в синтетичному повітрі. (a) SiC-FET з платиновим затвором і (b) SiC-FET з іридієвим затвором



Базуючись на основах SiC-FET, відповідь датчика в лінійній області залежить від  $V_{DS}$ , що означає, що відповідь датчика зазвичай найвища для найвищої температури. Знову ж таки, сигнал датчика слідує за зміною температури, а базова лінія знаходиться в діапазоні від 0,6 В до 1 В. Струм, встановлений для Pt-gate SiC-FET, становить, залежно від зразка, від 40 мкА до 100 мкА, тоді як для Ir- струм досить низький, тобто між 20 мкА і 40 мкА через низький струм насичення.

В якості типових летких органічних сполук вибрано формальдегід, нафталін і бензол, а діапазони концентрацій визначені відповідно до поточних правових порогових значень. Етанол вибрано як типовий заважаючий фактор із діапазоном концентрацій від 0,5 ppm до 2 ppm і, таким чином, на кілька величин вище, ніж концентрації цільових ЛОС. Досліджуваний газовий профіль містить принаймні п'ять концентрацій для кожного ЛОС, для формальдегіду 25, 50, 75, 100 і 200 ppb, для нафталіну 2,5, 5, 10, 20 і 40 ppb, а для бензолу 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 і 4,5 ppb.

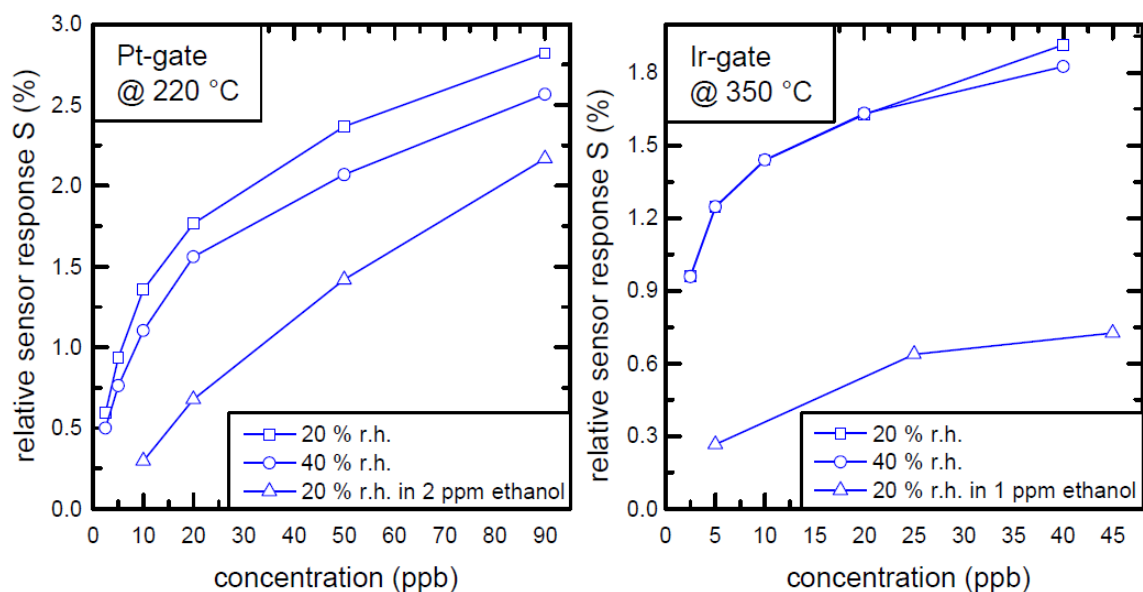


Рисунок 2.21 – Відносна відповідь датчика на нафталін при двох рівнях вологості та в суміші з етанолом. (а) SiC-FET з платиновим затвором, адаптований з [47], і (б) SiC-FET з іридієвим затвором

Відносний відгук датчика трохи вищий для платини, тоді як іридій менш чутливий до відносної вологості. Загалом вплив відносної вологості на відгук датчика для обох металізацій затвора виглядає досить незначним. При високому фоновому рівні 2 ppm етанолу виявлення нафталіну все ще можливо, але чутливість знижена.

Відносний відгук датчика для формальдегіду нижчий, ніж для

нафталіну, хоча концентрації, що представляють інтерес, вищі, див. Рис. 2.22а, (та наведена в додатку А рис.10). Вплив відносної вологості, як і раніше, досить низький. На рис. 2.22а також показана відповідь датчика для Pt-gate SiC-FET при 200 °С. Відповідний відгук нижчий, ніж для 220 °С, що, ймовірно, тому, що базова лінія, тобто  $V_{DS}$ , нижча, див. Рис. 2.19. На рис. 2.22b показана відповідь датчика Pt-затвору при 220 °С для п'яти концентрацій бензолу. Можна досягти межі виявлення приблизно 1 ppb. Загалом відповідь досить мала, але, з іншого боку, концентрації, які необхідно виявити, також низькі.

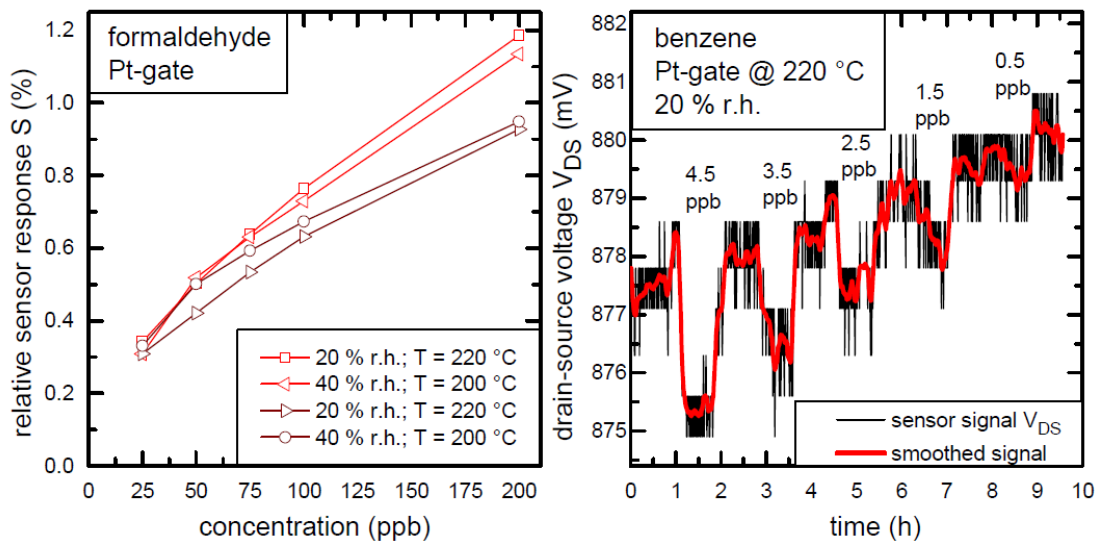


Рисунок 2.22 – (а) Відносна відповідь датчика для формальдегіду при двох рівнях вологості та при двох температурах і (б) відповідь датчика для бензолу

#### Розрізнення летких органічних сполук.

Температурні цикли, представлені в останньому розділі, використовуються для розрізнення типових ЛОС, таких як формальдегід, нафталін і бензол. Відповідь датчика спочатку нормалізується шляхом встановлення середнього значення циклу на одиницю. На рис. 2.23 показаний різницевий нормалізований сигнал Pt-gate SiC-FET для 100 ppb формальдегіду, 20 ppb нафталіну та 4,5 ppb бензолу, щоб придушити вплив температури на базову лінію датчика.

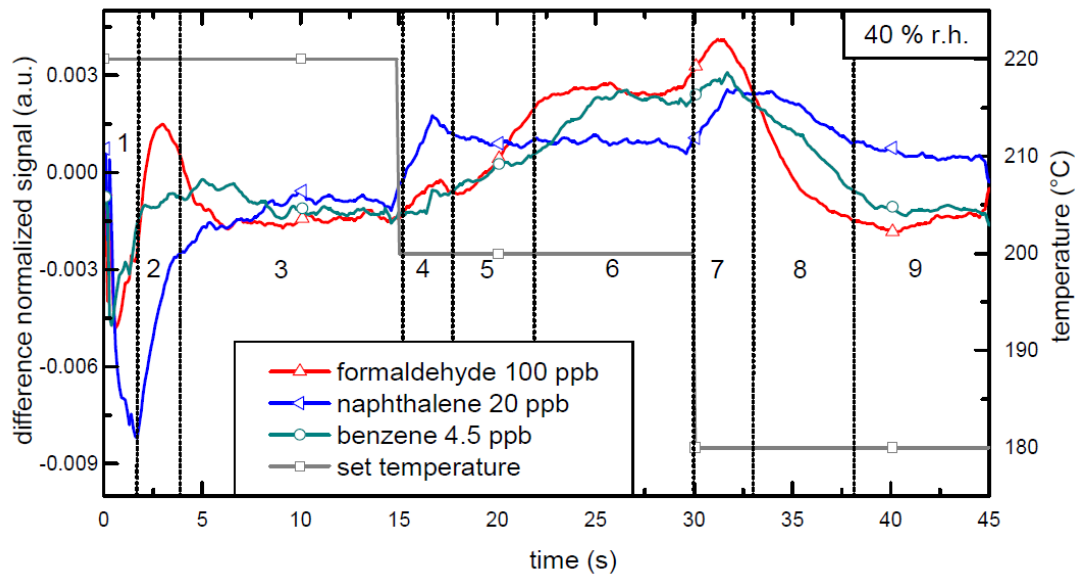


Рисунок 2.23 – Нормований різницевий сигнал Pt-gate SiC-FET для 100 ppb формальдегіду, 20 ppb нафталіну та 4,5 ppb бензолу з 40 % відносною вологістю при 20 °C. Позначено дев'ять інтервалів для виділення ознак

Як видно, різницевий сигнал характерно змінюється на окремих ділянках циклу. Для виділення ознак визначено дев'ять інтервалів. Особливо в інтервалах, де температура змінюється, тобто інтервалах 1 і 2 або 7 і 8, різниці між кривими, тобто гази високі. Як ознаки розраховуються середні значення та нахили, тобто лінії найкращого підходу. Ці 18 функцій використовуються як вхідні дані для алгоритмів розпізнавання образів, таких як лінійний дискримінантний аналіз і частковий найменший квадрат – дискримінантний аналіз, які використовуються для розрізнення ЛОС у цьому розділі.

Далі розглядаються лише SiC-FET з платиновим затвором, оскільки вони пропонують вищу чутливість. На рис. 2.24 показана діаграма розсіювання LDA, яка показує розрізнення кількох концентрацій формальдегіду, нафталіну та бензолу з відносною вологістю 40 %. Можливе чітке розділення різних газів лише з невеликим перекриттям. Навіть різні концентрації нафталіну та формальдегіду розташовані окремо один від одного. Лише найнижчі концентрації близькі до групи чистого повітря і трохи перекриваються з низькими концентраціями нафталіну. Бензол, який призводить до слабкої реакції датчика, відокремлений від інших груп, але розташований близько до групи чистого повітря. Слід зазначити, що групи чистого повітря завжди розташовані поруч із групою, що відповідає найнижчій концентрації конкретного ЛОС. Вищі концентрації розташовані далі від чистого повітря, тобто група 0 ppb. Це можна розглядати як непряму

перевірку.

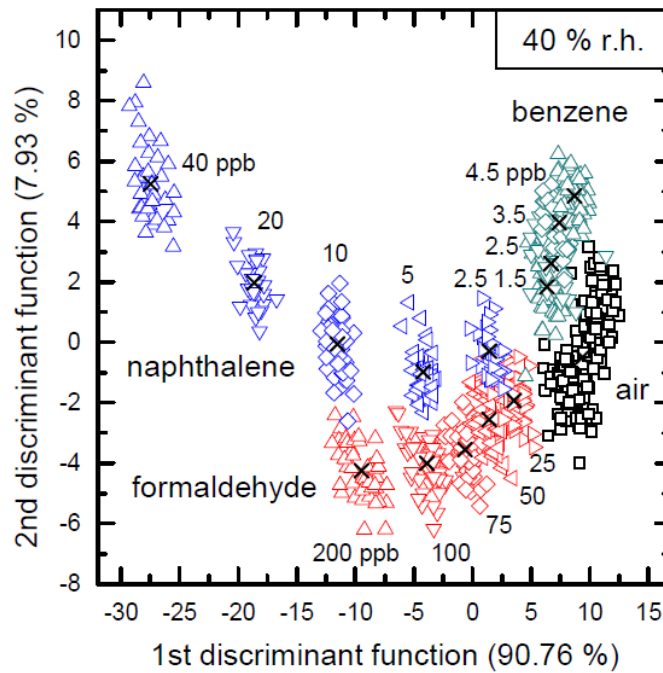


Рисунок 2.24 – LDA графік, що показує розрізнення кількох концентрацій формальдегіду, нафталіну та бензолу з відносною вологістю 40 %, коли використовується Pt-gate SiC-FET

Хоча ця діаграма розсіювання добре розрізняє три різні ЛОС, визначення конкретного ЛОС не є оптимальним, оскільки будь-яка зміна вологості чи концентрації може легко призвести до неправильної класифікації. Більш стабільна та надійна дискримінація досягається, якщо параметри, які можуть змінюватися, наприклад, вологість, включені в навчання. Для визначення цільових газів також корисно включити кілька різних концентрацій у навчання. Оскільки застосуванням, що стоїть за дослідженнями ЛОС, є якість повітря в приміщенні та вентиляція за потребою, як зазначено у вступі.

## 2.8 Висновки до розділу

Розроблено математичні моделі радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів та біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, в яких на відміну від існуючих, враховано вплив концентрації газу на елементи нелінійних еквівалентних схем, що дало змогу отримати аналітичні вирази чутливості та функції перетворення концентрації газу у частоту. Удосконалено математичну модель резистивного елементу,

яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховані фізичні процеси, що приводять до зміни опору поверхні газочутливого напівпровідника від кількості адсорбованих молекул газу.

Отримано аналітичні вирази для функції перетворення і чутливості розробленого радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів та біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, які можуть бути використані для інженерного розрахунку первинних вимірювальних пристроїв концентрації газів.

Представлено дослідження газочутливого SiC-FET з двох, трьох та багато електродному вигляді для моніторингу вихлопних газів, виявлення NO<sub>x</sub> та для застосування вимірювання якості повітря в приміщенні.

### 3 РОЗРОБКА РАДІОТЕХНІЧНОГО ПРИСТРОЮ ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ З MODBUS RTU НА ESP8266

Для вимірювання та визначення якості повітря використаємо MEMS сенсор якості повітря CCS811 та порівняти його показання з SGP30 або SGPC3. Важливо розуміти, що це сенсор TVOC та номінальна присутність eCO<sub>2</sub> не робить його сенсором вуглекислого газу. Тестовий стенд побудований на контролері Wiren Board з протоколом Modbus RTU, тому і розроблюваний пристрій працюватиме з цим протоколом. Спершу зробимо простий Modbus RTU пристрій із змінними налаштуваннями підключення, який потім може стати основою для інших розробок. Потім підключимо сенсор CCS811 і навчимося зберігати BaseLine. Наприкінці підключимо пристрій до контролера Wiren Board: складемо шаблон для драйвера wb-mqtt-serial і напишемо простий сценарій автоматизації.

#### 3.1 Modbus RTU

Modbus RTU – це промисловий протокол зв'язку між пристроями, що працює поверх шини RS-485. Контролер автоматизації зазвичай є клієнтом, а периферія серверами. Сервери мають свою унікальну адресу в рамках одного сегмента шини і багато modbus-регістрів, тобто осередків пам'яті зі своїми адресами та типами даних, доступних зовні. Клієнт по черзі підключається до кожного сервера і зчитує значення регістрів або записує в них свої, які змушують сервер виконувати задані дії у програмі.

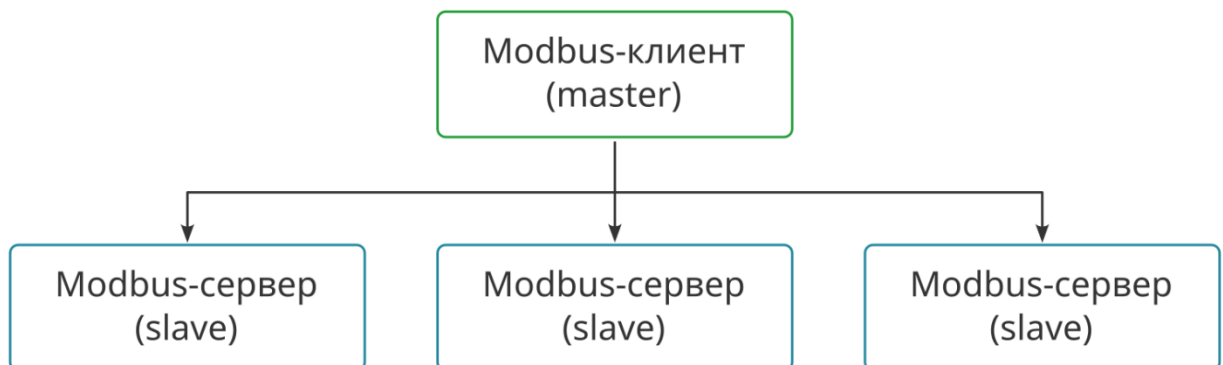


Рисунок 3.1 – Структура Modbus RTU

Доступні типи регістрів протоколу Modbus:

- Coils (1 біт, читання запис, 1 або 0) - дискретний вихід, не використовуємо.
- Discrete Input (1 біт, тільки читання, 1 або 0) — дискретний вхід, який використовується для помилок ініціалізації.

- Input Register (16 біт, тільки читання, 0 ... 65535) - реєстр введення, використовуємо для даних з датчика.
- Holding (16 біт, читання-запис, 0 ... 65535) - зберігатимемо налаштування зв'язку.

Для кожного типу реєстру є своя функція роботи з ним:

- 0×02 - читання Discrete Input.
- 0×03 – читання Holding.
- 0×04 - читання Input Register
- 0×06 – запис Holding.

Для розробки даної системи знадобиться сенсор якості повітря (TVOC) – CCS811. Як мікроконтролер для пристрою вибрано ESP8266 - він досить недорогий, має багато периферії, цілком продуктивний, тому вибрано відладочну плату NodeMCU з модулем ESP12F (ESP8266).

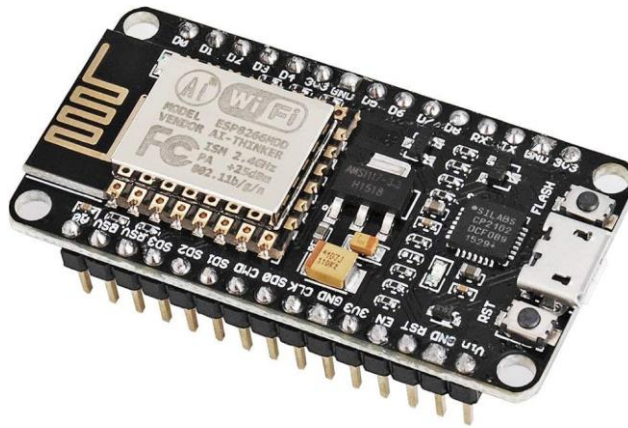


Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд відладочної плати NodeMCU з модулем ESP12F

Щоб підключити ESP8266 до шини RS-485, нам знадобиться перетворювач рівнів UART → RS-485 (рис.3.3), наприклад, зібраний на мікросхемі MAX485 HW-97.

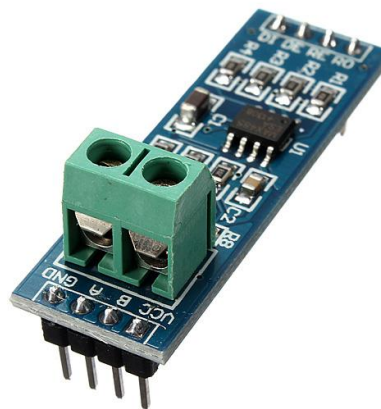


Рисунок 3.3 – Перетворювач рівнів UART → RS-485



Для реалізації сервісного режиму нам знадобиться будь-яка тактова кнопка, на схемі вона підключена до D5 та GND. Схематичне зображення експериментальної установки наведено на рис.3.4.

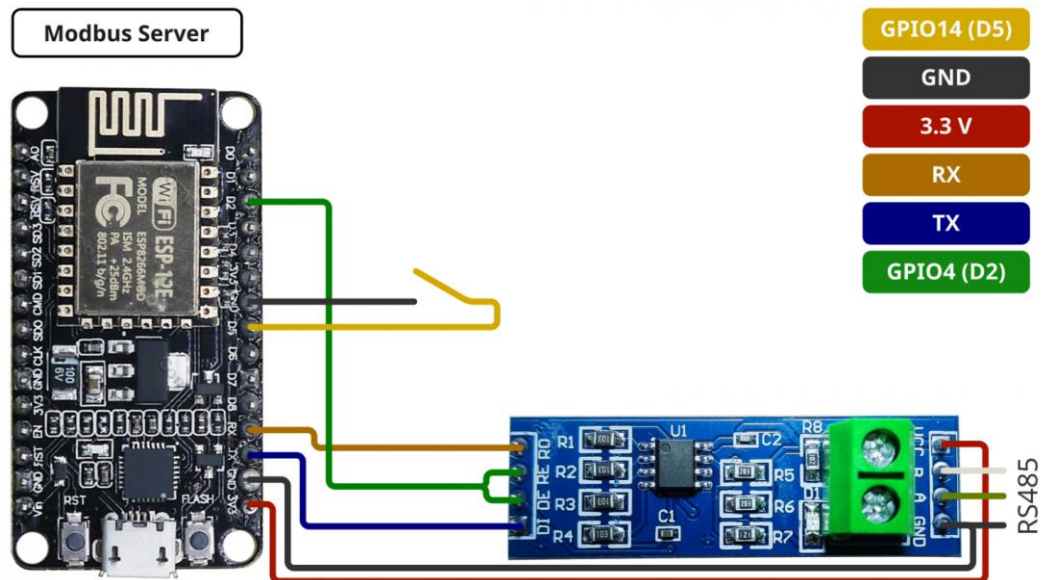


Рисунок 3.4 – Схематичне підключення модуля UART → RS-485 до плати NodeMCU

Прошивка пристрою буде написана в середовищі Arduino IDE, яке дозволяє писати програми (скетчі) для Embedded мовою C++.

Простий Modbus-сервер.

Зробимо modbus сервер з адресою 1, параметрами підключення 9600 8N2, в якому буде один тестовий holding реєстр з числом 3.

```
#include <ModbusRTU.h>

// Налаштування Modbus
#define SLAVE_ID 1 // адрес нашого сервера
#define PIN_FLOW 4 // пін контролю напрямку приймання/передачі,

// Номери Modbus реєстрів
#define REG_TEST 0

ModbusRTU mb;

void setup() {
  modbus_setup();
}

void loop() {
  mb.task();
}

void modbus_setup() {
  Serial.begin(9600, SERIAL_8N2); // задаємо параметри зв'язку
  mb.begin(&Serial);
```

```

mb.begin(&Serial, PIN_FLOW); // включаємо контроль напрямку приймання/передачі
mb.slave(SLAVE_ID); // вказуємо адрес нашого сервера

mb.addHreg(REG_TEST); // регістр REG_TEST типу Holding
mb.Hreg(REG_TEST, 3); // записуємо в наш регістр REG_TEST число 3 —
}

```

Підключаємо свою плату до комп'ютера та натискаємо Ctrl+U – це дозволяє скомпілювати скетч та залити його в контролер NodeMCU.

Для підключення по Modbus необхідна програма для роботи з Modbus RTU. Залежно від типу операційної системи можна використати:

- Windows: Rilheva Modbus Poll.
- Linux: консольний modbus\_client чи графічний QMaster.
- MacOS давно не працював, але кажуть, що там є утиліта su.

### 3.2 Принцип роботи програм

Принцип роботи всіх програм один: підключаєте до комп'ютера пристрій через перехідник USB RS485, запускаєте програму, вказуєте параметри підключення, адресу пристрою, номер потрібного регістру та функцію, за допомогою якої треба читати або записувати байти (рис.3.5).

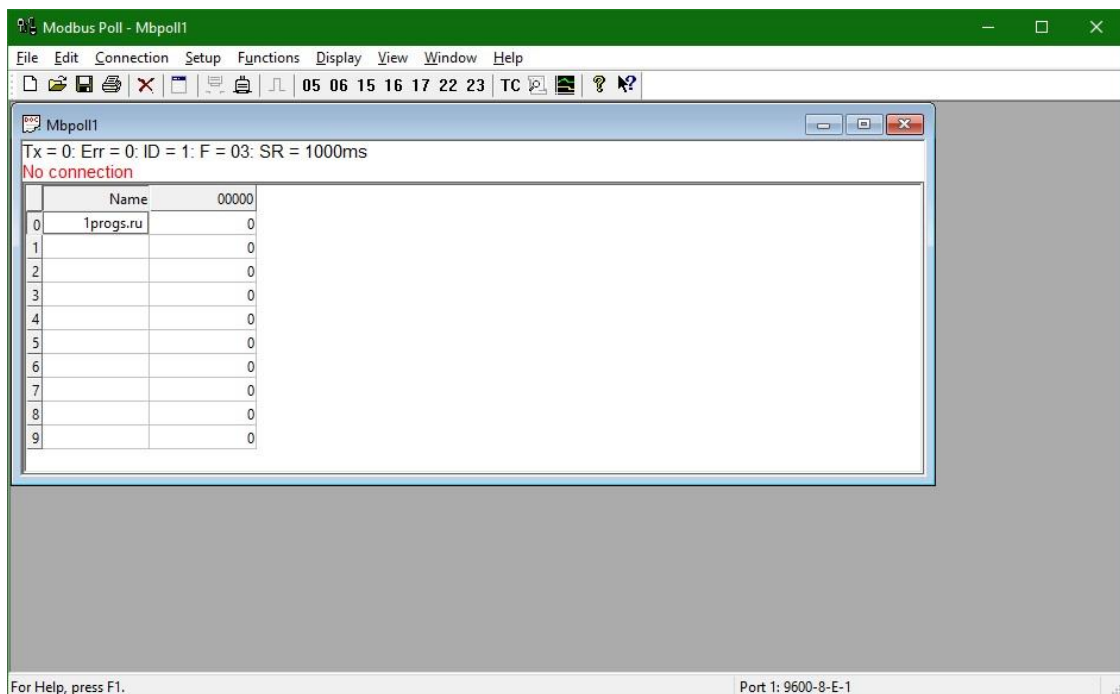


Рисунок 3.5 – Інтерфейс програми Modbus Poll

Для нашого випадку це:

- Параметри підключення - 9600 8N2
- Адреса - 1

- Реєстр Holding із адресою 0.

Зазвичай у програмах треба вибрати функцію читання/запису регістра. Для holding-регістрів це 0×03 – читання та 0×06 запис.

Налаштування змінного зв'язку.

Для зміни налаштувань нам доведеться щоразу збирати прошивку і це незручно. Щоб користувач нашого пристрою не мучився, дамо можливість змінювати налаштування зв'язку через Modbus-реєстри. Так він без проблем зможе використати наш пристрій на одній шині з іншими. Найчастіше потрібно змінювати швидкість підключення, кількість стопових бітів та адресу, тому нам знадобиться зробити три holding-реєстри, дамо їм номери подалі від нашого тестового, щоб випадково їх не змінити:

```
// Адреса Modbus-регістрів з налаштуванням зв'язку
#define REG_MB_ADDRESS 100
#define REG_MB_STOP_BITS 101
#define REG_MB_BAUDRATE 102
```

Оскільки при відключенні живлення значення регістрів скидаються, нам знадобиться місце, де ми зберігатимемо налаштування — EEPROM:

```
#define EEPROM_SIZE 6
#define EEPROM_MB_ADDRESS 0
#define EEPROM_MB_STOP_BITS 2
#define EEPROM_MB_BAUDRATE 4
```

При старті ми читаємо налаштування з EEPROM і якщо там нічого немає, то для з'єднання використовуємо налаштування зв'язку за замовчуванням. Далі створюємо holding регістри, куди записуємо поточні налаштування. Крім цього, ми призначаємо колбек функцію на запис значень у регістри, щоб записані користувачем налаштування відправити до осередків EEPROM.

У нас є робочий modbus-сервер, який нічого не вміє, крім як зберігати налаштування зв'язку в регістрах і записувати налаштування користувача в EEPROM. Додамо у прошивку роботу із сенсором CCS811. Сам сенсор дуже малий, тому буде використовуватись готова плата з цим сенсором (рис.3.6).

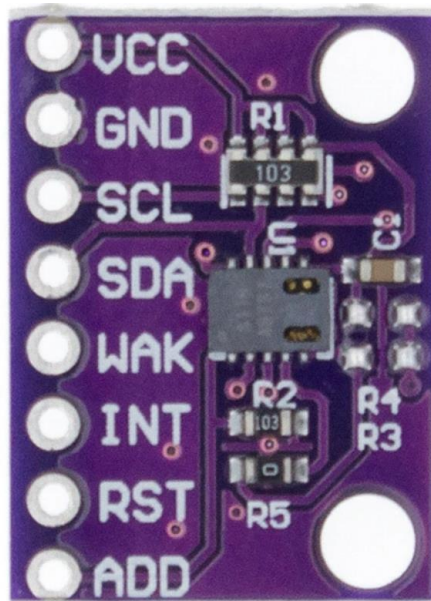


Рисунок 3.6 – Плата із сенсором CCS811

Підключаємо сенсор до ESP8266, за замовчуванням I2C у нас призначено на піни GPIO5 (D1) та GPIO4 (D2), тому сюди і підключимо наш датчик. GPIO4 у нас зайнятий виходом Flow Control, тому ми звільнимо його. Тепер Flow Control підключено у нас на GPIO12 (D6). Схема зі всіма підключеннями наведена на рис.3.7. (та наведена в додатку А рис.11)

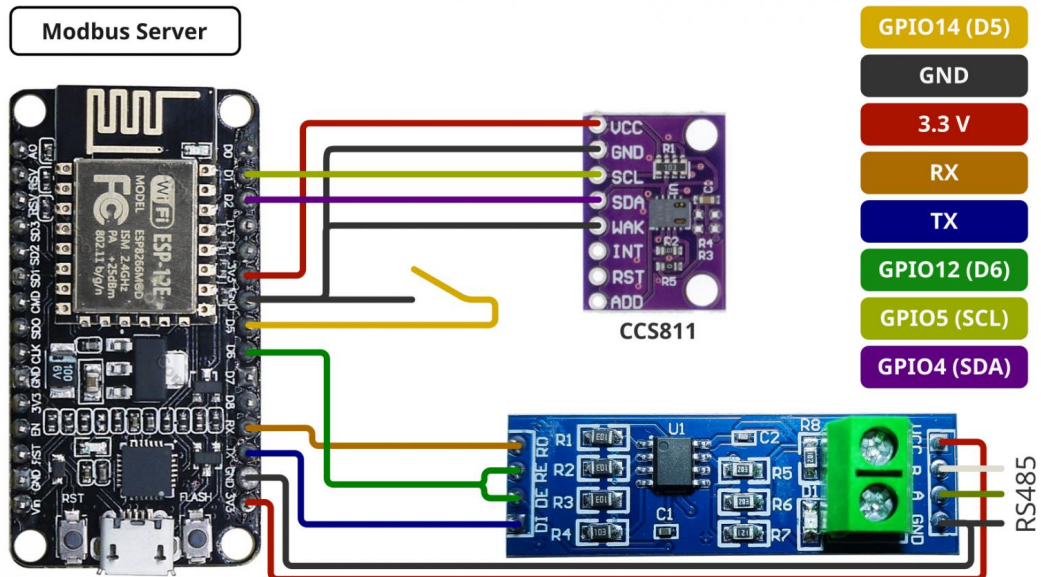


Рисунок 3.7 – Схема підключення датчика CCS811 та перетворювача UART-RS485

Збереження Baseline. Baseline – це внутрішнє калібрувальне значення, яке змінюється сенсором під час його автокалібрування. Але є нюанс - воно скидається при відключенні живлення, а значить сенсор втрачає калібрування і починає заново цикл. Тому ми зберігатимемо значення

Baseline під час роботи сенсора, а при старті відновлюватимемо. Тут обов'язково треба пам'ятати, що в процесі калібрування значення Baseline може змінюватися досить часто, а автокалібрування відбувається раз на добу. Зберігати ми це значення будемо в EEPROM за аналогією до налаштувань Modbus. Додаємо до виділеного нами розміру EEPROM ще дві комірки та вказуємо номер комірки для зберігання Baseline:

```
#define EEPROM_SIZE      8
#define EEPROM_BASELINE  6
```

Оголошуємо змінну для зберігання Baseline:

```
uint16_t sensorBaseLine = 0;
```

Додаємо таймер:

```
SimpleTimer bTimer(30000);
```

```
void check_timer() {
```

```
...
```

```
    if (bTimer.isReady()) {
```

```
        save_baseline();
```

```
        bTimer.reset();
```

```
    }
```

Інтеграція в систему автоматизації на Wiren Board (рис.3.8), та показана в додатку А рис.12). Прототип готовий, час підключити його до контролера - виведемо значення у веб-інтерфейс. Wiren Board має власний драйвер роботи з Modbus-пристроями wb-mqtt-serial, для якого можна написати свій шаблон і він працюватиме з нашим пристроєм. Напишемо простий сценарій, який включатиме зумер контролера, якщо значення сенсора TVOC перевищить певне значення.



Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд Wiren Board

Пристрій підключено до порту RS485 контролера Wiren Board. Шаблон драйвера `wb-mqtt-serial` - це json-файл з описом регістрів Modbus-пристрою. Перед тим, як робити шаблон, наведемо карту регістрів нашого пристрою.

Адреса	Тип	Опис
0	Discrete Input	Помилка ініціалізації сенсора CCS811
1	Input Register	Значення eCO2
2	Input Register	Значення TVOC
3	Input Register	Значення Baseline
100	Holding	Modbus-адреса пристрою
101	Holding	Стоп бит
102	Holding	Швидкість обміну, поділена на 100

Спрощено шаблон пристрою виглядає так:

```
{
  "device_type": "ad-sv", // тип пристрою
  "title": "AD-SV",
  "group": "g-climate-sensor", // група, в якій відтворюється шаблон.
  "device": {
    "name": "AD-SV", // ім'я пристрою в MQTT
    "id": "ad-sv",
    "groups": [ ], // групи параметрів і каналів
    "channels": [ ],
    "parameters": [ ],
    "translations": { }
  }
}
```

AD-SV – скорочене ім'я пристрою.

З карти регістрів нашого пристрою видно:

- регістри 0...3 — це канали (`channels`) пристрою: їх ми виведемо веб-інтерфейс і зможемо використовувати у скрипті автоматизації;
- регістри 100 ... 102 - це параметри (`parameters`) пристрою, їх ми додамо на сторінку налаштувань.

Групи у нас буде дві:

- `Inputs` – сюди увійдуть канали;
- `Settings` — Установки.

Також ми зробимо наш шаблон двомовним: `en/ua`.

Визначившись зі структурою шаблону, читаємо документацію, описуємо канали та параметри і в результаті маємо вийти приблизно так:

```
{
  "device_type": "ad-sv",
  "title": "AD-SV",
```

```

"group": "g-climate-sensor",
"device": {
  "name": "AD-SV",
  "id": "ad-sv",
  "groups": [
    {
      "title": "Inputs",
      "id": "inputs",
      "order": 0
    },
    {
      "title": "Settings",
      "id": "settings",
      "order": 1
    }
  ],
"channels": [
  {
    "name": "eCO2",
    "reg_type": "input",
    "address": 1,
    "type": "value",
    "group": "inputs"
  },
  {
    "name": "TVOC",
    "reg_type": "input",
    "address": 2,
    "type": "value",
    "group": "inputs"
  },
  {
    "name": "Baseline",
    "reg_type": "input",
    "address": 3,
    "type": "value",
    "group": "inputs"
  },
  {
    "name": "CCS811 Error",
    "reg_type": "discrete",
    "address": 0,
    "type": "switch",
    "group": "inputs"
  }
],
"parameters": [
  {
    "id": "address",
    "title": "Address",
    "reg_type": "holding",
    "address": 100,
    "default": 1,
    "min": 1,
    "max": 247,
    "group": "settings"
  },
  {
    "id": "stop-bits",
    "title": "Stop Bits",
    "reg_type": "holding",
    "address": 101,

```



```

    "default": 2,
    "enum": [1, 2],
    "enum_titles": ["1", "2"],
    "group": "settings"
  },
  {
    "id": "baudrate",
    "title": "Baudrate",
    "reg_type": "holding",
    "address": 102,
    "default": 96,
    "enum": [12, 24, 48, 96, 192, 384, 576, 1152],
    "enum_titles": ["1200", "2400", "4800", "9600", "19200", "38400", "57600", "115200"],
    "group": "settings"
  }
],
"translations": {
  "ru": {
    "Inputs": "Входи",
    "Settings": "Настройки",
    "eCO2": "eCO2",
    "TVOC": "TVOC",
    "Baseline": "Baseline",
    "CCS811 Error": "Помилка CCS811",
    "File System Error": "Помилка файлової системи",
    "Address": "Адрес пристрою",
    "Stop Bits": "Стоп біти",
    "Baudrate": "Швидкість обміну",
  }
}
}
}

```

Тепер підключаємо пристрій до контролера та налаштуємо:

1. Копіюємо файл шаблону на контролер в папку шаблонів користувача /etc/wb-mqtt-serial.conf.d/templates,
2. Ідемо у веб-інтерфейсі Установки → Файли конфігурації → Налаштування драйвера serial-пристроїв.
3. Параметри порту залишаємо за замовчуванням.
4. Додаємо новий пристрій та у списку шаблонів вибираємо наш пристрій. Якщо в списку немає, натискаємо Ctrl+F5, щоб скинути кеш браузера.
5. У полі відразу під вибором шаблону вказуємо адресу пристрою - 1.
6. Зберігаємо налаштування.

Тепер на вкладці «Пристрої» ми маємо побачити картку з нашим сенсором.

Лістинг програми на ESP8266 (який наведений в додатку B)

```

#include <ModbusRTU.h> // modbus-esp8266
#include <EEPROM.h> // робота з EEPROM
#include <SimpleTimer.h> // простий таймер

#include <Wire.h> // Wire
#include <SparkFunCCS811.h> // SparkFunCCS811

#define DEFAULT_MB_ADDRESS 1 // адрес нашого сервера
#define DEFAULT_MB_STOP_BITS 2 // кількість стопових бітів

```

```

#define DEFAULT_MB_BAUDRATE 96 // швидкість підключення /100

#define REG_SENSOR_ERROR 0 // помилка ініціалізації сенсора CCS811
#define REG_SENSOR_ECO2 1 // eCO2
#define REG_SENSOR_TVOC 2 // TVOC
#define REG_SENSOR_BL 3 // Baseline
#define REG_MB_ADDRESS 100
#define REG_MB_STOP_BITS 101
#define REG_MB_BAUDRATE 102
#define EEPROM_SIZE 8
#define EEPROM_MB_ADDRESS 0
#define EEPROM_MB_STOP_BITS 2
#define EEPROM_MB_BAUDRATE 4
#define EEPROM_BASELINE 6
#define PIN_FLOW 12
#define BTN_SAFE_MODE 14
#define CCS811_ADDR 0x5A

uint16_t mbAddress = DEFAULT_MB_ADDRESS;
uint16_t mbStopBits = DEFAULT_MB_STOP_BITS;
uint16_t mbBaudrate = DEFAULT_MB_BAUDRATE;
uint16_t sensorBaseLine = 0;
String configFile = "/config.json";

ModbusRTU mb;
CCS811 ccs811(CCS811_ADDR);
SimpleTimer sysTimer(2000);
SimpleTimer blTimer(30000);

void setup() {
  io_setup();
  eeprom_setup();
  check_safe_mode();
  modbus_setup();
  i2c_setup();
  read_baseline();
}

// Головний цикл
void loop() {
  mb.task();
  check_timer();
}

void check_timer() {
  if (sysTimer.isReady()) {
    read_sensor();
    sysTimer.reset();
  }

  if (blTimer.isReady()) {
    save_baseline();
    blTimer.reset();
  }
}

void io_setup() {
  pinMode(BTN_SAFE_MODE, INPUT_PULLUP);
}

void modbus_setup() {

```

```

Serial.begin(convert_baudrate(mbBaudrate), convert_stop_bits_to_config(mbStopBits));
mb.begin(&Serial);
mb.begin(&Serial, PIN_FLOW);
mb.slave(mbAddress);

mb.addHreg(REG_MB_ADDRESS);
mb.addHreg(REG_MB_STOP_BITS);
mb.addHreg(REG_MB_BAUDRATE);
mb.addIsts(REG_SENSOR_ERROR);
mb.addIreg(REG_SENSOR_ECO2);
mb.addIreg(REG_SENSOR_TVOC);
mb.addIreg(REG_SENSOR_BL);

mb.Hreg(REG_MB_ADDRESS, mbAddress);
mb.Hreg(REG_MB_STOP_BITS, mbStopBits);
mb.Hreg(REG_MB_BAUDRATE, mbBaudrate);
mb.Ists(REG_SENSOR_ERROR, 0); // ошибка сенсора
mb.Ireg(REG_SENSOR_ECO2, 0); // eCO2
mb.Ireg(REG_SENSOR_TVOC, 0); // TVOC
mb.Ireg(REG_SENSOR_BL, 0); // Baseline
mb.onSetHreg(REG_MB_ADDRESS, callback_set_mb_reg);
mb.onSetHreg(REG_MB_STOP_BITS, callback_set_mb_reg);
mb.onSetHreg(REG_MB_BAUDRATE, callback_set_mb_reg);
}

void eeprom_setup() {
  EEPROM.begin(EEPROM_SIZE);
}

void read_modbus_settings() {
  EEPROM.get(EEPROM_MB_ADDRESS, mbAddress);
  if (mbAddress == 0xffff) {
    mbAddress = DEFAULT_MB_ADDRESS;
  }

  EEPROM.get(EEPROM_MB_STOP_BITS, mbStopBits);
  if (mbStopBits == 0xffff) {
    mbStopBits = DEFAULT_MB_STOP_BITS;
  }
  EEPROM.get(EEPROM_MB_BAUDRATE, mbBaudrate);
  if (mbBaudrate == 0xffff) {
    mbBaudrate = DEFAULT_MB_BAUDRATE;
  };
}

void i2c_setup() {
  Wire.begin();

  if (!ccs811.begin()) {
    mb.Ists(REG_SENSOR_ERROR, 1);
  } else {
    mb.Ists(REG_SENSOR_ERROR, 0);
  };
}

void check_safe_mode() {
  if (digitalRead(BTN_SAFE_MODE)) {
    read_modbus_settings();
  }
}

void read_baseline() {
  EEPROM.get(EEPROM_BASELINE, sensorBaseLine);
  if (sensorBaseLine != 0xffff) {

```

```

    mb.Ireg(REG_SENSOR_BL, sensorBaseLine);

    if (write_baseline(sensorBaseLine)) {
        mb.Ists(REG_SENSOR_ERROR, 0);
    } else {
        mb.Ists(REG_SENSOR_ERROR, 1);
    }
}

bool write_baseline(uint16_t baseline) {
    CCS811Core::CCS811_Status_e errorStatus;

    errorStatus = ccs811.setBaseline(baseline);
    if (errorStatus != CCS811Core::CCS811_Stat_SUCCESS)
    {
        return false;
    };
    return true;
}

void save_baseline(){
    write_eeprom(EEPROM_BASELINE, sensorBaseLine);
}

void read_sensor() {
    if (ccs811.dataAvailable()) {
        ccs811.readAlgorithmResults();
        mb.Ireg(REG_SENSOR_ECO2, ccs811.getCO2());
        mb.Ireg(REG_SENSOR_TVOC, ccs811.getTVOC());

        sensorBaseLine = ccs811.getBaseline();
        mb.Ireg(REG_SENSOR_BL, sensorBaseLine);
    }
}

uint16_t callback_set_mb_reg(TRegister * reg, uint16_t val) {
    switch (reg->address.address) {
        case REG_MB_ADDRESS:
            if (val > 0 && val < 247) {
                write_eeprom(EEPROM_MB_ADDRESS, val);
            } else {
                val = reg->value;
            }
            break;
        case REG_MB_STOP_BITS:
            if (val == 1 || val == 2) {
                write_eeprom(EEPROM_MB_STOP_BITS, val);
            } else {
                val = reg->value;
            }
            break;
        case REG_MB_BAUDRATE:
            uint16_t correctBaudRates[] = {12, 24, 48, 96, 192, 384, 576, 1152};
            if (contains(val, correctBaudRates, 8)) {
                write_eeprom(EEPROM_MB_BAUDRATE, val);
            } else {
                val = reg->value;
            }
            break;
    }
    return val;
}

```

```

}

void write_eeprom(uint8_t eeprom_address, uint16_t val) {
    EEPROM.put(eeprom_address, val);
    EEPROM.commit();
}

SerialConfig convert_stop_bits_to_config(uint16_t stopBits) {
    return (stopBits == 2) ? SERIAL_8N2 : SERIAL_8N1;
}

uint32_t convert_baudrate(uint16_t baudrateValue) {
    return baudrateValue * 100;
}

bool contains(uint16_t a, uint16_t arr[], uint8_t arr_size) {
    for (uint8_t i = 0; i < arr_size; i++) if (a == arr[i]) return true;
    return false;
}

```

### 3.3 Висновки до розділу

Розроблено радіотехнічний пристрій визначення якості повітря з modbus rtu на ESP8266. Для вимірювання та визначення якості повітря використано MEMS сенсор якості повітря CCS811 та порівняння його показань з SGP30 або SGPC3. Тестовий стенд побудований на контролері Wiren Board з протоколом Modbus RTU, тому і розроблюваний пристрій працює з цим протоколом. Написаний шаблон для драйвера wb-mqtt-serial, а також написано простий сценарій автоматизації. Представлено лістинг програми для мікроконтролера ESP8266 на мові C++.

## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

### 4.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (повному або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	42	54	48
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>		48,0		



Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 4.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	0	66	0
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	58	0	58
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>	<b>60,7</b>		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [49]

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (4.1)$$

де  $k_{нов}$ ,  $k_{теор}$  - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи,  $k_{нов} = 48,0$ ,  $k_{теор} = 60,7$  балів;

$0,6$  та  $0,4$  – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 48,0 + 0,4 \cdot 60,67 = 53,07 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника  $E_{нау}$  проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем», даний рівень становить 53,07 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

## 4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

### 4.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами

оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [49]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де  $k$  – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

$M_{ni}$  – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, (грн.);

$t_i$  – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці,  $T_p=22$  дні.

$$Z_o = 15750,00 \cdot 32 / 22 = 22909,09 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
1. Керівник проекту	15750,00	715,91	32	22909,09
2. Інженер-конструктор радіоелектронної апаратури	14750,00	670,45	26	17431,82
3. Науковий співробітник	14800,00	672,73	32	21527,27
4. Лаборант	6800,00	309,09	22	6800,00
Всього				68668,18

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем» розраховуємо за формулою

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

де  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, (грн/год.);

$t_i$  – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{zm}}, \quad (4.4)$$

де  $M_M$  – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo  $M_M=6700,00$  (грн.);

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [49.];

$K_c$  – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 22$  дн;

$t_{zm}$  – тривалість зміни, (год.).

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (22 \cdot 8) = 56,53 \text{ (грн.)}$$

$$З_{pl} = 56,53 \cdot 6,00 = 339,19 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника, грн
1. Встановлення обладнання	6,00	2	1,10	56,53	339,19
2. Інсталяція програмного забезпечення	5,00	4	1,50	77,09	385,44
3. Налаштування цифрових	3,40	4	1,50	77,09	262,10

аналізаторів					
Продовження таблиці 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників					
4. Відлагодження датчиків аналізатора	4,50	5	1,70	87,37	393,15
5. Формування структурної схеми компонентів	5,60	5	1,70	87,37	489,25
6. Тренування системи	6,00	4	1,50	77,09	462,53
Всього					2331,66

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де  $H_{\text{дод}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{дод}} = (68668,18 + 2331,66) \cdot 10 / 100\% = 7099,98 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%}, \quad (4.6)$$

де  $H_{\text{зн}}$  – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (68668,18 + 2331,66 + 7099,98) \cdot 22 / 100\% = 17181,96 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій

та витрачені на проведення досліджень за темою «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали ( $M$ ), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\epsilon j}, \quad (4.7)$$

де  $H_j$  – норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, кг;

$n$  – кількість видів матеріалів;

$C_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, (грн/кг.);

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1, 1 \dots 1, 15$ );

$B_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, кг;

$C_{\epsilon j}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, (грн/кг.).

$M_1 = 2,0 \cdot 185,00 \cdot 1,05 - 0 \cdot 0 = 388,50$  (грн.).

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Офісний папір	185,00	2,0	0	0	388,50
Папір для записів	125,00	3,0	0	0	393,75
Органайзер офісний	210,00	3,0	0	0	661,50
Набір офісного працівника	195,00	3,0	0	0	614,25
Картридж для принтера	1460,00	2,0	0	0	3066,00
Диск оптичний	27,00	5,0	0	0	141,75
Flesh-пам'ять 32 GB	139,00	2,0	0	0	291,90
Тека для паперів А4	92,00	3,0	0	0	289,80

Продовження таблиці 4.6 – Витрати на матеріали

Припой ПОС-61	520,00	0,1	0,050	50,00	52,10
Лак УР-231	345,00	0,0110	0,005	100,00	3,48
Склотекстоліт	295,00	0,0200	0,008	50,00	5,80
Провод монтажний	365,00	0,0140	0,000	0,00	5,37
Спирт технічний	156,00	0,1000	0,000	0,00	16,38
Клей	395,00	0,1800	0,000	0,00	74,66
Термопластик	680,00	0,3000	0,000	0,00	214,20
Полістирол	345,00	0,2100	0,000	0,00	76,07
Всього					6295,50

#### 4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_6$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.8)$$

де  $H_j$  – кількість комплектуючих  $j$ -го виду, шт.;

$C_j$  – покупна ціна комплектуючих  $j$ -го виду, (грн.);

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ ).

$K_6 = 1 \cdot 505,00 \cdot 1,05 = 530,25$  (грн.).

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.7

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Мікроконтролер ESP 32 DIVKIT3	1	505,00	530,25
Сенсор газу – MICSECX 4721	1	710,00	745,50
Транзистори BF928	1	25,20	26,46
BFP450	1	39,90	41,90
BFT93	1	61,40	64,47
Всього			1408,58



#### 4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де  $C_i$  – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, (грн.);

$C_{\text{пр.і}}$  – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, (шт.);

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ( $K_i = 1,10 \dots 1,12$ );

$k$  – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 16820,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 17661,00 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Газоаналізатор лабораторний	1	16820,00	17661,00
Програматор мікроконтролерний	1	8400,00	8820,00
Осцилограф ОС-114/1-4	1	9562,00	10040,10
Паяльна станція ПС-280-А/8	1	1850,00	1942,50
Всього			38463,60

#### 4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{inpz} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (4.10)$$

де  $C_{inpz}$  – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{npz.i}$  – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{npz} = 4520,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 4746,00 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Пакет Visual System Simulator	1	4520,00	4746,00
Пакет Microwave Office	1	3710,00	3895,50
Пакет MATLAB SIMULINK	1	4290,00	4504,50
Всього			13146,00

#### 4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{обл} = \frac{C_{б}}{T_{е}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.11)$$

де  $C_{б}$  – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, (грн.);

$t_{вик}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{е}$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (42899,00 \cdot 2) / (2 \cdot 12) = 3574,92 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.10

Таблиця 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Графічно-обчислювальний комплекс	42899,00	2	2	3574,92
Робоче місце розробника-дослідника	9120,00	5	2	304,00
Пристрої виводу інформації	7999,00	4	2	333,29
Оргтехніка	7210,00	4	2	300,42
Приміщення лабораторії	365500,00	25	2	2436,67
ОС Windows 11	5680,00	3	2	315,56
Прикладний пакет Microsoft Office 2021 Professional Plus	5120,00	3	2	284,44
Всього				7549,29

## 4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію ( $B_e$ ) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.12)$$

де  $W_{yi}$  – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, (грн.); (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo  $C_e = 7,50$  (грн.);

$K_{eni}$  – коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{eni} < 1$ ;

$\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

$$B_e = 0,32 \cdot 240,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 576,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Графічно-обчислювальний комплекс	0,32	240,0	576,00
Робоче місце розробника-дослідника	0,08	210,0	126,00
Пристрої виводу інформації	0,12	3,0	2,70
Оргтехніка	0,32	1,5	3,60
Газоаналізатор лабораторний	0,25	150,0	281,25
Програматор мікроконтролерний	0,16	150,0	180,00
Осцилограф ОС-114/1-4	0,14	100,0	105,00
Паяльна станція ПС-280-А/8	0,08	6,0	3,60
Всього			1278,15

#### 4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 15...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (4.13)$$

де  $H_{cv}$  – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», приймемо  $H_{cv} = 15\%$ .

$$B_{cv} = (68668,18 + 2331,66) \cdot 15 / 100\% = 10649,98 \text{ (грн.)}$$

4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 20...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (4.14)$$

де  $H_{cn}$  – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo  $H_{cn} = 20\%$ .

$$B_{cn} = (68668,18 + 2331,66) \cdot 20 / 100\% = 14199,97 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де  $H_{ie}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{ie} = 50\%$ .

$$I_e = (68668,18 + 2331,66) \cdot 50 / 100\% = 35499,92 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загально виробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.16)$$

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загально виробничі) витрати», прийmemo  $H_{нзв} = 105\%$ .

$$B_{нзв} = (68668,18 + 2331,66) \cdot 105 / 100\% = 74549,83 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{ood} + Z_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (4.17)$$

$$B_{заг} = 68668,18 + 2331,66 + 7099,98 + 17181,96 + 6295,50 + 1408,58 + 38463,60 + 13146,00 + 7549,29 + 1278,15 + 10649,98 + 14199,97 + 35499,92 + 74549,83 = 298322,60 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати  $ZB$  на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.18)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta=0,9$ .

$$ZB = 298322,60 / 0,9 = 331469,55 \text{ (грн.)}$$

### 4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник  $K_p$  рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.19)$$

де  $I$  – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo  $I = 4$ ;

$n$  – коефіцієнт використання результатів роботи;  $n = 0$ , коли результати роботи не будуть використовуватись;  $n = 1$ , коли результати роботи будуть використовуватись частково;  $n = 2$ , коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках;  $n = 3$ , коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo  $n = 3$ ;

$T_c$  – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo  $T_c = 3$ ;

$R$  – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то  $R = 4$ ; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то  $R = 3$ ; якщо нижче відомих результатів, то  $R = 1$ . Прийmemo  $R = 4$ ;

$B$  – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo  $B = 331469,55$  (грн.);

$t$  – час проведення дослідження. Прийmemo  $t = 0,17$  років, (2 міс.).

Визначення показників  $I$ ,  $n$ ,  $T_c$ ,  $R$ ,  $B$ ,  $t$  здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [49].



$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 3 \cdot 4 / 331,5 \cdot 0,17 = 13,90.$$

Якщо  $K_p > 1$ , то науково-дослідну роботу на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

#### 4.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем» складають 331469,55 (грн.). Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи  $K_p > 1$ , що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці - це комплекс заходів, спрямованих на забезпечення безпеки та здоров'я працівників у процесі трудової діяльності. Основна мета охорони праці - мінімізувати ризики травм і захворювань, а також створити комфортні умови для роботи, які сприяють підвищенню продуктивності праці. Вдосконалення системи охорони праці на підприємстві має важливе значення, оскільки дозволяє збільшити безпеку праці, захистити здоров'я працівників, покращити умови праці та підвищити продуктивність. Для досягнення цієї мети необхідно, щоб система охорони праці була інтегрована в усі виробничі процеси на кожному підприємстві. Це означає, що всі працівники повинні бути обізнані з правилами безпеки та дотримуватися їх у своїй роботі.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які відповідно до Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» можуть впливати на працівника під час виконання дослідження на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем» такі: підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; недостатнє освітлення робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; відсутність чи нестача природного світла; фізичні перевантаження (статичні); пряма та відображена блискість; нервово - психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, емоційні навантаження).

Відповідно до визначених факторів формуємо рекомендації щодо безпечних умов праці під час виконання дослідження [50].

### 5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання дослідження

#### 5.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Обладнання робочого місця – це важливий фактор, який впливає на ефективність і безпеку праці. Наявність необхідних інструментів, технічного обладнання та комфортного робочого середовища сприяє:

- підвищенню продуктивності праці: працівники можуть ефективно виконувати завдання, знижувати час, необхідний для виконання завдань, і підвищувати якість виробленої продукції або наданої послуги;
- зменшення ризику травм та негативного впливу на здоров'я працівників: належне обладнання робочого місця допомагає запобігати травмам і захищає від негативного впливу шкідливих чинників.

Обладнання робочого місця має бути безпечним, відповідати вимогам охорони праці та бути адаптованим до потреб працівників.

На робочому місці необхідно забезпечити захист працівників від небезпечних і шкідливих факторів виробництва. Ці фактори можуть завдати шкоди здоров'ю працівників, тому їх рівні не повинні перевищувати допустимих норм, встановлених законодавством, технічними та санітарно-технічними нормами. Оскільки дослідження відбувається за ПК з відповідним програмним забезпеченням, проаналізуємо параметри приміщення щодо їх відповідності НПАОП 0.00-7.15-18 [51] «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями». Загальна площа приміщення становить  $26,7 \text{ м}^2$ , об'єм –  $93,5 \text{ м}^3$ . Кількість працівників у приміщенні – 4 особи. З них комп'ютеризованих 4 місця. На одного працівника в даному приміщенні припадає  $6,7 \text{ (м}^2/\text{ос.)}$  робочої площі. Об'єм повітря на одного працівника припадає  $23,4 \text{ м}^3$ . Знайдені значення відповідають нормативним.

Робоче місце дослідника має бути обладнане таким чином, щоб забезпечити достатній простір для виконання роботи. Для цього необхідно дотримуватися таких вимог:

1) Засоби ручного керування повинні бути розташовані в межах зони моторного поля, яка становить 900-1330 мм по висоті і 400-500 мм по глибині. Це дозволить досліднику комфортно виконувати завдання, не напружуючи руки.

2) Екран монітора повинен знаходитися на відстані 600-700 мм від очей працівника. Це дозволить уникнути втоми очей і запобігти розвитку захворювань.

3) Клавіатура повинна бути розташована таким чином, щоб дослідник міг комфортно працювати двома руками. Кут нахилу панелі клавіатури повинен бути в межах від 5 до  $25^\circ$ .

4) Принтер повинен бути розташований у зручному для користувача місці, щоб відстань до клавіш керування не перевищувала довжину витягнутої руки.

5) Висота робочої поверхні стола повинна становити 725 мм. Це дозволить досліднику комфортно працювати, не напружуючи спину.

6) Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше 450 мм і на рівні витягнутих ніг не менше 650 мм. Це дозволить працівнику комфортно тримати ноги під час роботи.

Засоби управління, які використовуються регулярно, повинні бути розташовані в межах зони досягання рук, щоб дослідник міг комфортно працювати з ними. Предмети, які використовуються рідко, можна розмістити

в більш віддаленій зоні або на спеціальних стелажах, щоб зберегти робочий простір.

Перед початком роботи необхідно:

- привести робоче місце в порядок, прибрати сторонні предмети. Це допоможе уникнути травм і запобігти падінню предметів;
- переконатися, що всі пристрої і блоки ПК підключені до системного блоку. Це допоможе уникнути пошкоджень обладнання;
- перевірити: наявність та надійність захисного заземлення устаткування для захисту від ураження електричним струмом, справність вимикачів та інших органів управління ПК, відсутність пошкоджень ізоляції проводів живлення та відсутність відкритих струмопровідних частин у пристроях ПК.

Після підготовки робочого місця необхідно забезпечити правильне освітлення. Пряме світло від вікон або інших джерел світла не повинно падати на екрани пристроїв. Для цього можна використовувати сонцезахисні пристрої. Обов'язково перевірити справність обладнання. Перед включенням штепсельної вилки необхідно переконатися в тому, що вимикачі мережі на всіх пристроях ПК знаходяться в положенні «вимкнено». При виявленні будь-яких несправностей ПК не вмикати і негайно повідомити керівника.

Дотримання вимог безпеки та ергономіки при роботі з комп'ютерами є важливим аспектом для забезпечення продуктивності та здоров'я працюючих. Правильне розташування обладнання, регулювання освітленості та своєчасне реагування на можливі несправності сприяють уникненню можливих проблем і забезпечують комфортну робочу атмосферу. Крім того, в процесі роботи необхідно робити перерви кожні 20-30 хвилин. Це допоможе уникнути втоми очей і шиї. Під час роботи спина повинна бути прямою, а ноги – зігнуті під прямим кутом в колінах.

### 5.1.2 Електробезпека приміщення

Усі технічні пристрої та обладнання, включаючи комп'ютери, спеціалізовані периферійні засоби, а також інструменти для обслуговування, ремонту та налагодження комп'ютерів, які використовуються під час виконання дослідження, відповідають актуальним стандартам та нормам щодо охорони праці, що діють в Україні, включаючи НПАОП 0.00-7.15-18 та ДСанПіН 3.3.2.007-98.

По небезпеці ураження електричним струмом досліджуване приміщення відноситься до категорії без підвищеної небезпеки, оскільки є сухим, в ньому нема підвищених температур, підвищеної вологості, підлога вкрита

струмонепровідним матеріалом (згідно з ПУЕ). Живлення силового обладнання та системи освітлення у приміщенні здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 x 220В (фазна напруга (фаза – «0») – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Для уникнення можливих електричних уражень прийнято численні заходи, зокрема такі як заземлення всіх наявних небезпечних електричних установок та ізоляція струмоведучих частин обладнання. Були встановлені окремі мережі для побутового та комп'ютерного живлення, а також персонал було проінформовано про необхідність безпеки при ремонті обладнання. Для забезпечення пожежної безпеки, в коридорі розміщено схему евакуації та встановлені шляхи евакуації, відповідні стандартам пожежної безпеки. Будинок також має два виходи, широкі коридори та двері, які відкриваються в напрямку руху людей під час евакуації, сприяючи загальній безпеці та швидкому виходу в надзвичайних ситуаціях. У разі виникнення будь-якої надзвичайної ситуації, включаючи пожежу або інші аварійні події, на території приміщення розташовані засоби пожежогасіння, готові до негайного використання.

Забезпечення безпеки та запобігання можливим небезпечним ситуаціям є одним з пріоритетів організації. Прийняти заходи, такі як заземлення та ізоляція електроустановок, розділення живлення, а також систематичне мережеве інформування персоналу про можливі ризики, слугують доказом значимості безпеки всіх осіб, які перебувають у приміщенні - незалежно від того, чи є вони працівниками, чи відвідувачами. Дотримання працівниками встановлених норм, стандартів та процедур, створення службового комфорту, системи безпеки праці та негайного реагування на будь-які надзвичайні ситуації – є основою для безпечної та ефективної роботи працівників [52]/

## 5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 5.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат у виробничих або офісних приміщеннях має значущий вплив на комфорт та продуктивність працівників. Оптимальні показники температури, вологості та якості повітря сприяють зниженню втоми та підвищенню концентрації. Параметри мікроклімату в робочій зоні належать до сфери нормування, і це нормування враховує як сезонні зміни, так і характер роботи, пов'язаний із витратами енергії та тепловим навантаженням. Виконання дослідження на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання

концентрації газів для IoT систем» належить до категорії робіт з легким фізичним навантаженням. Параметри мікроклімату, прийняті для роботи з категорією 1 б відповідно до вимог ДСН 3.3.6.042-99 [52], наведені в таб. 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	21-28	75	0,1-0,3
Холодний	20-24	75	0,1

Для досягнення допустимих параметрів мікроклімату у досліджуваному приміщенні використовують інженерні системи та технологічні рішення. Під час холодного періоду року – централізована парова система опалення для обігріву. За допомогою системи припливно-витяжної вентиляції, систематичного провітрювання та використання зволожувачів повітря досягається нормований рівень вологості повітря.

### 5.2.2 Склад повітря робочої зони

В приміщенні, де проводилося дослідження, існує ймовірність появи таких шкідливих речовин в повітрі, як вуглекислий газ, пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка, а пил може потрапляти в приміщення через вікна, двері та переноситися працівниками. Це може призвести до накопичення пилу та шкідливих речовин у повітрі, що вимагає регулярного прибирання та підтримки високої якості повітря у приміщенні. Згідно з ДСН 3.3.6.042-99 [53], у виробничих приміщеннях шкідливі хімічні речовини в повітрі не повинні перевищувати гранично допустимі концентрації забруднюючих речовин (табл. 5.2). Рівні позитивних і негативних іонів у повітрі в таких приміщеннях повинні відповідати нормам, поданим у таблиці 5.3.

Таблиця 2.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

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

Таблиця 5.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

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

Забезпечення належних умов повітряного середовища у приміщенні досягається за рахунок роботи вентиляційної системи та регулярного вологого прибирання. Якщо потрібно, можна провітрювати приміщення, відчиняючи вікна та двері для покращення якості повітря. Важливо дотримуватися встановлених графіків для вологого приладдя та технічного обслуговування вентиляційних систем, щоб забезпечити постійну ефективність їхньої роботи та безпеку приміщення. Вчасне обслуговування вентиляційних систем та дотримання зазначених процедур відіграють ключову роль у підтриманні відповідних умов для праці та комфорту всіх працівників.

### 5.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення виробничих приміщень є ключовим для забезпечення безпеки, комфорту та продуктивності працівників у виробничому середовищі, і правильне планування та доцільне використання освітлення вважаються критично важливими аспектами у галузі охорони праці та управління виробничими процесами.

У приміщенні, де проводилося дослідження, використовуються як штучне, так і природне освітлення. Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 [53], в такому приміщенні рекомендується використовувати систему комбінованого освітлення. Освітленість на робочих місцях забезпечується природним світлом під час світлих годин та штучним освітленням в темну пору доби. Норми освітленості для штучного освітлення та коефіцієнти природного освітлення для третього світлового поясу вказані в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО,			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення належного рівня освітлення передбачені такі заходи:

1) Максимальне використання природного освітлення шляхом розміщення робочих зон поруч із вікнами. Це допоможе використати природне світло та зменшити залежність від штучного освітлення.

2) Регулярне очищення віконного скла від бруду і пилу, не менше двох разів на рік. Чисте віконне скло покращує пропускну здатність світла та забезпечує яскраве освітлення приміщення.

3) Постійна підтримка справності освітлювальних приладів шляхом заміни несправних світильників та регулювання їх яскравості, щоб забезпечити стабільне та комфортне освітлення.

4) Використання енергоефективних світильників та ламп.

#### 5.2.4 Виробничий шум

Вплив шуму на організм людини залежить від інтенсивності та частоти звукових коливань, тривалості експозиції, а також фізичного та психічного стану особи. Шум може істотно впливати на продуктивність та якість виконаної роботи, оскільки під його впливом знижується здатність до концентрації уваги та порушуються фізіологічні функції організму. В результаті тривалий вплив шуму може призвести до негативних наслідків для здоров'я працівників, включаючи погіршення їхнього психофізичного стану.

Джерелом шуму у приміщенні, де виконувалася робота, є працююча офісна техніка. Дотримання санітарних норм виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку регулюється ДСН 3.3.6.037-99 [55]. Норми для умов виконання



роботи відображені в табл.5.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньо-геометричними 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 прийнятих рівнів шуму можна вживати заходи, такі як використання комп'ютерів із пасивним охолодженням та встановлення вікон із високими показниками звукоізоляції [56]. Ці заходи сприяють зниженню рівня шуму і покращенню комфорту для працівників. Крім того, при підвищенні рівня шумового фону слід передбачити інші заходи для зменшення шумового впливу, такі як застосування звукоізоляційних матеріалів в інтер'єрі приміщення, встановлення перегородок, що поглинають звук тощо.

### 5.2.5 Виробничі випромінювання

На дослідника під час виконання роботи діє підвищений рівень електромагнітного поля, джерелом якого є працююча техніка (ПК, принтер, сканер, ксерокс) та електромережа в приміщенні. Наслідком впливу електромагнітного поля може бути: тепловий ефект (при наявності досить високих рівнів електромагнітного випромінювання), погіршення стану здоров'я (зокрема, проблеми в роботі нервової та серцево-судинної систем, пошкодження сітківки ока), а також підвищення тривоги. Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітору комп'ютера наведені в табл. 5.6. [57]

Таблиця 5.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	10 В/м

Продовження таблиці 5.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	0,3 А/м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати:	для дорослих користувачів 20кВ/м для дітей 15кВ/м

Для мінімізації впливу електромагнітного поля на працівника важливо використовувати лише високоякісну техніку, яка забезпечена сертифікатом якості, що гарантує надійність та безпеку в роботі та дотримуватися раціонального режиму праці та відпочинку.

#### 5.2.6 Психофізіологічні фактори

Забезпечення відповідних психофізіологічних умов на робочому місці є важливим аспектом охорони здоров'я та безпеки працівників. Забезпечення належних умов включає в себе розробку та впровадження ефективних стратегій зниження стресу, контролю над фізичним навантаженням, а також забезпечення раціонального режиму роботи.

Оцінка психофізіологічних факторів під час виконання дослідження на тему «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем» здійснюється відповідно до Гігієнічної класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу.

Загальні енергозатрати організму: до 174 Вт.

Стереотипні робочі рухи (кількість за зміну): до 40 000.

Робоча поза: вільна зручна поза, можливість зміни пози («сидячи – стоячи») за бажанням працівника; перебування в позі «стоячи» до 40% часу зміни.

Нахили тулуба (вимушені, більше 30°), кількість за зміну: до 50 раз.

Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження:

– зміст роботи – творча діяльність, що вимагає вирішення складних завдань за відсутності алгоритму;

–сприймання інформації та їх оцінка – сприймання сигналів з наступним порівнянням фактичних значень параметрів з їх номінальними значеннями. Заключна оцінка фактичних значень параметрів;

–розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, виконання завдання та його перевірка.

Сенсорні навантаження:

–зосередження (%за зміну) – до 5-75%;

–щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150;

–навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80 %;

–спостереження за екранами відеотерміналів (годин на зміну) – 4-6год.

–навантаження на голосовий апарат ( протягом тижня) – від 16 до 20.

Емоційне навантаження:

ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний;

Режим праці: тривалість робочого дня – більше 8 год; змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни). [57]

За зазначеними показниками важкості та напруженості праці, робота, яка виконується належить до допустимого класу умов праці (напруженість праці середнього ступеня).

### 5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи в умовах дії загрозливих факторів НС

#### 5.3.1 Дія вогню на будівлі виробничих приміщень під час пожежі

Аналіз пожеж показує, що рівень гранично допустимих чинників пожежі виникає через 5-10 хв з початку пожежі, несучу здатність будівельні металеві конструкції втрачають через 10-15 хв, а середній час початку ефективних дій пожежних підрозділів становить 20-25 хв.

Пожежну небезпеку посилює зростання концентрації горючих речовин і матеріальних цінностей, що припадає на одиницю площі будівель (пожежне навантаження), що призводить до дуже високого рівня їх пожежної небезпеки.

Тяжкість наслідків від пожеж значною мірою зумовлена недостатньою захищеністю будівель та споруд системами автоматичного протипожежного захисту та їх некваліфікованим обслуговуванням.

Причиною зростання кількості жертв та матеріальних збитків на пожежах стає те, що технічна оснащеність пожежної охорони значно відстає від сучасних вимог і недостатньо укомплектована засобами рятування людей та засобами пожежогасіння.

Втрати від пожеж визначаються сукупністю видів збитків від них. Втрати на пожежах пов'язані з прямими, побічними, соціальними та екологічними збитками.

Руйнування будівельних конструкцій відбувається внаслідок втрати ними несучої здатності під впливом високих температур та вибухів. При цьому люди можуть одержати значні механічні травми, опинитися під уламками завалених конструкцій. До того ж, евакуація може бути просто неможливою, внаслідок завалів евакуаційних виходів та руйнування шляхів евакуації [58].

Тільки в Україні щотижня пожежі руйнують або пошкоджують від 600 до 700 житлових будівель і приміщень. Більшість видів соціальних збитків неможливо економічно оцінити (розпад сім'ї, хвороби, стреси). Люди, що отримали травми на пожежах, потребують тривалого (до 2 років) та дорогого лікування, включаючи пластичні та реконструктивні операції. Світова статистика свідчить, що в середньому на одного загиблого припадає до 30 опечених, які отримали опіки різного ступеня та витрати на лікування яких складають до 2% загальних збитків від пожежі.

### 5.3.2 Визначення нижньої та верхньої концентраційної межі спалахування пожежовибухо-небезпечної суміші

Вихідні дані: до складу пожежовибухонебезпечної суміші входять: метан – 80 %, етан – 10 %, пропан – 5 %, бутан – 5 %.

Нижню та верхню концентраційну межу поширення полум'я (спалахування)  $C$  суміші декількох горючих речовин при початковій температурі суміші 25 °С можна орієнтовно визначити за формулою Ле-Шателе

$$C = \frac{\sum_{k=1}^n C_k}{\sum_{k=1}^n C_k / C_{mk}} \quad [\% \text{ об.}], \quad (5.1)$$

де  $n$  – кількість горючих елементів суміші;

$C_k$  – концентрація  $k$ -го компонента в суміші, % об.;

$C_{mk}$  – нижня або верхня концентраційна межа (НКМ або ВКМ) поширення полум'я  $k$ -го компонента суміші, % об.

Вибираємо НКМ та ВКМ усіх складових пожежовибухонебезпечної суміші: метан – 5/15 %, етан – 2,9/15 %, пропан – 2,1/9,5 %, бутан – 1,8/9,1 %.

Використовуючи формулу (5.1) визначимо нижню та верхню концентраційну межу поширення полум'я (спалахування) суміші

$$C_{НКМ} = \frac{80 + 10 + 5 + 5}{80/5 + 10/2,9 + 5/2,1 + 5/1,8} = 4,06 (\% \text{ об.});$$

$$C_{ВКМ} = \frac{80 + 10 + 5 + 5}{80/15 + 10/15 + 5/9,5 + 5/9,1} = 14,13 (\% \text{ об.}).$$

### 5.3.3 Розробка превентивних заходів з підвищення безпеки роботи в умовах дії надзвичайних ситуацій

Для попередження пожежі проводяться організаційні, технічні, експлуатаційні та режимні заходи.

До організаційних заходів відносяться: навчання працюючих правилам пожежної безпеки, проведення інструктажів, бесід, лекцій тощо.

До технічних – дотримування протипожежних правил та норм при встановленні опалення, вентиляційного обладнання.

До експлуатаційних – заходи, що передбачають правильну експлуатацію машин, обладнання, транспорту, правильне утримання території і будинків.

## 5.4 Висновки

Визначено нижню та верхню концентраційну межу спалахування пожежовибухонебезпечної суміші. Розроблено превентивні заходи з підвищення безпеки роботи в умовах дії надзвичайних ситуацій.

## ВИСНОВКИ

На основі проведеного аналізу літературних джерел можна зробити наступні висновки, що розумні технології відіграють вирішальну роль у стабільному економічному зростанні. Вони перетворюють будинки, офіси, фабрики і навіть міста в автономні, самокеровані системи без втручання людини. Ця сучасна тенденція автоматизації та дедалі більше використання передових технологій сприяють розвитку світової економіки. Інтернет речей (IoT) і бездротові сенсорні мережі (WSN) відіграють життєво важливу роль у цій модернізації. На підставі вище написаного необхідно швидко і якісно розробляти радіотехнічні пристрої вимірювання з покращеними метрологічними та економічними показниками для бездротових сенсорних мереж.

Розроблено математичні моделі радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів та біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, в яких на відміну від існуючих, враховано вплив концентрації газу на елементи нелінійних еквівалентних схем, що дало змогу отримати аналітичні вирази чутливості та функції перетворення концентрації газу у частоту. Удосконалено математичну модель резистивного елемента, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховані фізичні процеси, що приводять до зміни опору поверхні газочутливого напівпровідника від кількості адсорбованих молекул газу.

Отримано аналітичні вирази для функції перетворення і чутливості розробленого радіотехнічних пристроїв вимірювання концентрації газів для IoT систем на основі метал-діелектрик-напівпровідник газочутливих елементів та біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором, які можуть бути використані для інженерного розрахунку первинних вимірювальних пристроїв концентрації газів.

Представлено дослідження газочутливого SiC-FET з двох, трьох та багато електродному вигляді для моніторингу вихлопних газів, виявлення NOx та для застосування вимірювання якості повітря в приміщенні.

Розроблено радіотехнічний пристрій визначення якості повітря з modbus rtu на ESP8266. Для вимірювання та визначення якості повітря використано MEMS сенсор якості повітря CCS811 та порівняння його показань з SGP30 або SGPC3. Тестовий стенд побудований на контролері Wiren Board з протоколом Modbus RTU, тому і розроблюваний пристрій працює з цим протоколом. Написаний шаблон для драйвера wb-mqtt-serial, а також написано простий сценарій автоматизації. Представлено лістинг програми для мікроконтролера ESP8266 на мові C++.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цзюнь Чжен, Аббас Джамаліпур, «Бездротові сенсорні мережі: мережева перспектива», Wiley India, 1-е видання, 2014 р.
2. Walteneus Dargie, Christian Poellabauer, "Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice", John Wiley & Sons, 1st Edition, 2010.
3. Едгар Х. Каллавей, «Бездротові сенсорні мережі: архітектури та протоколи», CRC Press, 1-е видання, серпень 2003 р.
4. Jose A. Gutierrez, Edgar H. Callaway, Raymond Barrett, "IEEE 802.15.4 Low-Rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensor Networks", Standards Information Network, 3rd Edition, 2011.
5. Kazem Sohraby, Daniel Minoli, TaiebZnati, "Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications", John Wiley & Sons, 1st Edition, 2007.
6. Ashibani, Y.; Mahmoud, Q.H. Cyber physical systems security: Analysis, challenges and solutions. *Comput. Secur.* 2017, 68, 81–97.
7. Ahmad, W.; Rasool, A.; Javed; Baker, A.R.T.; Jalil, Z. Cyber Security in IoT-Based Cloud Computing: A Comprehensive Survey. *Electronics* 2022, 11, 16.
8. Landaluce, H.; Arjona, L.; Perallos, A.; Falcone, F.; Angulo, I.; Muralter, F. A review of iot sensing applications and challenges using RFID and wireless sensor networks. *J. Sens.* 2020, 20, 1–18.
9. Dalipi, F.; Yayilgan, S.Y. Security and privacy considerations for IoT application on smart grids: Survey and research challenges. In *Proceedings of the Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW)*, Vienna, Austria, 22–24 August 2016; pp. 63–68.
10. Tuna, G.; Gungor, V.C. A survey on deployment techniques, localization algorithms, and research challenges for underwater acoustic sensor networks. *J. Commun. Syst.* 2017, 30, e3350.
11. Faheem, M.; Tuna, G.; Gungor, V.C. Lrp: Link quality-aware queue-based spectral clustering routing protocol for underwater acoustic sensor networks. *J. Commun. Syst.* 2017, 30, e3257.
12. Parra, L.; Sendra, S.; Lloret, J.; Rodrigues, J.J. Design and deployment of a smart system for data gathering in aquaculture tanks using wireless sensor networks. *J. Commun. Syst.* 2017, 30, e3335.
13. Sharma, R.; Prakash, S. Enhancement of relay nodes communication approach in WSN-IoT for underground coal mine. *J. Inf. Optim. Sci.* 2020, 41, 521–531.
14. Rashid, B.; Rehmani, M.H. Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey. *J. Netw. Comput. Appl.* 2016, 60, 192–219.

14. Ravi, C.; Tigga, A.; Reddy, G.T.; Hakak, S.; Alazab, M. Driver Identification Using Optimized Deep Learning Model in Smart Transportation. *ACM Trans. Internet Technol.* 2020 .
15. Tandale, U.; Momin, B.; Seetharam, D.P. An empirical study of application layer protocols for IoT. In *Proceedings of the International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, Chennai, India, 1–2 August 2017; pp. 2447–2451.
16. Kumar, R.; Kumar, P.; Srivastava, G.; Gupta, G.P.; Tripathi, R.; Gadekallu, T.R.; Xiong, N.N. PPSF: A privacy-preserving and secure framework using blockchain-based machine-learning for IoT-driven smart cities. *IEEE Trans. Netw. Sci. Eng.* 2021, 8, 2326–2341.
17. Farsi, M.; Daneshkhah, A.; Hosseinian-Far, A.; Jahankhani, H. (Eds.) *Digital Twin Technologies and Smart Cities*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020.
18. Majeed, M.A.A.; Rupasinghe, T.D. Internet of things (IoT) embedded future supply chains for Industry 4.0: An assessment from an ERP-based fashion apparel and footwear industry. *Int. J. Supply Chain. Manag.* 2017, 6, 25–40.
19. Oliff, H.; Liu, Y. Towards Industry 4.0 Utilizing Data-Mining Techniques: A Case Study on Quality Improvement. *Procedia CIRP* 2017, 63, 167–172.
20. Ovsthus, A.A.K.S.K.; Kristensen, L.M. An Industrial Perspective on Wireless Sensor Networks—A Survey of Requirements, Protocols, and Challenges. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2014, 16, 1391–1412.
21. Muneeba, N.; Javed, A.R.; Tariq, M.A.; Asim, M.; Baker, T. Feature engineering and deep learning-based intrusion detection framework for securing edge IoT. *J. Super Comput.* 2022, 1–15.
22. Osterrieder, P.; Budde, L.; Friedli, T. The smart factory as a key construct of Industry 4.0: A systematic literature review. *Int. J. Prod. Econ.* 2020, 221, 107476.
23. Devesh, M.; Kant, A.K.; Suchit, Y.R.; Tanuja, P.; Kumar, S.N. Fruition of CPS and IoT in Context of Industry 4.0. In *Intelligent Communication, Control and Devices*; Springer: Singapore, 2020; pp. 367–375.
24. Pamarthi, S.; Narmadha, R. Literature review on network security in Wireless Mobile Ad-hoc Network for IoT applications: Network attacks and detection mechanisms. *Int. J. Intell. Unmanned Syst.* 2021, ahead-of-print.
25. Parvathy, K. Wormhole Attacks in Wireless Sensor Networks (WSN) & Internet of Things (IoT): A Review. *Int. J. Recent Technol. Eng. (IJRTE)* 2021, 10. Ayotunde, A.F. Internet of Things security: A survey. *J. Netw. Comput. Appl.* 2017, 8, 10–28.



26. Granjal, J.; Monteiro, E.; Silva, J. Security for the Internet of things: A survey of existing protocols and open research issues. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2015, 17, 1294–1312.
27. Sharma, V.; Patel, R.B.; Bhaduria, H.S.; Prasad, D. Deployment schemes in wireless sensor network to achieve blanket coverage in large-scale open area: A review. *Egypt. Inform. J.* 2016, 17, 45–56.
28. Trotta, D.; Garengo, P. Industry 4.0 key research topics: A bibliometric review. In *Proceedings of the 2018 7th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*, Oxford, UK, 7–9 May 2018; pp. 113–117.
29. Iwendi, C.; Jalil, Z.; Javed, A.R.; Reddy, T.; Kaluri, R.; Srivastava, G.; Jo, O. Keysplitwatermark: Zero watermarking algorithm for software protection against cyber-attacks. *IEEE Access* 2020, 8, 72650–72660.
30. Wang, W.; Qiu, C.; Yin, Z.; Srivastava, G.; Gadekallu, T.R.; Alsolami, F.; Su, C. Blockchain and PUF-based Lightweight Authentication Protocol for Wireless Medical Sensor Networks. *IEEE Internet Things* 2021.
31. Microelectronic sensors of physical quantities. Edited Z.Yu. Hotra. In 3 volumes. Lvov: League-Press, 2003. Vol.2. –595 p.
32. Kwang-Jow Gan, Dong-Shong Liang, Chung-Chih Hsiao, Cher-Shiung Tsai and Yaw-Hwang Chen. Investigation of MOS-NDR Voltage Controlled Ring Oscillator Fabricated by CMOS Process. 2005 IEEE Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits, 2005. pp. 825-827. DOI: 10.1109/EDSSC.2005.1635405
33. Kwang-Jow Gan, Kuan-Yu Chun, Wen-Kuan Yeh. Design of Dynamic Frequency Divider using Negative Differential Resistance Circuit. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication.* 2015. Volume: 3 Issue: 8. pp.5224-5228.
34. J. Núñez, M. J. Avedillo, J. M. Quintana. Bifurcation diagrams in MOS-NDR frequency divider circuits. 2012 19th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS 2012), Seville, 2012. pp. 480-483. DOI: 10.1109/ICECS.2012.6463558
35. D. S. Liang, K. J. Gan, K. Y. Chun. Frequency divider design using the  $\Lambda$ -type negative-differential-resistance circuit. 2010 53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, Seattle, WA, 2010. pp. 969-972. DOI: 10.1109/MWSCAS.2010.5548795
36. A.V. Osadchuk, V.S.Osadchuk. Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities. 2015 Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 21-23 May 2015. Omsk. 978-1-4799-7103-9/15. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147167

37. V.S. Osadchuk and O.V. Osadchuk. Reactive properties of transistors and transistor circuits. Vinnitsa: UNIVERSUM-Vinnitsa, 1999.
38. Problems of semiconductor physics. Sat ed. V. L. Bonch-Bruevich. Moskow: Foreign literature, 1957. – 450 p.
39. Osadchuk A., Osadchuk V., Seletska O., Krylik L. Microelectronic Transducer of Gas Concentration based on MOSFET with an Active Inductive Element. PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 95 NR 4/2019. –P.237-241
40. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V., Yushchenko Y.A. Radiomeasuring thermal flowmeter of gas on the basis of transistor structure with negative resistance. Elektronika ir Elektrotechnika. Kaunas: Technologija, 2008. №8(84). pp.89-93.
41. User`s Guide includes PSPICE A/D, PSPICE A/D Basics and PSPICE Cadence Design Systems. Inc. All rights reserved, 2016. – 898 p.
42. Osadchuk O., Osadchuk V., Osadchuk I. The generator of superhigh frequencies on the basis silicon germanium heterojunction bipolar transistors. 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv, 2016, pp. 336-338.
43. Abe, J.O.; Popoola, A.P.I.; Ajenifuja, E.; Popoola, O.M. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. Int. J. Hydrogen Energy 2019, 44, 15072–15086.
44. Lu, S.; Zhang, Y.; Liu, J.; Li, H.-Y.; Hu, Z.; Luo, X.; Gao, N.; Zhang, B.; Jiang, J.; Zhong, A.; et al. Sensitive H<sub>2</sub> gas sensors based on SnO<sub>2</sub> nanowires. Sens. Actuators B 2021, 345, 130334.
45. Mao, X.; Ying, R.; Yuan, Y.; Li, F.; Shen, B. Simulation and analysis of hydrogen leakage and explosion behaviors in various compartments on a hydrogen fuel cell ship. Int. J. Hydrogen Energy 2021, 46, 6857–6872.
46. Zhang, X.-Y.; Ma, R.-H.; Li, L.-S.; Fan, L.; Yang, Y.-T.; Zhang, S.-Y. A room-temperature ultrasonic hydrogen sensor based on a sensitive layer of reduced graphene oxide. Sci. Rep. 2021, 11, 2404.
47. Wang, F.; Hu, K.; Liu, H.; Zhao, Q.; Wang, K.; Zhang, Y. Low temperature and fast response hydrogen gas sensor with Pd coated SnO<sub>2</sub> nanofiber rods. Int. J. Hydrogen Energy 2020, 45, 7234–7242.
48. Lee, J.; Koo, H.; Kim, S.Y.; Kim, S.J.; Lee, W. Electrostatic spray deposition of chemochromic WO<sub>3</sub>-Pd sensor for hydrogen leakage detection at room temperature. Sens. Actuators B 2021, 327, 128930.
49. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

50. 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](http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14_nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html)

51. 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](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028)

52. 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](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885)

53. 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\\_npaop\\_0\\_00-7\\_15-18\\_01\\_ua.php](http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php)

54. ДСанПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derzhavni-sanitarni-pravila-i-normi-roboti-z-vizualnimi-disp-nor4881.html>

55. 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>

56. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

57. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

58. Методичні вказівки до самостійної та індивідуальної роботи з дисципліни "Цивільний захист та охорона праці в галузі. Частина 1. Цивільний захист" / Уклад. О. В. Поліщук, О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 32 с.5

Додаток А  
(обов'язковий)

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**  
**РАДІОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ**  
**ГАЗІВ ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ**

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-22м  
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіо-  
техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

  
Андреєнков М.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., зав. каф. ІРТС

  
Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«16» 12 2023 р.

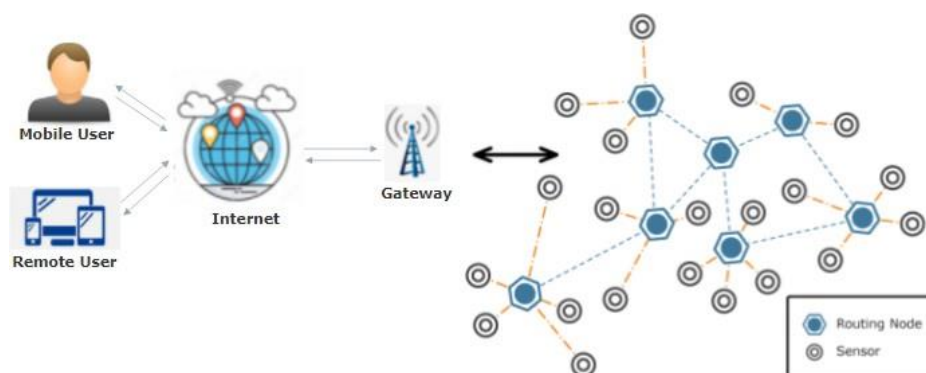


Рисунок 1 - Архітектура бездротової сенсорної мережі (WSN)

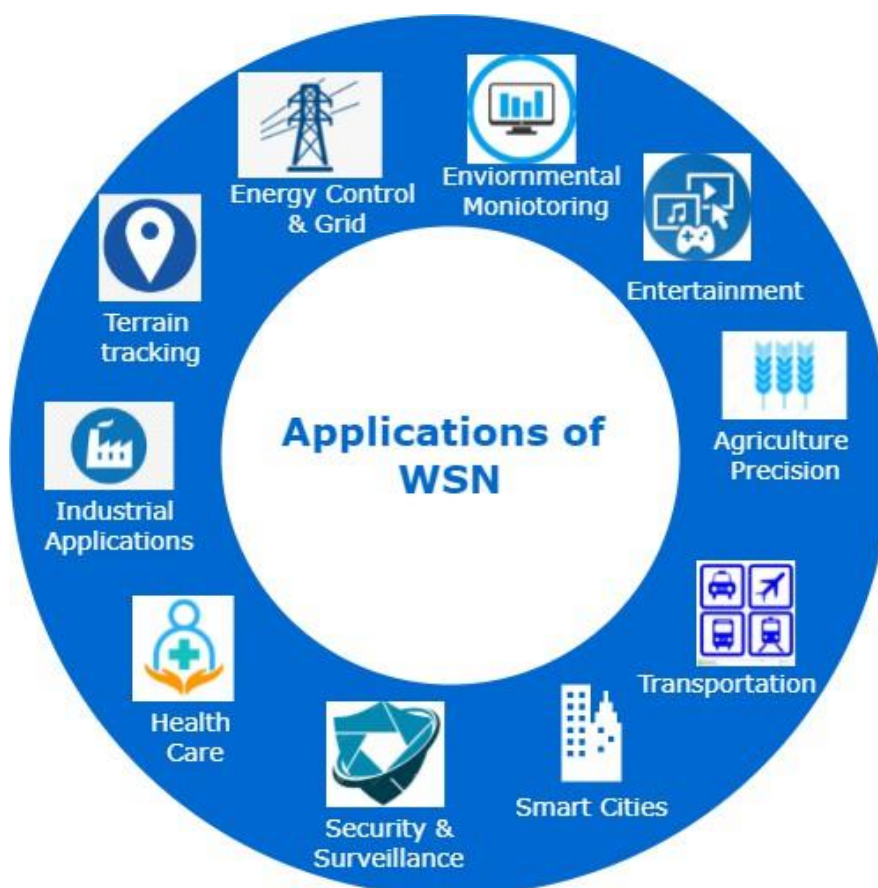


Рисунок 2 – Застосування бездротової сенсорної мережі (WSN)



Рисунок 3 – Види комунікаційних технологій

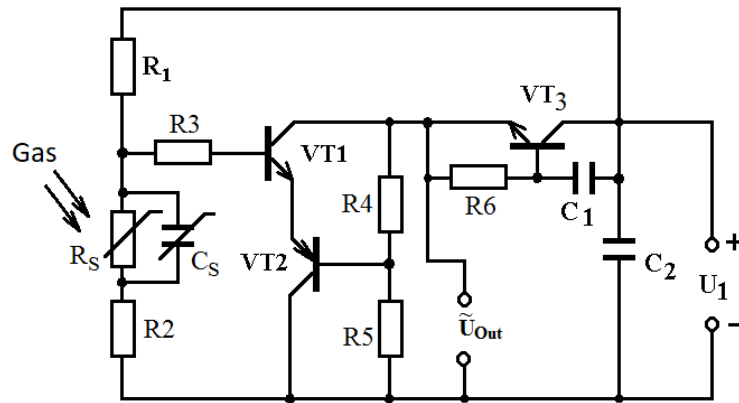


Рисунок 4 – Електрична схема автогенераторного радіотехнічного пристрою вимірювання концентрації газів на основі двох біполярних транзисторів з активним індуктивним елементом

$$F_0(w) = \frac{1}{2\pi R_g(w) C_{ekv}(w)} \left[ \frac{R_g^2(w) C_{ekv}(w)}{L} - 1 \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$S_{F_0}^w = \frac{R_g(w) C_{ekv}(w) \frac{dR_g(w)}{dw} + R_g^2(w) \frac{dC_{ekv}(w)}{dw}}{4\pi R_g(w) C_{ekv}(w) L \left[ \frac{R_g^2(w) C_{ekv}(w)}{L} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}} - \frac{\left[ \frac{R_g^2(w) C_{ekv}(w)}{L} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \frac{dR_g(w)}{dw}}{2\pi R_g^2(w) C_{ekv}(w)}$$

$$- \frac{\left[ \frac{R_g^2(w) C_{ekv}(w)}{L} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \frac{dC_{ekv}(w)}{dw}}{2\pi R_g(w) C_{ekv}^2(w)}.$$

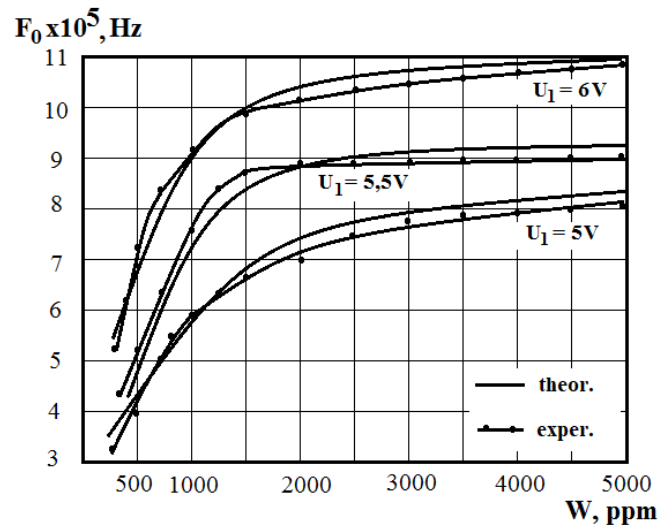


Рисунок 5 – Теоретична та експериментальна залежність вихідної частоти автогенераторного перетворювача від концентрації метану

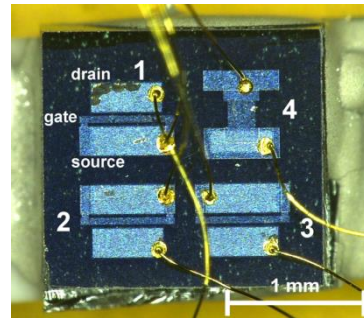
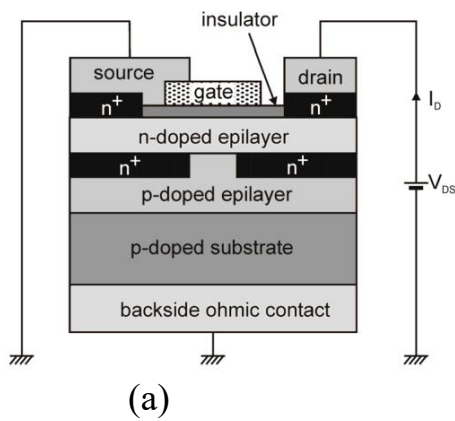


Рисунок 6 – (а) Вид поперечного перерізу SiC-FET із двополюсним виснаженням і (б) зображення матриці SiC, що містить три транзисторні структури (1–3) і одну тестову структуру (4)

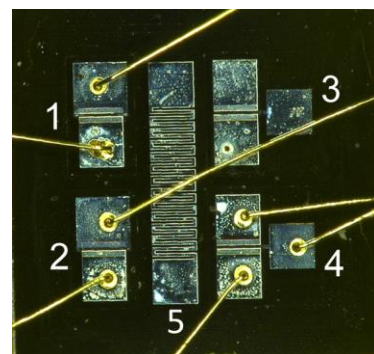
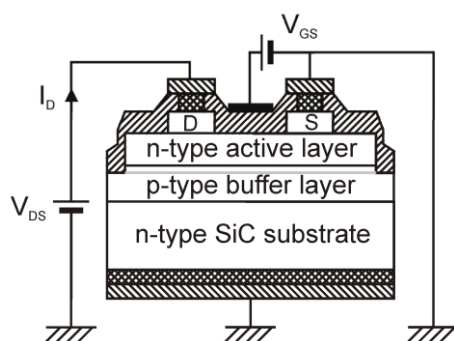


Рисунок 7 – (а) Поперечний переріз SiC-FET із виснаженням трьох контактів і (б) зображення матриці SiC, що містить дві транзисторні структури з двома висновками (1, 2) і дві транзисторні структури з трьома висновками (3, 4). ) і платиновий датчик температури (5)



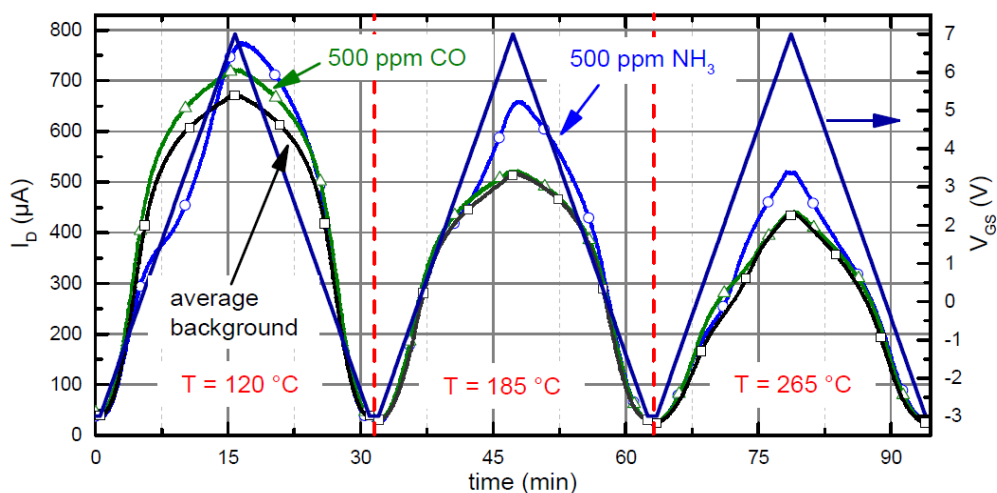


Рисунок 8 – Застосована розгортка зсуву затвора (синій) і відповідна відповідь датчика на 500 ppm аміаку та 500 ppm монооксиду вуглецю в сухому синтетичному повітрі при трьох температурах

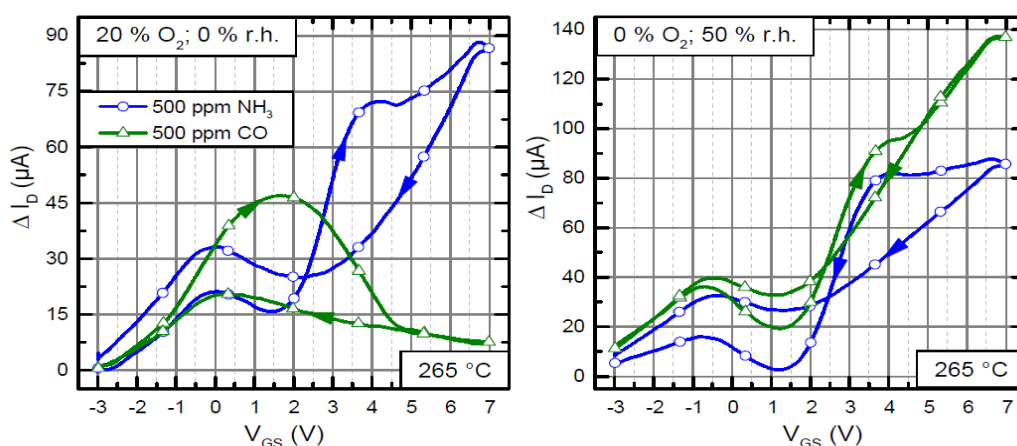


Рисунок 9 – Різницеві криві гістерезису для NH<sub>3</sub> і CO при 265 °C при зміні зсуву затвора від -3 В до +7 В за 900 с і назад. (а) У сухому синтетичному повітрі, тобто 20 % O<sub>2</sub> і 0 % r.h., та (б) в азоті з відносною вологістю 50 % при 20 °C

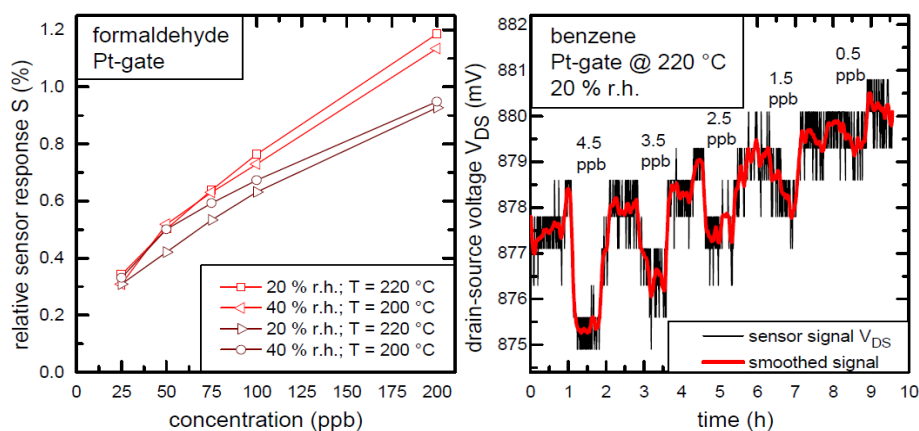


Рисунок 10 – (а) Відносна відповідь датчика для формальдегіду при двох рівнях вологості та при двох температурах і (б) відповідь датчика для бензолу



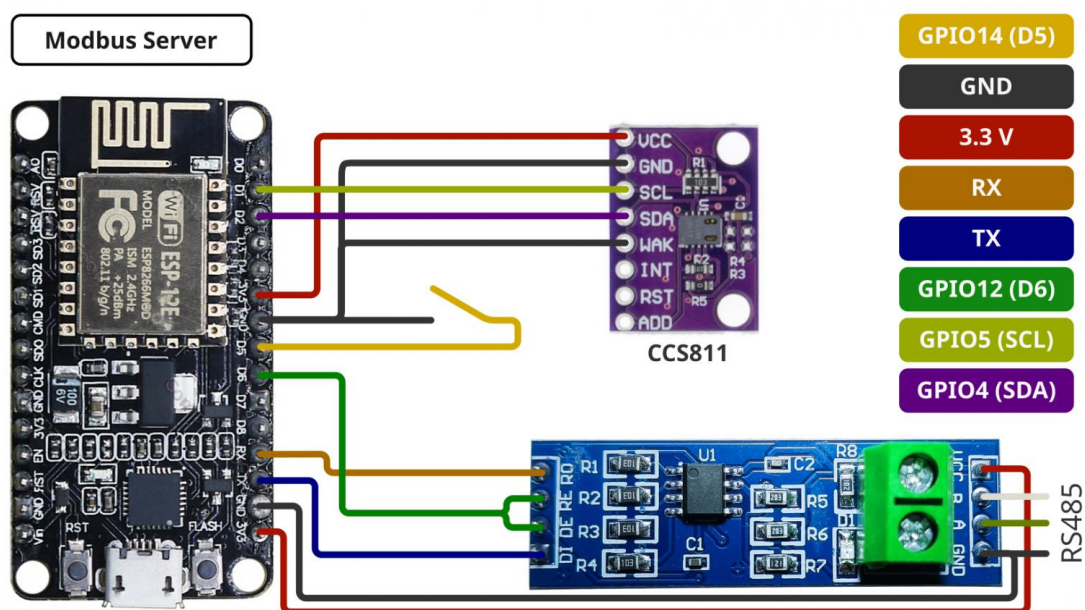


Рисунок 11 – Схема підключення датчика CCS811 та перетворювача UART-RS485



Рисунок 12 – Зовнішній вигляд Wiren Board

Додаток Б  
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ**  
**РАДІОТЕХНІЧНІ ПРИБОРИ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ**  
**ГАЗІВ ДЛЯ ІОТ СИСТЕМ**

ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Радіотехнічні пристрої вимірювання концентрації газів для IoT систем»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра ІРТС  
(кафедра, факультет)

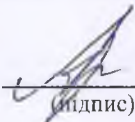
**Показники звіту подібності Unicheck**

Оригінальність 90,06% Схожість 9,94%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку

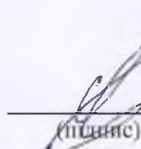
  
(підпис)

Звягін О.С.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

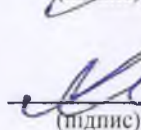
Автор роботи

  
(підпис)

Андреєнков М.А.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Осадчук О.В.

(прізвище, ініціали)

## Додаток В (ДОВІДНИКОВИЙ)

### Лістинг програми на ESP8266

```

#include <ModbusRTU.h> // modbus-esp8266
#include <EEPROM.h> // робота з EEPROM
#include <SimpleTimer.h> // простий таймер

#include <Wire.h> // Wire
#include <SparkFunCCS811.h> // SparkFunCCS811

#define DEFAULT_MB_ADDRESS 1 // адрес нашого сервера
#define DEFAULT_MB_STOP_BITS 2 // кількість стопових бітів
#define DEFAULT_MB_BAUDRATE 96 // швидкість підключення /100

#define REG_SENSOR_ERROR 0 // помилка ініціалізації сенсора CCS811
#define REG_SENSOR_ECO2 1 // eCO2
#define REG_SENSOR_TVOC 2 // TVOC
#define REG_SENSOR_BL 3 // Baseline
#define REG_MB_ADDRESS 100
#define REG_MB_STOP_BITS 101
#define REG_MB_BAUDRATE 102
#define EEPROM_SIZE 8
#define EEPROM_MB_ADDRESS 0
#define EEPROM_MB_STOP_BITS 2
#define EEPROM_MB_BAUDRATE 4
#define EEPROM_BASELINE 6
#define PIN_FLOW 12
#define BTN_SAFE_MODE 14
#define CCS811_ADDR 0x5A

uint16_t mbAddress = DEFAULT_MB_ADDRESS;
uint16_t mbStopBits = DEFAULT_MB_STOP_BITS;
uint16_t mbBaudrate = DEFAULT_MB_BAUDRATE;
uint16_t sensorBaseLine = 0;
String configFile = "/config.json";

ModbusRTU mb;
CCS811 ccs811(CCS811_ADDR);
SimpleTimer sysTimer(2000);
SimpleTimer blTimer(30000);

void setup() {
  io_setup();
  eeprom_setup();
  check_safe_mode();
  modbus_setup();
  i2c_setup();
  read_baseline();
}

// Головний цикл
void loop() {
  mb.task();
  check_timer();
}

void check_timer() {
  if(sysTimer.isReady()) {

```



```

    read_sensor();
    sysTimer.reset();
}

if (blTimer.isReady()) {
    save_baseline();
    blTimer.reset();
}
}

void io_setup() {
    pinMode(BTN_SAFE_MODE, INPUT_PULLUP);
}

void modbus_setup() {
    Serial.begin(convert_baudrate(mbBaudrate), convert_stop_bits_to_config(mbStopBits));
    mb.begin(&Serial);
    mb.begin(&Serial, PIN_FLOW);
    mb.slave(mbAddress);

    mb.addHreg(REG_MB_ADDRESS);
    mb.addHreg(REG_MB_STOP_BITS);
    mb.addHreg(REG_MB_BAUDRATE);
    mb.addIsts(REG_SENSOR_ERROR);
    mb.addIreg(REG_SENSOR_ECO2);
    mb.addIreg(REG_SENSOR_TVOC);
    mb.addIreg(REG_SENSOR_BL);

    mb.Hreg(REG_MB_ADDRESS, mbAddress);
    mb.Hreg(REG_MB_STOP_BITS, mbStopBits);
    mb.Hreg(REG_MB_BAUDRATE, mbBaudrate);
    mb.Ists(REG_SENSOR_ERROR, 0); // ошибка сенсора
    mb.Ireg(REG_SENSOR_ECO2, 0); // eCO2
    mb.Ireg(REG_SENSOR_TVOC, 0); // TVOC
    mb.Ireg(REG_SENSOR_BL, 0); // Baseline
    mb.onSetHreg(REG_MB_ADDRESS, callback_set_mb_reg);
    mb.onSetHreg(REG_MB_STOP_BITS, callback_set_mb_reg);
    mb.onSetHreg(REG_MB_BAUDRATE, callback_set_mb_reg);
}

void eeprom_setup() {
    EEPROM.begin(EEPROM_SIZE);
}

void read_modbus_settings() {
    EEPROM.get(EEPROM_MB_ADDRESS, mbAddress);
    if (mbAddress == 0xffff) {
        mbAddress = DEFAULT_MB_ADDRESS;
    }

    EEPROM.get(EEPROM_MB_STOP_BITS, mbStopBits);
    if (mbStopBits == 0xffff) {
        mbStopBits = DEFAULT_MB_STOP_BITS;
    }
    EEPROM.get(EEPROM_MB_BAUDRATE, mbBaudrate);
    if (mbBaudrate == 0xffff) {
        mbBaudrate = DEFAULT_MB_BAUDRATE;
    };
}

void i2c_setup() {
    Wire.begin();

    if (!i2c811.begin()) {

```

```

    mb.Ists(REG_SENSOR_ERROR, 1);
  } else {
    mb.Ists(REG_SENSOR_ERROR, 0);
  };
}

void check_safe_mode() {
  if (digitalRead(BTN_SAFE_MODE)) {
    read_modbus_settings();
  }
}

void read_baseline() {
  EEPROM.get(EEPROM_BASELINE, sensorBaseLine);
  if (sensorBaseLine != 0xffff) {
    mb.Ireg(REG_SENSOR_BL, sensorBaseLine);

    if (write_baseline(sensorBaseLine)) {
      mb.Ists(REG_SENSOR_ERROR, 0);
    } else {
      mb.Ists(REG_SENSOR_ERROR, 1);
    }
  }
}

bool write_baseline(uint16_t baseline) {
  CCS811Core::CCS811_Status_e errorStatus;

  errorStatus = ccs811.setBaseline(baseline);
  if (errorStatus != CCS811Core::CCS811_Stat_SUCCESS)
  {
    return false;
  };
  return true;
}

void save_baseline(){
  write_eeprom(EEPROM_BASELINE, sensorBaseLine);
}

void read_sensor() {
  if (ccs811.dataAvailable()) {
    ccs811.readAlgorithmResults();
    mb.Ireg(REG_SENSOR_ECO2, ccs811.getCO2());
    mb.Ireg(REG_SENSOR_TVOC, ccs811.getTVOC());

    sensorBaseLine = ccs811.getBaseline();
    mb.Ireg(REG_SENSOR_BL, sensorBaseLine);
  }
}

uint16_t callback_set_mb_reg(TRegister * reg, uint16_t val) {
  switch (reg->address.address) {
  case REG_MB_ADDRESS:
    if (val > 0 && val < 247) {
      write_eeprom(EEPROM_MB_ADDRESS, val);
    } else {
      val = reg->value;
    }
    break;
  case REG_MB_STOP_BITS:
    if (val == 1 || val == 2) {

```

```

    write_eeprom(EEPROM_MB_STOP_BITS, val);
} else {
    val = reg->value;
}
break;
case REG_MB_BAUDRATE:
    uint16_t correctBaudRates[] = {12, 24, 48, 96, 192, 384, 576, 1152};
    if (contains(val, correctBaudRates, 8)) {
        write_eeprom(EEPROM_MB_BAUDRATE, val);
    } else {
        val = reg->value;
    }
    break;
}
return val;
}

void write_eeprom(uint8_t eepromm_address, uint16_t val) {
    EEPROM.put(eepromm_address, val);
    EEPROM.commit();
}

SerialConfig convert_stop_bits_to_config(uint16_t stopBits) {
    return (stopBits == 2) ? SERIAL_8N2 : SERIAL_8N1;
}

uint32_t convert_baudrate(uint16_t baudrateValue) {
    return baudrateValue * 100;
}

bool contains(uint16_t a, uint16_t arr[], uint8_t arr_size) {
    for (uint8_t i = 0; i < arr_size; i++) if (a == arr[i]) return true;
    return false;
}

```