

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем  
Кафедра радіотехніки

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до магістерської кваліфікаційної роботи  
за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр»

на тему:

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ  
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГИ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

08–36.МКР.016.00.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ–19м  
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіо-  
техніка (освітня програма: Радіотехніка  
\_\_\_\_\_ Смердов А.О.

Керівник: д.т.н., проф. каф. РТ  
\_\_\_\_\_ Осадчук В.С.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

Рецензент: к.т.н., доцент. каф. ТКСТБ  
\_\_\_\_\_  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

Вінниця ВНТУ – 2020 рік

Вінницький національний технічний університет

Факультет Інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем

Кафедра Радіотехніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри РТ

д.т.н., професор О.В. Осадчук

“ 28 ” 09 2020 року

## **З А В Д А Н Н Я НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Смердову Андрію Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Радіовимірювальні параметричні сенсори для визначення вологості в газових середовищах»

керівник роботи Осадчук Володимир Степанович, д.т.н., професор

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “25” 09 2020 року №214

2. Строк подання студентом роботи 10 грудня 2020 року

3. Вихідні дані до роботи: напруга живлення радіовимірювального параметричного сенсора вологості – 5 В; струм споживання 0,5...5 мА; напруга живлення вузлів радіовимірювального параметричного сенсора вологості + 3,5...5,5 В; споживана потужність – 0,15 Вт; частота генерації – 100...3600 кГц; діапазон вимірювання вологості – 0...100 %.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз сучасного стану розробок сенсорів вологості; радіовимірювальний параметричний сенсор вологості з вологочутливими ємнісними елементами; розробка схемного рішення багатоканального радіовимірювального приладу вимірювання вологості; економічна частина, безпека життєдіяльності; висновки; перелік посилань; додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): електрична схема радіовимірювального параметричного сенсора вологості з вологочутливими ємнісними елементами; еквівалентна нелінійна схема радіовимірювального параметричного сенсора вологості в газових середовищах з чутливим до вологості ємнісними елементами; блок-схема мікросхеми CPLD сімейства MAX II; схема програмованої логічної інтегральної схеми пристрою; структурна схема багатоканального радіовимірювального приладу вимірювального контролю вологості; блок схема частотоміра; схема електрична-принципова багатоканального радіовимірювального приладу вимірювального контролю вологості; відладочна плата ЕРМ1270.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	д.т.н., професор Осадчук В. С.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	к.т.н., доцент Березюк О. В.		
Економічна частина	к.е.н., ст. викл. Кавецький В. В.		

7. Дата видачі завдання 29 вересня 2020 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	03.09.2020-14.09.2020	
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	15.09.2020-21.09.2020	
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	21.09.2020-25.09.2020	
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	26.09.2020-09.10.2020	
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	10.10.2020-25.10.2020	
6.	Розділ моделювання	26.10.2020-04.11.2020	
7.	Розробка графічної частини МКР	05.11. 2020-15.11.2020	
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	16.11.2020-19.11.2020	
9.	Охорона праці (ОП)	19.11.2020-22.11.2020	
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11.2020-29.11.2020	
11.	Нормоконтроль	30.11.2020-01.12.2020	
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12.2020-04.12.2020	
13.	Захист МКР ЕК	11.12.2020-14.12.2020	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Смердов А. О.

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Осадчук В. С.

## РЕФЕРАТ

УДК 621.38

Смердов А.О. Радіовимірювальні параметричні сенсори для визначення вологи в газових середовищах. Магістерська кваліфікаційна робота: – Вінниця: ВНТУ 2020 р. –152 стор., рисунків 22, табл.26, бібл. 74 – українською мовою.

У даній магістерській кваліфікаційній роботі було проведено аналіз сучасного рівня розробок конструкцій радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах, що дозволив визначити можливі шляхи поліпшення їх характеристик.

Аналіз сучасного рівня розробок конструкцій радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах дозволив визначити можливі шляхи поліпшення їх параметрів: чутливості, температурної стабільності, стабільності електричних характеристик сенсорів, надійності, собівартості тощо.

Розроблено радіовимірювальні параметричні сенсори для визначення вологи в газових середовищах на основі біполярно–польової транзисторної структури з ємнісними елементами, який реалізує принцип перетворення «вологість – частота». На основі еквівалентної високочастотної нелінійної схеми радіовимірювального параметричного сенсора для визначення вологи в газових середовищах отримано аналітичні вирази функції перетворення та рівняння чутливості. Проведено дослідження електричних параметрів радіовимірювального параметричного сенсора вологості та розраховано їх теоретичні залежності. Проведені експериментальні дослідження радіовимірювального параметричного сенсора для визначення вологи в газових середовищах з чутливими до вологи конденсаторами: P14 Rapid (WIRED) фірми Innovative sensor technology, в діапазоні вимірювання вологості  $W = 1 \div 100\%$  складає 1040 Гц/%; P14 Rapid (SMD) фірми Innovative sensor technology, в тому ж діапазоні вимірювання вологості  $W$  складає 944 Гц/%; HCN-1000 фірми Honeywell, в діапазоні вимірювання вологості  $W = 0 \div 100\%$  складає 689 Гц/%; МДН-конденсатором НДІ «Гелій», в діапазоні вимірювання вологості  $W = 18 \div 99\%$  складає 3500 Гц/%. Розроблено схемотехнічне рішення системи вимірювання вологості на програмованій логічній інтегральній мікросхемі EPM1270 на основі CPLD MAX II фірми ALTERA.

В економічній частині можна зробити висновок, що застосування нового виробу для споживача є економічно вигідним, бо споживач отримує економічний ефект від використання в межах 158,86 грн., що підтверджує економічну доцільність нової розробки.

В розділу охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях було розглянуто такі питання, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення параметрів витяжної загальнообмінної штучної вентиляції при виділенні шкідливих речовин та надлишків вологи.

Ключові слова: радіовимірювальний сенсор вологи, частотний перетворювач, від’ємний диференційний опір, програмована логічна інтегральна мікросхема.

## ABSTRACT

Smerdov A.O. Radiometric parametric sensors for determining humidity in gaseous media. Master's qualification work: - Vinnytsia: VNTU 2020 - 152p. , Fig.22, table. 26, bibl. 74- In ukrainian.

In this master's qualification work, an analysis of the current level of development of designs of radiometric parametric sensors for determining humidity in gaseous media was conducted, which allowed to identify possible ways to improve their characteristics.

Analysis of the current level of design of radiometric parametric sensors for determining humidity in gaseous media has identified possible ways to improve their parameters: sensitivity, temperature stability, stability of electrical characteristics of sensors, reliability, cost and more. Radiometric parametric sensors have been developed for determining humidity in gaseous media on the basis of a bipolar-field-effect transistor structure with capacitive elements, which implements the principle of "humidity-frequency" transformation. Based on the equivalent high-frequency nonlinear circuit of the radio-measuring parametric sensor for determining the humidity in gaseous media, analytical expressions of the conversion function and the sensitivity equation are obtained. The study of electrical parameters of the radio-measuring parametric humidity sensor is carried out and their theoretical dependences are calculated. Experimental studies of a radio-measuring parametric sensor for determining humidity in gaseous media with humidity-sensitive condensers: P14 Rapid (WIRED) by Innovative sensor technology, in the measurement range is 1040 Hz /%; P14 Rapid (SMD) from Innovative sensor technology, in the same measurement range - 944 Hz /%; HCH-1000 from Honeywell, in the measuring range - 689 Hz /%; MDN capacitor of the Helium Research Institute, in the measurement range - 3500 Hz /%.

A circuit solution for the humidity measurement system on the programmable logic integrated circuit EPM1270 based on CPLD MAX II from ALTERA has been developed.

In the economic part, we can conclude that the use of a new product for the consumer is economically viable, because the consumer receives an economic effect from the use of 158.86 UAH, which confirms the economic feasibility of the new development.

In the section of labor protection and safety in emergency situations such issues as technical solutions on occupational health and industrial sanitation, determination of parameters of exhaust general exchange artificial ventilation in the release of harmful substances and excess moisture were considered.

Keywords: radio humidity measurement sensor, frequency converter, negative differential resistance, programmable logic integrated circuit.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	8
<b>1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗРОБОК СЕНСОРІВ ВОЛОГИ</b> .....	12
1.1 Основні фізичні поняття про вологу газових та текучих середовищ .....	12
1.2 Класифікація сенсорів вологи.....	16
1.3 Відносні сенсори вологості. Керамічні чутливі матеріали.....	17
1.4 Сенсори на основі $Al_2O_3$ .....	20
1.5 Імпедансні сенсори вологості (резистивні сенсори).....	24
1.6 Полімерні резистивні сенсори вологості.....	26
1.7 Керамічні резистивні сенсори вологості.....	31
1.8 Керамічні сенсори вологості типу Перовскіт .....	35
1.9 Висновки до розділу .....	51
<b>2 РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ СЕНСОР ВОЛОГИ З ВОЛОГОЧУТЛИВИМИ ЄМНІСНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ</b> .....	52
2.1 Розробка математичної моделі.....	53
2.2 Висновки до розділу .....	60
<b>3 РОЗРОБКА СХЕМНОГО РІШЕННЯ БАГАТОКАНАЛЬНОГО РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИЛАДУ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ</b> .....	61
3.1 Застосування ПЛІС для побудови радіовимірювальної системи.....	61
3.2 Схемотехнічне рішення радіовимірювальної системи.....	69
3.3 Висновки до розділу.....	73
<b>4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b> .....	74
4.1 Оцінка наукового, технічного та економічного рівня НДДКР.....	74
4.1.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки.....	75
4.1.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості для нового рішення.....	79
4.2 Розрахунок витрат на проведення НДДКР з дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах.....	81
4.2.1 Розрахунок собівартості виготовлення розробленого пристрою.....	88
4.2.2 Розрахунок ціни реалізації 0.....	92
4.2.3 Розрахунок чистого прибутку для виробника від реалізації нового технічного рішення.....	93
4.2.4 Розрахунок терміну окупності витрат для виробника.....	94
4.2.5 Розрахунок величини експлуатаційних витрат.....	94
<b>5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ</b>	

<b>СИТУАЦІЯХ</b> .....	97
5.1 Виробнича санітарія та гігієна праці.....	97
5.1.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони.....	97
5.1.2 Виробниче освітлення.....	100
5.1.3 Виробничі віброакустичні коливання.....	101
5.1.4 Виробничі випромінювання.....	102
5.2 Технічні рішення щодо промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження.....	102
5.2.1 Безпека щодо організації робочих місць.....	103
5.2.2 Електробезпека.....	103
5.2.3 Пожежна безпека.....	103
5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях.....	105
5.4 Дослідження області працездатності радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах в умовах дії електромагнітного імпульсу.....	107
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	110
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</b> .....	112
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання.....	118
Додаток Б (обов'язковий) Електрична схема радіовимірювального параметричного сенсора вологи з вологочутливими ємнісними елементами .....	124
Додаток В (обов'язковий) Еквівалентна нелінійна схема радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами .....	126
Додаток Д (обов'язковий) Блок-схема мікросхеми CPLD сімейства MAX II ..	128
Додаток Е (обов'язковий) Архітектурний план CPLD MAX II.....	130
Додаток Ж (обов'язковий) Відладочна плата EPM1270 .....	132
Додаток К (обов'язковий) Схема програмованої логічної інтегральної схеми пристрою .....	134
Додаток Л (обов'язковий) Структурна схема багатоканального радіовимірювального приладу вимірювального контролю вологості .....	136
Додаток М (обов'язковий) Блок схема частотоміра .....	138
Додаток Н (обов'язковий) Схема електрична-принципова багатоканального радіовимірювального приладу вимірювального контролю вологості .....	140
Додаток П (довідниковий) Програма моделювання радіовимірювального параметричного сенсора вологості в середовищі Matlab 9.2.....	142

## ВСТУП

**Актуальність.** Сенсори вологості знаходять все більше застосування у промисловій переробці та екологічному контролі. Для виробництва високотехнологічних інтегральних схем в напівпровідниковій промисловості, рівень вологості або вологи постійно контролюється при обробці шарів мікросхем. Існує багато вітчизняних сенсорів, таких як інтелектуальне управління середовищем проживання в будівлях, контроль приготування їжі для мікрохвильових печей та інтелектуальне управління пранням білизни тощо. У автомобільній промисловості сенсори вологості використовуються в задньому склі автомобіля та лінії збірки двигуна. У медичній галузі сенсори вологості використовуються в дихальному обладнанні, стерилізаторах, інкубаторах, фармацевтичній галузі та інш. У сільському господарстві сенсори вологості використовуються для тепличного кондиціонування, захисту плантацій (запобігання росі), моніторинг вологості ґрунту та зберігання зернових. У загальній промисловості сенсори вологості використовуються для контролю вологості в хімічному очищенні газів, сушарках, печах, осушення плівок, виробництві паперу та текстилю, та переробці продуктів харчування. У цій роботі ми прагнемо представити обширний огляд дослідження і розробки сенсорів вологості для різноманітних галузей застосування. Тому що пристрої в кожній галузі вимагають різних умов експлуатації, різних типів сенсорів вологості на основі різноманітних чутливих матеріалів.

На сучасному етапі розвитку людства, виробництво вимагає адекватного виконання технології і широкого застосування автоматизації виробничих процесів. Стан сучасної світової економіки великою мірою визначається успішним розв'язанням питань створення та освоєння серійного випуску автоматичних засобів технічної діагностики машин та обладнання, приладів неруйнівного контролю, систем перевірки якості промислової та сільськогосподарської продукції, контролю параметрів довкілля тощо. Ефективність комплексу технічних засобів, в свою чергу, залежить від якості первинних параметричних сенсорів, які є основними чутливими органами контрольно–вимірювальної апаратури.

Важливою різновидністю вимірювальних параметричних сенсорів є сенсори вологи, оскільки багато процесів, в тому числі і в повсякденному житті, залежать від вологи. В Україні вимір вологи є одним із поширених напрямків вимірювань. Це обумовлено потужним промисловим та науково–технічним потенціалом країни з переважним розвитком таких галузей, як машинобудування, металургія, авіаційна та космічна техніка, енергетика, хімічна промисловість, ефективність яких значною мірою залежить від точності вимірювань вологи, температури та інших характеристик. У зв'язку з цим досить важливим завданням сучасного приладобудування та контрольно–вимірювальної техніки є вибір



надійних методів виміру вологи у різних виробництвах, створення радіовимірювальних приладів необхідної точності, стабільності та швидкодії, а також дослідження впливів на результат вимірювань всієї сукупності факторів, які супроводжують вимірювальний процес. Для забезпечення високої точності вимірювань вологи необхідно здійснити підсилення сигналу первинного сенсора, лінеаризацію передатної характеристики, компенсацію початкового зміщення та похибок, які виникають у зв'язку зі зміною температури довкілля та часового дрейфу. Ефективно виконувати подібні перетворення можна тільки з використанням цифрової обробки даних.

**Мета і завдання дослідження магістерської кваліфікаційної роботи.**

**Метою роботи** є покращення характеристик та параметрів радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи для визначення вологи в газових середовищах технологічно сумісних з інтегральною технологією за рахунок перетворення вологи в частотний вихідний сигнал.

**Об'єктом дослідження** є процес перетворення вологи у частотний вихідний сигнал у радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах, що породжує задачу розбудови радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи з покращеними характеристиками та параметрами.

**Предмет дослідження** – характеристики та параметри радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи для визначення вологи в газових середовищах на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференційним опором.

**Для досягнення поставленої мети у магістерській кваліфікаційній роботі розв'язуються такі задачі:**

- проаналізувати існуючі параметричні сенсори вологи та обґрунтувати переваги радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи на основі транзисторних структур з від'ємним диференційним опором по відношенню до існуючих;

- розробити математичну модель радіовимірювального параметричного сенсора вологи на основі біполярно–польової транзисторної структури з врахуванням впливу вологи на чутливі ємнісні елементи та експериментально дослідити їх характеристики;

- виконати експериментальну перевірку залежностей електричних параметрів та характеристик розробленої математичної моделі радіовимірювального параметричного сенсора від дії вологи та дослідити їх електричні параметри;

- розробити схемне рішення системи вимірювання вологості на програмованій логічній інтегральній мікросхемі EPM1270 на основі CPLD MAX II фірми ALTERA.

**Методи дослідження** ґрунтуються на використанні: диференціального та інтегрального числення для створення математичної моделі; рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи; теорії функції комплексної змінної для визначення функцій перетворення та чутливості; теорії розрахунку нелінійних електричних кіл для визначення імпедансу радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи.

### **Наукова новизна магістерської кваліфікаційної роботи**

1. Проаналізовано існуючі параметричні сенсори вологи та обґрунтовано переваги радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором по відношенню до існуючих.

2. Розроблено математичну модель радіовимірювального параметричного сенсора вологи на основі біполярно–польової транзисторної структури з врахуванням впливу вологи на чутливі ємнісні елементи та експериментально дослідити їх характеристики.

3. На основі еквівалентної високочастотної нелінійної схеми радіовимірювального параметричного сенсора вологості отримано аналітичні вирази функції перетворення та рівняння чутливості.

4. Розроблено схемне рішення системи вимірювання вологості на програмованій логічній інтегральній мікросхемі EPM1270 на основі CPLD MAX II фірми ALTERA.

### **Практичне значення одержаних результатів**

1. Розроблено радіовимірювальний параметричний перетворювач вологості на основі біполярно–польової транзисторної структури з ємнісними елементами, який реалізує принцип перетворення «вологість – частота». Проведено дослідження електричних параметрів радіовимірювального параметричного сенсора вологості та розраховано їх теоретичні залежності.

2. Проведені експериментальні дослідження радіовимірювального параметричного сенсора вологості з вологочутливими конденсаторами: P14 Rapid (WIRED) фірми Innovative sensor technology, в діапазоні вимірювання вологості  $W = 1 \div 100\%$  складає 1040 Гц/%; P14 Rapid (SMD) фірми Innovative sensor technology, в тому ж діапазоні вимірювання вологості  $W$  складає 944 Гц/%; HCH-1000 фірми Honeywell, в діапазоні вимірювання вологості  $W = 0 \div 100\%$  складає 689 Гц/%; МДН-конденсатором НДІ «Гелій», в діапазоні вимірювання вологості  $W = 18 \div 99\%$  складає 3500 Гц/%.

3. Розроблено схемне рішення системи вимірювання вологості.

**Особистий внесок здобувача**

Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором практично самостійно в науковій школі д.т.н., проф. Осадчука О.В.

**Структура і обсяг роботи.** Магістерська кваліфікаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновок та перелік посилань.

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗРОБОК СЕНСОРІВ ВОЛОГИ

В останній час серед первинних параметричних сенсорів фізичних величин особливе місце у контрольній-вимірній техніці займають параметричні сенсори вологи [1]. Необхідність контролю вологи у промисловості, а також у побуті робить актуальною проблему розроблення і дослідження параметричних сенсорів вологи різних типів, принцип дії яких базується на зміні електрофізичних параметрів та характеристик [2].

Крім того, сучасний стан науки і техніки висуває підвищені вимоги до засобів виміру вологи, які пов'язані із автоматизацією технологічних процесів. Питання вивчення, дослідження, розроблення та виробництва засобів виміру вологи є актуальним, оскільки перетворення рівня вологи в електричний сигнал відомими радіовимірними засобами на даний час є складною задачею і наразі ускладнене [3, 4]. Особливо необхідність в параметричних сенсорах вологи відчувається в різноманітних галузях промислової індустрії таких як мікроелектроніка, металургія, ядерна енергетика, а також медицина [5].

## 1.1 Основні фізичні поняття про вологу газових та текучих середовищ

На даному етапі розвитку науково-технічного прогресу вагоме місце займає визначення вмісту вологи в газоподібних та рідких середовищах. Відомо, що в технології мікроелектроніки використовуються процеси фізико-хімічної обробки матеріалів, які знаходяться в контакт з газовою (процеси епітаксії, дифузії, окислення) або рідкою (процеси хімічного травлення, анодного окислення, фотолітографії, очищення поверхні) фазами. Вимоги до вмісту вологи в середовищі, в залежності від типу технологічного процесу, різноманітні. У виробництві сучасних інтегральних схем звичайного ступеню інтеграції, концентрація пари  $H_2O$  у фосфіні не повинна перевищувати 30 ppm, а під час виробництва напівпровідникових великих інтегральних схем не повинна перевищувати рівня 1 ppm. У процесах вакуумно-плазмового травлення наявність парів  $H_2O$  є причиною невиправних дефектів інтегральних схем. Вміст вологи в середині корпусів інтегральних схем не повинен перевищувати 500 ppm, а на операціях збирання мікросхем не повинен перевищувати 50 ppm, однак під час проведення процесів окислення, вміст вологи в парогазовій суміші може досягнути 100 % відносної вологи. Вміст  $H_2O$  в неводних електролітах на основі тетрагідрофурилового та амілового спирту, етиленгліколю, N-метилацетаміду, ацетону, які використовуються при анодному окисленні напівпровідникових матеріалів не повинен перевищувати 1–2 %. В побутовій техніці широке використання на да-

ний час знаходять параметричні сенсори вологи, область використання яких визначає насамперед їх робочий діапазон по температурі і вологі, що показано в табл. 1.1 [6]. В залежності від конкретного випадку до сенсора вологи висуваються специфічні вимоги щодо швидкодії, часової і температурної стабільності, універсальності, взаємозамінності, розмірів, характеру вихідного сигналу сенсора тощо.

Існують різні одиниці виміру за допомогою яких визначається вміст вологи в газоподібних і рідких середовищах. Вміст вологи в парогазовій суміші зазвичай вимірюють в одиницях абсолютної вологи, парціального тиску пари  $H_2O$ , об'ємного вологовмісту, відносної вологи, температури точки роси тощо. Дані величини взаємозв'язані і залежать від температури і тиску в системі. Розглянемо конкретно кожен фізичну величину.

Таблиця 1.1 – Галузі використання параметричних сенсорів вологи [6]

Галузі використання	Режим експлуатації	
	Температура, К	Волога, %
Побутова техніка		
системи кондиціонування	278 – 313	40 – 70
сушильні для одягу	353	0 – 40
НВЧ печі	278 – 373	2 – 100
Контроль мікроклімату в медицині	283 – 303	50 – 100
Контроль запотівання скла в автомобілях	253 – 353	50 – 100
Промисловість		
текстильна	283 – 303	50 – 100
виробництво і сушіння порошків у хімії	323 – 373	0 – 50
електронна	278 – 313	0 – 50
Контроль атмосфери на фермах у сільсько-		
господарстві	293 – 298	40 – 70
Гідрометеорологічні радіозонди	223 – 313	0 – 100

Абсолютна волога  $W_a$  показує, яка кількість  $H_2O$  міститься в  $1 \text{ м}^3$  повітря,  $\text{г}/\text{м}^3$  [6, 7]:

$$W_a = \frac{m_{H_2O}}{V_{\Pi}}, \quad (1.1)$$

де  $V_{II}$  – об’єм повітря,  $\text{м}^3$ ;  $m_{\text{H}_2\text{O}}$  – маса  $\text{H}_2\text{O}$ , г;

Волога насичення  $W_{sat}$  в газовому середовищі характеризує максимальну кількість  $\text{H}_2\text{O}$ , яка може міститися в  $1 \text{ м}^3$  повітря за певної температури і атмосферному тиску без створення конденсату,  $\text{г}/\text{м}^3$  [7]:

$$W_{sat} = \frac{m_{\max \text{H}_2\text{O}}}{V_{II}}, \quad (1.2)$$

де  $m_{\max \text{H}_2\text{O}}$  – максимальна кількість  $\text{H}_2\text{O}$ , г в газовому середовищі.

Об’ємний вологовміст (або об’ємна концентрація пари  $\text{H}_2\text{O}$ )  $W_v$  визначається як відношення об’єму пари  $\text{H}_2\text{O}$  до об’єму парогазовій суміші, ppm [6]:

$$W_v = \frac{p}{P} = \frac{W \cdot p_s}{P}, \quad (1.3)$$

де  $p$  – парціальний тиск пари  $\text{H}_2\text{O}$ , ГПа ( $1 \text{ ГПа} = 100 \text{ Па}$ ) в газовому середовищі;  $P$  – загальний тиск в системі, ГПа;  $W$  – відносна волога, % в газовому середовищі;  $p_s$  – тиск насиченої пари  $\text{H}_2\text{O}$  (ГПа) при даній температурі (К) в газовому середовищі.

Відносна волога  $W$  в газовому середовищі вимірюється у відсотках і визначається як відношення парціального тиску пари  $\text{H}_2\text{O}$  при температурі  $T$  до тиску насиченої пари при цій же температурі, % [5, 6]:

$$W = \frac{p}{p_s} \cdot 100, \quad (1.4)$$

Під температурою точки роси  $T_p$  в газовому середовищі, розуміють таку температуру, при ізобарному охолодженні з якої починається конденсація пари  $\text{H}_2\text{O}$ , що міститься в газовому середовищі, К [6].

Під масовим відношенням вологи  $r$  (кг/кг), яка характеризує вологу, розуміють відношення маси водяної пари  $m_{\text{H}_2\text{O}}$  до маси  $m_{II}$  сухого повітря, в газовому середовищі з яким знаходиться дана водяна пара [5]:

$$r = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{II}}, \quad (1.5)$$

де  $m_{\text{II}}$  – маса сухого повітря, кг в газовому середовищі;  $m_{\text{H}_2\text{O}}$  – маса водяної пари, кг в газовому середовищі.

Під тиском насиченої пари  $p_s$  в газовому середовищі розуміють тиск пари, який знаходиться в рівновазі з рідкою водою при температурі  $T$ . Це максимальне значення, яке може прийняти парціальний тиск пари  $p$  в газовому середовищі при температурі  $T$ , потім виникає конденсація.

Питома ентальпія  $i$  (кДж/кг) – сумарна теплота, яка міститься у вологому повітрі. Вважають, що нульова ентальпія відповідає сухому повітрю при  $0^\circ\text{C}$  в газовому середовищі. Крім того, питома ентальпія віднесена до одиниці маси сухого повітря в газовому середовищі. Поняття питомої ентальпії дає змогу об'єднати в одне ціле “вимірювану” теплоту, яка відповідає зміні  $(T_B - T_A)$  температури при переході від умов  $A$  до  $B$ , та “сховану” теплоту, що відповідає зміні масових відношень вологи  $(r_B - r_A)$  в газовому середовищі при переході від умов  $A$  до  $B$ :

$$i(T, r) = c_{\text{II}}T + r(L_0 + c_p T), \quad (1.6)$$

Де  $c_p$  – питома теплоємність водяної пари (1,84 кДж/кг $\cdot$ °C при  $T=20^\circ\text{C}$ ) в газовому середовищі;  $c_{\text{II}}$  – питома теплоємність сухого повітря (1,006 кДж/кг $\cdot$ °C при  $T=20^\circ\text{C}$ ) в газовому середовищі;  $L_0$  – схована теплота пароутворення при  $T_0=0^\circ\text{C}$  (2501,6 кДж/кг) в газовому середовищі.

Розглянемо відношення між величинами, що характеризують вологу в газовому середовищі. Зв'язок між масовим відношенням вологи і тиском пари в газовому середовищі описується виразом

$$\chi = \delta \frac{p}{P - p}, \quad (1.7)$$

де  $\delta = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{II}}} \approx 0,622$ ;  $M_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $M_{\text{II}}$  – молекулярні маси водяної пари і повітря в газовому середовищі.

Значення вологи газів при 294 К в різноманітних одиницях наведені в табл.1.2. Під час виміру мікроконцентрацій вологи в рідинах в якості одиниць виміру об'ємного вологовмісту використовують одиниці ppm або відсотки [6].

Таблиця 1.2 – Співвідношення між різноманітними одиницями вологи при температурі 294 К

Точка роси, К	Парціальний тиск пари H <sub>2</sub> O, Па	Об'ємна концентрація пари H <sub>2</sub> O, ppm	Відносна волога, %
185	0,0133	0,132	0,00054
193	0,0532	0,526	0,00214
201	0,1902	1,880	0,00765
209	0,6171	6,10	0,0248
217	1,8354	18,20	0,0738
225	5,0270	49,70	0,2020
229	8,1000	80,10	0,3250
233	12,8480	127,00	0,5160
237	20,0430	197,00	0,8040
241	30,8290	305,00	1,2400
245	46,6830	462,00	1,8800
261	217,060	2147,00	8,7500
265	314,150	3061,00	12,8000
273	609,010	6025,00	24,1000
277	798,000	7895,00	32,5000
285	1400,500	13855,00	56,0000
289	1814,500	17951,00	72,6000
293	2332,200	23072,00	94,0000

## 1.2 Класифікація сенсорів вологи

Сенсори вологості знаходять все більше застосування у промисловій переробці та екологічному контролі. Для виробництва високотехнологічних інтегральних схем в напівпровідниковій промисловості, рівень вологості або вологи постійно контролюється при обробці шарів мікросхем. Існує багато вітчизняних сенсорів, таких як інтелектуальне управління середовищем проживання в будівлях, контроль приготування їжі для мікрохвильових печей та інтелектуальне управління пранням білизни тощо. У автомобільній промисловості сенсори вологості використовуються в задньому склі автомобіля та лінії збірки двигуна. У медичній галузі сенсори вологості використовуються в дихальному обладнанні, стерилізаторах, інкубаторах, фармацевтичній галузі та інш. У сільському господарстві сенсори вологості використовуються для тепличного кондиціонування, захисту плантацій (запобігання росі), моніторинг вологості ґрунту та збері-



гання зернових. У загальній промисловості сенсори вологості використовується для контролю вологості в хімічному очищенні газів, сушарках, печах, осушення плівок, виробництві паперу та текстилю, та переробці продуктів харчування. У цій роботі ми прагнемо представити обширний огляд дослідження і розробки сенсорів вологості для різноманітних галузей застосування. Тому що пристрої в кожній галузі вимагають різних умов експлуатації, різних типів сенсорів вологості на основі різноманітних чутливих матеріалів.

Вимірювання вологості визначає кількість пари води, присутні в газі, який може бути сумішшю, наприклад повітря або чистий газ, такий як азот або аргон. На основі методів вимірювання, найбільш часто використовувани одиниці для вимірювання вологості - відносна вологість (RH), Точка роси / замерзання (D / F PT) та кількість частин на мільйон (PPM). Відносна вологість (RH) - це відношення парціального тиску водяної пари, присутньої в газі, до пари насичення тиску газу при заданій температурі. RH - це функція температури, і, отже, це відносне вимірювання. Вимірювання відносної вологості виражається у відсотках. Роса точка - це температура (вище 0 C), при якій пари води в газі конденсуються до рідкої води. Точка морозу - це температура (нижче 0 C), при якій пара конденсується до льоду. D / F PT - це функція тиску газу, але не залежить від температури і тому визначається як вимірювання абсолютної вологості. Частина на мільйон (PPM) являє собою вміст водяної пари за об'ємною часткою (PPMv) або, якщо помножити на відношення молекулярної маси води до повітря, як PPMw. PPM - це також абсолютне вимірювання. Хоча ця одиниця виміру складніша щоб визначити, але має широке застосування в промисловості, особливо для вимірювання вологості слідів. Вимірювання RH відносно вище діапазон вологості, PPMv охоплює нижчий діапазон вологості, і D / F PT охоплює весь діапазон вологості.

Для вимірювання вологості слід краще використовувати PPMv або D / F PT, оскільки це говорить нам про абсолютну кількість водяної пари в газі або повітрі. Відповідно до одиниці вимірювання, сенсори вологості поділяються на два типи: Сенсори відносної вологості (RH) та сенсори абсолютної вологості. Більшість сенсорів вологості відносні сенсори вологості, які можна додатково класифікувати на керамічні, напівпровідникові та полімерні сенсори вологості. Два типи сенсорів абсолютної вологості або гігрометрів доступні, включаючи твердий датчик вологи та дзеркально охолоджений гігрометр.

### 1.3 Відносні сенсори вологості. Керамічні чутливі матеріали

Сенсори вологості на основі протонної кераміки з водофазною фазою матеріали широко використовуються у промислових та дослідницьких лабора-

торіях. Адсорбована вода конденсується на поверхні матеріалу та протони будуть проводитися у сформованому водяному шарі. Для іонних чутливих матеріалів, якщо вологість збільшується, провідність зменшується і діелектрик постійне збільшення. У великій кількості води протон є домінуючим носієм, відповідальним за електропровідність. Провідність відбувається завдяки механізму Гротхуса, за допомогою якого протони тунелюють від однієї молекули води до наступної через водневий зв'язок, який універсально існує в рідкій фазі води (рисунок 1.1).

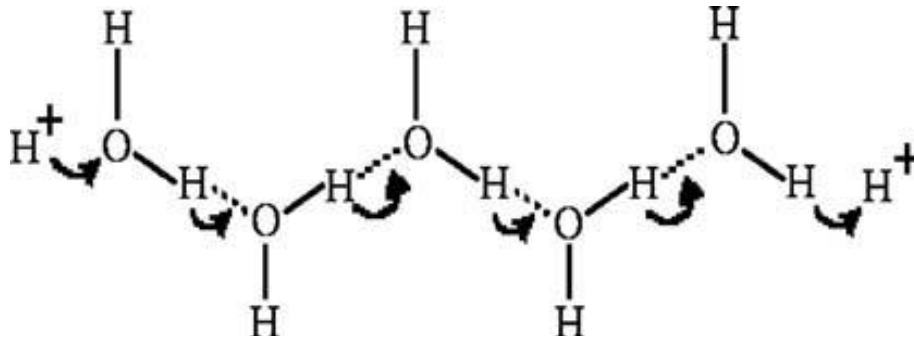


Рисунок 1.1 – Коротка ілюстрація механізму Гротхуса

Про цей механізм повідомляли близько 200 років тому механізм протонної провідності всередині адсорбованого шару води на поверхні сенсорних матеріалів були відкрито при вивченні  $\text{TiO}_2$  та  $-\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Як показано в ринку 1.2, на першій стадії адсорбції, молекула води хімічно адсорбується на активованій ділянці (а) з утворенням адсорбційний комплекс (б), який згодом переносить на поверхню гідроксильних груп (в). Потім інша молекула води адсорбується через водневий зв'язок дві сусідні гідроксильні групи, як показано (г). Верхня конденсована молекула води не може вільно рухатися через обмеження двох водневих зв'язків (д). Таким чином цей шар або перший фізично адсорбується шар нерухомий і не утворюються водневі зв'язки між молекулами води в цьому шарі. Тому на цій стадії може проводитися протон. У міру того як вода продовжує конденсуватися на поверхні керамічний, додатковий шар поверх першого фізично адсорбованого форми шару (рисунок 1.3). Цей шар менш впорядкований ніж перший фізично адсорбований. Наприклад, там може бути лише один водневий зв'язок локально. Якщо більше шарів конденсуватися, впорядкування з початкової поверхні може поступово зникають і протони можуть мати все більше і більше свободи пересування всередині конденсованої води через механізм Гротхуса. Іншими словами, з другого фізично поглинаючий шар, молекули води стають рухливими і нарешті, майже ідентична об'ємній рідкій воді і механізм Гротхуса стає домінуючим.

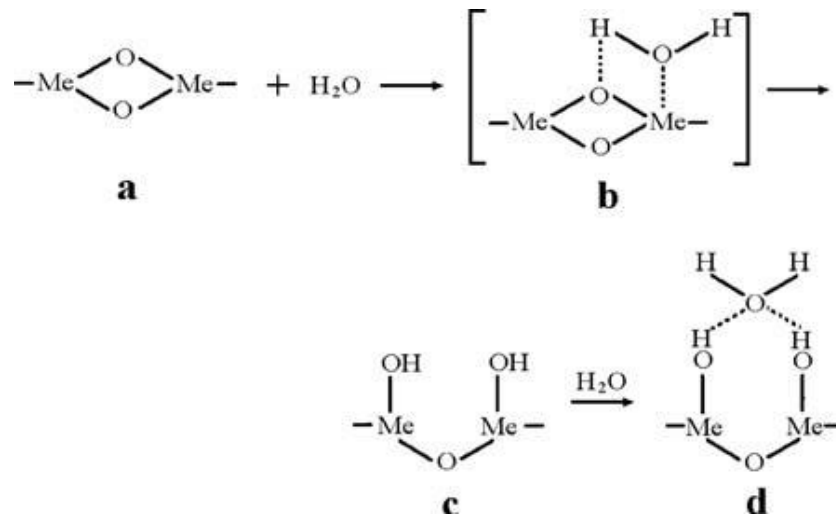


Рисунок 1.2 – Чотири стадії адсорбції

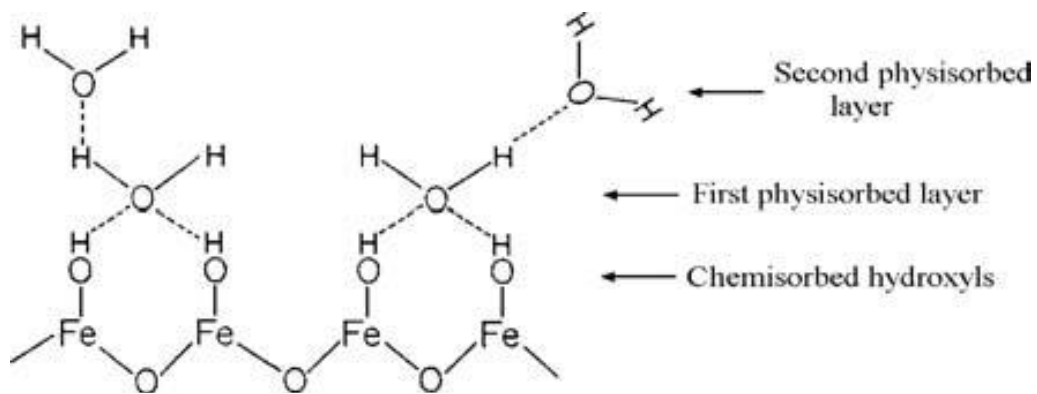


Рисунок 1.3 – Багатошарова структура конденсованої води

Цей механізм вказує на те, що сенсори засновані виключно на протоні з водно-фазовим процесом провідність не була б досить чутливою до низької вологості, при якому водяна пара рідко могла утворюватися безперервно рухливі шари на поверхні сенсора. Два нерухомих шари, хемосорбований і спочатку фізично всмоктуються, хоча не можуть сприяти протон-провідності активність, може забезпечити електронне тунелювання між донорськими водними ділянками.<sup>8 9</sup> Тунельний ефект з енергією, індукованою поверхневими аніонами, полегшує електрони стрибати вздовж поверхні, яка покрита нерухомі шари і, отже, сприяє провідності. Цей механізм дуже корисний для виявлення низького рівня рівні вологості, при яких не існує ефективного протонної провідності. Тим не менше, тунельний ефект, безумовно, є а не напівпровідниковий механізм, про який піде мова пізніше. У наступних підрозділах ми опишемо чотири основні типи чутливих матеріалів на основі оксиду, включаючи  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , сполуки  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  та інш.

## 1.4 Сенсори на основі $\text{Al}_2\text{O}_3$

$\text{Al}_2\text{O}_3$  - один з найбільш сприятливих керамічних чутливих матеріалів через його незалежність від температури майже весь діапазон відносної вологості від  $25^\circ\text{C}$  до  $80^\circ\text{C}$ . Малий радіус пор робить  $\text{Al}_2\text{O}_3$  чутливим до дуже низький тиск водяної пари. Завдяки електронному тунелюванню ефект всередині конденсованих нерухомих шарів води, пористий  $\text{Al}_2\text{O}_3$  є конкурентним матеріалом для зондування низького рівня вологості. На додаток до ємнісних та резистивних сенсорів, більш складні сенсори на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , наприклад, MOSFET (польові транзистори з металу-ізолятор-напівпровідник), були створеними, і деякі з них мають дуже добрі лінійні реакції. Існує кілька фаз для  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , тоді як лише дві вони є загальноприйнятими та використовуються для зондування вологості: -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (аморфний) та -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (корунд). Перший є більш чутливий, ніж останній, завдяки своїй високій пористості, тоді як останній є найбільш термодинамічно стабільною фазою. Хоча багато сенсорів, що базуються на вологості на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3$  використовують - фазну або аморфну фазу  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , плівки сприйнятливі до зміни до -  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (беміт), в результаті чого поступово зменшується площа поверхні і пористість. Тому осадження або зростання вологості чутливі (пористий) -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  також важливий для сенсорів необхідний для довгострокових, нерегенерованих застосувань. Оскільки -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  завжди змішується з величезною кількістю аморфного  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , вміст кристалів досить малий і аморфний  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що утворюється шляхом анодування або вакуумного осадження містить - фазу до певної міри, тоді як перша є кристалічним, і останній не має значних піків в дифракції рентгенівських променів, за винятком одного широкого піку. Багато сучасних сенсорів вологості  $\text{Al}_2\text{O}_3$  виготовлені шляхом анодування. Через його недорогий і простий Процес анодного  $\text{Al}_2\text{O}_3$  має великий пріоритет над іншими керамічними виробами. Метод анодування можна розділити на дві категорії, анодування низької напруги ( $<100\text{ V}$ ) та анодна іскра осадження (звичай  $>100\text{ V}$ ). Анодування низької напруги утворює - фазний або аморфний  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і анодний осадження іскри призводить до пористого -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ці двоє Спочатку будуть розглянуті методи та інші методи виготовлення чутливості до вологості  $\text{Al}_2\text{O}_3$  буде розглянуто пізніше. Перший шар чутливого до вологості  $\text{Al}_2\text{O}_3$  утворився наскрізь анодування на поверхні металу Al. Анодування проводили в 3%  $\text{H}_2\text{CrO}_3$  при 50 В. Ємність лінійно зростала, тоді як опір зменшувався експоненціально до відносної вологості повітря ємнісна та резистивна чутливість значно постраждали за температурою. Параметри анодування значно впливали на чутливість до вологи в результаті пористої плівки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Як повідомляється у посиланнях [14, 15], ємність/опір проти вологості, характерні для сенсорів, виготовлених при низькій щільності струму, показує слабку реакцію

при низькій вологості, тоді як для анодування при високій щільності струму або повторне анодування набагато крутіше при низькій вологості води. Це явище було приписується захопленню аніонів електролітів при високому рівні щільності струму або в пори шляхом повторного анодування. висока щільність заряду призводить до легкої фізичної сорбції води молекули, які утворюють рідиноподібну мережу в порах (як обговорювалось у попередньому розділі). Основна проблема анодованого аморфного  $Al_2O_3$  як обговорювалось раніше, це те, що при тривалому впливі при високій вологості, значне погіршення чутливості і дрейф характеристик ємності буде очікуваний. Це було пов'язано з розширенням пір завдяки дифузії адсорбованої води. Найкраще рішення було б вирощувати самовпорядковані пористі плівки та виключати мінливість між порами та нерівностями мікроструктура плівки. Термічний відпал приблизно Як повідомляється,  $400\text{ }^{\circ}C$  мало покращує стабільність анодованих сенсорів  $Al_2O_3$  200 нм.

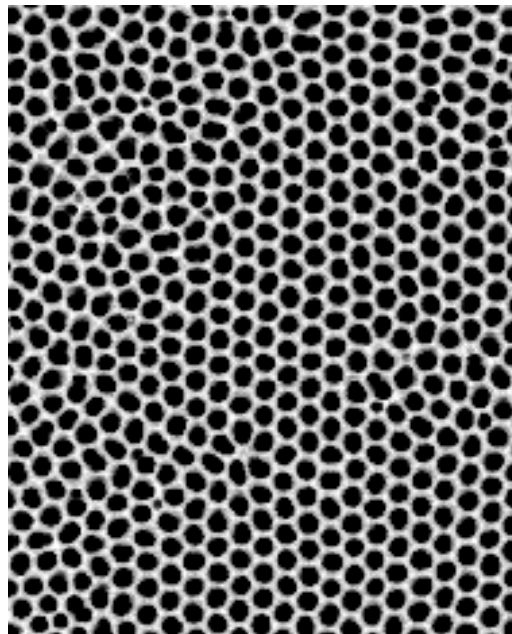


Рисунок 1.4 – Стільникова структура анодного оксиду алюмінію

Хоча аморфний ААО (анодний оксид алюмінію) було виявлено, що він чутливий до вологості в 1950-х роках, цього не було до 1978 р. дослідники виявили, що вона може сформуватися регулярна мікроструктура. Анодизація низької напруги при певних умови (завжди характеризуються тривалою анодизацією періоду при постійній напрузі) в кислому електроліті розчин утворює шар  $Al_2O_3$ , що складається з гексагонального щільно упакованого циліндричні пори, перпендикулярні поверхні металу (Рисунок 1.5). Діаметри та глибина пор можуть бути контролюватися налаштуванням умов анодування. Отже, межу виявлення можна встановити дуже низькою, скорочуючи розмір пор (як згадувалось раніше, мінімальний рівень вологості зменшується із зменшенням радіуса пор).

На додаток, можна сказати, що до своєї легкості процесу, ця стільникова структура має великий потенційні можливості в електронній, оптичній та мікромеханічній галузях сенсорної техніки. Для чутливих до вологості польових транзисторів (HUMI FET), пориста плівка  $Al_2O_3$  зазвичай затиснута між собою верхній електрод Au та нижній електрод Al. Це також дає, що HUMIFET зі структурою  $SiO_2 / Si_3N_4 / Ta / Ta_2O_5 / Al_2O_3$  виявляє значно вищу чутливість (менше 1 ppmv) і швидший час відгуку (менше ніж 1 секунда), ніж звичайно анодований  $Al_2O_3$ . Як процедура анодування високої напруги, анодна іскра осадження може створити пористий -  $Al_2O_3$  шар (~10 мкм) що майже не погіршиться у вологому середовищі.<sup>24 25</sup> Електроліти анодного іскрового осадження не є водою розчини, але високотемпературні солі плавляться (зазвичай луг солі). Через величезну енергію, що розсіюється при дуже великій миттєвій щільність струму ( $\sim 10^4$  А/см<sup>2</sup>), вже відпалена бар'єрна плівка  $Al_2O_3$  руйнується електричною іскрою. Це призводить до надзвичайно високої температури з електричних іскор які розплавляють плівку  $Al_2O_3$ .

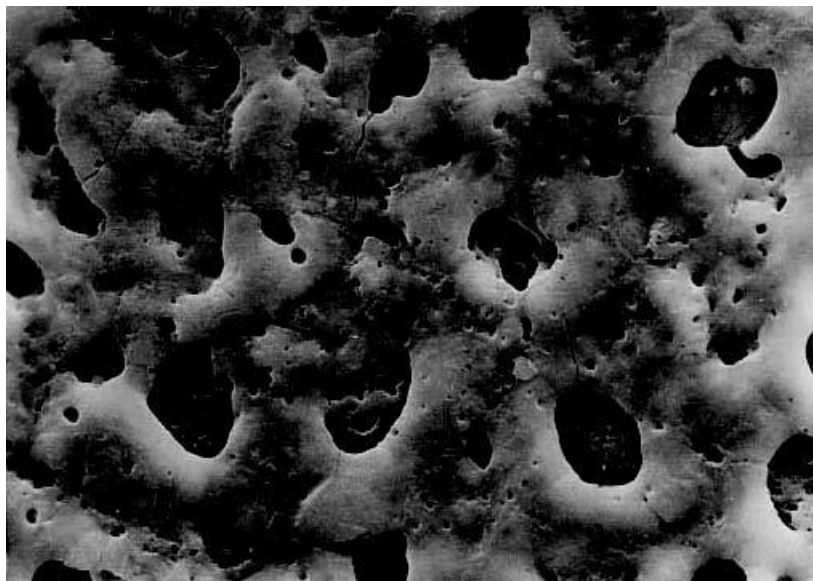


Рисунок 1.5 – Пористий  $Al_2O_3$  шляхом анодного осадження іскрою

На рисунку 1.6 показано електричні характеристики сенсорів -  $Al_2O_3$  порівняно зі зміною відносної вологості (RH) при різних температурах. Їх час відгуку та довготривала стабільність також показані на рисунках 1.7 та 1.8. Сенсори на основі  $Al_2O_3$  показали дуже високий рівень чутливості і дуже швидко реакцію в діапазоні RH (<5 с). Для перевірки його довготривалої стійкості, він був підданий впливу повітря один рік, і його читання все ще було таким же, як і початкове один (рисунок 1.8). Катодно вирощений гідроксид алюмінію або гідратований  $Al_2O_3$ , може також використовуватися в якості матеріалів, що контролюють вологість Використання електроаналізу насиченого  $Al_2(SO_4)$ , як розчину і

метал, що адсорбує водень (паладій) в якості катода, плівка гідроксиду алюмінію може осідати на паладії. Хоча цей шар має хороший відгук на високих вологостях, він не чутливий до низької вологості. Електроаналіз це не єдиний спосіб виготовлення тонких плівок  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

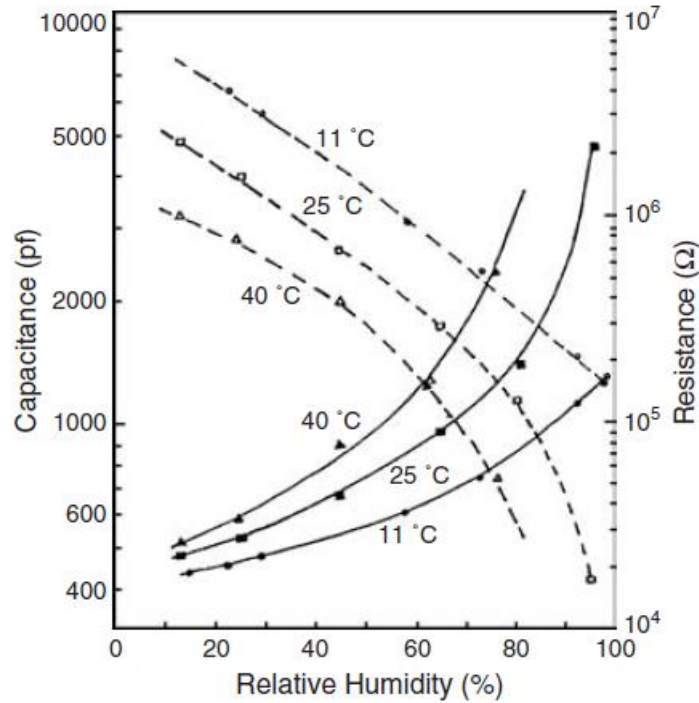


Рисунок 1.6 – Ємність (-) та опір (- - -) відгуку сенсора відносної вологості на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при  $11^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$  і  $40^\circ\text{C}$

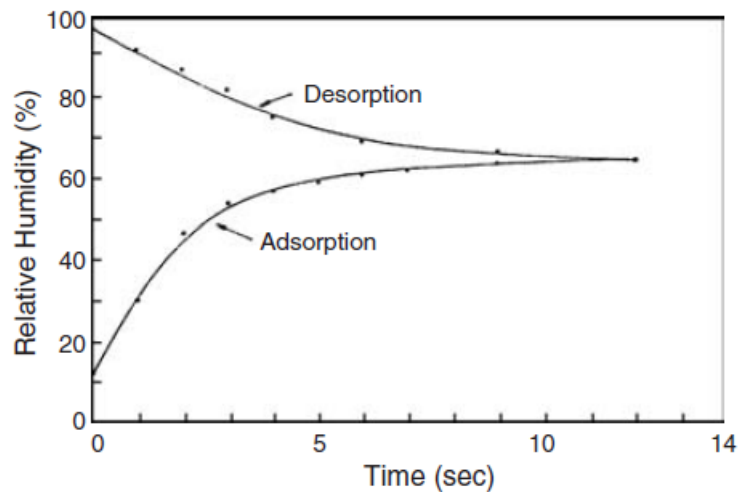


Рисунок 1.7 – Часові реакції сенсора на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на відносну вологість від від 12% до 65% і від 95% до 65%

Інші методи, такі як випаровування пучка електронів, реактивні випаровування, напилення, розпилювальний піроліз тощо використовується для осадження тонких плівок  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . На жаль, схоже до плівок, утворених при низьковольтній

анодації,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  плівки, приготовлені вакуумними методами при нижчих температурах основи, зазвичай є - фазними або аморфними, вони страждають від деградації. Ефективний спосіб отримання пористого  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (стабільного) для вимірювання вологості - це реактивне випаровування при підвищених температурах підкладки ( $800\text{--}1300\text{ }^\circ\text{C}$ ), в яких метал алюміній випаровується та окислюється до появи частинок оксиду, які наноситься на підкладку. Реакційно випаровуваний  $\text{Al}_2\text{O}_3$  чутливий до низького рівня вологи (1 ppmv). Аморфні плівки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , нанесені розпилювальним піролізом при  $250\text{--}350\text{ }^\circ\text{C}$  з розчиненого ацетилацетонату алюмінію у диметилформаміді виявлено, що він чутливий до вологості. Однак про деградацію не відомо.

Сенсори вологості на основі спеченого  $\text{Al}_2\text{O}_3$  також використовуються на даний час. Однак вони чутливі лише до рівня водяної пари вище  $50\text{--}100\text{ ppmv}$  через менший рівень пористість. Сенсори  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для вимірювання абсолютної вологості буде детально описано в наступному підрозділі.

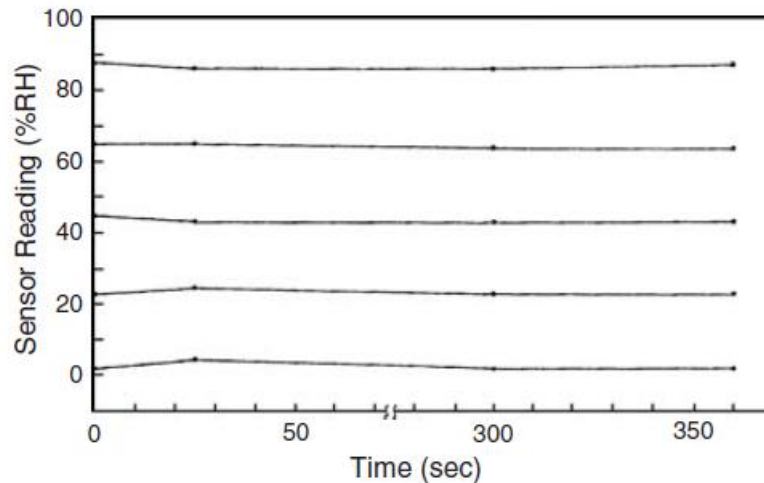


Рисунок 1.8 – Довготривалі результати тестування на стабільність сенсора на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3$

### 1.5 Імпедансні сенсори вологості (резистивні сенсори)

Сенсори вологості резистивного типу, як правило, містять електроди з благородних металів благородного металу, нанесені на скляну або керамічну підкладку методами друку на товстій плівці [25] або осадження тонкої плівки [26]. Конструктивна конфігурація більшості резистивних сенсорів базується на міжштирьових електродах [27], в яких чутливі до вологості плівки осідають між ними таким чином, що вони торкаються електродів E1 та E2. Підкладка платформи може бути покрита електролітичними провідним полімером, таким як солі та кислоти [28, 29], або легованими керамічними чутливими плівками [30, 31]. У деяких випадках сенсори на основі плівки формуються шляхом за-



стосування як друкарських методів, наприклад, трафаретного або струменевого друку, так і методів нанесення покриттів, наприклад, методів хімічного осадження парів (CVD), таких як прядильне покриття та нанесення покриттів, або вакуумного фізичного осадження паром (PVD), такі як термічне випаровування та розпилення холодом [32]. У гібридних структурах часто товстим плівковим нанесеним шаром є нижній шар. Серед згаданих методів осадження електрохімічне осадження в основному діє, коли потрібно покриття мінімальної площі підготовленими полімерами. Однак є деякі роботи, в яких застосовувались різні методи нанесення, такі як розпилювальні методи [33] або поєднання розпилювального піролізу з іншими прийомами [34].

Резистивні сенсори вимірюють зміну вологості та перетворюють її на зміну електричного імпедансу гігроскопічного середовища. Як правило, зміна опору вологості відбувається за оберненою експоненціальною асоціацією і майже завжди варіюється від 1 кОм до 100 МОм. Як правило, при адсорбції водяної пари її молекули дисоціюють до іонних функціональних гідроксильних груп, що призводить до збільшення електропровідності плівки. Більше того, час відгуку резистивних сенсорів здебільшого коливається від 10 до 30 с для зміни рівня вологості на 63% [35]. Прототип ескізу площинного сенсора вологості товстої / тонкої плівки, що базується на багатофункціональній структурі з пористою мембраною, показаний на рисунку 7. Важливі параметри конструкції виділені на схематичному ескізі.

Один з найперших тонкопліткових резистивних сенсорів вологості з високою точністю (1%), з назвою «Humment», був розроблений Nakaasa Instrument Co. Ltd. в 1978 р. [36]. На рисунку 1.9 наведено схематичний ескіз та розміри сенсора. Він був підготовлений на основі кополімеризації амонійних солей на Au-міждифрагованому електроді, розміщеному на глиноземній підкладці. Час відгуку адсорбції вимірювали приблизно 2 хв, тоді як він був дещо довшим під час процесу десорбції. Даний сенсор мав тривалий час відгуку та великі розміри. З часом інші сополімери з різними методами одержання, такі як зшиті кополімери (мережі зшитих полімерів), приготовані з стиренсульфонату методом фотополімеризації, вініловий полімер та N, N-метилен-bis-акриламід як зшиваючий зв'язок регент були досліджені в роботах [36, 37].

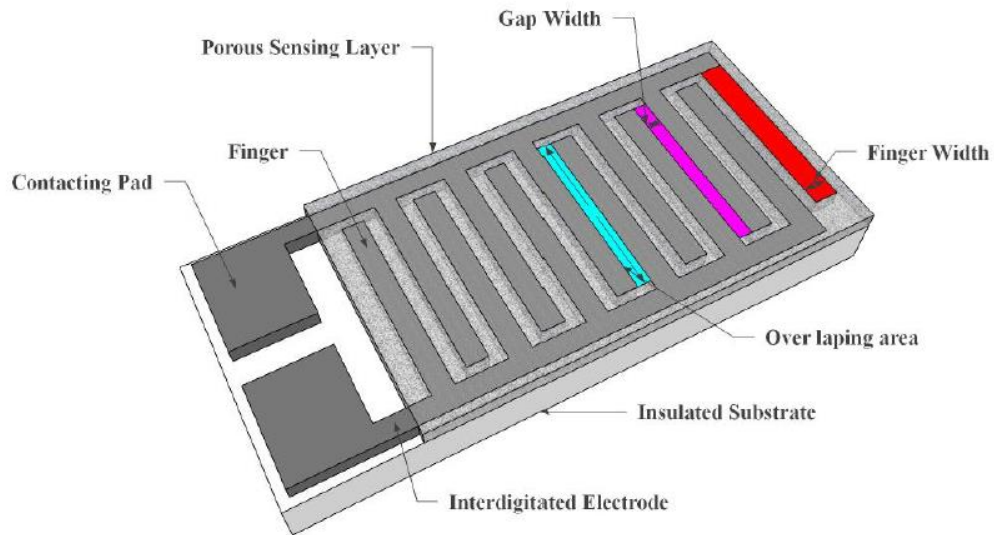


Рисунок 1.9 – Ескіз площинного сенсора вологості на основі товстої / тонкої плівки, що базується на багатозначній структурі з пористим чутливим елемен-

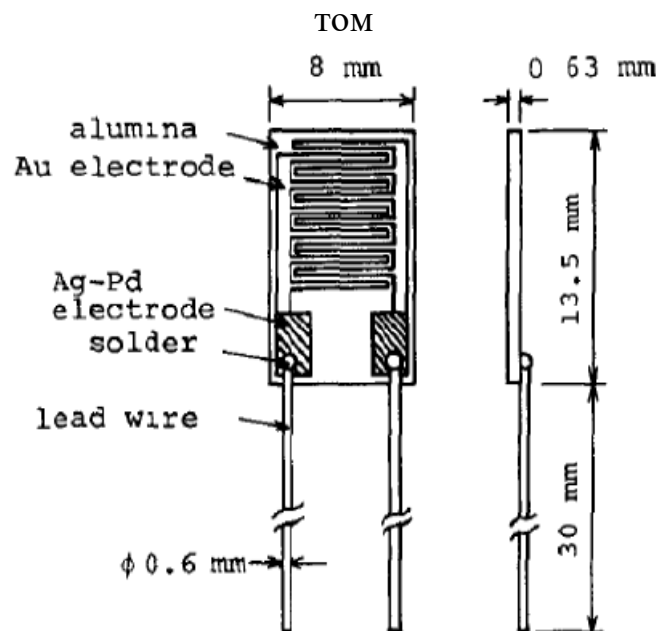


Рисунок 1.10 – Схематичний вигляд сенсора вологості типу Hument HPR

### 1.6 Полімерні резистивні сенсори вологості

Дослідження та розробка полімерних сенсорів вологості тривали і застосовувались у промисловості протягом останніх чотирьох десятиліть. Більшість із цих сенсорів виготовляються на основі тонких плівок з пористих полімерів [38] та застосовують принципи зондування, подібні до принципів оксидно-металевих керамічних сенсорів. Функціональність сенсорів заснована на фізичному та хімічному поглинанні водою плівок та конденсації в присутності капілярних пор, а отже, зміні деяких фізичних та електричних властивостей senso-

ра. Величина зміни об'ємної провідності або діелектричної проникності залежить від внутрішніх властивостей.

Однак попит на органічні полімерні тонкоплівкові сенсори вологості та їх застосування все ще є наразі актуальним питанням, як і з тим, що стосується металооксидних товстих або тонкоплівкових керамічних сенсорів [39], але їх виготовлення та розвиток постійно прогресували, особливо в лабораторних дослідницьких роботах. Протягом останніх двох десятиліть були розроблені резистивні елементи [35, 40], такі як товстоплівкові площинні та тонкоплівкові випаровувані [43] компоненти на основі трьох груп поліелектролітних полімерів [44–46] та кополімерів [47–49]. для застосувань сенсорів вологості [50–54].

Полімерні електроліти (поліелектроліти) - це група полімерів з електролітичними групами, такими як іонні мономери, які виявляють іонну провідність при впливі водяної пари. Вони реагують на зміни водяної пари, збільшуючи свою іонну рухливість або концентрацію носія заряду з низької до високої [55,56]. Поліелектроліти можуть бути виготовлені з солей, кислот і основ. Відповідно до класифікації Ченя та Лу, чутливі до вологи поліелектроліти групуються на основі їх функціональних електролітичних груп і їх можна принципово розділити на три основні категорії, що складаються з солей четвертинного амонію, солей сульфонатів та солей фосфонію [49]. Поліелектроліти, як правило, гідрофільні і, як правило, розчиняються у воді, а тому тривалий час не стійкі до водяної пари і страждають від слабкої стійкості [47]. Крім того, полімерні електроліти мають серйозний дефіцит зміни опору під впливом високого рівня вологості, часто вище 50% вологості. Наявність великого гістерезису також є одним з інших суттєвих недоліків цих груп. Навпаки, провідні полімери частково гідрофобні і, таким чином, демонструють вищу міцність завдяки меншому поглинанню води [56,57]. Крім того, електропровідні полімери, такі як полі (3,4-етилендіокситіофен) (PEDOT) або полі (3,4-етилендіокситіофен-полі (стирол-сульфонат) (PEDOT-PSS), мають вищу чутливість до вологи та значні оборотні зміни імпедансу при дії вологі умови [58]. Мініатюрний датчик вологості резистивного типу з органічного спряженого полімеру на основі PEDOT був розроблений і виготовлений із застосуванням стандартної технології MEMS, інтегрованої з процесом полімеризації. Електричні характеристики випробувань показали, що датчик чутливий до вологості в діапазоні від 20% до 99% [129]. Крім того, Miyoshi et al. повідомили про гнучку конфігурацію резистивного сенсора вологості, засновану на затиснутій пористій гідрофобній політетрафторетиленовій мембранній структурі, нанесеній методом м'якого MEMS, застосованого до фізіологічних діапазонів вологості [58].

Існує кілька вдосконалених методів проектування та виготовлення водостійких елементів у випадку резистивних сенсорів вологості на основі полімер-

них електролітів для зменшення розчинності у воді та захисту їх від деформації розчиненням [31]. Деякі з цих методів охоплюють застосування гідрофобних груп шляхом прищеплення та кополімеризації для нанесення захисних плівок [32–34], зшивання пластів та взаємопроникнення мережевих структур [35–37], отримання органічних / неорганічних гібридних сполук, що містять метал або оксид металу додані полімери [38–40], введення реактивних функціональних груп для утворення хімічних зв'язків між підкладкою та чутливим шаром за допомогою фотохімічних реакцій зшивання [41–43], закріплення полімерних мембран на поверхнях електродів за допомогою УФ-опромінення, переважно в роботі Гонгом та ін. [44–46], а також додавання легуючих речовин, наприклад, солей або кислот для усунення недоліків напівпровідникових / провідних полімерів [47–49].

Водостійкі поліелектролітні сенсори вологості на основі композитів епоксидної смоли та двох інших сомономерів, вибраних із солей четвертинного амонію, були підготовлені Lee et al. Чутлива мембрана була сформована з композиції гліцидилтриметилхлориду амонію (GTMAC) як мономеру та ангідриду метилтетрагідрофталевого ангідриду (МТРНА) та дигіцидилового ефіру поліпропіленгліколю (PPGDGE) в якості співмономерів, а потім вводили на друкований золотий електрод для формування сенсора. Сенсори були протестовані для використання у важких умовах [50]. У випадку з поліелектролітом четвертинний фосфонієвих солей, новий мономер (вінілбензил) трибутилфосфоній хлориду був кополімеризований з двома іншими сомономерами як водостійка мембрана, що сприймає вологість, за допомогою методу зануреного покриття [51]. Датчик показав чутливість до водяної пари для діапазону вологості від 20% до 95%. Для поліпшення довговічності та стійкості при високій вологості Sakai et al. повідомляли про одночасне зшивання та кватернізацію (4-вінілпіридинового) полімеру з іншим полімером [52]. Пізніше Сакай та ін. розробив зшиті гідрофільні полімерні плівки для формування взаємопроникних полімерних мереж (IPN) з гідрофобним полімером, щоб зробити гідрофільні полімерні плівки більш стійкими та довговічними в умовах високої вологості [55]. Про кополімеризацію гідрофільних або гідрофобних мономерів з іншими гідрофобними сомономерами та вплив різних параметрів на характеристики зшитих кватернізованих мембран поліелектролітів докладніше повідомляється в роботах [53,54].

Останнім часом у багатьох роботах розглядалися способи усунення недоліків сенсорних мембран на основі полімерних електролітів, таким чином усуваючи деякі їх небажані характеристики. Переглядаючи опубліковані дані, виявляється, що більшість цих проблем стосувались розчинності у воді при високій вологості, низького ступеня чутливості при низькій вологості, зменшення

загального імпедансу та модифікацій гістерезису. Полі (4-вінілпіридин) є прикладом слабкого гідрофільного полімеру, який був підданий деякій обробці, щоб використовувати його як чутливий до вологості матеріал Li et al. Для поліпшення чутливості до вологи, міцності плівки, стабільності та здатності працювати у вологих середовищах вони співполімеризували мономер бутілметакрилату з 4-вінілпіридином разом із реакцією дибромбутану для отримання зшитих та кватернованих структур [55]. Більше того, новий датчик резистивної вологості на основі підкладки на основі полієфіру (ПЕТ) виготовлений на основі кополімеризації *in situ* двох різних полімерів для досягнення довготривалого стабільного сенсора [56]. Згідно з Лі та співавт. вологостійкі плівки, що визначають вологість, засновані на структурі взаємопроникаючої мережі (IPN), одночасно були підготовлені шляхом зшивання полі (диметиламіноетилметакрилату) (PDMAEM) та полі (гліцидилметакрилату) (PGMA). Як зшиваючих мономерів використовували гідрофобні полімери 1,4-дибромбутану (DBB) та діетилтріаміну (DETA) відповідно. Датчик був випробуваний на відносному рівні вологи від 20% до 97%, він мав чутливість до низької вологості та прийнятну реакцію протягом 4 с [57]. Поліпірол - один із полімерів, який має деякі недоліки. Сонце та ін. виготовив датчик на основі композиції на поліпіролі шляхом хімічної рідкофазної полімеризації та подальшої кватернізації 1,4-дибромбутаном для отримання чутливого сенсора з низькою вологістю [58]. В інших роботах повідомляється про резистивний датчик вологості з акцентом на вдосконалених методах приготування зшитих поліелектролітів, наприклад, кватернізація, а потім кополімеризація [159], зшивання та кватернізація [60]. Як новий внесок Sun та ін. був запропонований і випробуваний поліелектролітний зшитий резистивний датчик вологості на основі кополімеризації, а потім кватернізації в різних хімічних середовищах, таких як ацетон і аміак, при вологості від 30% до 95% вологості. В результаті для 63% зміни вологості датчик показав зміну імпедансу на чотири порядки. Під впливом парів етанолу вихідні властивості зменшувались лише на один порядок [61].

Як вже згадувалося раніше, створення міцних сполук між полімерами та пластиковими підкладками, часто полієфірними (ПЕТ) та поліімідними підкладками, є основною проблемою сучасних розробок. Цю проблему було дещо пом'якшено шляхом введення фізичних та хімічних реактивних методів для формування матриці зв'язку. Композитні нановолокнисті матеріали, що містять вологість, з вмістом кремнію полімерного електроліту, поліетиленоксиду та поліаніліну підготовлені методом електровідтиску.

Як реакція на вологість, так і зв'язана когезія були покращені модифікацією першого шару (золотого електрода) полі (діаллідиметиламоній хлоридом) (PDDA) перед осадженням. Крім того, вони виявили, що присутність поліанілі-

ну (PANi) у нановолокнах ефективно призвело до зменшення імпедансу плівки. Також повідомлялося, що короткий час відгуку сенсора можна розглядати як обумовлений посиленням з'єднанням композитних нановолокон та підкладки [62]. На основі їх нових робіт над композиціями нановолокон на основі поліаніліну (PANi) було виявлено, що на зчеплення плівки як з підкладкою, так і з електродом значний вплив має утворення нанотрубкових гранул у нановолокнах. Більше того, модерування та підтримка співвідношення складу полі (вінілбутиралу) та полі (етиленоксиду) у розчині електропрядіння (ES) призвело до кращого електричного контакту, відносно високої питомої поверхні та модифікації гідрофільності нановолокна містять нановолокна PANi [63]. Іншою альтернативою є кріплення поліелектролітів, що сприймають вологість, до поверхні електрода на пластикових підкладках. Су та ін. виготовили нові гнучкі резистивні сенсори вологості на основі закріплених мембран з поліелектролітів (одержуваних кополімеризацією метилметакрилату та [3- (метакриламін) пропіл] триметиламонію хлориду) до незміцненого золотого електрода (попередньо обробленого 3-меркаптопропіоновою кислотою) на PET-підкладці хімічний протокол пептидів. N- (3-диметиламінопропіл) -N'-етилкарбодіїмід гідрохлорид (EDC) використовували в якості реагенту для зв'язування пептидів. Сенсори показали хорошу залежність вологості в широких діапазонах вологості (20% – 90% RH) з хорошою довгостроковою стабільністю. На стійкість води закріпленого полі-MMA-MAPTAC до зони контакту MPA / Au впливала кількість доданого EDC [64]. Поліпшення злипання між поліелектролітними чутливими шарами та поліімідними плівками як гнучка підкладка також вивчалось та експериментувалось на [65] шляхом синтезу поліелектролітних та епоксидних смол як взаємопроникаючих полімерних мереж, які були отримані зшиванням та кополімеризацією, щоб стати потенційним методом. Сенсорні мембрани виготовляли методом трафаретного друку та оцінювали їх у діапазоні вологості від 20% до 95% відносною вологості з хорошою чутливістю від низьких до високих областей [26]. Більшість розглянутих сенсорів виявляли чутливість до вологості навіть при значеннях RH нижче 30%.

Для збільшення зміни імпедансу цих резистивних полімерних сенсорів вологості на основі спряжених провідних або напівпровідникових полімерів легування та диспергування іонів каталізатора всередині матеріалів попередника призводить до зменшення опору при низькій вологості [26–30] і, отже, більших змін провідності. У зв'язку з цим полі (p-діетилінбензол) або PDEB синтезовані з нікелевим каталізатором (Ni-C) як новий комплексний каталізатор перехідного металу та ацетиліду в системі змішаних розчинників діоксан-толуолу при температурі 25 ° C, Yang et al. і використовуються для цілей визначення вологості. В результаті вийшло з'єднання з більш високою молекулярною масою

(МВ) і хорошою розчинністю. Датчик тестували в діапазоні вологості 15% – 92% відносної вологості, а імпеданс сенсора варіював від 103 до 107 Ом, що було досить низьким порівняно з іншими сенсорами на основі спряжених полімерів [27]. Наночастинки золота належать до металевих катализаторів, які використовувались для забезпечення тонкоплівкових сенсорів з високою провідністю [28]. Су та ін. синтезовані та виготовлені сенсори вологості типу імпедансу дендримерного полімеру поліамідоаміну (ПАМАМ), диспергованого з AuNP (наночастинки золота) шляхом покриття краплями на поліефірній підкладці. Їх конструкція прототипу пропонує переваги гнучкості завдяки новій підкладці та низьку чутливість до відносної вологості завдяки наявності катализаторів Au [33].

Додатковим недоліком сенсорів вологості резистивного типу на основі поліелектролітів є погане виявлення низької вологості при роботі в дуже сухій атмосфері (близько 40% відносної вологості), де вони, таким чином, демонструють надзвичайно низьку провідність, що, як наслідок, ускладнює або неможливо виводити електрику вимірювання відгуку. Щоб усунути цю проблему, одним із рішень є зміна полімерної матриці шляхом застосування надпровідника з високою власною провідністю та методами механічного змішування. Лі та ін. розробили полі (4-вінілпіридин) / сажу (СВ) композит, який буде використовуватися як чутливий до вологості матеріал [34]. На основі їх роботи полі (4-вінілпіридин) (PVP) був прищеплений на сажу (СВ) у присутності TEMPO з утворенням нової сполуки, яка була далі кватернізована і зшита з алкілгалогенідами, такими як бромбутан і 1,4 -дибромбутан для отримання матеріалу, що відчуває вологість.

В іншій роботі для використання для резистивних тонкоплівкових сенсорів вологості [35]. Ці сенсори характеризувались у діапазоні вологості від 10% до 98% відносної вологості, що призвело до різної провідності для різних діапазонів відносної вологості, і слід зазначити, що особливо висока провідність спостерігалася навіть при дуже низькій вологості.

### 1.7 Керамічні резистивні сенсори вологості

Електрокерамічні матеріали як у формі сполук, так і одновидові з одинарними / полікристалічними структурами можуть бути розглянуті як корисні кандидати для застосування сенсорів вологи. Для вирішення проблем дефіциту звичайних матеріалів, таких як неадекватна чутливість або селективність, низька каталітична якість, недостатність порожнин, деградація поверхні внаслідок сильних забруднень у суворих середовищах та відсутність роботи в пересохлих або просочених середовищах, запропоновано використання інноваційних мате-

ріалів з новими механізмами виявлення вологості [36]. Цю ціль можна досягти шляхом утворення нових знайдених комбінацій, тобто змішанням наноматеріалів з різним розміром частинок / морфологією, гібридизацією матеріалів шляхом заміщення або легування нових атомів у решітці, зменшенням розміру частинок до субнано-масштабів і, нарешті, дослідженням впливові властивості матеріалів з різних сімейств з різними вакансіями у валентному шарі.

Пористі керамічні або керамічні сенсори вологості на основі нанородів можуть бути реалізовані та сформовані за допомогою таких методів, як трафаретна друк на товстій плівці [33, 38], за допомогою яких провідні та непровідні пасти наносяться на ізолюючу підкладку, тонкі плівки плазми або вакуумної пари, які наносяться на основі напівпровідника оксиди металів [39,40], а плівки утворюються шляхом анодування, переважно для оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ) [41]. У таких сенсорах з товстої плівки товщина плівки зазвичай перевищує 10 мкм, і до попередньо реагуючих порошків можна додавати легуючі речовини як каталізатори реакції для сприяння дисоціації молекул води на функціональні групи, що містять іони водню та гідроксилу. Тонкі плівки нанесення вакуумної пари або плазмового розпилення на різні підкладки, такі як кремній, також будуть функціонувати як пристрої резистивного типу і в основному використовують іонно-електронну провідність завдяки своїй напівпровідниковій природі. Поверхневі гідроксильні іони зменшують опір плівки і, як наслідок, змінюють опір.

Як згадувалося в розділі 1.3, резистивні сенсори потрапляють до іонних та електронних провідних груп.  $MgCr_2O_4-TiO_2$  [42],  $ZnCr_2O_4-LiZnVO_4$  [43],  $TiO_2-K_2Ti_6O_{13}$ ,  $Ni(Al, Fe)2O_4-TiO_2$ ,  $MgFe_2O_4$ ,  $ZnO$ ,  $TiO_2$  [46] і розмір наномасштабу  $SnO$  додані з різними співвідношеннями оксидів  $CuO$ ,  $Fe_2O_3$  та  $SbO_2$  [47] є прикладами типів іонної провідності, які працюють за допомогою поверхневої хемосорбції та фізичної сорбції для вимірювання відносної вологості навколишнього середовища. Пористий керамічний датчик вологості  $MgCr_2O_4-TiO_2$  був розроблений для мікрохвильових печей [48]. Цей матеріал функціонував на основі хемосорбції та фізичної адаптації молекул води і, нарешті, іонної протонної провідності [56]. Оцінка вологості визначалась у дві фази, що включали низьку та високу RH: при низькій RH, хемосорбція спричиняла дисоціацію молекул водяної пари та утворення гідроксильних іонів на поверхні ділянок  $Cr_3+$ . Підвищений рівень вологості спричиняє фізичну сорбцію та утворення першого шару іонів гідронію, а отже, перенесення протону на сусідні ділянки, що призводить до посилення провідності (іонної або протонної провідності). При вищій вологості конденсація водяної пари відбувається в капілярних квазіотворах, утворюючи рідинні шари. Електролітична провідність призводить до виникнення подальшої провідності.



Пористість, середній розмір зерен та середній розмір пор  $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{-TiO}_2$  становили 30%–40%, 1–2 мкм та 300 нм, відповідно. Нагрівач підвищив чутливість сенсора вологості, нагріваючи його до 450 °C після будь-якого часу використання. Це нагрівання було необхідним для усунення гідроксильних груп на поверхні. Крім того, нагрівач видаляв такі забруднення, як пил, олія та інші пари хімічних речовин. На рисунку 1.11 показана конструкційна структура сенсора.

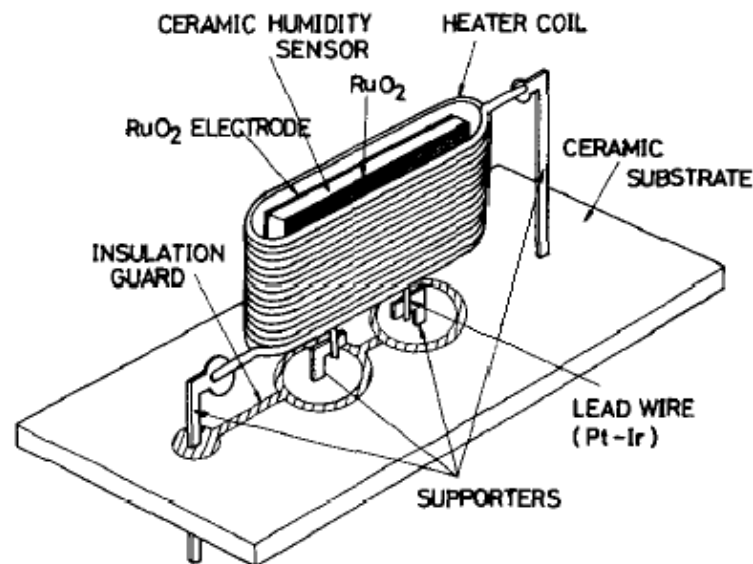


Рисунок 1.11 – Конструкційний ескіз керамічного сенсора вологості  $\text{MgCr}_2\text{O}_4\text{-TiO}_2$

Ямамото та ін. вивчив та запропонував подібний механізм зондування для сенсора вологи  $\text{TiO}_2 / \text{SnO}_2$  (моль співвідношення 1: 1) на основі механізму іонної провідності на поверхні сенсора [59]. У цьому випадку зерна з більшим поперечним перерізом міжзернистих шийок робили пристрій менш чутливим до хемосорбції, а отже, зменшували вплив гідроксильних функціональних груп. Крім того, використання цього керамічного сенсора без нагрівального елемента було б можливим в середовищі без токсичних газів або шкідливого пилу. Приблизно через вісім років, у 1989 р., Пористий керамічний датчик вологості з чистого титану був досліджений Yeh et al. [60]. В якості нової знахідки цієї роботи датчик міг працювати при кімнатній температурі (25 °C) і відновлюватися без потреби в термічній десорбції. Крім того, чутливість вологопровідності сенсора була змінена більш ніж на чотири порядки для діапазону вологості від ~ 15% до 95% при 400 Гц. На підставі результатів електричної характеристики датчик працював за допомогою носіїв іонної провідності, які були одночасно іонами та електронами, а іони були домінуючими носіями.

Досліджено властивості чутливості до вологості фериту магнію ( $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ) та фериту магнію, заміщеного різними співвідношеннями літію ( $\text{Mg}_{1-x}\text{Li}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) ( $0,2 \leq x \leq 0,6$ ), синтезованого з неорганічних попередників за допомогою твердофазної реакції [51]. Зазначено, що метою заміщення іонів  $\text{Li}^{+}$  є подальше зменшення розміру зерна феритової керамічної шпінелі, отже, стимулювання пористості та створення більше структур дефектів решітки. Реакція вологості композитів оцінювалась у діапазоні вологості від 10% до 80% при кімнатній температурі. Всі ферити, заміщені іонами літію шпінелі, мають підвищену чутливість до вологості, особливо заміщений зразок  $x = 0,2 \text{ Li}$ . При низькій вологості чутливість лужних зразків зростала завдяки кращому віддаванню електронів на об'ємну поверхню від водяних парів. Загалом, зразок з  $x = 0,2 \text{ Li}$  забезпечував високу площу поверхні та високий ступінь пористості, отже, сильнішу адсорбцію / десорбцію. Шляхом порівняння даних було встановлено, що найменша пористість і, отже, найменша чутливість відповідали зразку  $x = 0,6 \text{ Li}$ .

Сенсори вологості на основі напівпровідникових оксидів металів були розділені на електронні сенсори провідності і в основному вивчалися при температурах вище  $100^\circ\text{C}$ . Оскільки ці сенсори працюють при температурах, набагато більших, ніж при фізичній сорбції води, отже, механізм їх провідності заснований лише на хімічній адсорбції (хемосорбції) молекул водяної пари [48]. Насправді цей тип працював на основі віддачі електронів від молекул водяної пари на поверхню оксиду металу напівпровідника. У таких випадках хемосорбція водяної пари може призвести або до збільшення, або до зменшення опору сенсора, що відповідає напівпровідниковому типу, будь то типу n або p типу. Властивості мікроструктури напівпровідникових електронних сенсорів, такі як площа поверхні, розподіл пор за розмірами та середній розмір частинок, не настільки ефективні, як мікроструктури іонних типів для чутливих характеристик сенсора [47]. На основі звіту Ямазое та Шимідзу,  $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)\text{SnO}_3$  та  $\text{ZrO}_2\text{-MgO}$  є одними з електронних типів, однак це єдина робота, в якій перовскіти, такі як SLS, були поміщені в високотемпературну напівпровідникову групу сенсорів. Можливо, заміна місць B та X оксидами лантану та олова вплинула на принцип роботи сенсорів. В інших роботах на початку 1980-х Seiyama et al. заявив, що зміна провідності напівпровідникових електронних сенсорів n-типу, тобто  $\text{SrSnO}_3$ , більше, ніж у сенсорів p-типу, таких як  $\text{SrTiO}_3$ , під впливом вологи [59].

## 1.8 Керамічні сенсори вологості типу Перовскіт

Дослідження та вивчення поведінки вологості та морфологічної структури пористих плівок перовскіту та сипучих матеріалів продовжує давати нові попередні та інноваційні результати [52–54]. Плівки перовскіту застосовані для виробництва емнісних сенсорів вологості [55] та мікроприладів [56]. Повідомлялося, що механізм визначення вологості оксидів перовскітного типу із загальною формулою  $ABX_3$  базується на віддачі електронів від молекул водяної пари. Стверджувалося, що їх активність може бути пов'язана з захопленими електронами через наявність поверхневих дефектів, таких як вакансії іонізованого кисню, і ці захоплені електрони можуть бути звільнені адсорбцією молекул водяної пари на місцях дефектів [48,69]. Виходячи з попереднього дослідження показали, що чутливі до вологості властивості перовскітових керамічних оксидів проявляються лише при підвищеній температурі в діапазоні від  $300\text{ }^\circ\text{C}$  до  $500\text{ }^\circ\text{C}$ , отже, вони діють на основі електронного механізму типу провідності [48]. Для перовскітів на основі церію, таких як леговані  $BaCeO_3$  та  $SrCeO_3$   $Nd_2O_3$ , було встановлено, що рухливість протонів вища, ніж рухливість іонів кисню при температурі  $700\text{ }^\circ\text{C}$ , тому їх використовують для потенціометричних сенсорів вологості через їх високу протонна провідність [198,199]. Твердий електролітний датчик вологості на основі перовскіту  $SrCe_{0.95}Yb_{0.05}O_3$  для високотемпературних застосувань реагував на вологість змішаними провідниками іонів водню (протони), іонів кисню (електронів) та позитивних дірок як дефекти решітки [20]. В інших роботах змішані перовскіти ніобатів кальцію барію (BCN) показали хороші перспективні властивості протонного провідника та стабільність у вологих атмосферах з низькою температурою. У цьому матеріалі рухливість протонів становить приблизно один порядок величини концентрації іонів кисню, а зміни провідності є функцією дисоціації  $H_2O$ , отже, це може бути комплекс типу іонної провідності [21].

Було встановлено, що багато видів окислів металів перовскіту з пористими структурами демонструють стійкі вологочутливі характеристики навіть при кімнатній температурі через їх протонний механізм іонної сенсорної провідності та відсутність електронної провідності [22,23]. Залежно від застосовуваного попередника для місць А або В комплексів ці сенсори демонстрували чутливість до вологості від 8%–20% до більш високих значень RH приблизно 98% [24–27]. Садаока та ін. виявлено, що пористі феноелектрики PLZT (Pb, La) (Zr, Ti)  $O_3$  (леговані дигідрофосом фосфатом свинцю титанат цирконату лантану), леговані  $KH_2PO_4$ , спікані при  $700\text{ }^\circ\text{C}$ , можуть використовуватися як елемент, що визначає вологість при кімнатній температурі та діапазоні вологості Від 0 до 90% вологості Крім того, вони помітили, що залежність імпедансу сенсора

від вологості в основному базується на покритті адсорбованої водяної пари (фізична адсорбція), і тому домінуючими носіями є протони з іонною провідністю [28].

В роботі [29] представлені фізичні та електричні характеристики пористої кераміки  $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ , що визначають вологість, в різних діапазонах низьких та високих частот при кімнатній температурі ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) та вказав, що цей перовскіт є підходящим кандидатом для використання як матеріал сенсора вологості. Вони виявили, що домінуючими провідними носіями є, ймовірно, протони, отже, сенсорним принципом є протонна іонна провідність. Ця композиція продемонструвала хорошу чутливість при низькій частоті в нормальній обстановці без токсичних газів і була зворотною між 15% і 95% RH при низькій температурі. В іншій роботі [21] вони досліджували вплив легуючих речовин, таких як оксид калію ( $K_2O$ ), на  $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ , спечений при  $1250\text{ }^\circ\text{C}$ . Провідність нової композиції змінилася на чотири порядки при низькій частоті для того самого діапазону RH, тоді як нелегована - приблизно на три порядки. Мікроструктури легованих зразків, такі як відкрита пористість та питома поверхня, виявили незначне зменшення порівняно з мікропроцесорними зразками БС.

У цих випадках сенсори перовскітного типу в основному працюють на основі електричних властивостей, які охоплюють зміни опору та ємності, пов'язані зі змінами відносної вологості навколишнього середовища, отже, їх можна розглядати як імпедансні або ємнісні керамічні сенсори [21–23]. Оскільки іонна провідність сильно залежить від утворення одношарової та багатошарової шляхом фізичної сорбції та капілярної конденсації молекул водяної пари, тому характеристики сенсорів вологості перовскітів значною мірою залежать від мікроструктур плівки або об'ємних комплексів, таких як питома площа поверхні, ефективна пористість, об'єм і розподіл пор за розміром. Відповідно, контроль мікроструктури пористих елементів є дуже визначальним для ефективності сенсора [24]. Вологопровідність та характеристики чутливості титанату кальцію перовскіту, спеченого при різних температурах, сильно залежать від мікроструктури спеченої кераміки [24]. Тим часом повідомлялося, що чутливість до вологи цих структур залежить від міжфазної мікроструктури та складу матеріалу. Як результат тесту,  $Sr(Sn_{0.5}, Ti_{0.5})O_3$  виявив швидку реакцію і працював незалежно від температури навколишнього середовища. Крім того, кераміку в цьому дослідженні підготували, пропустивши процес прожарювання, і її безпосередньо спікали. Отримана кераміка виявила вищу пористість, ніж та, яка зазнала процесів прожарювання [25]. Zhang та інш. виготовили датчик вологості із закрученим покриттям нового перовскіту титанату калію вісмуту ( $Bi_{0.5}K_{0.5}TiO_3$ ) на нестабілізованому сріблом паладію електроді та глиноземній підкладці. [216]. Порошок зондування ВКТ синтезували за допомогою хімі-

чного хімічного розчину. У цьому випадку чутливу пасту готували безпосередньо шляхом змішування порошку та деіонізованої води без будь-якого сполучного або стадії відпалу. Для дослідження механізму зондування сенсора його піддали морфологічній та якісній фазовій характеристиці та подальшому дослідженню вологості в діапазоні від 11% до 95% відносної вологості. З результатів стверджувалося, що датчик використовує поверхневі взаємодії, а зміни провідності в основному зумовлені носіями іонних зарядів стрибковим транспортом через високу локальну щільність заряду. Датчик продемонстрував зміну імпедансу приблизно на чотири порядки для всього випробовуваного діапазону відносної вологості та гістерезис приблизно 3% відносної вологості.

Сімейство барієвих перовскітів, наприклад,  $\text{BaTiO}_3$  [27] або композити  $\text{BaTiO}_3$  та полімерів [22–23] з пористою структурою та різною робочою температурою, привернули значну привабливість для зондування вологи. Вівіані та ін. досліджували поведінку пористого оксиду молібдену барію ( $\text{BaMO}_3$ ) із вмістом  $M = \text{Ti}, \text{Zr}, \text{Hf}$  або  $\text{Sn}$ , приготовленого вологим хімічним синтезом та різними підвищеними температурами від  $1250^\circ \text{C}$  до  $1700^\circ \text{C}$ . Зразки з нижчою температурою спікання та більшою відкритою пористістю продемонстрували збільшення як провідності, так і ємності із збільшенням діапазону вологості від 20% до 80% відносної вологості при кімнатній температурі ( $25^\circ \text{C}$ ). Вони повідомили, що найвища чутливість була виявлена у високопористих зразків  $\text{BaTiO}_3$ , легованих з додаванням 0,3 ат.%  $\text{La}$ . На підставі експериментальних результатів вони стверджували, що сенсор працює відповідно до моделі поверхневої протонічної провідності [224]. В інших дослідженнях Hwang et al. електричні характеристики легованого  $\text{BaTiO}_3$  пористого лантану ( $\text{La}$ ) вивчали за допомогою комплексної імпедансної спектроскопії в залежності від різної щільності спекання та умов вологості. Було виявлено, що зразки з меншою щільністю та вищим опором демонструють велику та майже лінійну провідність у відповідь на зміни вологості [25]. Ван та співавт. досліджували властивості опору сенсора вологості сенсорів, виготовлених з нанокристалічного  $\text{BaTiO}_3$ , легованого лужними карбонатними оксидами  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  та  $\text{K}_2\text{CO}_3$  при 3 мас.%, та нанокристалічних сенсорів  $\text{BaTiO}_3$  без будь-якого легування. Вони заявили, що опір сенсора вологості може бути зменшений до діапазону 1–103 кОм шляхом додавання 3–5 мас.%  $\text{K}_2\text{CO}_3$  або  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . Крім того, вони виявили, що додавання  $\text{NaN}_2\text{PO}_4$  до  $\text{BaTiO}_3$  може бути причиною зменшення гістерезису сенсора вологості [26].

Останнім часом одновимірні сенсори вологості на нановолокні на основі перовскіту, підготовлені методами електровідтиску, набули значного значення завдяки більшій ефективності, обумовленій більшими площами контакту поверхневих волокон та вологого повітря. Різні види перовскітних матеріалів, такі

як нановолокно титанат барію або титанат барію стронцію, були вивчені для використання в системах, що визначають вологість [27–29]. Для зменшення петлі гістерезису нановолокна  $\text{BaTiO}_3$  були синтезовані методом техніка електровідтиску як матеріали, що визначають вологість, Wanga et al. Сенсори вологості постійного струму виготовлені шляхом нанесення нановолокнистих пасти з титанату барію (суміші порошку та деіонізованої води) на скляну підкладку за допомогою зануреного покриття на два різні електроди Al та Ag, що осідають. Випробовуючи сенсори в діапазоні вологості від 11% до 95%, той, що базується на срібному електроді, продемонстрував більш високу чутливість і швидший час відгуку / відновлення, що може бути пов'язано з меншим опором металевого провідника. Загальні результати продемонстрували чудовий потенціал нановолокон  $\text{BaTiO}_3$  для застосувань сенсорів вологості [23]. Нещодавно електроспінові сенсори вологості титанату кадмію ( $\text{CdTiO}_3$ ) на основі одновимірних нановолокон з пористою структурою були запропоновані Imran та співавт. Датчик нановолокон складався з різних структур з трьома шарами. У цій конструкції нановолокна  $\text{CdTiO}_3$  осаджувались методом фотолітографії на скляну підкладку, а два алюмінієвих електроди розміщували поверх них із шириною зазору 25 мкм. Характеристики вимірювання електричної вологості сенсора вимірювали експериментально в діапазоні відносної вологості 40% -90% при 25 ° C, змінюючи частоту. Ефективні характеристики сенсора, такі як чутливість та гістерезис, були значно покращені. Вимірювали швидку реакцію та час відновлення відповідно 4 і 6 с. Наявність пористої наноструктури та нановолокна з мінімальним діаметром у сенсорній плівці є одними з досліджуваних параметрів оптимізації [23].

У багатьох структурах перовскітів елементи II групи (лужноземельні метали), такі як Be, Mg, Ca, Sr, Ba та Ra, можуть служити іонами металів, які будуть використовуватися як гігроскопічні матеріали для поліпшення характеристик вологості. У зв'язку з цим завдяки механізму провідності більшості перовскітних комплексів при взаємодії з водою вони добре відомі позитивним іонним провідникам при кімнатній температурі. Більшість оксидів перовскітів синтезуються методами хімічного розчину, що включають перемішування та перемішування, або твердотільними реакціями шляхом об'ємного прожарювання сумішей двох або більше карбонатів та / або оксидів металів [23].

Твердотільні газові сенсори стали популярними завдяки їх низькій вартості та масштабованості та вже знайшли шлях до ряду різних застосувань. Сучасні дослідження фокусується на сенсорах на основі оксидів металів, напівпровідникових нанопроволок, вуглецю нанотрубки і зовсім недавно твердотільні газові сенсори на основі графену та оксид графена (GO). Однією з помітних властивостей графена є його висока електрична здатність провідність, яку мож-

на віднести до р-орбітальних електронів, які утворюють  $\pi$ -зв'язки з сусідні атоми. Ці  $\pi$ -зв'язки з їхніми локалізованими електронами визначають електронна смугова структура з високою рухливістю несучої. Однак ділокалізований  $\pi$ -електрони також чутливі до модифікацій їх безпосереднього оточення. Як наслідок, графен виявився чутливим до ряду різних газів. Це також забезпечило граничний рівень чутливості шляхом виявлення одиничних молекули газу. Кілька звітів раніше вивчали вплив вологості на пристрої на основі графену, але результати, про які повідомляється до цього часу, обмежені в діапазоні та / або час реакції. Тут ми представляємо сенсори вологостійкості резистивної вологості використовуючи CVD графен, розміщений на шарі SiO<sub>2</sub> для потенційного твердотільного сенсора сенсорів. Сенсори працюють в атмосферних умовах з незначним значенням перехресна чутливість від конкуруючих газів. Пояснено механізм визначення вологості шляхом взаємодії полярних молекул H<sub>2</sub>O із субстратом (SiO<sub>2</sub>) дефектами через щільність моделювання теорії функцій. Використовували графен, осаджений парою, і Дизайн сенсора дозволяє легко інтегрувати з схемами на основі CMOS, забезпечуючи тим самим низьку вартість і дуже масштабована альтернатива звичайним сенсорам вологості для системи на мікросхемі (SoC) рішення. Процес виготовлення графенових сенсорів показаний на рисунок 1.12,а та а детальне пояснення виготовлення наведено в розділі методів. Сенсори виготовляються на кремнієвих підкладках з термічно вирощеними шарами SiO<sub>2</sub> товщиною 300 нм (Рисунок 1.12). По-перше, золоті контакти вбудовані в оксид (рисунок 1.12), який може бути використовуються для чотириточкових вимірювань опору графенового пластиру (хоча інші можуть використовуватися метали). Потім осаджений хімічний пар графен передається з мідні фольги на підкладку і витравлені у потрібну форму (рис. 1.12,а). Ефективні розміри графенових плям складають 44 мкм у довжину ( відстань між внутрішніми контактами Au) та шириною 80 мкм. Спектроскопія КРС показує типові піки графена G та 2D (рисунок 1.12,б) і підтверджує успішність перенесення графена, а також відсутність помітного піку дефекту - демонстрація що графен хорошої якості. Більш детальне пояснення графену якість наведено у Додатковій інформації. Розміщені виготовлені сенсори у керамічних упаковках та з дровим зв'язком (рисунок 1.12,в). На рисунку 1.12,с далі показано колір посиленна скануюча електронна мікрофотографія (SEM) пристрою з одношаровим графеновий пластир поверх SiO<sub>2</sub>, золоті контакти під графіновим пластиром і з'єднувальні дроти, з'єднані з накладками. Експерименти проводились всередині двох окремих камер: вакуумної камери працює (рисунок 1.12,г) при тиску нижче атмосферного тиску та вологості (Рисунок 1.12,д), що працює при атмосферному тиску. Дві палати повинні були охоплюють повний діапазон вологості від 1% відносної вологості (RH) до 96% RH. У вакуумі камери, повітря

викачується з камери, що зменшує водяну пару (тобто рівень вологості) від приблизно 30% вологості до 1% вологості. Швидкість роботи насоса повітря, що виходить з камери, контролюється клапаном. Вакуумна камера була також використовується для керованого впливу графенових пристроїв на окремі гази. Це дозволяє оцінити перехресну чутливість сенсора до конкуруючих газів. В навпаки, камера вологості працює при постійному атмосферному тиску і може бути заповнений водяною парою для зміни вологості приблизно від 30% до 96% вологості. Це робиться за допомогою зволожувача, який перекачує водяну пару в камеру через трубу. Швидкість потоку водяної пари від зволожувача контролюється за допомогою увімкненого циферблата його сторона. Електричне зчитування в режимі реального часу в лабораторії показує поточний опір пристрою і вологість камери у будь-який час під час вимірювання. Хоча точний контроль вологості в камері утруднена, спостерігається відносна зміна вологості щодо опору забезпечує достатню точність. Під час усіх вимірювань вологість постійно контролюється за допомогою комерційного сенсора вологості НН-4000 (Honeywell International Inc.). Крім того, тиск газу у вакуумній камері становить постійно контролюється за допомогою комерційного цифрового вакуумного сенсора PDR 900 (MKS Інструменти). Крім того, температура контролюється за допомогою LM35.

На рисунку 1.13,а показана виміряна відносна зміна опору графенового сенсора як барокамера евакуюється (область 1, чорні символи). Дані об'єднані з виміряною відносною зміною опору графенового сенсора в окремій вологості в міру збільшення вологості (область 2, сині символи). Зверніть увагу, що один раз вологість починає змінюватися, опір змінюється відповідно і реакція на зміну вологості показує подібну поведінку в обох камерах. Як вологість зменшується у вакуумній камері за рахунок зниження тиску газу, відповідний опір зростає (рисунок 1.13,а). Так само, як і вологість збільшується в камері вологості шляхом введення водяної пари, відповідно опір зменшується (рисунок 1,13,а). На рисунку 1.13,б показано схему взаємодії водяна пара з графеном. Зі збільшенням вологості збільшується кількість молекул води адсорбується на поверхні. Подібним чином, зменшення вологості спричинить молекули води десорбуватися з поверхні. Для вимірювання опору графенового пластиру, пристрій розміщено у конфігурації мосту Уітстона. Графенові плями є зміщений з імпульсами квадратної хвилі 200 мВ та тривалістю імпульсу 500 мкс. Це зроблено з метою пом'якшення дрейфу в пристрої через надмірне нагрівання Джоуля. Рисунок 1.13,в порівнює дані вимірювань з графенового сенсора, розміщеного у вакуумній камері (чорна лінія) з виміряною відносною вологістю, показаною на рисунку як значення % RH за допомогою комерційного сенсора вологості (червона лінія) та виміряного тиску в камері за допомогою комерційного сенсора



тиску (синя лінія). Вихідні сигнали графенового датчика вологості, комерційний датчик вологості та тиск надзвичайно подібний - підтверджуючи, що зміни тиску в камері корелюють із змінами в концентрації водяної пари в повітрі.

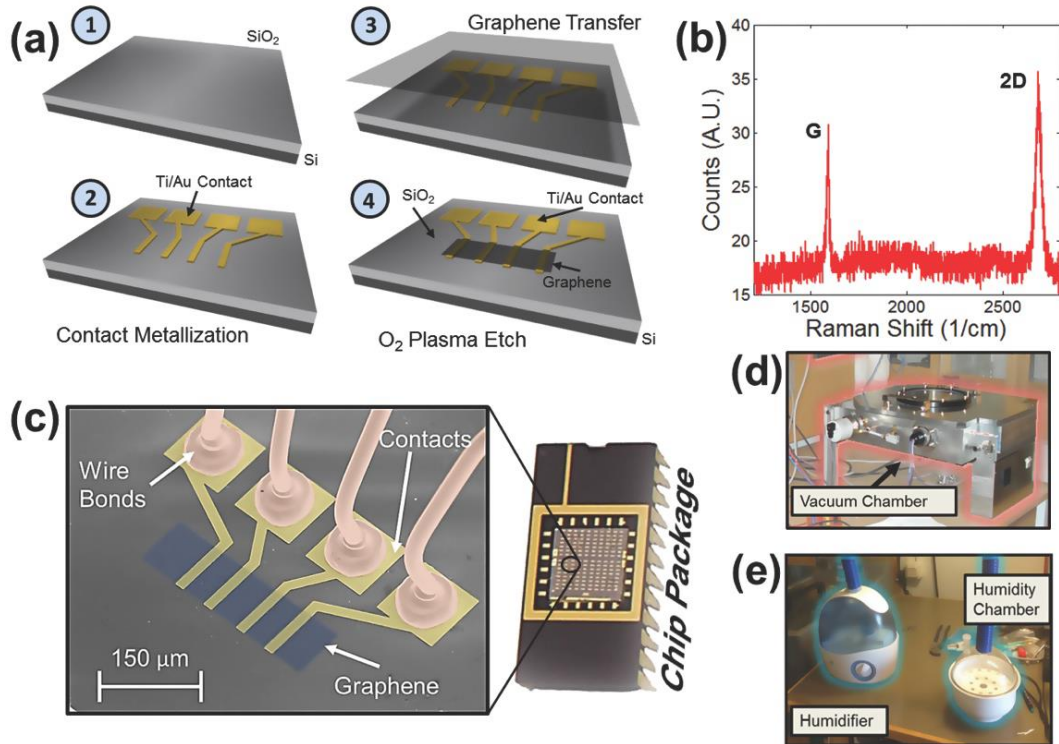


Рисунок 1.12 – а) Процес виготовлення сенсора вологості. (1) зображений кремній субстрат з 300 нм SiO<sub>2</sub>, термічно вирощений на верхній поверхні. Порожини були травили і заповнювали 20 нм Ti і 200 нм Au для того, щоб визначити електричні контакти до пластиру з графеном (2). Потім графен переносили на чіп (3) та з малюнком із використанням фоторезист-маски та плазмового травлення O<sub>2</sub> (4). б) Раман спектр графену з характерними піками G та 2D. в) Колір посиленій SEM-зображення дротового пристрою, де містяться графен, контакти та дротові зв'язки затінені відповідно світло-блакитним, золотим та помаранчевим кольорами. Упаковані та пристрої з дротовим з'єднанням всередині керамічної упаковки показані праворуч. г) Налаштування вакуумної камери.

д) Налаштування вологості камери

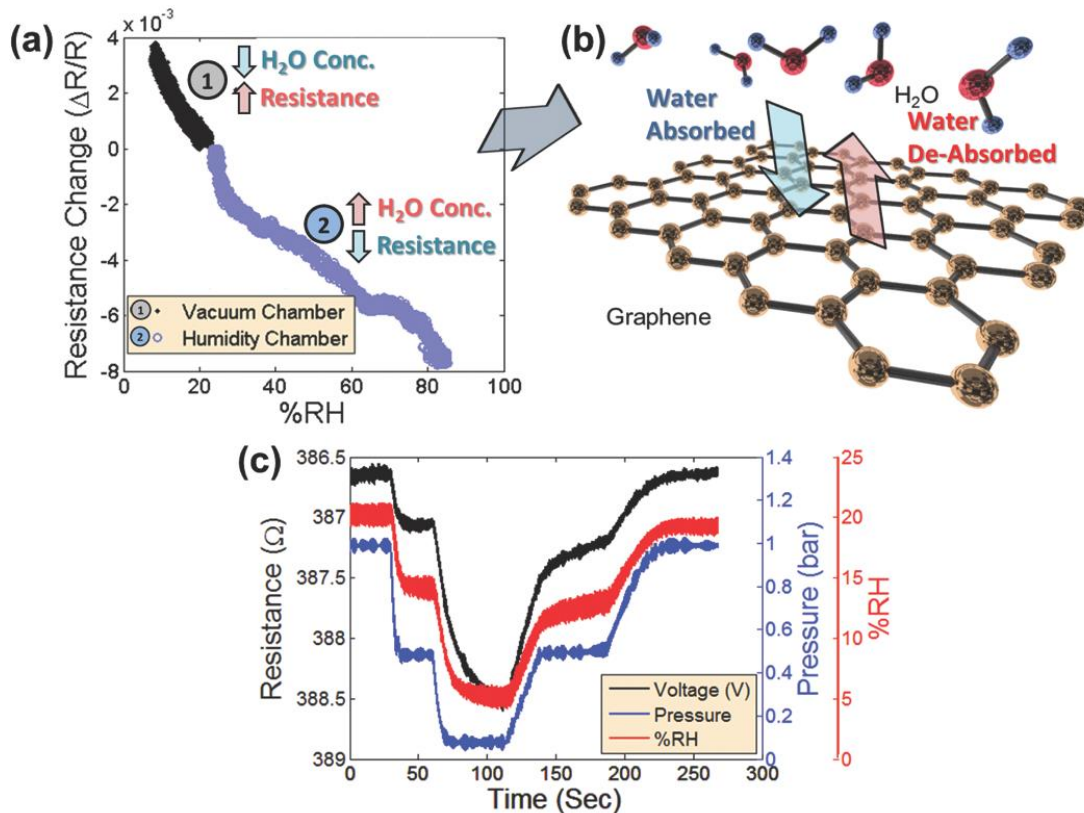


Рисунок 1.13 – а) Зміна опору в графеновому пристрої порівняно з відносною вологість (% відносної вологості) для пристрою, розміщеного у вакуумній камері (1), і тієї ж пристрій, розміщений у вологостійкій камері (2). б) Взаємодія молекул води з графенова поверхня. в) Відповідь опору (чорні лінії) графенового пристрою в конфігурація моста Уїтстона в порівнянні з відсотком RH відносної реакції від як комерційний датчик вологості НН-4000 (червона лінія), так і тиск відгук (бар) від комерційного сенсора тиску PDR 900 (синя лінія), розміщеного в вакуумна камера

Був проведений контрольний експеримент, щоб виключити перехресну чутливість до змін тиску або до газів, типово присутніх у повітрі. Тому графенові пристрої були індивідуально піддається дії найбільш поширених газів, що містять повітря, включаючи сухий азот (N<sub>2</sub>) кисень (O<sub>2</sub>), сухий аргон (Ar), а також вологе повітря. Для досягнення цього застосовується тиск Клапан, який контролює надходження повітря у вакуумну камеру, був з'єднаний з баком містять ці чисті та сухі стислі газу. Після підключення клапан до газу резервуар був відкритий і газ був пропущений в камеру. Шляхом евакуації барокамера до вакууму менше 200 мбар протягом декількох хвилин, дозволяючи при надходженні чистого сухого газу камера заповнювалась газом. Для кожного газу, Потім реєстрували зміну опору в графеновому датчику, змінюючи значення тиск у камері від 200 мбар до 1 бар. Тиск контролювали за допомогою а клапан між камерою та вакуумним насосом (подібно до експериментів, про які повідомля-

ється у Smith і співавт.). Реакція графенного сенсора в результаті змін тиску для кожного окремого газу було визначено так і наведено на рисунку 1.14,а. Зауважте, що немає суттєвих змін опору для будь-якого з газів, що випробовуються окремо. В навпаки, зміна опору графенових пристроїв, що піддаються впливу вологого повітря, зберігається серед повторних випробувань. Це твердо говорить про відсутність впливу особистості газу на стійкість графену, але це справді така вологість відчував. Нечутливість сенсора до основних газів, що складають повітря, була додатково підтверджена підключення декількох припливів газу (сухий Ar, сухий N<sub>2</sub>, сухий O<sub>2</sub> та вологе повітря) до вакууму і дозволяючи кожному з газів згодом потрапляти в камеру. Це підтверджує, що жоден із окремих сухих газів не впливає на графеновий пристрій при першому введенні в камеру. На рисунку 1.14,б показано еволюцію опору графеновий датчик (чорні точки), вимірюваний під час введення кожного газу в камеру. Спочатку камеру заповнювали Ar, а потім Ar циркулювали через камеру, поки реєструвалася реакція опору сенсора. Потім аргон потік відключили і камеру евакуювали. Ця процедура була повторена для N<sub>2</sub> та O<sub>2</sub>. Нарешті, в камеру було введено вологе повітря. На рисунку 1.14,б показано номер значну реакцію опору графенового сенсора під час введення кожного газу 10 камери, крім випадку вологого повітря. Відповідна відповідь % RH комерційний датчик вологості HIN-4000 на рисунку 1.14,б підтверджує, що вологість в камері це суттєво не впливає, оскільки сухі гази ретельно циркулюють. Це демонструє, що протягом часових масштабів цього дослідження є кожен окремий газ дуже незначний вплив на опір графенового пристрою і на графеновий датчик має високу специфічність щодо вологості щодо основних газових складових у повітрі. Це в на відміну від попередніх досліджень, які свідчать про чутливість графену до O<sub>2</sub> що може бути можлива перехресна чутливість. Однак це дослідження було закінчено більші часові шкали з більш низьким часом відгуку, ніж повідомляється тут, що може послужити пояснити різні висновки". Ситуація дещо інша, коли через датчик є значний потік газу, оскільки можуть бути змагальні події. Спочатку для контролю над потоком використовували пістолет N<sub>2</sub> азоту над поверхнею сенсора. Коли N<sub>2</sub> протікає по поверхні пристрою, опір зростає помітно і відтворюється (рисунок 1.14,в). Це можна пояснити за рахунок зменшення поверхневої концентрації молекул води на графені як проілюстровано на рисунку 1.14,d. Подібним чином пристрій піддавався потоку видиху дихання з відносною вологістю повітря приблизно 100%. На рисунку 1.14,е показано опір реакція пристрою під час вдиху та видиху кілька разів у безпосередній близькості (в межах 10 см) від пристрою. Потік призводить до зменшення опору. Цей результат відповідає нашим очікуванням, оскільки відповідь пристрою є викликаний водяною паром, що міститься в диханні, як показано на рисунку 1.14,f. В обох випадки,

вплив потоку  $N_2$  та вплив на дихання, збільшення водяної пари концентрація спричиняє зменшення опору графенового пристрою, тоді як а зниження концентрації водяної пари викликає збільшення опору графеновий пристрій. Ці результати є очікуваними та узгоджуються з результатами з вимірювання у вакуумі та у камерах вологості, показані на рисунку 1.14.

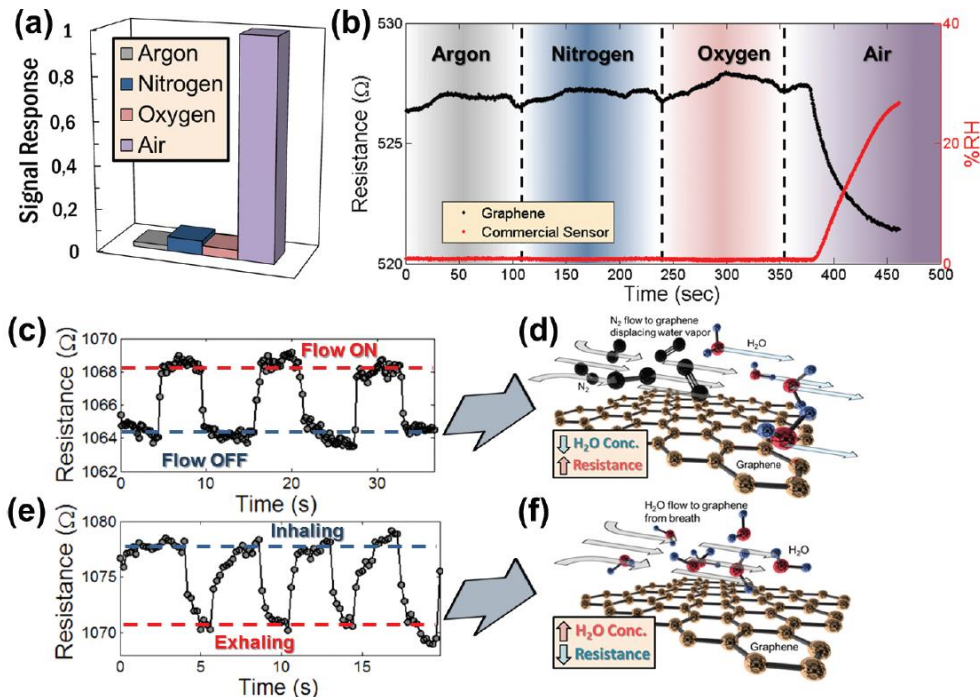


Рисунок 1.14 – а) Нормалізована реакція сигналу графенового пристрою для різних газів при різному тиску (що призводить до різної вологості у випадку повітря). Зверніть увагу, що зміна опору в графенових пристроях дуже мала для будь-якого з них газів, за винятком повітря, який є єдиним газом, що містить помітну кількість водяної пари. б) Зміна опору - це графеновий пристрій згодом піддаються дії різних газів (чорних крапок) порівняно з відносними рівні вологості (% вологості), виміряні комерційним датчиком НІН-4000 (червоні крапки), в) Графеновий пристрій у повітрі та під впливом імпульсів потоку  $N_2$ . в) Схематичне зображення того, як потік  $N_2$  через пристрій впливає на локальний рівні вологості. д) Реакція опору графенового пристрою під впливом вдих і видих людського дихання. е) Схематичне зображення водяної пари продувається на пристрій, коли він вдихається, збільшуючи тим самим місцевий рівень рівні вологості

Повторюваність розглядається на рисунку 1.15,а, де показано середнє виміряне значення графічний опір пристрою, нанесений на графік у порівнянні з відносною вологістю (% вологості (червоні крапки з лінією). Столпчики помилок вказують стандартне відхилення даних від усередненого значення, с максимальне стандартне відхилення - 0,1082 Ом. Сірі крапки представляють вихід-

ні дані. Це Дані представляють три цикли відкачування та видалення вологого повітря в і з барокамера. На рисунку 1.15,b порівнюється провідність пристрою, розрахована з простою модель резистора на основі вимірних розмірів пристрою та відомої товщини одношаровий графен приблизно  $3,4 \text{ \AA}$ , 34 з часом із сигналом від комерційний датчик вологості. Дані представляють три цикли модуляції вологості усередині вакуумної камери і демонструє надзвичайно стабільний показник. Раніше повідомлялося, дані для вимірювання вологості з використанням графена свідчать про дуже повільні показники час відгуку та відновлення порядку 180 с. Рисунку 1.15,c та 1.15,d показують час вирішена реакція та відновлення графенового сенсора та комерційної вологості датчик. Час реакції та відновлення тут визначається як час, необхідний для сигнал досягати від 10% початкового значення вологості до 90% кінцевого значення вологості. На рисунках 1.15,c і 1.15,d чорні крапки представляють сигнал від графенового сенсора і червоні крапки представляють сигнал від комерційного сенсора вологості. 10% до 90% регіони позначені пунктирними чорно-червоними лініями. Тому що перекачування та вентиляція водяної пари у вакуумній камері та з неї включає затримку на порядок кілька секунд, це неможливо з вимірювань, проведених у вакуумі камери, щоб точно визначити абсолютну реакцію та час відновлення, використовуючи це експериментальне встановлення. Тому пістолет  $\text{N}_2$  використовувався для наведення більш локального та швидкого зміна молекул поверхневої води. На рисунках 1.15,e та 1.15,f показані часи відгуку та відновлення у графеновому датчику від стану ввімкнення до стан витікання і навпаки. Регіони від 10% до 90% знову позначені штрихові червоно-сині лінії. Вимірний час відгуку становить від 600 мс до 800 мс і час відновлення становить 400 мс до 1 с. На рисунку 1.15,g показано вимірювання опору пристрій у вакуумній камері з рисунок 1.15,b з високою роздільною здатністю за часом, саме тоді, коли вологість камери починає збільшуватися. Графеновий датчик (чорні крапки) чітко реагує швидше, ніж комерційний датчик вологості (червоні кола). Затінений чорний а червоні області представляють приблизний час, коли перехід від зменшуваного до вимірюється збільшення вологості. Тут графеновий пристрій реагує приблизно за 1с. На 2 секунди швидше, ніж комерційний датчик. Поєднання цих вимірювань припускають, що час відгуку та відновлення пристроїв має порядок мілісекунд і, можливо, набагато швидше, ніж спостерігалось через обмеження в експериментальних дослідженнях.



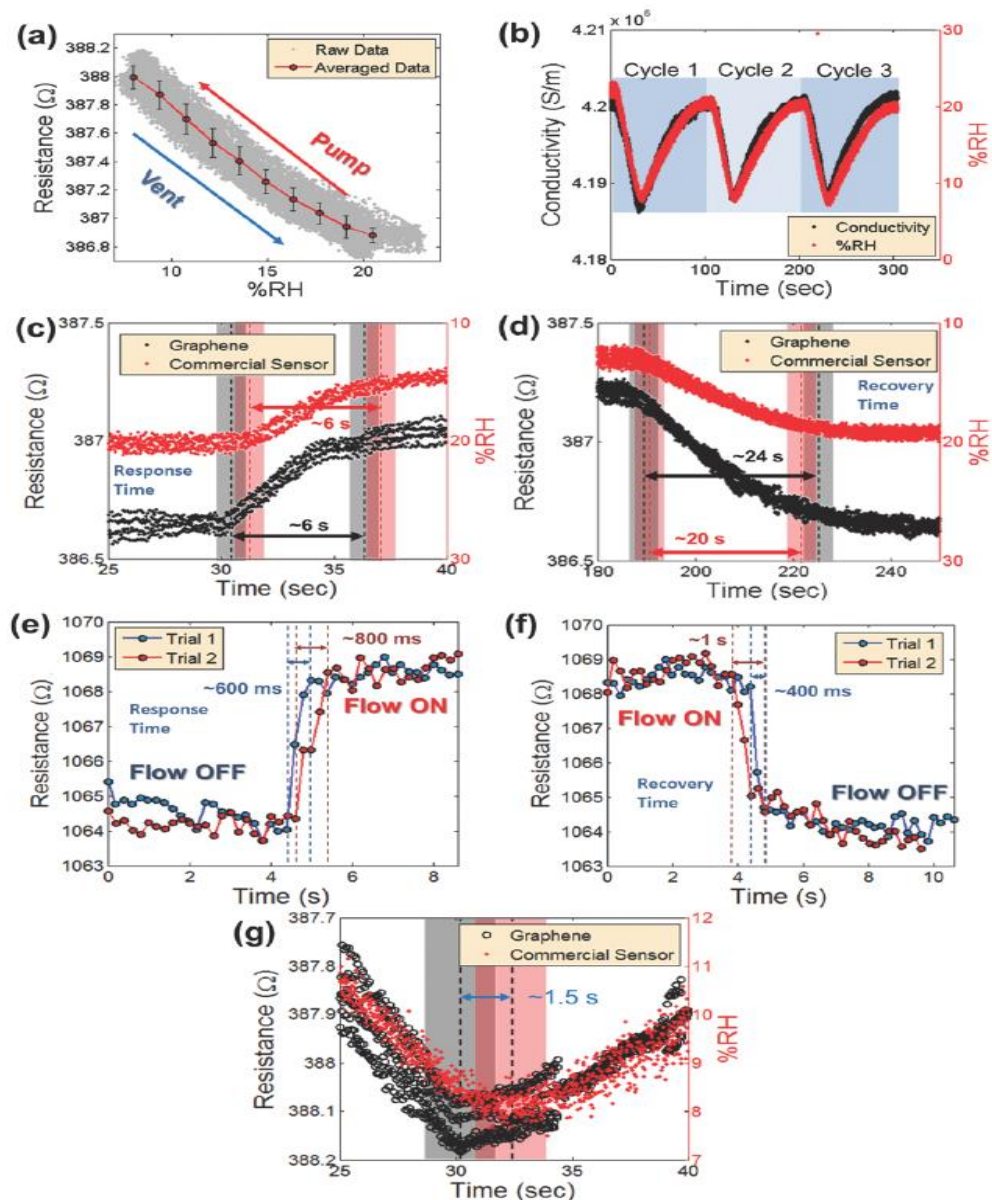


Рисунок 1.15 – а) Стійкість до відносної вологості (% вологості) графенового пристрою під час відкачування та вентиляції вакуумної камери. На вставці показано відповідна провідність того самого пристрою. б) Провідність графена пристрій, виміряний у поєднанні з вимірюванням % RH відносно часу за допомогою комерційний датчик вологості. Дані представляють 3 цикли вимірювання, де вологість змінюється шляхом евакуації та видалення повітря вакуумної камери. в) Реакція опору в залежності від часу графенового пристрою порівняно з комерційний датчик вологості для характеристики часу відгуку пристрою. г) Реакція опору в залежності від часу пристрою порівняно з комерційною датчик вологості для оцінки часу відновлення пристрою. д) Час відповіді графеновий пристрій при подачі потоку газу за допомогою пістолета N2. е) Відповідні час відновлення, коли пристрій зазнає потоку газу. г) Вихідний опір графенового пристрою порівняно з комерційною вологістю датчик. Зауважте, що графеновий пристрій реагує на 1-2 с швидше, ніж комерційний датчик вологості

Механізм, що підтримує чутливість графена до вологості, може бути результатом дії електростатична взаємодія між водою та графеном. З усіх газів що містить повітря, вода єдина, що містить диполь. Таким чином, моделювання взаємодія вода / графен може дати розуміння механізму чутливості. А ряд досліджень попередньо досліджував вплив присутності води молекули на поверхні графену на підкладках SiO<sub>2</sub>. Спираючись на них дослідження, розрахунки функціональної теорії щільності основного стану для графену в проводились різні конфігурації вологого середовища. Графен-вода Система моделюється як одиничні молекули води, які розташовані в моношарі води над одношаровим графеновим листом з відривом 3,5 Å. Графеновий лист лежить над шаром SiO<sub>2</sub>. Експериментально спостерігається зміна провідності в графен припускає, що молекули води легують шар графена. Тому ми виконали функціональні розрахунки щільності на системі графен-вода для різних випадки: ідеальна підкладка SiO<sub>2</sub> та підкладка SiO<sub>2</sub> з добре усталеною поверхнею дефект, Q3 0 дефект. Відстань між Q3 0 атом кремнію та графен аркуша встановлено на рівні 4,1 Å в наших моделюваннях. Потім поверхневий дефект був включений в моделювання для двох відповідних випадків, тобто з моношаром води та без нього молекули. Елементарна комірка моделювання показана на рисунку 1.16,а. Червона пунктирна лінія позначає площину різання, через яку досліджується різниця щільності заряду. Q30 дефект вводиться в систему, як показано на рисунку 1.16,б. На рисунку 1.16 показано а контурна карта різниці щільності заряду дефектної системи без наявності молекули води. Аналогічним чином на рисунку 5с показана контурна карта заряду різниці щільності із наявністю молекули води та Q30 дефект. Коли а дефект присутній на поверхні SiO<sub>2</sub>, значний перенос заряду та дипольний момент утворюється в шарі SiO<sub>2</sub>. На рисунку 1.16,d показана досконала система (тобто відсутність дефекту в SiO<sub>2</sub> присутній). У випадку ідеальної системи для пасивування використовується атом водню звисаючий атомарний зв'язок кисню в підкладці. Коли обидва Q30 дефект і присутні молекули води (рисунок 5в), щільність заряду між графеном шар і молекули води істотно відрізняються в порівнянні з система з Q30 дефектів, але без води (Рисунок 1.16,б), а також ідеальна система (Рисунок 1.16,г). При розрахунках дефекти поверхні SiO<sub>2</sub> дають домішкову смугу, аналогічно результатам Wehling et al. Електростатичний дипольний момент води молекули тепер можуть зміщувати цю смугу домішок, що призводить до ефективного легування і підвищена провідність у шарі графена, що відповідає експериментальному спостереження. Однак моделювання показують, що ефект відчуття вологості зумовлений графеновий шар, що контактує з деформованим шаром SiO<sub>2</sub> під впливом води. Крім того, окремо стоячий графен може бути не чутливим до молекул води<sup>38</sup>. Це є цікавим прогнозом, який говорить про те, що субстрат графена може ефек-

тивно функціоналізувати матеріал, щоб стати більш чутливим до зазначеного адсорбенту.

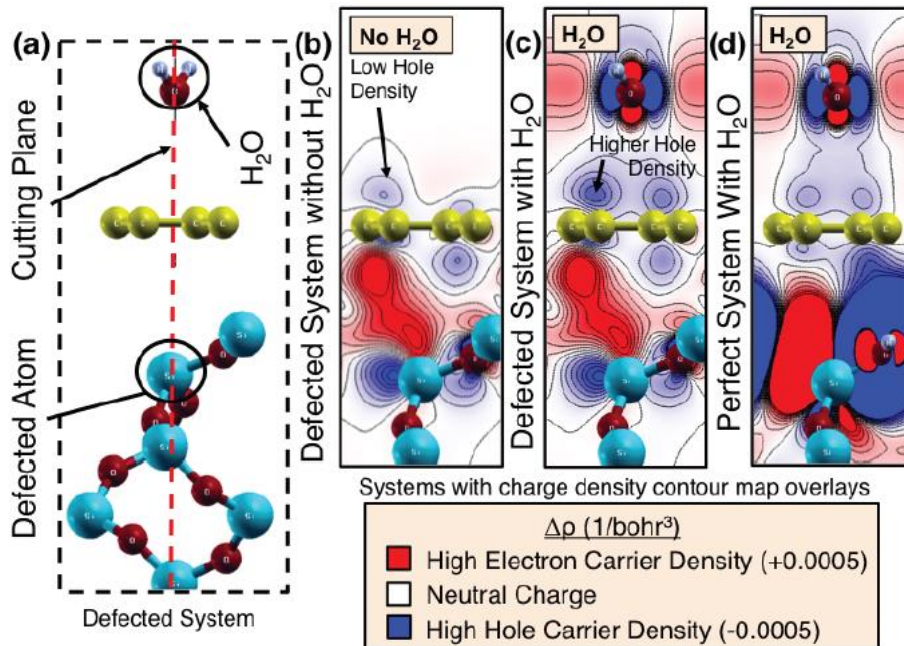


Рисунок 1.16 – Графіки різниці щільності заряду (CDD) для трьох модельованих систем. CDD обчислюється відніманням щільності заряду відповідної підсистеми з розрахункової щільності заряду системи. а) Елементарна комірка графен поверх SiO<sub>2</sub> з Q30 дефектів, з додаванням води поверх графеновий шар. б) CDD для графена поверх SiO<sub>2</sub> з Q30 наявних дефектів. Немає води. в) CDD для тієї ж системи, що і в б), але з додаванням води поверх графеновий шар. г) CDD для графена поверх SiO<sub>2</sub> без дефектів, з додаванням води поверх шару графена. Зверніть увагу на накопичення заряду в графені поверхня на панелі в) де обидва Q30 дефектів і води

З метою порівняння досліджених резистивних сенсорів вологості графена проти комерційного продукту та інших запропонованих потенційних нанотехнологій, показано на рисунку 1.16 порівняння з характерним діапазоном вологості ряду різної вологості сенсори. Датчик графена у цьому дослідженні має характеризується більшим діапазоном вологості, ніж будь-який інший експериментальний пристрій в Росії література. На рисунку 1.17,б порівнюється час відгуку представленого графенового пристрою з резистивними сенсорами оксиду графену (GO) та оксиду олова (SnO<sub>2</sub>). Зауважте, що поки як GO, так і графен перевершують SnO<sub>2</sub>, GO, здається, є вищим датчиком щодо часу реакції та часу відновлення. Однак це бере свій початок у Росії обмеження в установці вимірювань та загальна складність у визначенні точного час відгуку та відновлення,



ніж сам датчик графена. Нарешті, чутливість датчик вологості графена розраховували за допомогою рівняння 1,

$$S = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta \%RH} \cdot 100$$

де  $S$  визначається як відсоток зміни опору, поділений на відсоток зміни в відносна вологість. Її порівнює дані для різних сенсорних технологій з графенові сенсори, досліджені в цій роботі, зокрема щодо відносної вологості (% вологості) діапазон, час відгуку, час відновлення та чутливість. Слід зазначити, що чутливість, повідомлена для різних технологій сенсорів вологості, що виникають, не є такою безпосередньо порівнянні і тому є лише орієнтовними. Наприклад, якщо чутливість наш датчик порівнюється безпосередньо як проста зміна опору відносно абсолютний опір (без урахування вимірюваного діапазону вологості), наші значення складають тоді порівнянні з тими, про які повідомляв Ghosh. Однак без послідовного діапазону вимірювань, чутливість не може бути адекватно порівняна, і тому просто повідомляється як виміряне. Крім того, порівняно мала чутливість графену шар може бути обумовлений меншими дефектами шару графена. GO на відміну має велику ступінь звисаючих зв'язків, що може сприяти його чутливості, хоча і за рахунок більш високого опору. Наприклад, сенсори тиску на основі графена мають а опір порядку 100 с Ом приблизно до 1 кОм. Для порівняння, GO сенсори мають опір порядку від 1 до 10 МОм. Це говорить про те, що графен мав би добре підходить для пристроїв з низькою потужністю. Далі, попередні звіти досліджували, як зерно Розмір або гранична щільність зерен можуть впливати на транспортні властивості графену є вища щільність, що призводить до посиленого хімічного зондування. Таким чином, налаштування щільності межі зерен можуть розглядатися для подальшого підвищення чутливості. Поки GO сенсори здаються найбільш життєздатними сенсорами для резистивного, ємнісного та п'єзорезистивне зондування вологості, резистивні сенсори на основі графена, добре працює в порівнянні з іншими резистивними сенсорами вологості. Однак одна ще однією перевагою графена перед GO може бути більший ступінь керованості протягом виготовлення. GO готується хімічно, і тому існує можливість поява хімічних домішок під час його приготування.

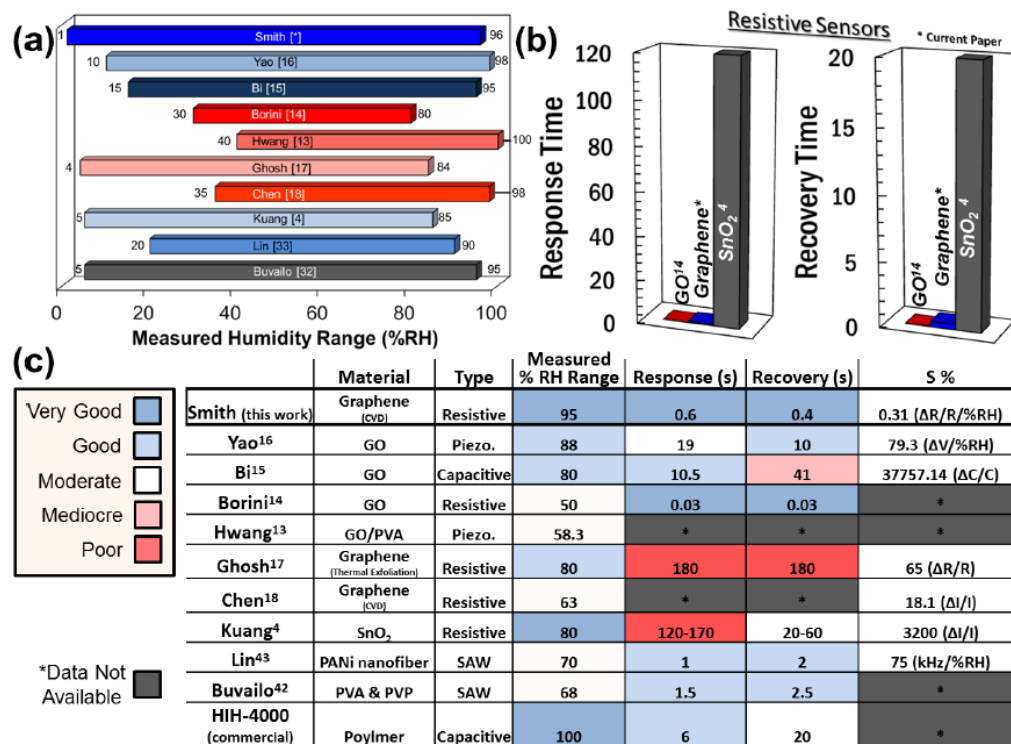


Рисунок 1.17 – а) Сенсори вологості, про які повідомляється в літературі, з охарактеризованими діапазонами вологості. б) Час реакції та відновлення представленого графенового сенсора порівняно з резистивними сенсорами вологості, про які повідомляється в літературі. в) Порівняння різних технологій сенсорів вологості щодо повідомлених Діапазони% вологості, час реакції та відновлення та чутливість. Зверніть увагу, що HIH-4000 - комерційний датчик, який використовується для порівняння у всіх експериментах

На закінчення ми продемонстрували та охарактеризували резистивну вологість графенового сенсора з високою специфічністю до інших газових складових, що знаходяться в повітрі. Моделювання показали, що чутливість опору графенового пластиру до водяної пари виникає внаслідок взаємодії між водним електростатичним диполем момент з домішковими смугами в підкладці. Цей ефект, у свою чергу, призводить до допінгу графеновий шар, спричиняючи підвищену провідність в результаті збільшення легування. Ми тому припускають, що електростатичні дипольні моменти відіграють ключову роль у легуванні графеном і відповідний механізм сприйняття, зокрема, оскільки всі інші молекули, що тут вивчалися були вільні від електростатичних дипольних моментів. Графенові сенсори демонструють широкий асортимент чутливості та хороший час відгуку та відновлення зі значеннями, що знаходяться нижче одного друге - конкурує з сенсорами оксиду графена і значно перевершує попередні сенсори вологості на основі графену. Простота використання конструкції пристрою Графен CVD потенційно може запропонувати недорогу та масштабовану тех-

нологію, яку можна інтегрувати в найновішу комерційну напівпровідникову технологію.

### 1.9 Висновки до розділу

1. Аналіз публікацій, присвячених теоретичним і експериментальним дослідженням сенсорів вологи показує, що розробка радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи є перспективним напрямком у розвитку апаратних засобів вимірювання вологи для сучасних мікропроцесорних систем радіоконтролю і радіокерування. Подібні сенсори вологи представляють високі метрологічні показники поряд з тенденцією до мінітюаризації, можливістю їх інтелектуалізації на основі конструктивної та технологічної сумісності з мікропроцесорними пристроями обробки вимірюваної інформації.

2. Аналіз сучасного рівня розробок конструкцій сенсорів вологості дозволив визначити можливі шляхи покращення їх параметрів: чутливості, температурної стабільності, стабільності електричних характеристик сенсорів, надійності.

## 2 РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ СЕНСОР ВОЛОГИ З ВОЛОГОЧУТЛИВИМИ ЄМНІСНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

На теперішній час серед параметричних сенсорів різного типу особливе місце у контрольно-вимірювальній техніці займають сенсори вологості. Необхідність вимірювального контролю вологості у промисловості, а також у побуті робить актуальною проблему розроблення та дослідження сенсорів вологості різних типів, принцип дії яких базується на зміні електрофізичних параметрів.

Серед великого різноманіття сенсорів вологості значний практичний інтерес набули мікроелектронні сорбційні параметричні сенсори вологості. У сенсорах адсорбційного та абсорбційного типів поглинання або виділення вологи сорбентом супроводжується зміною його маси та електрофізичних характеристик – електропровідності або діелектричної проникності [1 – 8].

Використання радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи в частотних пристроях, в яких вологість перетворюється у частоту, дозволяє значно підвищити чутливість і точність вимірювання, спростити схеми подальшої обробки інформації. В цьому випадку необхідно використовувати вологочутливий елемент у вигляді ємності, який є найоптимальнішим за сукупністю параметрів. Завдяки цьому забезпечуються мінімальні габарити вологочутливого елемента, можливість розташування на кристалі спеціалізованої інтегральної схеми обробки інформативного сигналу [9, 10].

Одним із нових напрямків в розробці та створенні радіовимірювальних параметричних сенсорів вологості є дослідження в області частотних сенсорів вологості на основі транзисторних структур з від’ємним диференціальним опором. Дослідження цього напрямку показали, що реактивні властивості і від’ємний диференціальний опір нерозривно пов’язані між собою, а багатofункціональність і простота радіовимірювальних приладів на основі структур з від’ємним диференціальним опором є перспективою їх практичного використання. Крім того, принцип перетворення «вологість – частота» на основі транзисторних структур з від’ємним диференціальним опором дає змогу виключити використання аналого–цифрових сенсорів при обробці інформативних сигналів, що суттєво знижує вартість систем радіоконтролю та радіоуправління, а також дозволяє підвищити не тільки чутливість, а й точність перетворення інформативного сигналу – відносної вологості навколишнього середовища в частоту [11–14].

## 2.1 Розробка математичної моделі

Метою дослідження є розробка нового радіовимірювального параметричного сенсора вологи з вологочутливими ємнісними елементами, який володіє високою чутливістю до вимірювального параметра та широким діапазоном вимірювання вологості. На рис. 2.1 представлена та наведена в додатку Б електрична схема радіовимірювального параметричного сенсора вологи з вологочутливими ємнісними елементами. Радіовимірювальний параметричний перетворювач вологості виконаний у вигляді гібридної інтегральної мікросхеми. Автогенераторний перетворювач утворює транзисторна структура з від'ємним диференціальним опором на основі польового двозатворного транзистора VT1 та біполярного транзистора VT2. Ємність коливального контуру радіовимірювального параметричного сенсора вологи реалізується ємністю складовою повного диференційного опору на електродах стік польового двозатворного транзистора VT1 та колектор біполярного транзистора VT2. Індуктивність коливального контуру радіовимірювального параметричного сенсора вологи – індуктивністю L. Резистори R1, R2 та R3 утворюють дільники напруги та забезпечують режим живлення транзисторів VT1 та VT2. Обмежувальний конденсатор C запобігає проходженню змінного струму через джерело постійної напруги радіовимірювального параметричного сенсора вологи. Від'ємний диференціальний опір виникає на електродах стік польового двозатворного транзистора VT1 та колектор біполярного транзистора VT2 радіовимірювального параметричного сенсора вологи при підвищенні напруги джерела постійної напруги до потрібного значення. Він приводить до виникнення електричних коливань в контурі. При дії вологи на вологочутливий конденсатор радіовимірювального параметричного сенсора вологи змінюється ємнісна складова повного опору на електродах стік польового транзистора та колектор біполярного транзистора, що викликає ефективну зміну частоти генерації коливального контуру радіовимірювального параметричного сенсора вологи

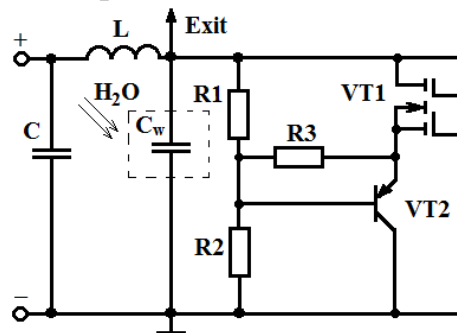


Рисунок 2.1 – Електрична схема радіовимірювального параметричного сенсора вологи з вологочутливими ємнісними елементами

В радіовиміральному параметричному сенсорі вологи для експериментальних досліджень було використано наступні чутливі елементи:

- чутливий до вологи МОН конденсатор на основі аморфного кремнію, який розроблений в науково-дослідному інституті «Гелій» (м. Вінниця);
- чутливий до вологи конденсатор НСН-1000 фірми Honeywell;
- чутливий до вологи конденсатор P14 Rapid фірми Innovative sensor technology.

Чутливими до вологи шарами досліджуваних конденсаторів фірм Honeywell та Innovative sensor technology є пористий полімерний матеріал.

Для визначення функції перетворення та рівняння чутливості радіовимірального параметричного сенсора вологи в газових середовищах, розроблено еквівалентну високочастотну нелінійну схему з ємнісними чутливим до вологи елементами.

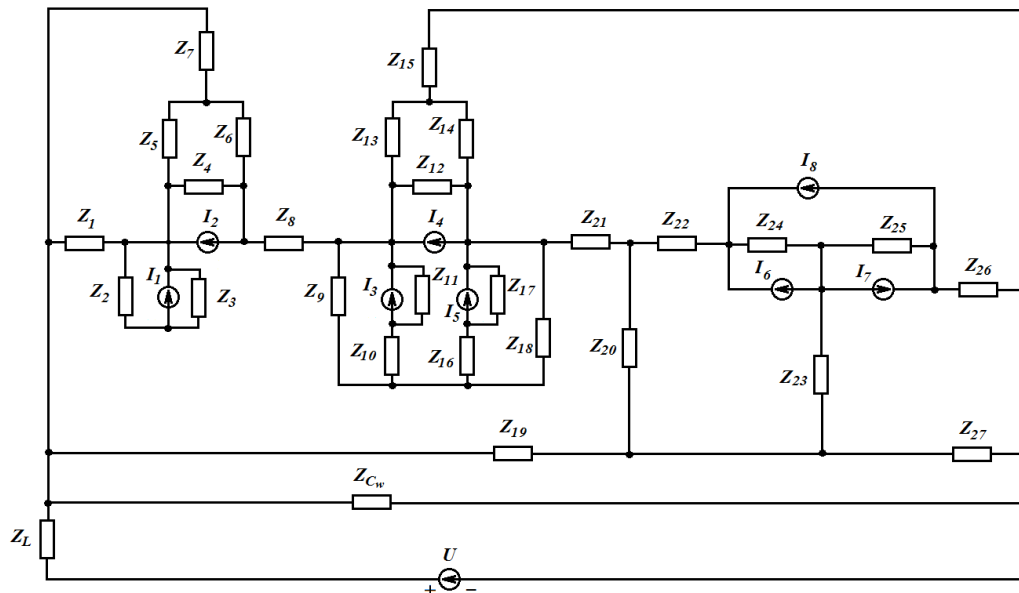


Рисунок 2.2 – Еквівалентна нелінійна схема радіовимірального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами

На рисунку 2.2 радіовимірального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами елементи еквівалентної нелінійної схеми описуються наступними величинами:

$$Z_L = j\omega L, \quad Z_{C_w} = \frac{1}{j\omega C_w}, \quad Z_1 = R_{c1} + R'_{c1} + j\omega L_{c1}, \quad Z_2 = RS1 - j\frac{1}{\omega C_{pc1}},$$

$$Z_3 = \frac{1}{j\omega C_1}, \quad Z_4 = R_{cb1}, \quad Z_5 = \frac{1}{j\omega C_{zc1}}, \quad Z_6 = \frac{1}{j\omega C_{zb1}}, \quad Z_7 = R_{z1} + R'_{z1} + j\omega L_{z1},$$

$$\begin{aligned}
Z_8 &= R_{cc}, & Z_9 &= \frac{1}{j\omega C_{pc2}}, & Z_{10} &= RS2, & Z_{11} &= \frac{1}{j\omega C_2}, & Z_{12} &= R_{cb2}, & Z_{13} &= \frac{1}{j\omega C_{zc2}}, \\
Z_{14} &= \frac{1}{j\omega C_{zb2}}, & Z_{15} &= R_{z2} + R'_{z2} + j\omega L_{z2}, & Z_{16} &= RS3, & Z_{17} &= \frac{1}{j\omega C_3}, \\
Z_{18} &= \frac{R_{p2}}{1 + \omega^2 R_{p2}^2 C_{pb2}^2} - j \frac{R_{p2}^2 \omega C_{pb2}}{1 + \omega^2 R_{p2}^2 C_{pb2}^2}, \\
Z_{19} &= R_1, & Z_{20} &= R_3, & Z_{21} &= R_{b2} + R'_{b2} + j\omega L_{b2}, & Z_{22} &= R_e + R'_e + j\omega L_e, \\
Z_{23} &= R_{baz} + R'_{baz} + j\omega L_{baz}, & Z_{24} &= \frac{1}{j\omega C_e}, & Z_{25} &= \frac{1}{j\omega C_k}, & Z_{26} &= R_k + R'_k + j\omega L_k, \\
Z_{27} &= R_2.
\end{aligned}$$

де  $C_w$  – чутливий до вологи конденсатор;  $L$  – індуктивність коливального контуру радіовимірювального параметричного сенсора вологи;  $C_{pc}$  – ємність підкладка-стік МДН транзистора;  $R_1, R_2, R_3$  – опори діляника радіовимірювального параметричного сенсора вологи;  $R_c$  – опір стоку МДН транзистора;  $R'_c$  – омичний опір стоку МДН транзистора;  $C_1, C_2$  – ємність р-п переходу стоку МДН транзистора;  $L_c$  – індуктивність електроду стоку МДН транзистора;  $R_p$  – опір підкладки МДН транзистора;  $C_{pb}$  – ємність підкладка-витік МДН транзистора;  $RS1, RS2$  – об'ємний опір р-п переходу підкладка-стік МДН транзистора;  $L_z$  – індуктивність електроду затвора;  $RS3$  – об'ємний опір р-п переходу підкладка-витік МДН транзистора;  $C_{zc}$  – ємність затвор-стік;  $C_3$  – ємність р-п переходу витоку;  $R_{cb}$  – опір стік-витік;  $C_{zb}$  – ємність затвор-витік МДН транзистора;  $R_z$  – опір електроду затвора;  $R'_z$  – омичний опір електроду затвора;  $I_1$  – струм переходу підкладка-стік МДН транзистора;  $I_2, I_4$  – струми витоку-стоку;  $I_3$  – струм переходу підкладка-стік-витік;  $I_5$  – струм переходу підкладка-витік;  $R_b$  – опір витоку МДН транзистора;  $R_{cc}$  – загальний опір стоку-витоку першого затвору двозатворного транзистора VT1;  $R'_b$  – омичний опір витоку МДН транзистора;  $L_b$  – індуктивність електроду витоку;  $R'_e$  – омичний опір емітерного електроду біполярного транзистора;  $L_e$  – індуктивність емітерного електроду біполярного транзистора;  $R_{baz}$  – опір бази біполярного транзистора;  $R'_{baz}$  – омичний опір базового електроду біполярного транзистора;  $L_{baz}$  – індуктивність базового електроду біполярного транзистора;  $C_e$  – ємність емітерного пе-

реходу;  $C_k$  – ємність колекторного переходу біполярного транзистора;  $R_e$  – опір емітерного переходу;  $R_k$  – опір колекторного переходу біполярного транзистора;  $R'_k$  – омичний опір колекторного електроду біполярного транзистора;  $L_k$  – індуктивність колекторного елек біполярного транзистора троду;  $I_6$  – струм емітер-база біполярного транзистора VT2;  $I_7$  – струм колектор-база біполярного транзистора VT2;  $I_8$  – струм емітер-колектор біполярного транзистора VT2.

На основі еквівалентної нелінійної схеми радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами (рисунок 2.2) та наведено в додатку В, використовуючи метод Ляпунова [35] складається рівняння по колу позитивного зворотного зв'язку. На основі даного методу визначено аналітичний вираз функції перетворення радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами:

$$F_0 = \frac{C_w(W)C_{zc1}C_{zc2}C_kC_{zb1}C_{zb2} \pm \sqrt{A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6 + A7}}{4\pi LC_w(W)C_{zc1}C_{zc2}C_kC_{zb1}C_{zb2}}, \quad (2.1)$$

де

$$A1 = C_w^2(W)C_{zc1}^2C_{zc2}^2C_k^2C_{zb2}^2C_{zb1}^2;$$

$$A2 = 4LC_w^2(W)C_{zc1}^2C_{zc2}^2C_k^2C_{zb2}^2C_{zb1}^2;$$

$$A3 = 4LC_w^2(W)C_{zc1}^2C_{zc2}^2C_k^2C_{zb2}^2C_{zb1}^2;$$

$$A4 = 4LC_w(W)C_{zc1}^2C_{zc2}^2C_k^2C_{zb1}^2C_{zb2}^2;$$

$$A5 = 4LC_w^2(W)C_{zc1}^2C_{zc2}^2C_kC_{zb1}^2C_{zb2}^2;$$

$$A6 = 4LC_w^2(W)C_{zc1}C_{zc2}^2C_k^2C_{zb1}^2C_{zb2}^2;$$

$$A7 = 4LC_w^2(W)C_{zc1}^2C_{zc2}^2C_k^2C_{zb2}^2C_{zb1}.$$

На основі виразу (2.1) теоретично розраховано та експериментально досліджено функції перетворення радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами



фірм Innovative sensor technology, Honeywell (рисунок 2.3) та вологочутливим МДН-конденсатором, розробленого в НДІ «Гелій» (рисунок 2.4). З рисунку 2.3 та рисунку 2.4 видно, що частота генерації радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами зменшується із збільшенням відносної вологості повітря  $W$ . Діапазони зміни частоти генерації радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами набувають таких значень:

- 320 кГц (чутливий до вологи МДН конденсатор,  $W = 18 \div 99\%$ );
- 103 кГц (чутливий до вологи конденсатор P14 Rapid (WIRED),  $W = 1 \div 100\%$ );
- 92 кГц (чутливий до вологи конденсатор P14 Rapid (SMD),  $W = 1 \div 100\%$ );
- 74 кГц (чутливий до вологи конденсатор НСН-1000,  $W = 0 \div 100\%$ );

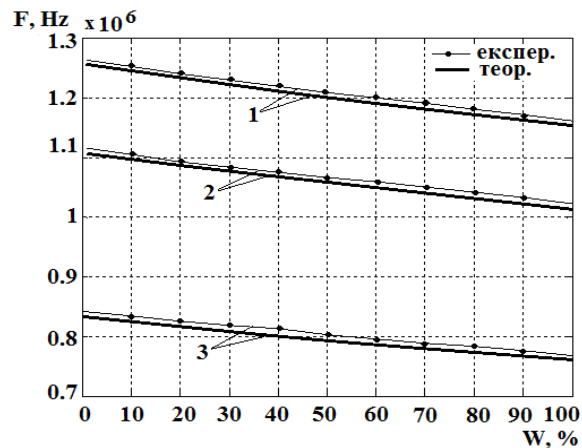


Рисунок 2.3 – Експериментальні та теоретичні залежності частоти генерації від зміни відносної вологості повітря радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами:  
1 – P14 Rapid (WIRED); 2 – P14 Rapid (SMD); 3 – НСН-1000

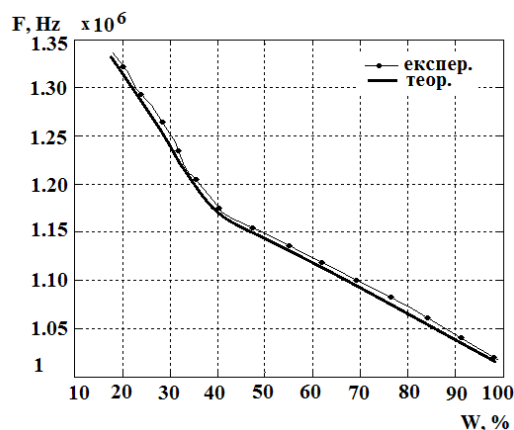


Рисунок 2.4 – Експериментальні та теоретичні залежності частоти генерації від зміни відносної вологості повітря радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами

На основі виразу (2.1) визначено аналітичний вираз рівняння чутливості (2.2) розробленого радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами:

$$\begin{aligned}
 S_W = & - \frac{C_w(W)C_{zc1}C_{zc2}C_kC_{zb1}C_{zb2} \pm \sqrt{A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6 + A7} \left( \frac{\partial C_w(W)}{\partial W} \right)}{4\pi LC_w^2(W)C_{zc1}C_{zc2}C_kC_{zb1}C_{zb2}} + \\
 & + \frac{\left( \frac{\partial C_w(W)}{\partial W} \right) G1 \pm \frac{G2 \left( \frac{\partial C_w(W)}{\partial W} \right) + G3 \left( \frac{\partial C_w(W)}{\partial W} \right) + G4 \left( \frac{\partial C_w(W)}{\partial W} \right)}{2\sqrt{A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6 + A7}}}{4\pi LC_w(W)C_{zc1}C_{zc2}C_kC_{zb1}C_{zb2}} + \\
 & + \frac{\left( \frac{\partial C_w(W)}{\partial W} \right) G1 \pm \frac{G5 \left( \frac{\partial C_w(W)}{\partial W} \right) + G6 \left( \frac{\partial C_w(W)}{\partial W} \right) + G7 \left( \frac{\partial C_w(W)}{\partial W} \right) + G8 \left( \frac{\partial C_w(W)}{\partial W} \right)}{2\sqrt{A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6 + A7}}}{4\pi LC_w(W)C_{zc1}C_{zc2}C_kC_{zb1}C_{zb2}}, \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{де } G1 &= C_{zc1}C_{zc2}C_kC_{zb1}C_{zb2}; & G2 &= 2C_w(W)C_{zc1}^2C_{zc2}^2C_k^2C_{zb1}^2C_{zb2}^2; \\
 G3 &= 8LC_w(W)C_{zc1}^2C_{zc2}^2C_k^2C_{zb2}^2C_{zb1}^2; & G4 &= 8LC_w(W)C_{zc1}^2C_{zc2}^2C_k^2C_{zb1}^2C_{zb2}^2; \\
 G5 &= 4LC_{zc1}^2C_{zc2}^2C_k^2C_{zb1}^2C_{zb2}^2; & G6 &= 8LC_w(W)C_{zc1}^2C_{zc2}^2C_k^2C_{zb1}^2C_{zb2}^2; \\
 G7 &= 8LC_w(W)C_{zc1}^2C_{zc2}^2C_k^2C_{zb1}^2C_{zb2}^2; & G8 &= 8LC_w(W)C_{zc1}^2C_{zc2}^2C_k^2C_{zb2}^2C_{zb1}^2.
 \end{aligned}$$

На рисунку 2.5 та рисунку 2.6 подано експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості повітря розроблено радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами WIRED, SMD, HCN-1000 та МДН конденсатором. З рисунку 2.5 та рисунку 2.6 видно, що чутливість розробленого радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами:

- МДН-конденсатором НДІ «Гелій», в діапазоні вимірювання  $W = 18 \div 99\%$  змінюється від 5730 Гц/% до 1917 Гц/%.
- P14 Rapid (WIRED) фірми Innovative sensor technology, в діапазоні вимірювання  $W = 1 \div 100\%$  змінюється від 1304 Гц/% до 1000 Гц/%;

- P14 Rapid (SMD) фірми Innovative sensor technology, в тому ж діапазоні вимірювання  $W$  змінюється від 1077 Гц/% до 822 Гц/%;
- НСН-1000 фірми Honeywell, в діапазоні вимірювання  $W = 0 \div 100\%$  змінюється від 835 Гц/% до 570 Гц/%;

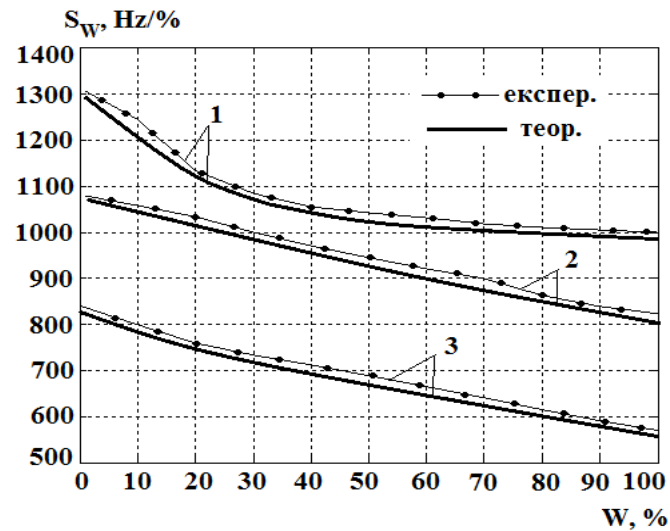


Рисунок 2.5 – Експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості повітря радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами:  
1 – P14 Rapid (WIRED); 2 – P14 Rapid (SMD); 3 – НСН-1000

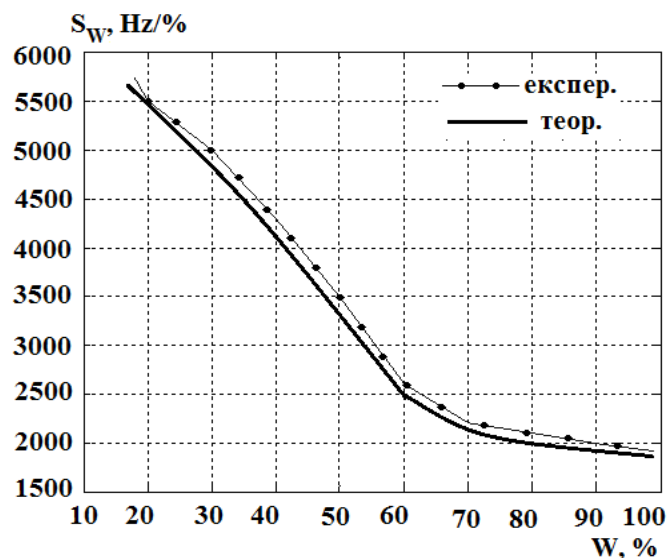


Рисунок 2.6 – Експериментальні та теоретичні залежності чутливості від зміни відносної вологості повітря радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи МДН-конденсатором

## 2.2 Висновки до розділу

Розроблено радіовимірювальний параметричний сенсор вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами, який реалізує принцип перетворення «вологість – частота». На основі еквівалентної високочастотної нелінійної схеми радіовимірювального параметричного сенсора вологи отримано аналітичні вирази функції перетворення та рівняння чутливості. Проведено дослідження електричних параметрів радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами та розраховано їх теоретичні залежності.

Експериментально встановлено, що середнє значення чутливості розробленого радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами: P14 Rapid (WIRED) фірми Innovative sensor technology, в діапазоні вимірювання  $W = 1 \div 100\%$  складає 1040 Гц/%; P14 Rapid (SMD) фірми Innovative sensor technology, в тому ж діапазоні вимірювання  $W = 1 \div 100\%$  – 944 Гц/%; HCH-1000 фірми Honeywell, в діапазоні вимірювання  $W = 0 \div 100\%$  – 689 Гц/%; МДН конденсатором НДІ «Гелій», в діапазоні вимірювання  $W = 18 \div 99\%$  – 3500 Гц/%.

Експериментально доведено, що фізико-хімічні властивості чутливого до вологи шару ємнісного елемента суттєво впливають на чутливість радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами. В діапазоні вологості 18÷99% найчутливішим є радіовимірювальний параметричний сенсор з вологочутливим МДН конденсатором, виготовленим на основі аморфного кремнію, середнє значення чутливості якого складає 3500 Гц/%.

Аналіз проведених теоретичних і експериментальних досліджень показав, що математична модель описує поведінку радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами з похибкою  $\pm 1,3\%$ .

## **3 РОЗРОБКА СХЕМНОГО РІШЕННЯ БАГАТОКАНАЛЬНОГО РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИЛАДУ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ**

### **3.1 Застосування ПЛІС для побудови радіовимірювальної системи**

Багатоканальна радіовимірювальна система вимірювання вологості призначена для вимірювання та контролювання вологістних режимів об'єкта в декількох точках вимірювання одночасно, в режимі реального часу. Система повинна вміти обробляти дані, що надходять з сенсорів, виконувати збереження цих даних, контролювати наявність сигналів з кожного з сенсорів, сповіщувати про перевищення рівня вологості, а також про неполадки або збої системи в цілому. Для підвищення надійності, система повинна бути автономною, з можливістю підключення до персонального комп'ютера, для виведення інформації про стан вологості, а також для її збереження.

Підвищення продуктивності обчислювальних систем реального часу є важливою загально-технічною задачею, актуальність якої обумовлена різноманітними галузями застосування автоматичних систем управління, до яких належить управління різними технологічними процесами, робототехніка, системи управління польотною інформацією, тощо. Значному зростанню продуктивності та швидкодії при зменшенні вартості цифрового пристрою, сприяла поява програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС). Поява ПЛІС дала змогу всі елементи фізично розмістити на одній інтегральній схемі, та перейти на якісно новий рівень пов'язаний зі значним збільшенням їх степені інтеграції до декількох мільйонів логічних вентилів і підвищенням швидкодії. Архітектура на основі процесорних ядер, реалізована на кристалі ПЛІС, вдало справляється з нестачею продуктивності шляхом впровадження паралелізму через копіювання багатьох ідентичних блоків. Системи на кристалі мають значно менший розмір, більшу швидкодію, мають перспективи масового дешевого виробництва складних високопродуктивних обчислювальних систем. Отже, застосування ПЛІС, дає більший вигравш у продуктивності, ніж за використання класичних мікроконтролерів, а також надає можливість реалізації додаткової периферії та спеціальних модулів в межах одного кристалу. У зв'язку із вищеозначеними перевагами, тому пропонується виконувати поступове переоснащення та заміну більшості систем керування системи ПЛІС, що не буде вимагати значних переробок, оскільки структура та логіка роботи таких систем залишається, але забезпечується більш високий рівень інтеграції, надійності та продуктивності таких систем.

На сучасному етапі розвитку електроніки і цифрової техніки основною областю застосування мов опису обладнання є поведінкове проектування програмованих логічних інтегральних схем FPGA- і CPLD- типів.

Інтегральні мікросхеми (ІМС) типу FPGA (Field Programmable Gate Array) представляють собою програмовані користувачем вентиляльні матриці. Сучасна електронна індустрія надає широкий діапазон ІМС FPGA- технології з найрізноманітнішими показниками по швидкодії, складності реалізованих алгоритмів, завадозахищеності і вартості. Це дозволяє здійснювати на їх основі проектування широкого спектру цифрових електронних пристроїв, серед яких слід назвати: сенсори кодів, периферійні контролери, мікропрограмні пристрої управління, універсальні і спеціалізовані процесори, пристрої цифрової обробки сигналів і багато інших.

Програмовані інтегральні схеми найбільш широко застосовуються в сфері телекомунікацій, в комп'ютерних мережах, в засобах цифрової обробки даних і в промисловому виробництві. В даний час важко знайти мобільний телефон, мережеву карту або концентратор, який не містить хоча б однієї FPGA мікросхеми. Висока продуктивність і паралелізація обчислювальних алгоритмів ПЛІС FPGA- типу уможливорює їх широке застосування в сучасних інформаційно - вимірювальних системах і комплексах та інших типах інтелектуальних комп'ютеризованих систем.

Більш детально розглянемо узагальнену структуру кристала ПЛІС FPGA-типу. По периферії верхнього шару кристала розміщуються блоки введення / виводу (БВВ). БВВ можуть бути запрограмовані для виконання функцій вхідного або вихідного буфера, а також буфера із запам'ятовуванням і ін. У деяких серіях FPGA- ІМС рівень напруги на окремих БВВ може бути різним, що дозволяє пов'язувати в одній системі пристрої з інтерфейсами, що відрізняються електричними стандартами живлення. У центрі кристала у вигляді матриці розміщені конфігуруючі логічні блоки (КЛБ). Швидкодія всієї мікросхеми в значній мірі визначається часовою затримкою «вхід - вихід» одного КЛБ. Структура КЛБ залежить від серії мікросхем. КЛБ інтегральних мікросхем може генерувати будь-яку логічну функцію чотирьох змінних або дві логічні функції трьох змінних. Вхідні сигнали для обчислення логічних функцій можуть надходити з чотирьох входів і виходу запам'ятовуючого елемента. Область між конфігуруючими логічними блоками називається областю програмованих міжз'єднань і являє собою розвинену ієрархію металевих ліній зв'язку, в точках перетину яких розміщені спеціальні швидкодіючі транзистори. Функція області міжз'єднань полягає в забезпеченні зв'язку між будь-якими виводами КЛБ і БВВ. Потрібний маршрут міжблокових з'єднань в FPGA- ПЛІС реалізується комутацією відповідних ліній за допомогою транзисторів. Нижній шар криста-

ла займає тіньовий пристрій, що запам'ятовує, інформація в елементах якого визначає логічні функції КЛБ, конфігурацію БВВ і маршрути міжз'єднань. Програмування мікросхеми FPGA полягає в завантаженні тіньового пристрою, що запам'ятовує, кожний біт якого безпосередньо пов'язаний з одним з параметрів елементів верхнього шару. Останні серії мікросхем компанії Xilinx Inc. дозволяють програмувати ІМС FPGA по частинах, без припинення її роботи. Реалізація такого підходу відкриває широкі можливості з віддаленого управління автономними електронними пристроями, наприклад, при модернізації їх програмного забезпечення. Мікросхеми FPGA побудовані за принципом оперативної пам'яті, і, отже, після відключення живлення інформація в тіньовому пристрої стирається. У зв'язку з цим на відповідних платах додатково встановлюють спеціальні мікросхеми ПЗУ, що дозволяють при кожному включенні перепрограмувати FPGA- мікросхему. Такий підхід значно послаблює рівень захисту від нелегального копіювання електронних схем, так як програму для ПЛІС нескладно перехопити на шляху між ПЗП і FPGA. Один із способів захисту, які використовуються компаніями - виробниками ПЛІС, полягає в засекречуванні структури бітового потоку під час програмування ПЛІС. В секреті зберігається відповідність між бітами програмуючого потоку і формується ланцюгом логічних елементів. Таким чином, можливість нелегального копіювання зберігається, проте розшифровка внутрішньої структури і деталей реалізації алгоритмів ПЛІС є більш складною, а в деяких випадках і нездійсненним завданням.

Застосування мови Verilog, Verilog-HDL і методологія проектування цифрових пристроїв. Останнього недоліку позбавлені виконані за технологією постійної пам'яті мікросхеми CPLD- типу. Вміст пам'яті таких ІМС при відключенні живлення не стирається, і, отже, їм не потрібно додаткових банків ПЗУ для програмування. Після установки біта секретності інформацію з CPLD- мікросхем зчитати неможливо. Архітектура ІМС типу CPLD Архітектуру ІМС типу CPLD (Complex Programmable Logic Device - складний програмований логічний пристрій) розглянемо на прикладі популярної серії мікросхем ALTERA MAX II.

На ринку представлені CPLD різноманітних сімейств і в самих різних типів корпусів. Значення напруги живлення, робочий струм, струм в режимі спокою і споживана потужність цих пристроїв також різні. У них використовується пам'ять різного типу й обсягу (ПЗУ, ОЗУ, двопортовий ОЗУ, асоціативна пам'ять, а також пам'ять прямого і зворотного магазинного типів). Деякі CPLD містять блоки ФАПЧ і автоматичного підстроювання по затримці, що забезпечують синтез тактової частоти, що дозволяє реалізовувати на таких мікросхемах DSP-алгоритми, а також функції системи на кристалі (табл.3.1).

Таблица 3.1 – Характеристики микросхем CPLD семейства MAX Altera

Тип изделия (тип конфигурационной памяти)	Рабочее напряжение ядра, В	Корпус и число выводов	Число МЯ	Число МЯ на ЛБ/число входов каждого ЛБ	Объем встроенной памяти, бит	Объем встроенного блока памяти, бит	Другие встроенные функции
<i>Altera</i>							
MAX 3000A (ЭСРПЗУ)	3,3	FBGA 256, PLCC 44, PQFP 208, TQFP 444/100/144	32–512	16/36	–	–	–
MAX 7000AE (ЭСРПЗУ)	3,3	BGA 256, FBGA 100/256, PLCC 44/84, PQFP 208, TQFP 100/144	32–512	16/36	–	–	–
MAX 7000B (ЭСРПЗУ)	2,5	BGA 256, FBGA 100/256, PLCC 44, PQFP 208, TQFP 44/100/144, 0,8-мм µBGA 49/169	32–512	16/36	–	–	–
MAX II (СОЗУ)	1,8; 2,5; 3,3	FBGA 256/324, TQFP 100/144	192–2210	10/26	8192 (флэш-память)	8192	Низкочастотный расположенный на кристалле генератор

Складні ПЛІС все ще іноді застосовуються в простих додатках, наприклад для декодування адреси, але все частіше їх можна знайти в портативних достатньо дешевих пристроях.

Мікросхеми CPLD з широкими функціональними можливостями і великим числом блоків введення / виведення вже вторгаються в області застосування FPGA. А оскільки для CPLD час затримки більш-менш передбачливий, ніж для FPGA, їм віддається перевага в тих випадках, коли потрібна високопродуктивна логіка і не вимагають пам'яті великого обсягу.

Основні постачальники CPLD – компанії Altera, Atmel, Cypress Semiconductor, Lattice Semiconductor, STMicroelectronics і Xilinx.

Протягом багатьох років компанія Altera розробляла архітектуру микросхем ведучого сімейства CPLD – MAX 7000, добиваючись збільшення швидкодії і числа логічних МК, а також зниження робочої напруги і споживаної потужності лише за рахунок вдосконалення методів виготовлення та зменшення розмірів елементів схеми.

Таблица 3.2 – Основні характеристики микросхем сімейства MAX

Характеристика	ЕРМ240	ЕРМ570	ЕРМ1270	ЕРМ2210
Число логических элементов	240	570	1270	2210
Среднее число эквивалентных макроячеек	192	440	980	1700
Число эквивалентных макроячеек	128–240	240–570	570–1270	1270–2210
Объем памяти UFM, бит	8192	8192	8192	8192
Максимальное число пользовательских выводов	80	160	212	272
$t_{pd1}^*$ , нс	4,7	5,5	6,3	7,1
$f_{CNT}$ , МГц	304	304	304	304
$t_{CO}^{**}$ , нс	4,4	4,5	4,6	4,1
Корпус	100-выводной TQFP	100-выводной TQFP 144-выводной TQFP 256-выводной BGA	144-выводной TQFP 256-выводной BGA	256-выводной BGA 324-выводной BGA
Цена, долл. (при закупке партии в 500 тыс. шт.)	1,5	2,3	4,25	7,0

\*Задержка распространения сигнала от входного контакта до выходного через комбинационную логику в худшем случае. \*\*Задержка выходного сигнала относительно глобального тактового сигнала.



При побудові архітектури нової мікросхеми компанія прийняла несподіване рішення: МК, які традиційно використовуються в CPLD на основі програмованої матричної логіки замінити притаманними FPGA таблицями відповідності (LUT). У порівнянні зі звичайними CPLD нова мікросхема характеризується більшою щільністю упаковки, меншою динамічною потужністю і більш високою продуктивністю. На думку багатьох експертів, мікросхеми сімейства MAX II досить важко ототожнювати зі звичними CPLD на базі трасувальної матриці з добре передбачуваним часом затримки, хоча вони і володіють всіма перевагами звичайних складних ПЛІС, принаймні тими, на які звертає увагу споживач: енергонезалежність конфігураційної пам'яті і миттєва працездатність при включенні. Розробники Altera налаштували складові маршрутизації, вжили низку заходів щодо поліпшення передбачуваності часу затримки і продовжують вказувати логічну складність мікросхеми за кількістю МК, а не логічних елементів. Але нові мікросхеми по роз'ємах не сумісні з CPLD попереднього сімейства MAX. У сімейство MAX II входять чотири типи CPLD-мікросхем з енергонезалежною конфігураційною і користувальницькою пам'яттю, виконаних по 0,18-мкм технології компанії Taiwan Semiconductor Manufacturing Co. (TSMC) з шестишаровою металізацією. CPLD сімейства містять від 240 до 2210 логічних елементів (у чотири рази більше, ніж у мікросхемах попередніх сімейств), що еквівалентно 128-2210 МК, і до 272 виводів (табл.3.2). Архітектура мікросхем складається з двомірної матриці логічних матричних блоків (ЛМБ) з 10 логічними елементами (ЛЕ) у кожному, банку енергонезалежної флеш-пам'яті і JTAG-порт управління та налагодження. Найбільш малий елемент архітектури мікросхеми сімейства – логічний – містить чотирьох входову LUT, що реалізовує будь-яку функцію чотирьох змінних. Крім того, ЛЕ містить програмований регістр і ланцюг перенесення даних. ЛМБ об'єднані системою між'єднань MultiTrack, яка містить ряди і стовпці між'єднань фіксованої протяжності, що забезпечує отримання передбачуваної і малої затримки поширення сигналу між логічними рівнями. Сигнали на виводи надходять від елементів введення / виведення (ЕВВ), розташованих на кінцях рядів і стовпців ЛМБ по периферії мікросхеми (рисунок 3.1) та наведено в додатку Д.

Кожен ЕВВ містить двонаправлений буфер введення / виведення з поліпшеними характеристиками. Вхідний буфер ЕВВ містить додатковий тригер Шміта, що забезпечує завадостійкість на вході. Завдяки LUT-структурі і високій щільності елементів у CPLD сімейства MAX II EPM1270 і EPM2210 достатньо можливостей для реалізації логіки РСІ-шин управління. Так, для реалізації цільової функції 32-біт/33-МГц РСІ потрібно ~ 40% логічних елементів EPM1270 – меншою з цих двох мікросхем. У результаті споживач може заоща-

дити до 50% коштів на реалізацію такого інтерфейсу в системі в порівнянні з конструкціями на базі спеціалізованих мікросхем ASSP-типу.

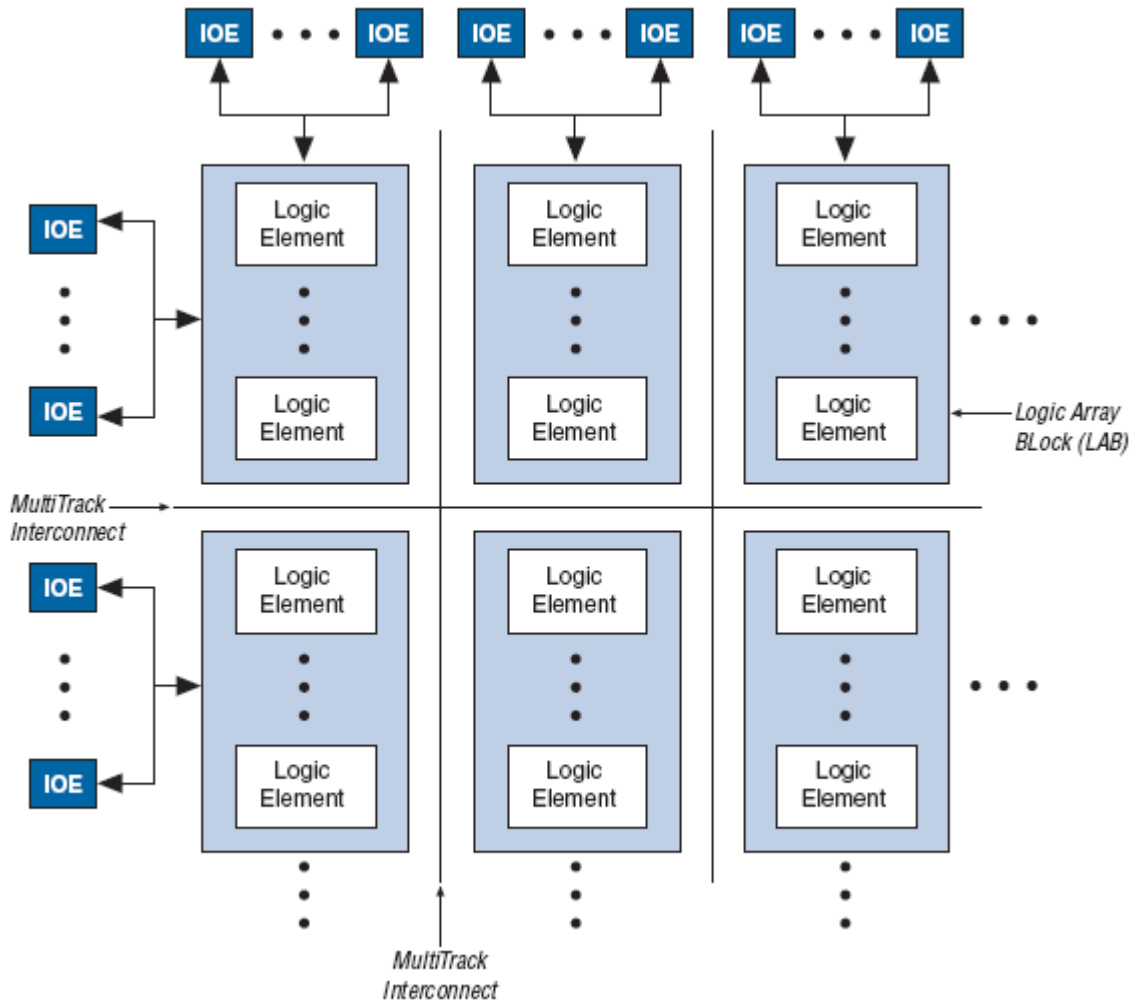


Рисунок 3.1 – Блок-схема мікросхеми CPLD сімейства MAX II

У банку флеш-пам'яті виділений спеціалізований конфігураційний блок (Configuration Flash Memory – CFM), в який записується вся конфігураційна інформація СОЗУ. При подачі живлення CFM-блок автоматично завантажує конфігураційні дані, забезпечуючи практично миттєве (через 200 мкс. після встановлення стабільного напруги живлення) включення мікросхеми. Передбачена можливість перепрограмування енергонезалежної конфігураційної пам'яті при роботі логічних блоків на основі СОЗУ. Інша, менша, частина банку пам'яті виділена для зберігання призначених для користувача даних.

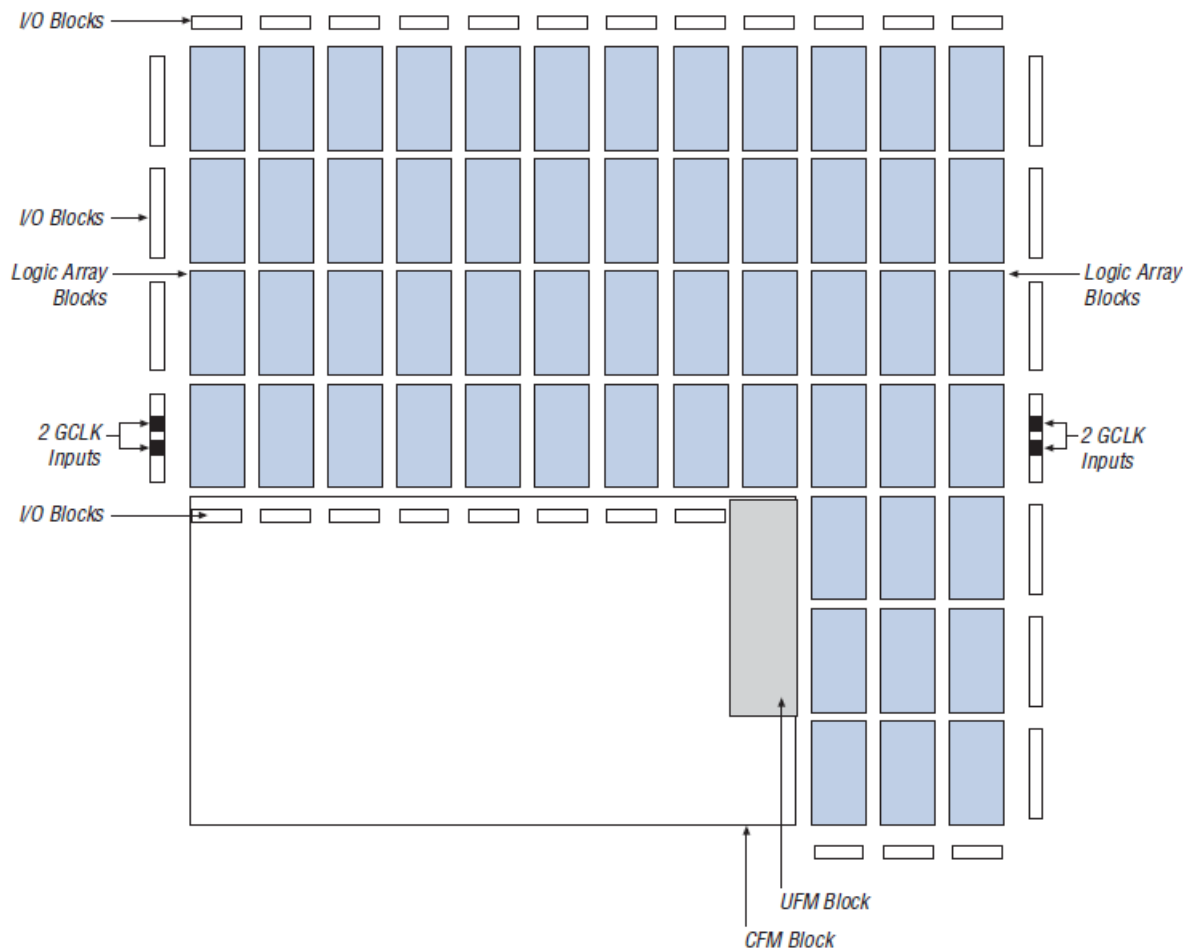


Рисунок 3.2 – Архітектурний план CPLD MAX II

Ємність пам'яті користувача (User Flash Memory – UFM), вперше реалізованої в ПЛІС, становить 8 Кбіт. Пам'ять користувача забезпечує програмовані з'єднання портів з логічною матрицею для зчитування та запису даних. Поруч з UFM-блоком розташовані три ряди ЛМБ, а число сусідніх стовпців для різних мікросхем сімейства різне (рисунок 3.2) та наведено в додатку Е. До переваг мікросхем нового сімейства відноситься також мала споживана потужність, яка на порядок менше, ніж у CPLD попередніх сімейств. Струм в режимі простою складає 2 мА. Напруга живлення мікросхем сімейства 1,8-3,3 В. Завдяки багатовольтовому інтерфейсу мікросхеми MAX II можуть взаємодіяти з системами на напругу 1,5; 1,8; 2,5 і 3,3 В.

На підставі вище сказаного для розробки багатоканального радіовимірювального приладу контролю витрат газового середовища вибрана плата EPM1270 на основі CPLD MAX II фірми ALTERA (див. рисунок 3.3) та наведено в додатку Ж.

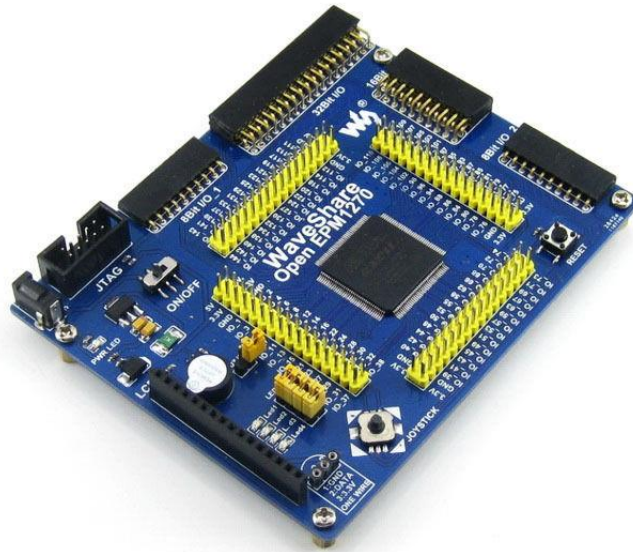


Рисунок 3.3 – Відладочна плата EPM1270

На рисунку 3.3 наведена схема відладочної плати EPM1270 програмованої логічної інтегральної схеми пристрою.

Quartus II (QII) - це система проектування на ПЛІС Altera, яка підходить для усіх випущених сімейств мікросхем Altera (лише в останніх версіях Quartus II немає підтримки всіх сімейств через складність виконання універсального трасувальника). Ця система включає весь необхідний набір утиліт, підпрограм і налаштувань для повного створення проекту (знову ж, крім останніх версій QII, де тимчасове моделювання перекладається на оболонку Model Sim від компанії Mentor Graphics). Всі підпрограми і утиліти QII можна розділити на групи відповідно до етапах виконання проекту на ПЛІС, які виглядають наступним чином:

1. Створення файлу проекту.
2. Аналіз і синтез проекту.
3. Трасування зв'язків і розміщення проекту.
4. Часовий аналіз за допомогою утиліти Time Quest.
5. Програмування конфігураційної пам'яті ПЛІС.

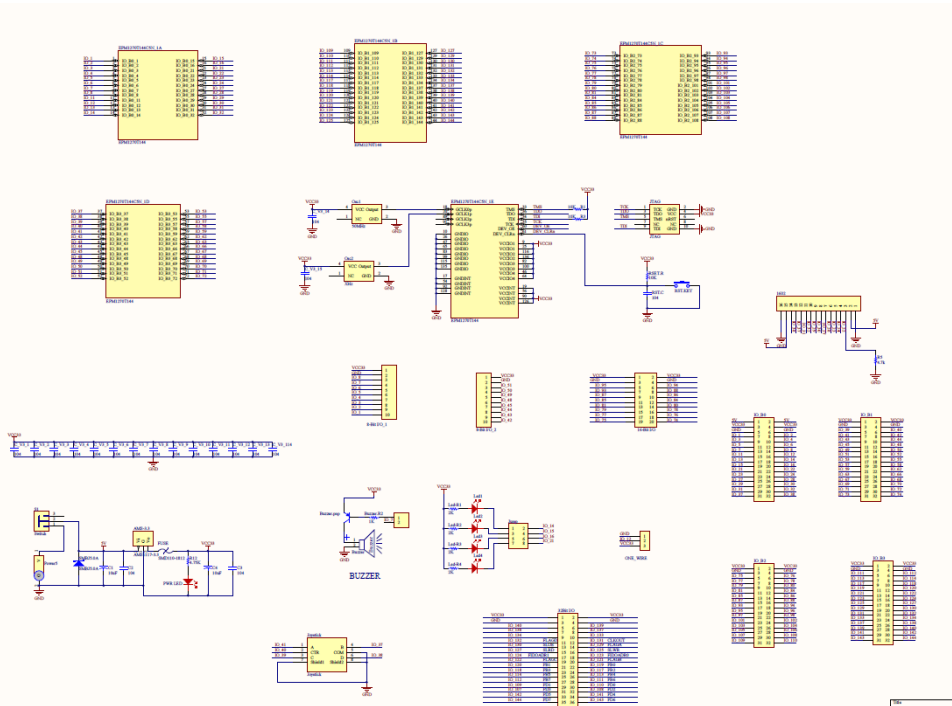


Рисунок 3.4 – Схема програмованої логічної інтегральної схеми пристрою

### 3.2 Схемотехнічне рішення радіовимірювальної системи

Розроблено багатоканальний радіовимірювальний прилад контролю температури на основі ПЛІС фірми ALTERA MAXII, який має 12 вимірювальних каналів і під'єднується до персонального комп'ютера через інтерфейс "віртуальний COM порт – USB", або "віртуальний COM порт – Bluetooth 2.0 - 4.0". Структурна схема багатоканального радіовимірювального приладу контролю витрат газового середовища представлена на рисунку 3.5 та наведена в додатку Л. Прилад складається з 12 незалежних вимірювальних каналів, які працюють в реальному масштабі часу. Кожен канал складається з радіовимірювального оптичного витратоміра на основі транзисторної структури з від'ємним опором, формувача вхідного сигналу, 32 розрядного частотоміра, буфера, формувача сенсора бінарного коду в ASCII код. Всі 12 каналів під'єднані до регістра формувача передачі даних по шині UART з швидкістю 115200 біт/с і блок передачі даних "віртуальний COM порт – USB".

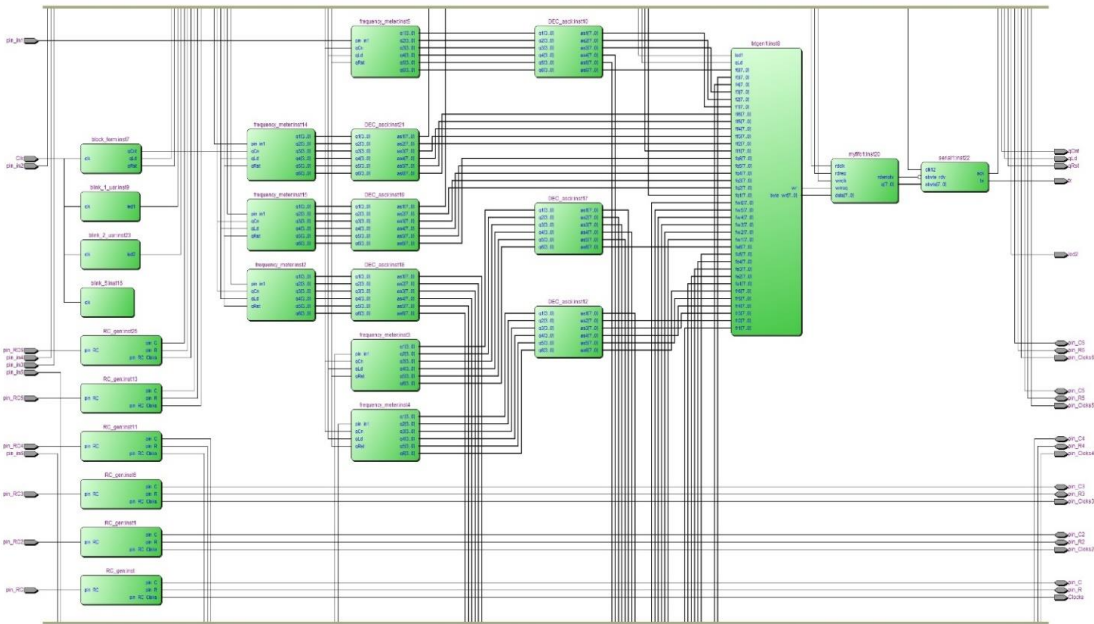


Рисунок 3.5 – Структурна схема багатоканального радіовимірювального приладу вимірювального контролю вологості

На рисунку 3.6 представлена та наведена в додатку М блок схема розробленого частотоміра. Принцип дії електронних лічильників базується на підрахунку кількості імпульсів, сформованих з періодичного сигналу прямокутної форми, за визначений час. Цей проміжок часу також задається підрахунком імпульсів внутрішнього кварцового генератора або зовнішнього (в нашому випадку 10 мс). Таким чином електронний лічильник є приладом порівняння, точність вимірювання якого залежить від точності еталонної частоти.

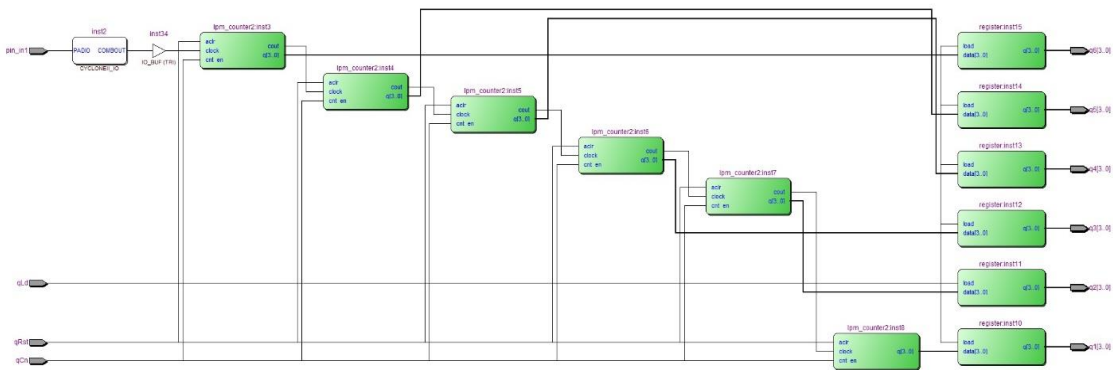


Рисунок 3.6 – Блок схема частотоміра

На рисунку 3.7. представлена та наведена в додатку Н схема електрично-принципова багатоканального радіовимірювального приладу вимірювального контролю вологості.



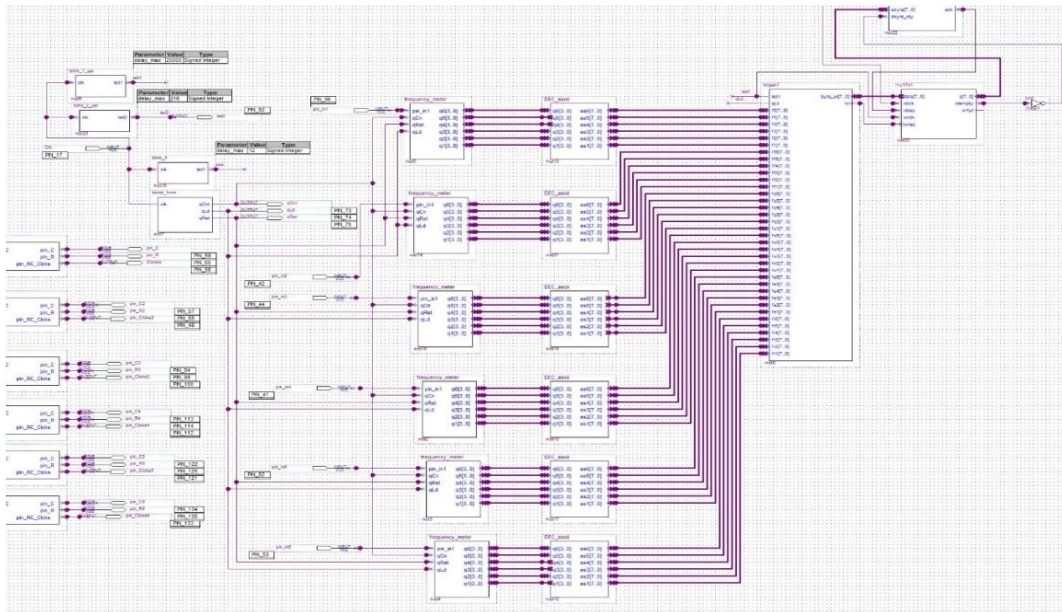


Рисунок 3.7 – Схема електрично-принципова багатоканального радіовимірювального приладу вимірювального контролю вологості

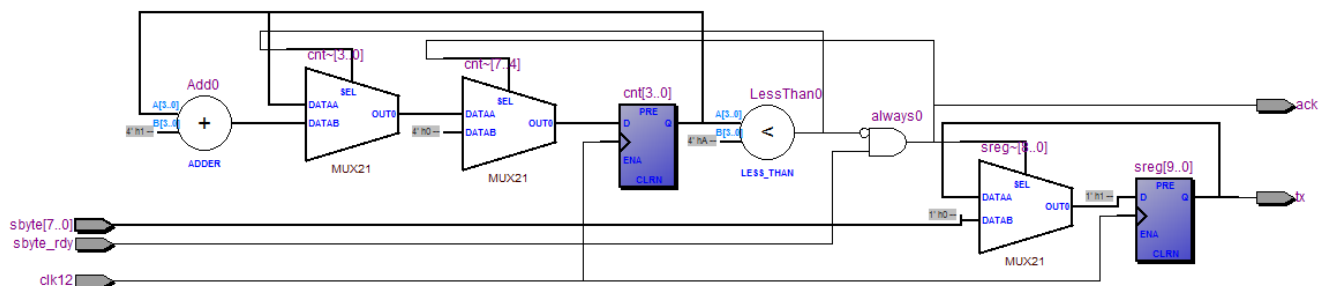


Рисунок 3.8 – Блок схема модуля UART tx

модуля UART tx на мові Verilog HDL, який працює на швидкості 115200 kBit/c:  
module serial1(  
input wire clk12,  
input wire [7:0]sbyte,  
input wire sbyte\_rdy,  
output wire tx,  
output wire ack  
);

```

reg [9:0]sreg;
assign tx = sreg[0];
reg [3:0]cnt = 0;
wire busy; assign busy = (cnt<10);
assign ack = sbyte_rdy & ~busy;
always @(posedge clk12)
begin
    if(sbyte_rdy & ~busy)
        sreg <= { 1'b1, sbyte, 1'b0 }; //load

```

```

else
sreg <= { 1'b1, sreg[9:1] }; //shift
if(sbyte_rdy & ~busy)
cnt <= 0;
else
if(busy)
cnt <= cnt + 1'b1;
end
endmodule

```

Для перетворення із двійково-десятькового коду в ascii код для сприйняття інформації на ЕОМ після передачі по UART написаний модуль Nibble2Ascii на мові Verilog HDL:

```

module Nibble2Ascii(ascii, nibble);
parameter LO = 1'b0, HI = 1'b1;
output [7:0] ascii;
input [3:0] nibble;
wire IsDecimal;
assign IsDecimal = ((nibble < 4'd10)? HI : LO);
assign ascii[7:4] = ((IsDecimal == HI)? 4'b0011:4'b0100);
assign ascii[3:0] = nibble - ((IsDecimal == HI)? 4'd0:4'd9);
endmodule

```

Модуль буфера на 256 bit на мові Verilog HDL:

```

// synopsys translate_off
`timescale 1 ps / 1 ps
// synopsys translate_on
module myfifo1 (
data,
rdclk,
rdreq,
wrclk,
wrreq,
q,
rdempty,
wrfull);
input [7:0] data;
input rdclk;
input rdreq;
input wrclk;
input wrreq;
output [7:0] q;
output rdempty;
output wrfull;

```



```

wire sub_wire0;
wire [7:0] sub_wire1;
wire sub_wire2;
wire wrfull = sub_wire0;
wire [7:0] q = sub_wire1[7:0];
wire rdempty = sub_wire2;
dcfifo      dcfifo_component (
                .data (data),
                .rdclk (rdclk),
                .rdreq (rdreq),
                .wrclk (wrclk),
                .wrreq (wrreq),
                .wrfull (sub_wire0),
                .q (sub_wire1),
                .rdempty (sub_wire2),
                .aclr (),
                .rdfull (),
                .rdusedw (),
                .wrempty (),
                .wrusedw ());

defparam
    dcfifo_component.intended_device_family = "Cyclone II",
    dcfifo_component.lpm_numwords = 256,
    dcfifo_component.lpm_showahead = "ON",
    dcfifo_component.lpm_type = "dcfifo",
    dcfifo_component.lpm_width = 8,
    dcfifo_component.lpm_widthu = 8,
    dcfifo_component.overflow_checking = "ON",
    dcfifo_component.rdsync_delaypipe = 4,
    dcfifo_component.underflow_checking = "ON",
    dcfifo_component.use_eab = "ON",
    dcfifo_component.wrsync_delaypipe = 4;
endmodule

```

### 3.3 Висновки до розділу

Розроблено схемотехнічне рішення системи вимірювання вологості на програмованій логічній інтегральній мікросхемі EPM1270 на основі CPLD MAX II фірми ALTERA.

## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Таблиця 4.1 Основні техніко-економічні показники аналога і нової розробки

Показники	Одиниця виміру	Аналог	Засіб, що проектується	Відношення параметрів
Напруга живлення	В	12	5	2,4
Кількість виконуваних функцій	шт.	2	6	3
Маса	кг	0,5	0,2	2,5
Термін безвідмовної роботи	год.	10 000	10 000	1
Швидкість та легкість налаштування	бали	2	10	5

### 4.1 Оцінка наукового, технічного та економічного рівня НДДКР

Проаналізуємо рівень науково-дослідної роботи яка пов'язана з дослідженням радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологості в газових середовищах. Виходячи з відповідних вимог НТП, доцільно орієнтуватися на час проведення НДДКР 2 роки і менше (+2), при чому технічні показники результатів плануються на рівні кращих світових зразків (0); наявність можливості отримання авторських свідоцтв на винахід – впевненість в отриманні авторських свідоцтв (+2); а строк окупності витрат – 2 роки і менше (+3).

В таблиці 4.2 наведено критерії та бальна оцінка для визначення наукового та технічного рівня науково-дослідної роботи

Таблиця 4.2 – Критерії та бальна оцінка для визначення наукового, технічного та економічного рівня науково-дослідної роботи

Критерії оцінки	Шкала критеріїв	Індекс оцінки
Час, необхідний для проведення НДР	2 роки і менше	+2
	3 роки	+1
	4 роки	0
	5-6 років	-1
	7 років і більше	-2

Продовження таблиці 4.2 – Критерії та бальна оцінка для визначення науково-го, технічного та економічного рівня науково-дослідної роботи

Технічні показники результатів розробки	Вище рівня кращих світових зразків	+2
	На рівні кращих світових зразків	0
	Ниже рівня кращих світових зразків	-2
Можливості отримання авторських свідоцтв на винахід	Впевненість в отриманні авторських свідоцтв	+2
	Часткові можливості	0
	Можливості немає	-1
Строк окупності витрат	2 роки і менше	+3
	3-4 роки	+2
	5 років	0
	6-7 років	-1
	8 років і більше	-2

В таблиці 4.3 наведено можливі результати оцінки теми НДДКР.

Таблиця 4.3 – Можливі результати оцінки теми НДДКР

Сума індексів	Оцінка теми
Позитивна(+)	Розробка є досить перспективною
Задовільна(0)	Розробка перспективна
Негативна(-)	Розробка не перспективна

Проаналізувавши дані таблиць 4.2 та 4.3, та підрахувавши загальну суму балів (+2-0+2+3=+7), робимо висновок, що дана науково-дослідна робота з дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах є досить перспективною.

#### 4.1.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою проведення технологічного аудиту є оцінювання комерційного потенціалу результатів НДДКР. В результаті оцінювання можна зробити висновок щодо напрямів (особливостей) організації подальшого впровадження результатів з врахуванням встановленого рейтингу.

Рекомендується здійснювати оцінювання комерційного потенціалу розробки за 12-ма критеріями, наведеними в таблиці 4.4. [58]

Таблиця 4.4 - Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри-терій	0	1	2	3	4
<b>Технічна здійсненність концепції:</b>					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
<b>Ринкові переваги (недоліки):</b>					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
<b>Ринкові перспективи</b>					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає

Практична здійсненість					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки зведемо до таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 - Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	експерт		
	1	2	3
	Бали, виставлені ек-		
1. Технічна здійсненність концепції	4	3	4
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	4	3	4
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	3	3	3
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	3	2	2
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	3	4	4
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	2	3	2
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	2	2	3
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	3	3	2
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	3	3	3
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	2	2	2
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	3	3	2
12. Практична здійсненність (розробка документів)	1	1	1
Сума балів	33	32	32
Середньоарифметична сума балів <u>СБ</u>	<b><u>32,3</u></b>		

За даними таблиці 4.5 зробимо висновок щодо рівня комерційного потенціалу дослідження. При цьому доцільно користуватися рекомендаціями, наведеними в таблиці 4.6. [58]

Таблиця 4.6 - Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів СБ , розрахована на основі виснов-	Рівень комерційного потенціалу розробки
0 - 10	Низький
11 - 20	Нижче середнього
21 - 30	Середній
31 - 40	Вище середнього
41 - 48	Високий

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки становить 32,3 бала, що, згідно таблиці 4.6, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

#### 4.1.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості для нового рішення

В процесі дослідження необхідно розглянути основні технічні показники, пристрою, що може бути спроектований в результаті проведення дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах. Ці показники по-різному впливають на загальну якість проектної розробки.

Узагальнений коефіцієнт якості ( $B_n$ ) для нового технічного рішення розраховуємо за формулою [59]

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i, \quad (4.1)$$

де  $k$  – кількість найбільш важливих технічних показників, які впливають на якість нового технічного рішення;

$\alpha_i$  – коефіцієнт, який враховує питому вагу  $i$ -го технічного показника в загальній якості розробки. Коефіцієнт  $\alpha_i$  визначається експертним шляхом і при цьому має виконуватись умова  $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$ ;

$\beta_i$  – відносне значення  $i$ -го технічного показника якості нової розробки.

Відносні значення  $\beta_i$  для різних випадків розраховують за такими формулами:

лами:

- для показників, зростання яких вказує на підвищення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ni}}{I_{ai}}, \quad (4.2)$$

де  $I_{ni}$  та  $I_{ai}$  – чисельні значення конкретного  $i$ -го технічного показника якості відповідно для нової розробки та аналога;

- для показників, зростання яких вказує на погіршення в лінійній залежності якості нової розробки

$$\beta_i = \frac{I_{ai}}{I_{ni}}; \quad (4.3)$$

Використовуючи наведені залежності можемо проаналізувати та порівняти техніко-економічні характеристики аналогу та майбутньої розробки на основі отриманих наявних та проектних показників, а результати порівняння зведемо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Порівняння основних параметрів пристрою що проектується та аналога

Показники (параметри)	Одиниця вимірювання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
Напруга живлення	В	12	5	2,4	0,2
Кількість виконуваних функцій	шт.	2	6	3	0,35
Маса	кг	0,5	0,2	2,5	0,25
Термін безвідмовної роботи	год.	10 000	10 000	1	0,1
Швидкість та легкість налаштування	бали	2	10	5	0,1

Узагальнений коефіцієнт якості ( $B_n$ ) для нового технічного рішення складе

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i = 2,4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,35 + 2,5 \cdot 0,25 + 1 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,1 = 2,76.$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, проєктований компонент переважає існуючі аналоги приблизно в 2,76 рази.



## Висновки

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки становить 32,3 балів, що свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього). При оцінюванні за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, удосконалений пристрій переважає існуючі аналоги приблизно в 2,76 рази. Отже можна зробити висновок про доцільність проведення НДДКР з дослідження та розробки радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах.

### 4.2 Розрахунок витрат на проведення НДДКР з дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах

В техніко-економічному обґрунтуванні представленому в першому розділі даної магістерської кваліфікаційної роботи було приблизно обґрунтовано доцільність проведення НДДКР. Тому в даному розділі будуть проведені більш детальні розрахунки витрат на проведення НДДКР стосовно дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах.

Для економічного розрахунку проведення НДДКР потрібно скласти кошторис витрат, який передбачає розрахунок визначених основних статей витрат.

Основна заробітна плата дослідників та розробників, яка розраховується за формулою [58]

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t, \quad (4.4)$$

де  $M$  – місячний посадовий оклад конкретного розробника (дослідника), грн.;

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

$t$  – число днів роботи розробника (дослідника).

Проведені розрахунки зводимо до таблиці 4.8.

Таблиця 4.8– Основна заробітна плата дослідників та розробників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
1. Керівник проекту	10100,00	459,09	35	16068,18
2. Аналітик	9500,00	431,82	15	6477,27
3. Інженер-метролог	9450,00	429,55	7	3006,82
5. Інженер-конструктор РЕА	9500,00	431,82	20	8636,36
5. Лаборант	5300,00	240,91	21	5059,09
Разом				39247,73

Витрати на основну заробітну плату працівників ( $Z_p$ ), що здійснюють підготовку робочих місць необхідних для дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах, підготовку та формування баз даних, підготовку та монтаж обладнання, макетів, виготовлення дослідних зразків тощо, розраховуються на основі норм часу, які необхідні для виконання даної роботи, за формулою [58]

$$Z_p = \sum_1^n t_i \cdot C_i \cdot K_c, \quad (4.5)$$

де  $t_i$  - норма часу (трудомісткість) на виконання конкретної роботи, годин;

$n$  - число робіт по видах та розрядах;

$K_c$  - коефіцієнт співвідношень, який установлений в даний час Генеральною тарифною угодою між Урядом України і профспілками,  $K_c = 1,75$ ;

$C_i$  - погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує відповідну роботу, грн./год.

$C_i$  визначається за формулою [58]

$$C_i = \frac{M_n \cdot K_i}{T_p \cdot T_{зм}}, \quad (4.6)$$

де,  $M_n$  – прожитковий мінімум працездатної особи, грн.,  $M_n = 2197,00$  грн.;

$K_i$  - тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду;

$T_p$  - число робочих днів в місяці,  $T_p = 22$  дн.;

$T_{зм}$  - тривалість зміни,  $T_{зм} = 8$  годин.

Проведені розрахунки винесемо до таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Витрати на основну заробітну плату працівників

Найменування робіт	Трудомісткість нормо-годин	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн.	Величина оплати, грн.
технічний контроль монтажу та складання;	0,5	5	1,7	37,14	18,57
захист виробу від дії навколишнього середовища;	0,4	6	2	43,69	17,48
технологічне тренування виробу;	0,8	6	2	43,69	34,95
налагодження виробу;	1,0	7	2,2	48,06	48,06
випробування виробу;	0,6	7	2,2	48,06	28,84
вихідний контроль	0,6	6	2	43,69	26,21
Разом					174,11

Додаткова заробітна плата розробників, дослідників та працівників, які приймали участь в дослідженнях та розробці НДДКР розраховується як 12% від основної заробітної плати розробників та працівників

$$Z_d = Z_o \cdot 12 / 100\% , \quad (4.7)$$

$$Z_d = (39247,73 + 174,11) \cdot 12 / 100\% = 4730,62 \text{ (грн.)}$$

Нарахування на заробітну плату дослідників та працівників.

Згідно діючого законодавства нарахування на заробітну плату складають 22% від суми основної та додаткової заробітної плати

$$H_3 = (Z_o + Z_d) \cdot 22\% / 100\% \quad (4.8)$$

$$H_3 = (39247,73 + 174,11 + 4730,62) \cdot 22\% / 100\% = 9713,54 \text{ (грн.)}$$

Витрати на матеріали на даному етапі проведення НДДКР пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних блоків і компо-

нентів, тому дані витрати формуються на основі як офісних витратних матеріалів так і обмеженого переліку матеріалів.

Витрати на матеріали, що були використані при проведенні досліджень, розраховуються по кожному виду матеріалів за формулою [58]

$$M = \sum_{i=1}^n H_i \cdot C_i \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де, -  $H_i$  - витрати матеріалу  $i$ -го найменування, кг;

$C_i$  - вартість матеріалу  $i$ -го найменування, грн./кг.;

$K_i$  - коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = 1,1$ ;

$n$  - кількість видів матеріалів,

Проведені розрахунки зводимо до таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Витрати на основні матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Одиниця виміру	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витраченого матеріалу, грн.
1.Припій ПОС-61	Кг	459,00	0,015	6,89
2.Сплав Rose	Кг	122,00	0,011	1,34
3.Лак УР-231	Кг	148,00	0,05	7,40
4.Склотекстоліт	Кг	116,00	0,01	1,16
5.Спирт технічний	Кг	32,00	0,05	1,60
6.Полікор	кг	85,00	0,04	3,40
7.Клей	кг	130,00	0,006	0,78
8.Полістирол	Кг	32,00	0,15	4,80
9.Термопластик	Кг	163,00	0,03	4,89
10. Канцелярські товари	компл.	125,00	4	500,00
11. Офісне начиння	комплект	146,00	4	584,00
Всього				1116,26

З врахуванням транспортних витрат вартість матеріалів складе

$$M = 1116,26 * 1,1 = 1227,88 \text{ грн.}$$

Витрати на комплектуючі (основне обладнання, емулятори, моделі, комплектуючі макетів), що були використані при дослідженні радіовимірювальних

параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах, розраховуються за формулою

$$H = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i , \quad (4.10)$$

де:  $H_i$  - кількість комплектуючих  $i$ -го виду, шт.;

$C_i$  - покупна ціна комплектуючих  $i$ -го виду, грн.;

$K_i$  - коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = 1,10$ ;

$n$  - кількість видів матеріалів.

Проведені розрахунки зводимо до таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Витрати на комплектуючі для формування компонентів для НДДКР

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн.	Сума, грн.
Конденсатори	0	0,00	0,00
SMD 0805	15	4,30	64,50
SMD AVX B,C, D	5	9,50	47,50
Резистори	0	0,00	0,00
SMD 0805	27	0,85	22,95
Дросель SMD	2	12,30	24,60
Кварцовий резонатор	0	0,00	0,00
50МГц	1	16,20	16,20
Відладочна плата	0	0,00	0,00
CPLD EPM1270	1	560,00	560,00
Транзистори	0	0,00	0,00
BF998	3	4,65	13,95
BC857	3	1,25	3,75
Всього			753,45

Витрати на комплектуючі з урахуванням транспортних витрат складають

$$H = 753,45 \cdot 1,10 = 828,80 \text{ (грн.)}$$

Амортизація обладнання для проведення досліджень.

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

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_в} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.11)$$

де  $Ц_б$  – балансова вартість обладнання, приміщень тощо, які використовувались для розробки нового технічного рішення, грн.;

$t_{вик}$  – термін використання обладнання, приміщень під час розробки, місяців;

$T_в$  – строк корисного використання обладнання, приміщень тощо, років.

Проведені розрахунки необхідно звести до таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 - Величина амортизаційних відрахувань

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн
Обчислювальний комплекс та комп'ютеризована система проектування	18250,00	5	1	304,17
Вимірювальний комплекс метрологічної системи	14550,00	5	1	242,50
Осцилограф	6800,00	4	1	141,67
Газоаналізатор	6200,00	4	1	129,17
Програмне забезпечення	7850,00	4	1	163,54
Лабораторія	220000,00	25	1	733,33
Всього				1714,38

Витрати на силову електроенергію на проведення досліджень розраховують за формулою [58]

$$V_e = V \cdot П \cdot \Phi \cdot K_{п}, \quad (4.12)$$

де,  $V$  – вартість 1 кВт-години електроенергії,  $V = 2,91$  грн./кВт –година;

$P$  – встановлена потужність обладнання, кВт.;

$\Phi$  – фактична кількість годин роботи обладнання, годин. ;

$K_n$  – коефіцієнт використання потужності.

Всі проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.13.

Таблиця 4.13 – Витрати на електроенергію при проведенні досліджень

Найменування обладнання	Кількість годин роботи обладнання, год.	Встановлена потужність, кВт	Коефіцієнт використання потужності	Величина оплати
Обчислювальний комплекс та комп'ютеризована система проектування	220	0,25	0,95	152,05
Вимірювальний комплекс метрологічної системи	170	0,56	0,95	263,18
Осцилограф	100	0,16	0,95	44,23
Газоаналізатор	100	0,25	0,95	69,11
Всього				528,57

Інші витрати охоплюють: загальновиробничі витрати, адміністративні витрати, витрати на відрядження, матеріали, окремі непередбачені витрати, зв'язок, витрати на інтернет-послуги тощо.

Інші витрати доцільно приймати як 200...300% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників. Величина інших витрат складе

$$I = (39247,73 + 174,11) * 250\% / 100\% = 98554,58 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи.

Сума всіх попередніх статей витрат дає загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи

$$B = 39247,73 + 174,11 + 4730,62 + 9713,54 + 1116,26 + 828,80 + 1714,38 + 528,57 + 98554,58 = 156608,58 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.1 Розрахунок собівартості виготовлення розробленого пристрою

Витрати на матеріали, що були використані на розробку пристрою, розраховуються по кожному виду матеріалів за формулою [59]

$$M = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i, \quad (4.13)$$

де, -  $H_i$  - витрати матеріалу  $i$ -го найменування, кг;

$C_i$  - вартість матеріалу  $i$ -го найменування, грн./кг.;

$K_i$  - коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = 1,1$ ;

$n$  - кількість видів матеріалів,

Проведені розрахунки зводимо до таблиці 4.14.

Таблиця 4.14 – Витрати на основні матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Одиниця виміру	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витраченого матеріалу, грн.
1.Припій ПОС-61	Кг	459,00	0,015	6,89
2.Сплав Rose	Кг	122,00	0,011	1,34
3.Лак УР-231	Кг	148,00	0,05	7,40
4.Склотекстоліт	Кг	116,00	0,01	1,16
5.Спирт технічний	Кг	32,00	0,05	1,60
6.Полікор	кг	85,00	0,04	3,40
7.Клей	кг	130,00	0,006	0,78
8.Полістирол	Кг	32,00	0,15	4,80
9.Термопластик	Кг	163,00	0,03	4,89
Всього				32,26

Вартість основних матеріалів з урахуванням транспортних витрат складає

$$M = 32,26 \cdot 1,1 = 35,48 \text{ (грн.)}$$

Витрати на комплектуючі, що були використані на виготовлення приладу, розраховуються за формулою



$$H = \sum_1^n H_i \cdot C_i \cdot K_i, \quad (4.14)$$

де:  $H_i$  — кількість комплектуючих  $i$ -го виду, шт.;

$C_i$  — покупна ціна комплектуючих  $i$ -го виду, грн.;

$K_i$  - коефіцієнт транспортних витрат,  $K_i = 1,1$ ;

$n$  - кількість видів матеріалів.

Проведені розрахунки зводимо до таблиці 4.15.

Таблиця 4.15 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн.	Сума, грн.
Конденсатори			
SMD 0805	15	4,30	64,50
SMD AVX B, C, D	5	9,50	47,50
Резистори			
SMD 0805	27	0,85	22,95
Дросель SMD	2	12,30	24,60
Кварцовий резонатор			
50МГц	1	16,20	16,20
Відладочна плата			
CPLD EPM1270	1	560,00	560,00
Транзистори			
BF998	3	4,65	13,95
BC857	3	1,25	3,75
Разом прибл.			753,45

Витрати на комплектуючі з урахуванням транспортних витрат складають

$$H = 753,45 \cdot 1,10 = 828,80 \text{ (грн.)}$$

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ), що здійснюють виготовлення пристрою, складання та попереднє налагодження, розраховуються на основі норм часу, які необхідні для виконання даної роботи, за формулою [59]

$$Z_p = \sum_1^n t_i \cdot C_i \cdot K_c, \quad (4.15)$$

де  $t_i$  - норма часу (трудомісткість) на виконання конкретної роботи, годин;

$n$  - число робіт по видах та розрядах;

$K_c$  - коефіцієнт співвідношень, який установлений в даний час Генеральною тарифною угодою між Урядом України і профспілками,  $K_c = 1,75$ ;

$C_i$  - погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує відповідну роботу, грн./год.

$C_i$  визначається за формулою

$$C_i = \frac{M_n \cdot K_i}{T_p \cdot T_{зм}}, \quad (4.16)$$

де,  $M_n$  – прожитковий мінімум для працездатної особи, грн.,  $M_n = 2197,00$  грн.;

$K_i$  – тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду;

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

$T_{зм}$  – тривалість зміни,  $T_{зм} = 8$  годин.

Проведені розрахунки заносимо до таблиці 4.16.

Таблиця 4.16 – Витрати на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Трудомісткість, нормо-годин	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн.	Величина оплати, грн.
технічний контроль монтажу та складання;	0,5	5	1,7	37,14	18,57
захист виробу від дії навколишнього середовища;	0,4	6	2	43,69	17,48
технологічне тренування виробу;	0,8	6	2	43,69	34,95
налагодження виробу;	1	7	2,2	48,06	48,06
випробування виробу;	0,6	7	2,2	48,06	28,84
вихідний контроль	0,6	6	2	43,69	26,21
Разом прибл.					174,11

Додаткова заробітна плата робітників, які приймали участь в виготовленні пристрою.

Розраховується як 12% від основної заробітної плати розробників та робітників

$$Z_d = Z_o \cdot 12 / 100\% , \quad (4.17)$$

$$Z_d = 174,11 \cdot 12 / 100 \% = 20,89 \text{ (грн.)}.$$

Нарахування на заробітну плату розробників та робітників.

Згідно діючого законодавства нарахування (ЄСВ) на заробітну плату складають 22 % від суми основної та додаткової заробітної плати.

$$H_z = (Z_o + Z_d) \cdot 22 / 100\% , \quad (4.18)$$

$$H_z = (174,11 + 20,89) \cdot 22 / 100\% = 42,90 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на силову електроенергію розраховуються за формулою

$$V_e = V \cdot P \cdot \Phi \cdot K_n , \quad (4.19)$$

де,  $V$  – вартість 1 кВт-години електроенергії,  $V = 2,91$  грн./кВт –година;

$P$  – встановлена потужність обладнання, кВт.;

$\Phi$  – фактична кількість годин роботи обладнання, годин. ;

$K_n$  – коефіцієнт використання потужності,  $K_n=0,95$ .

Всі проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.17.

Таблиця 4.17– Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Кількість годин роботи обладнання, год.	Встановлена потужність, кВт	Коефіцієнт використання потужності	Величина оплати, грн
Вимірювальний комплекс	1,5	0,32	0,95	1,33
Генератор сигналів	1,2	0,15	0,95	0,50
Осцилограф	1,3	0,15	0,95	0,54
Газоаналізатор	1,25	0,16	0,95	0,55
Монтажне обладнання	1,3	0,82	0,95	2,95
Всього				5,86

Загальновиробничі витрати розраховуються згідно нормативів до основної заробітної плати основних робітників і складають

$$H_{зв} = Z_o \cdot 200 / 100\% , \quad (4.20)$$

$$H_{зв} = 174,11 \cdot 200 / 100\% = 348,21 \text{ (грн.)}$$

Виробнича собівартість одиниці продукції

Виробнича собівартість одиниці продукції визначається як сума всіх попередніх витрат

$$S = 174,11 + 20,89 + 42,90 + 32,26 + 828,80 + 5,86 + 348,21 = 1453,03 \text{ (грн.)}$$

Виробнича собівартість пристрою складає 1453,03 (грн.).

#### 4.2.2 Розрахунок ціни реалізації 0

Визначення можливої ціни реалізації об'єкта розробки здійснюється на підставі аналізу нижньої та верхньої межі ціни.

##### *Нижня межа ціни*

Нижня межа ціни ( $C_{нмр}$ ) захищає інтереси виробника продукції і передбачає, що ціна повинна покрити витрати виробника, які пов'язані з виробництвом та реалізацією продукції, і має забезпечити рівень рентабельності не нижче того, що має підприємство при виробництві вже освоєної продукції.

Ціна реалізації в цьому випадку розраховується за формулою [60]

$$C_{нмр} = S_v \cdot \left(1 + \frac{P}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{w}{100}\right), \quad (4.21)$$

де  $C_{нмр}$  – нижня межа ціни реалізації виробу, грн.;

$S_v$  – виробнича собівартість виробу, грн.;

$P$  – нормативний рівень рентабельності, %, рекомендується приймати  $P=20\dots60\%$ ;

$w$  – ставка податку на додану вартість, %, за станом на 2020 рік,  $w=18\%$ .

Необхідність врахування податку на додану вартість виникає у зв'язку з тим, що коли буде встановлюватись верхня межа ціни, а потім договірна ціна, то ціна базового виробу зазвичай містить цей податок.

$$C_{нмр} = S_е \cdot \left(1 + \frac{P}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{w}{100}\right) = 1453,03 \cdot (1 + 20/100) \cdot (1 + 20/100) = 2092,36 \text{ (грн.)}.$$

### *Верхня межа ціни*

Верхня межа ціни ( $C_{вмр}$ ) захищає інтереси споживача і визначається тією ціною, яку споживач готовий сплатити за продукцію з кращою споживчою якістю.

Параметри якості продукції змінюються у відповідності до показника якості і складає  $B_2 = 2,76$ , а ціна конкурентів на аналогічний продукт складає 2300,00 (грн.).

$$C_{вмр} = C_б \cdot B_n, \quad (4.22)$$

$$C_{вмр} = 2300,00 \cdot 2,76 = 6336,50 \text{ (грн.)}.$$

Договірна ціна ( $C_{дог}$ ) може бути встановлена за домовленістю між виробником і споживачем в інтервалі між нижньою та верхньою лімітними цінами згідно виразу

$$C_{нмр} < C_{дог} < C_{вмр}.$$

З метою забезпечення реалізації продукції договірну ціну приймемо у розмірі 2100,00 грн. Така ціна забезпечить підприємству виробнику покриття витрат і додаткові конкурентні переваги на ринку, зацікавивши споживачів покращеними характеристиками та нижчою ціною в порівнянні з конкурентами.

### 4.2.3 Розрахунок чистого прибутку для виробника від реалізації нового технічного рішення

Розрахунок чистого прибутку для виробника проводиться за формулою

$$\Pi = \left\{ \left[ C_p - \frac{(C_p - MP) \cdot f}{100} - S_b - \frac{q \cdot S_b}{100} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{h}{100} \right] \right\} \cdot N \text{ (грн.)},$$

де:  $C_p$  – ціна реалізації виробу, носія з програмним продуктом тощо, грн.;

$MP$  – вартість матеріальних та інших ресурсів, які були придбані виробником для виготовлення готової продукції; рекомендується приймати:  $MP = (0,4 \div 0,6)C_p$ ;

$S_е$  – виробнича собівартість вибору, носія з програмним продуктом тощо, грн.;

$f$  – зустрічна ставка податку на додану вартість, % . В 2020 р.  $f = 16,67\%$ ;

$h$  – ставка податку на прибуток, %. В 2020 р.  $h = 18\%$ ;

$q$  – норматив, який визначає величину адміністративних витрат, витрат на збут та інші операційні витрати, %; рекомендується приймати  $q = 5 \div 10\%$ .

$N$  – число виробів (носіїв), які планується реалізувати за рік, 750 шт.;

$$\Pi = 2100,00 - (2100,00 - 861,05) \cdot 16,67 / 100\% - 1453,03 - (0,1 \cdot 1453,03) \cdot (1 - 18 / 100) \cdot 750 = 181510,36 \text{ (грн.)}$$

Чистий прибуток для виробника складе 181510,36 (грн.).

#### 4.2.4 Розрахунок терміну окупності витрат для виробника

Розрахуємо термін окупності витрат  $T_o$  ( в роках) для виробника за формулою

$$T_o = \frac{B}{\Pi} \quad (4.23)$$

де  $B$  – кошторис витрат на розробку та дослідження,  $B = 156608,58$  грн.

$\Pi$  – чистий прибуток для виробника протягом одного року  $\Pi = 181510,36$  (грн.).

$$T_o = 156608,58 / 181510,36 = 0,86 \text{ (року)}.$$

Термін окупності складає менше нормативного строку, отже розробку можна вважати економічно вигідною для виробника.

#### 4.2.5 Розрахунок величини експлуатаційних витрат

Розрахунок експлуатаційних витрат у споживача при використанні нової розробки.

Розрахуємо заробітну плату обслуговуючого персоналу за формулою

$$\text{Зобс} = 12 \cdot M \cdot \beta \text{ (грн./рік)}, \quad (4.24)$$

де  $M$  – місячний посадовий оклад інженерно-технічного працівника, грн. Прийmemo 7300,00 грн.

$\beta$  – частка часу, який витрачає фахівець на обслуговування виробу в загальному часі своєї роботи.  $\beta=0,0004$  год.рік.

$$Зобс = 12 \cdot 7300,00 \cdot 0,0004 = 35,04 \text{ (грн. / рік).}$$

Додаткова заробітна плата обслуговуючого персоналу (12% від основної заробітної плати обслуговуючого персоналу)

$$Здод = 35,04 \cdot 12\% / 100\% = 4,20 \text{ (грн. / рік).}$$

Нарахування на заробітну плату обслуговуючого персоналу складає 22% від суми основної та додаткової заробітної плати

$$Зн = 22\% (35,04 + 4,20) = 8,63 \text{ (грн.).} \quad (4.25)$$

Витрати на силову електроенергію

Витрати на силову електроенергію для забезпечення роботи пристрою для дефібриляції розраховуються за формулою

$$V_c = V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi} \text{ [грн./рік]}, \quad (4.26)$$

де  $V$  - вартість 1 кВт-години електроенергії. В 2020 році ця вартість складала  $V = 2,91$  грн./кВт;

$\Pi$  - установлена потужність виробу, кВт;

$\Phi$  - фактична кількість годин роботи виробу за рік, годин;

$K_{\Pi}$  - коефіцієнт використання потужності,  $K_{\Pi} = 1$ .

$$V_c = 2,91 \cdot 0,005 \cdot 400 \cdot 1,0 = 5,82 \text{ (грн./рік).}$$

Амортизаційні відрахування:

Амортизаційні відрахування розраховуються за формулою

$$A_{OB} = \frac{B_A}{T_B}, \quad (4.27)$$

де  $B_A$  – вартість розробки, що амортизується, грн;

$T_B$  – термін корисного використання нової розробки, років;

$$A_{OB} = 2100,00 / 4 = 525,00 \text{ (грн.)}$$

Інші витрати 2% від загальної суми усіх попередніх витрат

$$B_i = (35,04 + 4,20 + 8,63 + 5,82 + 525,00) \cdot 2\% / 100\% = 11,57 \text{ (грн. / рік)}$$

Сума витрат за всіма попередніми статтями дає величину експлуатаційних витрат для даної розробки –  $E_2$

$$E_2 = 35,04 + 4,20 + 8,63 + 5,82 + 525,00 + 11,57 = 590,27 \text{ (грн. / рік)}$$

Експлуатаційні витрати для аналогу складуть приблизно 749,13 грн. на рік. (при ціні виробу в 2300,00 грн. амортизаційні витрати становлять 575,00 грн., а витрати на електроенергію – 116,40 грн., обслуговування – 26,28 грн.)

$$E_1 = 749,13 \text{ (грн.)}$$

### Висновки

При проектуванні виробу були проведені розрахунки витрат на науково-дослідну та дослідно-конструкторську роботу, які склали 156608,58 грн. та визначена виробнича собівартість одиниці нового технічного рішення, яка склала 1453,03 грн., визначений чистий прибуток (181510,36 грн.), який може отримати виробник протягом одного року від реалізації 750 шт. даної розробки. Також був визначений строк окупності витрат для виробника, який складає 0,86 року і є меншим за нормативний.

Отже, можна зробити висновок, що застосування нового виробу для споживача є економічно вигідним, бо споживач отримує економічний ефект від використання в межах 158,86 грн., що підтверджує економічну доцільність нової розробки.



## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Виробнича безпека, що її вивчає охорона праці, має велике значення для трудової діяльності, оскільки саме вона контролює фізичний стан працівника, що не може не позначитись на його здоров'ї, житті, а також результативності роботи в тому числі і у галузі радіоелектроніки.

У цьому розділі проводиться розгляд небезпечних, шкідливих [61] і уражаючих для людини та навколишнього середовища чинників, що утворюються при проведенні дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах. В ньому розглядаються, в тому числі, технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення параметрів витяжної загальнообмінної штучної вентиляції при виділенні шкідливих речовин та надлишків вологи, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження, безпека в надзвичайних ситуаціях.

### 5.1 Виробнича санітарія та гігієна праці

#### 5.1.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони

Визначаємо для приміщення для проведення дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Ia.

Згідно із [62] допустимі показники мікроклімату в робочій зоні для теплого та холодного періодів року приведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Нормовані допустимі параметри мікроклімату в приміщенні

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Ia	21-25	18-26	75	≤0,1
Теплий		22-28	20-30	55 при 28°С	0,1-0,2

Для опромінення менше 25% поверхні тіла працівника, допустима інтенсивність теплового опромінення складає 100 Вт/м<sup>2</sup>.

Повітря робочої зони не повинно містити шкідливих речовин з концентраціями вище гранично допустимих концентрацій (ГДК) у повітрі ро-

бочої зони і підлягає систематичному контролю для запобігання можливості перевищення ГДК, значення яких для роботи з ЕОМ наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин [64]

Назва шкідливої речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>	Агрегатний стан	Клас небезпеки
Бутан	400	Пара	4
Озон	0,1	Пара	4
Оксиди азоту	5	Пара	2
Пил	4	Аерозоль	2

При використанні ЕОМ джерелом забруднення повітря є також іонізація молекул речовин, які містяться в повітрі. Рівні додатних та від'ємних іонів повинні відповідати [64] та приведені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Число іонів у 1 см<sup>3</sup> повітря приміщення при роботі на ЕОМ

Рівні	Мінімально необхідні	Оптимальні	Максимально допустимі
додатній	400	1500-3000	50000
від'ємний	600	3000-5000	50000

Для встановлення необхідних за нормативами показників мікроклімату та складу повітря робочої зони передбачено такі заходи:

- 1) в приміщенні повинна бути встановлена система опалення для холодного і кондиціонування для теплого періодів року;
- 2) застосування вентиляції, яка видаляє забруднення або нагріте повітря з приміщення, а також за допомогою неї контролюється швидкість руху повітря і вологість.

Визначимо параметри витяжної загальнообмінної штучної вентиляції при виділенні шкідливих речовин та надлишків вологи, якщо кількість шкідливих речовин, які виділяються за одиницю часу  $G_{шп} = 2500$  мг/год;  $ГДК = 400$  мг/м<sup>3</sup>. Надмірна волога у приміщенні  $G = 0,7$  кг/год; кількість вологи, що видаляється та потрапляє у приміщення  $d_1 = 0,0022$  кг/м<sup>3</sup>;  $d_2 = 0,0009$  кг/м<sup>3</sup>.

Знаходимо орієнтовну продуктивність вентилятора при виділенні шкідливих речовин за формулою:

$$L_{шп} = \frac{G_{шп}}{(q_1 - q_2)} = \frac{G_{шп}}{0,7ГДК} \text{ [м}^3\text{/год]}, \quad (5.1)$$

де  $G_{\text{вир}}$  – кількість шкідливих речовин, які виділяються за одиницю часу, мг/год;

$q_1, q_2$  – концентрації шкідливих речовин у повітрі, що виводиться та поступає у приміщення ( $q_1 \leq ГДК$ ;  $q_2 \leq 0,3ГДК$ ), мг/м<sup>3</sup>;

$ГДК$  – гранично допустима концентрація шкідливої речовини, мг/м<sup>3</sup>.

Знаходимо орієнтовну продуктивність вентилятора при виділенні надлишків вологи за формулою:

$$L_{\text{НВ}} = \frac{G}{d_1 - d_2} \text{ [м}^3\text{/год]}, \quad (5.2)$$

де  $G$  – надмірна волога у приміщенні, кг/год;

$d_1, d_2$  – кількість вологи, що видаляється та потрапляє у приміщення, кг/м<sup>3</sup>.

Із двох значень продуктивностей вентилятора  $L_{\text{ШР}}$  та  $L_{\text{НВ}}$  за розрахункову приймається найбільша із них

$$L = \max\{L_{\text{ШР}}; L_{\text{НВ}}\} \text{ [м}^3\text{/год]}. \quad (5.3)$$

Потужність електродвигуна вентилятора може бути визначена за формулою:

$$N = \frac{LHK}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_{\text{в}} \eta_{\text{п.п.}}} \text{ [кВт]}, \quad (5.4)$$

де  $L$  – продуктивність вентилятора, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – повний тиск вентилятора, кг/м<sup>2</sup>;

$K$  – коефіцієнт запасу;

$\eta_{\text{в}}, \eta_{\text{п.п}}$  – ККД вентилятора та пасової передачі відповідно (для плоских пасів 0,85...0,9, для клиновидних 0,9...0,95).

Після підстановки відомих значень у формули (5.1, ..., 5.4) отримаємо

$$L_{\text{ШР}} = \frac{2500}{0,7 \cdot 400} = 8,93 \text{ (м}^3\text{/ год)};$$

$$L_{\text{НВ}} = \frac{0,7}{0,0022 - 0,0009} = 538,46 \text{ (м}^3\text{/ год)};$$

$$L = \max\{8,93; 538,46\} = 538,46 \text{ (м}^3\text{/ год)}.$$

За отриманим значенням продуктивності вентилятора вибираємо повний тиск вентилятора  $H = 45 \text{ кг/м}^2$ . Вибираємо коефіцієнт запасу

$K = 1,1 \dots 1,2 = 1,12$ . ККД вентилятора  $\eta_B = 0,6$ . З метою підвищення ККД пасової передачі вибираємо клиновидні паси, для яких  $\eta_{n,n} = 0,9 \dots 0,95 = 0,92$ .

За відомими значення розрахуємо потужність електродвигуна вентилятора за формулою (5.4)

$$N = \frac{538,46 \cdot 45 \cdot 1,12}{3600 \cdot 102 \cdot 0,6 \cdot 0,92} = 0,134 \text{ (кВт)}.$$

За отриманим значенням вибираємо електродвигун типу А0Л112-4 з  $N = 0,18$  кВт,  $n = 1400$  об/хв.

### 5.1.2 Виробниче освітлення

З метою створення гігієнічних раціональних умов на робочих місцях значні вимоги висуваються щодо якісних та кількісних параметрів освітлення. З точки зору задач зорової роботи в приміщенні, в якому проводиться робота з дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах, згідно [63] знаходимо, що вони відповідають IV розряду зорових робіт. Вибираємо контраст об'єкта з фоном – великий, а характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд  $g$ .

Нормовані значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) та мінімальні значення освітленості при штучному освітленні приведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Нормовані значення КПО і мінімальні освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість при штучному освітленні, лк			КПО для бокового освітлення, %	
						комбіноване		загальне	Природного	Суміщеного
						всього	у т. ч. від загального			
Середньої точності	0,5-1	IV	г	великий	середній	300	150	150	1,5	0,9

Оскільки приміщення розташоване у м. Вінниця (2-га група забезпеченості природним світлом), а вікна орієнтовані за азимутом  $270^\circ$ , то для таких обставин КЕО визначатиметься за виразом [64, 65]

$$e_N = e_H m_N [\%], \quad (5.5)$$

де  $e_H$  – табличне значення КЕО для бокового освітлення, %;

$m_N$  – коефіцієнт світлового клімату;

$N$  – порядковий номер групи забезпеченості природним світлом.

Підставляючи відомі значення отримаємо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення:

$$e_{N.б} = 1,5 \cdot 0,85 = 1,28 (\%);$$

$$e_{N.с} = 0,9 \cdot 0,85 = 0,77 (\%).$$

Для встановлення нормованих значень параметрів освітлення передбачено:

1) за недостатнього природного освітлення у світлий час доби доповнення штучним за допомогою люмінесцентних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення;

2) застосування загального штучного освітлення у темний час доби.

### 5.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

Зважаючи на те, що при експлуатації пристроїв крім усього іншого обладнання застосовується устаткування, робота якого генерує шум та вібрацію, потрібно передбачити шумовий та вібраційний захист.

Встановлено, що приміщення, в якому проводиться робота з дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах може містити робочі місця із шумом та вібрацією, що спричиняється рухомими елементами ЕОМ.

З метою запобігання травмуванню працівників від дії шуму він підлягає нормуванню. Основним нормативом стосовно виробничого шуму, що діє в Україні, є [65], згідно з яким допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні шуму на робочих місцях у промислових приміщеннях не мають перевищувати значень, які приведені у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Нормовані рівні звукового тиску та еквівалентні рівні звуку

Рівні звукового тиску в дБ в октавних полосах із середньо-геометричними частотами, Гц									Рівні звуку і еквівалентні рівні звуку, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Норми виробничих вібрацій наведені в таблиці 5.6 для локальної вібрації.

Таблиця 5.6 – Допустимі рівні віброприскорення [66]

Гранично допустимі рівні віброприскорення, дБ, в октавних полосах із середньо-геометричними частотами, Гц								Коректовані рівні віброприскорення, дБА
8	16	31,5	63	125	250	500	1000	
73	73	79	85	91	97	103	109	76

Для забезпечення допустимих показників шуму та вібрації в приміщенні передбачено:

- 1) оздоблення стін спеціальними перфорованими плитами, панелями з метою шумопоглинання;
- 2) контроль рівня шуму та вібрації не менше 1 разу на рік.

#### 5.1.4 Виробничі випромінювання

Величина напруженості електромагнітного поля на робочих місцях з персональними ЕОМ мають не перевищувати граничнодопустимі, які складають 20 кВ/м.

Експозиційна доза рентгенівського випромінювання на відстані 5 см від екрана до корпусу монітора при будь-яких положеннях регулювальних пристроїв не повинні перевищувати  $7,74 \cdot 10^{-12}$  Кл/кг, що відповідає потужності еквівалентної дози 0,1 мБер/год (100 мкР/год) у відповідності до [65].

З метою забезпечення захисту і досягнення нормованих рівнів випромінювань необхідно застосовувати приєкранні фільтри, локальні світлофільтри та інші засоби захисту, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат.

#### 5.2 Технічні рішення щодо промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження

На теперішньому етапі розвитку техніки, автоматизації розробок та досліджень широкого використання на робочому місці набули ЕОМ. Наявність великої кількості прикладних програм сприяє тому, що ЕОМ є основним робочим інструментом інженера в галузі радіотехніки.

### 5.2.1 Безпека щодо організації робочих місць

Оснащені відеодисплейним терміналом робочі місця зобов'язані розташовуватись на відстані не менше як 1,5 м від стіни з віконними прорізами, від інших стін – на віддалі 1 м, одне від одного на відстані не менше як 1,5 м. У випадку розміщення робочих місць потрібно виключити можливість прямого засвічування екрану джерелом природного освітлення. Робоче місце доцільно розташовувати так, щоб природне світло падало на нього збоку, бажано з лівого [66].

Поверхня екрана повинна знаходитись на віддалі 400-700 мм від очей користувача. Висота робочої поверхні столу при виконанні роботи сидячи повинна налаштовуватись у діапазоні 680-800 мм. Робочий стіл повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше як 0,5 м, глибиною на рівні колін не менше 0,45 м та на рівні витягнутої ноги не менше ніж 0,65 м [67].

### 5.2.2 Електробезпека

В середині приміщення, де проводиться робота з дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах, значну увагу потрібно приділити запобіганню небезпеки ураження електричним струмом. Згідно [68] це приміщення відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом через наявність значної (більше 75 %) вологості. Тому безпека експлуатації електрообладнання має гарантуватись рядом заходів, що включають використання ізоляції струмоведучих частин, захисних блокувань, захисного заземлення та ін [69].

### 5.2.3 Пожежна безпека

Згідно [70] приміщення, в якому проводиться робота з дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах, відноситься до категорії пожежної небезпеки В. Це приміщення відноситься до 3-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону.

Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій розглядуваного приміщення наведені в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Мінімальні межі вогнестійкості приміщення [70]

Ступінь вогнестійкості будівлі	Стіни				Колони	Східчасті майданчики	Плити та інші несучі конструкції	Елементи покриття	
	Несучі та східчасті клітки	Самонесучі	Зовнішні несучі	Перегородки				Плити, прогони	Балки, ферми
3	REI 120	REI 60	E 15	EI 15	R 120	R 60	REI 45	не нормується	
	M0	M0	M0	M1	M0	M0	M1		

Примітка. R – втрати несучої здатності; E – втрати цілісності; I – втрати теплоізолювальної спроможності; M – показник здатності будівельної конструкції поширювати вогонь (межа поширення вогню); M0 – межа поширення вогню дорівнює 0 см; M1 –  $M \leq 25$  см – для горизонтальних конструкцій;  $M \leq 40$  см – для вертикальних і похилих конструкцій.

В таблиці 5.8 наведено протипожежні норми проектування будівель і споруд.

Таблиця 5.8 – Протипожежні норми проектування будівель і споруд [73]

Об'єм приміщення, тис. м <sup>3</sup>	Категорія пожежної безпеки	Ступінь вогнестійкості	Відстань, м, для щільності людського потоку в загальному проході, осіб/м <sup>2</sup>			Кількість людей на 1 м ширини евакуаційного виходу	Відстань між будівлями та спорудами, м, при ступені їх вогнестійкості			Найбільша кількість поверхів	Площа поверху в межах пожежного відсіку, м <sup>2</sup> , для кількості поверхів		
			до 1	2-3	4-5		I,II	III	IV,V		1	2	3 і більше
до 15	B	3	100	60	40	110	9	12	15	3	5200	3500	2600



Вибираємо, що приміщення, де проводиться робота з дослідження, має бути оснащено двома вогнегасниками, пожежним щитом, а також ємністю з піском [74].

5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Визначення області працездатності радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Радіовимірювальні параметричні сенсори для визначення вологи в газових середовищах можуть використовуватися як у державних структурах, так і різними приватними компаніями у різних частинах України, тому існує ймовірність впливу на пристрій електромагнітних та іонізуючих випромінювань. Вплив іонізуючого випромінювання на радіоелементи викликає зворотні та незворотні процеси, внаслідок яких може бути порушена робота елементів схеми, що призводить до виходу з ладу приладу.

Надзвичайна ситуація є наслідком сукупності виняткових обставин, що склалися у відповідній зоні в результаті надзвичайної події техногенного, природного, антропогенного та воєнного характеру, а також під впливом можливих надзвичайних умов.

Надзвичайні ситуації, які можуть виникати на території України і здійснювати негативний вплив на функціонування об'єктів економіки та життєдіяльність населення, поділяються за такими основними ознаками:

- за сферою виникнення;
- за галузевою ознакою;
- за масштабами можливих наслідків.

Надзвичайні ситуації особливого періоду бувають з впливом і дією іонізуючих випромінювань, або електромагнітного імпульсу.

При проходженні потоку гамма-опромінення через елементи РЕА, в них виникають вільні носії електричних зарядів, внаслідок переміщення яких виникає хибний імпульс, який може призвести до збою в роботі комп'ютерної системи. Особливо чутливими до радіації елементами є елементи з високим вмістом металів, яким в свою чергу властива висока концентрація вільних носіїв зарядів.

Таким чином радіація в РЕА викликає зворотні і незворотні процеси, внаслідок яких можлива зміна майже всіх електричних та експлуатаційних характеристик, що залежать від проходження процесів іонізації, порушення структури матеріалів, що призводить до пошкодження апаратури.

Під час дії електромагнітного імпульсу (ЕМІ) у тілах, що проводять електричний струм на частку секунди (час дії ЕМІ) виникає імпульс електричного

струму і з'являється різниця потенціалів відносно землі. Під дією цих напруг може відбутись пошкодження РЕА, ліній зв'язку, вихід з ладу запобіжників і т.д.

5.3.1 Визначення області працездатності радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах в умовах дії іонізуючого випромінювання

В приладі використовуються елементи, до складу яких входять матеріали: метали, неорганічні матеріали, напівпровідники та різні органічні сполуки (діелектрики, смоли та інші). Серед цих матеріалів метали найбільш чутливі до радіації, оскільки їм властива висока концентрація вільних носіїв.

Визначаємо потужність експозиційної дози для кожного елемента і знаходимо елемент, який найбільш чуттєвий до дії іонізуючого випромінювання.

Таблиця 5.9 - Стійкість елементів радіовимірювального сенсора до радіації.

№	Блоки елементів	Елементи РЕА	Найменування	$P_{гр.і}$ , р/год	$P_{гр}$ , р/год
1	Основний пристрій	Конденсатори	К50-35, К10-17	$10^5$	$10^4$
		Резистори	С2-23	$10^6$	
		Транзистори	КТ3102А	$10^5$	
		Мікросхеми	FT232RL, АТ24С512	$10^4$	
2	Перетворювач	Діоди	АЛ307	$10^5$	$10^5$
		мікроборка	SNB14	$10^5$	

Аналізуючи дані таблиці 1, визначаємо, що найбільшого впливу зазнають мікросхеми та діелектричні матеріали. В них незворотні дії виникають при рівні  $p_i$ , яка для пристрою в цілому є граничною, отже,  $p_{гран}=10^4$  Рад/с.

В якості критерію стійкості роботи радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах використовують значення рівня радіації гамма-випромінювання, яке розраховується за формулою

$$p'_{гран} = p_{гран} \cdot K_H \cdot K_{носи} [Rad/c], \quad (5.6)$$

де  $p_{гран}$  – межа стійкості роботи приладу, Рад/с;

$K_H$  – коефіцієнт надійності елементної бази,  $K_H = 0,9 \dots 0,95$ ,

приймаємо  $K_H = 0,92$ ;

$K_{\text{посл}}$  – коефіцієнт послаблення радіації, із завдання:  $K_{\text{посл}} = 7$ .

Тоді

$$P'_{\text{гран}} = 10^4 \cdot 0,92 \cdot 7 = 6,44 \cdot 10^4 \text{ (Paд/c)}.$$

Визначимо допустимий час роботи РЕА в заданих умовах

$$t_{\text{доп}} = \frac{D_{\text{сп}} \cdot K_{\text{посл}} + 2P_1 \cdot \sqrt{t_n}}{2P_1} \quad (5.7)$$

$$t_{\text{доп}} = \frac{10^4 \cdot 7 + 2 \cdot 17,8 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 17,8} = 1967,292 \text{ год}$$

5.4 Дослідження області працездатності радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах в умовах дії електромагнітного імпульсу

За критерій стійкості роботи радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах в умовах дії електромагнітного імпульсу можна прийняти коефіцієнт безпеки, який визначається за формулою

$$K_B = 20 \cdot \lg \frac{U_\delta}{U_\Gamma} \geq 40 \text{ дБ}, \quad (5.8)$$

де  $U_\Gamma$  – напруга наведення за рахунок електромагнітних випромінювань горизонтальних струмопровідних частин плати, В;

$U_\delta$  – допустиме коливання напруги живлення, В.

Визначаємо допустиме коливання напруги живлення

$$U_\delta = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{ж}}}{100} \cdot \Delta \quad (5.9)$$

де  $U_{\text{ж}}$  – напруга живлення приладу ( $U_{\text{ж}} = 30\text{В}$ );

$N$  – допустиме коливання напруги живлення ( $N = \pm 5\%$ ).

$$U_\delta = 30 + \frac{30}{100} \cdot 5 = 31,5 \text{ (В)}.$$

Плата системи розташована в горизонтальній площині. Визначимо максимальну очікувану напругу в горизонтальних лініях з рівності

$$20 \cdot \lg \frac{U_\delta}{U_\Gamma} = 40 \quad (5.10)$$

$$U_\Gamma = \frac{U_\delta}{100} [B], \quad (5.11)$$

$$U_\Gamma = \frac{31,5}{100} = 0,315 (B).$$

Вертикальна складова напруженості електричного поля визначається як

$$U_\Gamma = E_B \cdot l_\Gamma, \quad (5.12)$$

звідки

$$E_B = \frac{U_\Gamma}{l_\Gamma} [B / м], \quad (5.13)$$

де  $l_\Gamma$  – максимальна довжина горизонтального контуру електричної схеми

$$м (l_\Gamma = 0,261 м).$$

$$E_B = \frac{0,619}{0,261} = 2,37 (B / м).$$

Згідно з розрахунками радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах здатні працювати в умовах дії електромагнітного імпульсу при напруженості вертикальної складової електричного поля  $E_B \leq 2,37$  В/м.

На підставі виконаних розрахунків можна зробити висновок про те, що дана радіовимірювальні параметричні сенсори здатні стійко працювати в середині будівлі, яка має коефіцієнт послаблення радіації не менше 6, в умовах дії іонізуючого випромінювання при потужності дози випромінювання до 64400 Рад / с.

Також в даному розділі було визначено область працездатності радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах в умовах дії загрозливих чинників НС та в умовах дії іонізуючого випромінювання. Визначено потужність експозиційної дози для кожного елементу, яка в цілому для пристроїв є граничною і складає:  $p_{гран} = 10^4$  Рад/с.

## Висновки до розділу

В результаті виконання даного розділу було розглянуто такі питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення параметрів витяжної загальнообмінної штучної вентиляції при виділенні шкідливих речовин та надлишків вологи, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах, безпека у надзвичайних ситуаціях.

## ВИСНОВКИ

Аналіз публікацій, присвячених теоретичним і експериментальним дослідженням параметричних сенсорів вологості показує, що розробка радіовимірювальних параметричних сенсорів вологості є перспективним напрямком у розвитку засобів вимірювання вологості для сучасних мікропроцесорних систем радіоконтролю і радіокерування. Такі параметричні сенсори вологості представляють високі метрологічні показники поряд з тенденцією до мінітюаризації, можливістю їх інтелектуалізації на основі конструктивної та технологічної сумісності з цифровими пристроями обробки вимірюваної інформації.

Аналіз сучасного рівня розробок конструкцій параметричних сенсорів вологості дозволив визначити можливі шляхи поліпшення їх параметрів: чутливості, температурної стабільності, стабільності електричних характеристик сенсорів, надійності, собівартості тощо.

Розроблено радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах на основі біполярно–польової транзисторної структури з ємнісними елементами, який реалізує принцип перетворення «вологість – частота». На основі еквівалентної високочастотної нелінійної схеми радіовимірювального параметричного сенсора для визначення вологи в газових середовищах отримано аналітичні вирази функції перетворення та рівняння чутливості. Проведено дослідження електричних параметрів радіовимірювального параметричного сенсора вологості та розраховано їх теоретичні залежності.

Проведені експериментальні дослідження радіовимірювального параметричного сенсора для визначення вологи в газових середовищах з чутливими до вологи конденсаторами: P14 Rapid (WIRED) фірми Innovative sensor technology, в діапазоні вимірювання вологості  $W = 1 \div 100\%$  складає 1040 Гц/%; P14 Rapid (SMD) фірми Innovative sensor technology, в тому ж діапазоні вимірювання вологості  $W$  складає 944 Гц/%; HCH-1000 фірми Honeywell, в діапазоні вимірювання вологості  $W = 0 \div 100\%$  складає 689 Гц/%; МДН-конденсатором НДІ «Гелій», в діапазоні вимірювання вологості  $W = 18 \div 99\%$  складає 3500 Гц/%.

Експериментально доведено, що фізико-хімічні властивості чутливого до вологи шару ємнісного елемента суттєво впливають на чутливість радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами. В діапазоні вологості  $18 \div 99\%$  найчутливішим є радіовимірювальний параметричний сенсор з вологочутливим МДН конденсатором, виготовленим на основі аморфного кремнію, середнє значення чутливості якого складає 3500 Гц/%.

Аналіз проведених теоретичних і експериментальних досліджень показав, що математична модель описує поведінку радіовимірювального параметричного сенсора вологи в газових середовищах з чутливим до вологи ємнісними елементами з похибкою  $\pm 1,3\%$ .

Розроблено схемотехнічне рішення системи вимірювання вологості на програмованій логічній інтегральній мікросхемі EPM1270 на основі CPLD MAX II фірми ALTERA.

В економічній частині при проектуванні виробу були проведені розрахунки витрат на науково-дослідну та дослідно-конструкторську роботу, які склали 156608,58 грн. та визначена виробнича собівартість одиниці нового технічного рішення, яка склала 1453,03 грн., визначений чистий прибуток (181510,36 грн.), який може отримати виробник протягом одного року від реалізації 750 шт. даної розробки. Також був визначений строк окупності витрат для виробника, який складає 0,86 року і є меншим за нормативний.

Отже, можна зробити висновок, що застосування нового виробу для споживача є економічно вигідним, бо споживач отримує економічний ефект від використання в межах 158,86 грн., що підтверджує економічну доцільність нової розробки.

В розділу охрони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях було розглянуто такі питання, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення параметрів витяжної загальнообмінної штучної вентиляції при виділенні шкідливих речовин та надлишків вологи, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення дослідження радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах, безпека у надзвичайних ситуаціях.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Аш Ж. Сенсоры измерительных систем. В 2 – х книгах. – М.: Мир, 1992. – 424 с.
2. Подлепецкий Б.И., Симаков А.Б. Микроэлектронные сенсоры влажности // Сборник обзоров. Зарубежная электронная техника.– 987.- №2(309). – С.64 - 97.
3. Бабаян Р.Р. Преобразователи неэлектрических величин с частотным выходом // Приборы и системы управления. – 1996. - №11. – С. 24 – 26.
4. Крутоверцев С.А., Тарасова А.Е., Сорокин С.И., Зорин А.В. Микроэлектронные сенсоры для контроля влажности // Электронная промышленность. – 1991. - №5. – С. 31 – 32.
5. Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon, Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review, Sensors, 14, 7881–79390, (2014).
6. Цветков Ю.Н., Гусейнов А.Б. Термоэлектрический датчик влажности воздуха // Изв. вузов. Приборостроение. – 2000. – Т. 43, №5. – С. 39 – 40.
7. Виглеб Г. Сенсоры: Пер. с нем. – М.: Мир, 1989. – 196 с.
8. Бутурлин А.И., Крутоверцев С.А., Чистяков Ю.Д. Микроэлектронные сенсоры влажности // Сборник обзоров. Зарубежная электронная техника. – 1984. - № 9. – С. 3 – 54.
9. Ashis Tripathy, Sumit Pramanik, Ayan Manna, Satyanarayan Bhuyan, Nabila Farhana Azrin Shah, Zamri Radzi, Noor Azuan Abu Osman, Design and Development for Capacitive Humidity Sensor Applications of Lead-Free Ca,Mg,Fe,Ti-Oxides-Based Electro-Ceramics with Improved Sensing Properties via Physisorption, Sensors,16, 1135, (2016).
10. Mario Pelino, Carlo Cantalini, Principles and applications of ceramic humidity sensors, Active and Passive Elec. Comp. 16, 69–87, (1994).
11. Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder, CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor, Journal of microelectromechanical system, 19, 1, 183–191, (february 2010).
12. Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti, Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nano-porous Polymer Membranes, Appeared in Sensors and Actuators B: Chemical, 114, 1, 254–262, (30 March 2006).
13. А. И. Бутурлин, С. А. Крутоверцев, Ю. Д. Чистяков, Микроэлектронные сенсоры влажности, Сборник обзоров. Зарубежная электронная техника, 9, 3–54, (1984).
14. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. –М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
15. Осадчук В. С. Сенсоры тиску і магнітного поля / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. –



- Вінниця: «УНІВЕРСУМ–Вінниця», 2005. – 207 с.
16. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / За ред. З. Ю. Готри. – Львів: Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
  17. Schaumburg H. Sensoren / Schaumburg H. – Stuttgart: B.G.Teubner. 1992. -517p.
  18. А. Маргелов, Сенсори вологості компанії Honeywell, Chip News, 8(101), 40 – 42, (2005).
  19. М. Виноградов, Емкостные сенсори вологості фірми IST AG, Компоненты и технологии, 1, 22–24, (2011).
  20. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем: монографія, Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 275, 1999.
  21. О. В. Осадчук, Мікроелектронні частотні сенсори на основі транзисторних структур з від’ємним опором: монографія, Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 303, 2000.
  22. В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, Сенсори вологості: монографія, Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 208, 203.
  23. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від’ємним опором : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2009. 184 с. ISBN 978-966-641-315-7
  24. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Семенов А. О., Коваль К. О. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2011. 336 с. ISBN 978-966-641-405-5.
  25. Осадчук О. В., Семенов А. О., Савицький А. Ю., Звягін О. С. Оброблення результатів вимірювання фази періодичних сигналів автогенераторних перетворювачів фізичних величин. Вісник ВПІ. – 2019. – №1. – С. 86-91. DOI:
  26. А. А. Каяцкас, Основы радиоэлектроники, М.: Высшая школа, 464, 1988.
  27. Белов А.Б. Конструирование устройств на микроконтроллерах / Наука и Техника, 2005. - 255 с.
  28. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. The Pontial of Modern Sciense. Chapters. Microelectronic frequency transducers of the magnetic field based on semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 3. Published by Sciemcee Pablishing.LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. –P.212-237. ISBN 978-1-9993071-3-4
  29. Осадчук А.В., Осадчук Я.О. Глобализация современных научных исследований 2019 : монографія. ГЛАВА 3. DOI:10.21893/978-5-6042828-5-4.0-007. Радиоизмерительные частотные параметрические преобразователи давления с тензочувствительными биполярными и полевыми транзисторами. – Иваново: Научный мир, 2019. –168 с. : ил., табл. –С.27- 41. ISBN 978-5-6042828-5-4

30. Capone, S. et al. Solid state gas sensors: state of the art and future activities. *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 5, 1335–1348 (2003).
31. Korotcenkov, G. Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice *Mater. Sci. Eng. B* 139, 1–23 (2007).
32. Kuang, Q., Lao, C., Wang, Z. L., Xie, Z. & Zheng, L. High-sensitivity humidity sensor based on a single SnO<sub>2</sub> nanowire. *J. Am. Chem. Soc.* 129, 6070–6071 (2007).
33. Kong, J. et al. Nanotube molecular wires as chemical sensors. *Science* 287, 622–625 (2000).
34. Zhou, X. T. et al. Silicon nanowires as chemical sensors. *Chem. Phys. Lett.* 369, 220–224 (2003).
35. Wang, Y., Jiang, X. & Xia, Y. A solution-phase, precursor route to polycrystalline SnO<sub>2</sub> nanowires that can be used for gas sensing under ambient conditions. *J. Am. Chem. Soc.* 125, 16176–16177 (2003).
36. Basu, S. & Bhattacharyya, P. Recent developments on graphene and graphene oxide based solid state gas sensors. *Sens. Actuators B Chem.* 173, 1–21 (2012).
37. Ratinac, K. R., Yang, W., Ringer, S. P. & Braet, F. Toward Ubiquitous Environmental Gas Sensors Capitalizing on the Promise of Graphene. *Environ. Sci. Technol.* 44, 1167–1176 (2010).
38. Yuan, W. & Shi, G. Graphene-based gas sensors. *J. Mater. Chem. A* 1, 10078–10091 (2013).
39. Zhou, Y., Jiang, Y., Xie, T., Tai, H. & Xie, G. A novel sensing mechanism for resistive gas sensors based on layered reduced graphene oxide thin films at room temperature. *Sens. Actuators B Chem.* 203, 135–142 (2014).
40. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. Modern world tendencies in the development of science. Chapters 19. Gas concentration transducers with frequency output signal based on reactive properties of semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 2. Published by Sciecee Publishing. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. –308 p. –P.271-285. ISBN 978-1-9993071-4-1
41. Alexander Osadchuk, Vladimir Osadchuk, Olena Seletska, Lyudmila Krylik. Microelectronic Transducer of Gas Concentration based on MOSFET with an Active Inductive Element // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 95 NR 4/2019. –P.237-241. Doi:10.15199/48.2019.04.45
42. Hu, X.; Gong, J.; Zhang, L.; Yu, J.C. Continuous Size Tuning of Monodisperse ZnO Colloidal Nanocrystal Clusters by a Microwave-Polyol Process and Their Application for Humidity Sensing. *Adv. Mater.* 2008, 20, 4845–4850.

43. Rezlescu, N.; Doroftei, C.; Popa, P.D. Humidity-Sensitive Electrical Resistivity of MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and Mg<sub>0.9</sub>Sn<sub>0.1</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Porous Ceramics. *Rom. J. Phys.* 2007, 52, 353–360.
44. Qiu, Y.; Yang, S. ZnO Nanotetrapods: Controlled Vapor-Phase Synthesis and Application for Humidity Sensing. *Adv. Funct. Mater.* 2007, 17, 1345–1352.
45. Shimizu, Y.; Okada, H.; Arai, H. Humidity-Sensitive Characteristics of Porous La-Ti-V-O Glass-Ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.* 1989, 72, 436–440.
46. Rezlescu, N.; Rezlescu, E.; Tudorache, F.; Popa, P.D. MgCu Nanocrystalline Ceramic with La<sup>3+</sup> and Y<sup>3+</sup> Ionic Substitutions Used as Humidity Sensor. *J. Optoelectron. Adv. Mater.* 2004, 6, 695 – 698.
47. Heitjans, P.; Indris, S. Diffusion and Ionic Conduction in Nanocrystalline Ceramics. *J. Phys. Condens. Matter* 2003, 15, R1257–R1289.
48. Traversa, E.; Sadaoka, Y.; Carotta, M.C.; Martinelli, G. Environmental Monitoring Field Tests Using Screen-Printed Thick-Film Sensors Based on Semiconducting Oxides. *Sens. Actuators B Chem.* 2000, 65, 181–185.
49. Kunte, G.V.; Shivashankar, S.A.; Umarji, A.M. Humidity Sensing Characteristics of Hydrotungstite Thin Films. *Bull. Mater. Sci.* 2009, 31, 835–839.
50. Mamishev, A.V.; Sundara-Rajan, K.; Zahn, M. Interdigital Sensors and Transducers. *Proc. IEEE* 2004, 92, 808–845.
51. Alexander V. Osadchuk, Neonila I. Osadchuk, Iaroslav A. Osadchuk, Olena O. Seletska, Oleksandr V. Kobylanskyi, Paweł Komada, and Yedilkhan Amirgaliyev. The mathematical model of frequency gas transducer based on transistor structure with NDR for diagnosis of helicobacter pylori strains // Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019, 111762T (6 November 2019); –P.1-8
52. Alexander V. Osadchuk, Vladimir S. Osadchuk, Iaroslav O. Osadchuk, Volodymyr V. Bogachuk, Olena O. Seletska, Mariusz Duk, and Saule Smailova. Development and research of a radio measuring device with a frequency output signal based on a pyroelectric primary converter// Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019, 1117611 (6 November 2019); –P. 1-10.
53. Alexander V. Osadchuk, Vladimir S. Osadchuk, Iaroslav A. Osadchuk, Olena O. Seletska, Piotr Kisała, and Karlygash Nurseitova. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors// Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019, 111761I (6 November 2019); –P.1-12.
54. Осадчук О. В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Математична модель газореактивного ефекту в напівпровідникових сенсорах газу // Вісник Хмельницького

- Національного університету. Серія: Технічні науки. Хмельницький, 2019, № 2 (271). –С. 160-166. DOI 10.31891/2307-5732-2019-271-2-160-166
- 55.Осадчук О.В., Осадчук Н.І., Осадчук Я.О.Частотний перетворювач газу на основі транзисторної структури з NDR для діагностики штамів бактерії *Helicobacter Pylori* // Вісник університету "Україна". Серія: "Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика", №1(22) 2019. –С.68-79.
- 56.Осадчук О. В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Вплив газореактивного ефекту первинних напівпровідникових сенсорів газу на вихідну частоту автогенераторних перетворювачів // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 30 (69). №3. Частина 2., 2019. –С.223-227.
- 57.Осадчук О. В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Вплив ємності просторового заряду на газореактивний ефект в напівпровідникових сенсорах газу // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2019. №4. – С.41-48.
58. Методичні вказівки до виконання студентами-магістрантами наукового напрямку економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. В.О. Козловський – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 22 с.
- 59.Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – Вінниця : ВДТУ, 2003. – 75с.
- 60.Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепа – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.
- 61.ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
- 62.ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
- 63.ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
- 64.Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
- 65.ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
- 66.ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
- 67.ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
- 68.Березюк О. В. Охорона праці. Підсумкова державна атестація спеціалістів, магістрів в галузях електроніки, радіотехніки, радіоелектронних апаратів та зв'язку : навчальний посібник / О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 104 с.

- 69.ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 382 с.
- 70.ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
- 71.ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
- 72.НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.
- 73.СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.
- 74.Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97), МОЗ України. – К., 1997.

Додаток А  
(обов'язковий)  
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри РТ ВНТУ,  
докт.техн.наук, професор  
О.В. Осадчук  
” 26 ” 09 2020 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ  
на виконання магістерської кваліфікаційної роботи  
**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ  
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВОЛОГИ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**  
08-36.МКР.016.00.000 ТЗ

Керівник роботи  
д.т.н., проф. каф. РТ  
Осадчук В.С.

Виконавець: ст. гр. РТ-19м  
Смердов А.О.

Вінниця-2020

## 1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету № 214 “25 ” 09 2020 року та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: “03” вересня 2020 р.

Дата закінчення: “10” грудня 2020 р.

## 2. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

**Мета і завдання дослідження магістерської кваліфікаційної роботи.**

*Метою роботи* є покращення характеристик та параметрів радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи для визначення вологи в газових середовищах технологічно сумісних з інтегральною технологією за рахунок перетворення вологи в частотний вихідний сигнал.

*Об’єктом дослідження* є процес перетворення вологи у частотний вихідний сигнал у радіовимірювальних параметричних сенсорів для визначення вологи в газових середовищах, що породжує задачу розбудови радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи з покращеними характеристиками та параметрами.

*Предмет дослідження* – характеристики та параметри радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи для визначення вологи в газових середовищах на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним диференційним опором.

**Для досягнення поставленої мети у магістерській кваліфікаційній роботі розв’язуються такі задачі:**

- проаналізувати існуючі параметричні сенсори вологи та обґрунтувати переваги радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи на основі транзисторних структур з від’ємним диференційним опором по відношенню до існуючих;

- розробити математичну модель радіовимірювального параметричного сенсора вологи на основі біполярно–польової транзисторної структури з врахуванням впливу вологи на чутливі ємнісні елементи та експериментально дослідити їх характеристики;

- виконати експериментальну перевірку залежностей електричних параметрів та характеристик розробленої математичної моделі радіовимірювального параметричного сенсора від дії вологи та дослідити їх електричні параметри;

- розробити схемне рішення системи вимірювання вологості на програмованій логічній інтегральній мікросхемі EPM1270 на основі CPLD MAX II фірми ALTERA.

**Методи дослідження** ґрунтуються на використанні: диференціального та інтегрального числення для створення математичної моделі; рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи; теорії функції комплексної змінної для визначення функцій перетворення та чутливості; теорії розрахунку нелінійних електричних кіл для визначення імпедансу радіовимірювальних параметричних сенсорів вологи.

### 3 ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

1. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. –Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1999. – 275с.
2. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні сенсори на основі транзисторних структур з від’ємним опором. –Вінниця:«УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2000.– 303с.
3. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник. –М.: Радио и связь, 1991. –528 с.
4. Аш Ж. Сенсоры измерительных систем. В 2 – х книгах. – М.: Мир, 1992. – 424 с.
5. Подлепецкий Б.И., Симаков А.Б. Микроэлектронные сенсоры влажности // Сборник обзоров. Зарубежная электронная техника.– 987.- №2(309). – С.64 - 97.
6. Бабаян Р.Р. Преобразователи неэлектрических величин с частотным выходом // Приборы и системы управления. – 1996. - №11. – С. 24 – 26.
7. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 1. / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 196 с.
8. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 2 / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 184 с.
9. Козловський В. О. Інноваційний менеджмент : Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 210 с.
- 10.ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
- 11.ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
- 12.Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.
- 13.ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
- 14.ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об’єктів будівництва.



#### 4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра радіотехніки,  
студент групи РТ-19м Смердов А. О.

#### 5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Основними вимогами є:

- удосконалення методу вимірювання вологи;
- розробка аналітичних виразів для розрахунку параметрів вимірювання вологи;
- удосконалення математичної моделі розрахунку радіовимірювальних параметричних сенсорів вологості.

##### *Технічні вимоги*

- Напруга живлення радіовимірювального параметричного сенсора вологості – 5 В;
- струм споживання 0,5...5 мА;
- Напруга живлення вузлів радіовимірювального параметричного сенсора вологості + 3,5...5,5 В;
- Споживана потужність – 0,15 Вт;
- Частота генерації – 100...3600 кГц;
- Діапазон вимірювання вологості – 0...100 %;

##### *Кліматичні умови*

- Забезпечити стабільну роботу параметричний сенсора за умов його експлуатації в температурному діапазоні 20°C...+80 °C.

##### *Конструктивні вимоги*

- Радіовимірювальний параметричний перетворювач вологості виконується у вигляді окремого функціонального блоку, та з'єднується за допомогою роз'ємів з іншими пристроями.

- Маса радіовимірювального параметричного сенсора вологості не повинна перевищувати – 0,1 кг.

- Час напрацювання на відмову не менше 5000 год. Для збільшення середнього часу напрацювання на відмову необхідно використати комплектуючі з малою інтенсивністю відмови, а також зменшити загальну кількість окремих елементів

- Тип виробництва – багатосерійне.

## 6. ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	03.09.2020	14.09.2020	Проведено огляд літературних джерел. Вибрана тема	Узгодження теми МКР по кафедрі
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	15.09.2020	21.09.2020	Аналіз літературних джерел. Підготовлений матеріал основних розділів	Вступ
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	21.09.2020	25.09.2020	Розроблене ТЗ	Наказ ВНТУ про затвердження теми Додаток А
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	26.09. 2020	09.10. 2020	Проведений аналіз. Розроблені схеми пристрою	Вступ Розділ 1-2 Звіт по переддипломній практиці
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	10.10.2020	25.10. 2020	Проведені розрахунки та дослідження	Розділ 3
6.	Розділ моделювання	26.10. 2020	04.11. 2020	Проведено моделювання	Результати моделювання
7.	Розробка графічної частини МКР	05.11. 2020	15.11. 2020	Плакати. Структурні та електричні схеми	Графічна частина
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	16.11. 2020	19.11. 2020	Економічна частина	Розділ 4
9.	Охорона праці (ОП)	19.11. 2020	22.11. 2020	Частина БЖД	Розділ 5
10	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11. 2020	29.11. 2020	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
11	Нормоконтроль	30.11. 2020	01.12. 2020	Підпис нормоконтроля	Оформлена ПЗ та графічна частина
12	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12. 2020	04.12. 2020	Позитивні відзиви	Відзив. Рецензія
13	Захист МКР ЕК	11.12. 2020	14.12. 2020	Позитивний захист	Протокол ЕК

## 7. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи будуть розроблені:

- принципова схема радіовимірювального параметричного сенсора вологості;
- математична модель радіовимірювального параметричного сенсора вологості;
- функція перетворення та рівняння чутливості радіовимірювального параметричного сенсора вологості;
- експериментальні дослідження радіовимірювального параметричного сенсора вологості;
- розділ безпеки життєдіяльності;
- розділ економіки.

## 8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬСЯ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

## 9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ІІ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист бакалаврської дипломної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

## 10. ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

- нову структуру радіовимірювального параметричного сенсора вологості;
- нову принципову електричну схему радіовимірювального параметричного сенсора вологості;
- схемотехнічне рішення системи вимірювання вологи на ПЛІС.

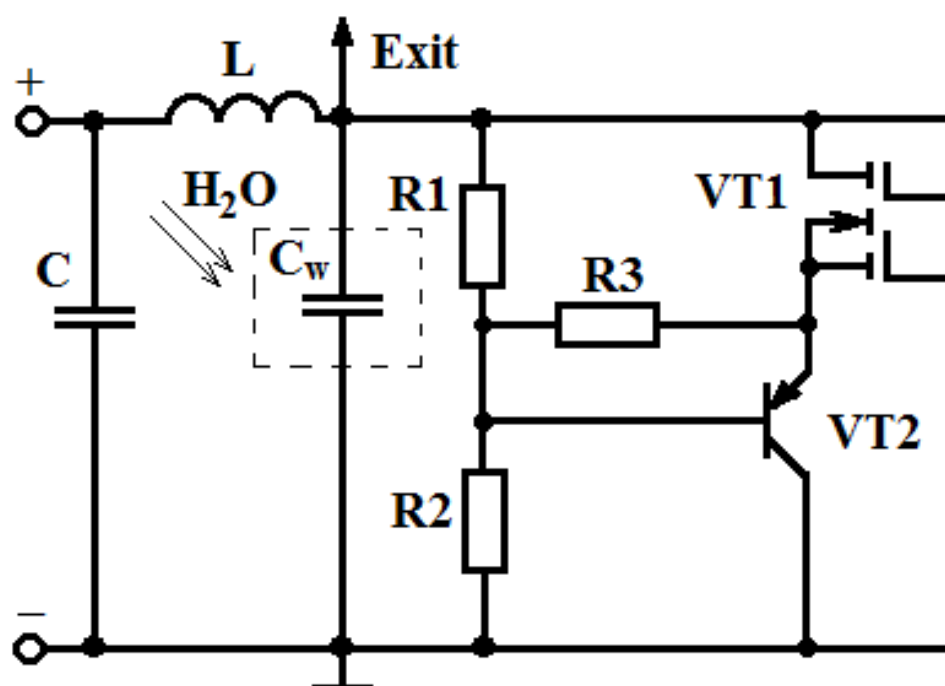
## 11. ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

Додаток Б  
(обов'язковий)

**РАДІОВІМІРЮВАЛЬНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ ДЛЯ ВИЗНА-  
ЧЕННЯ ВОЛОГИ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

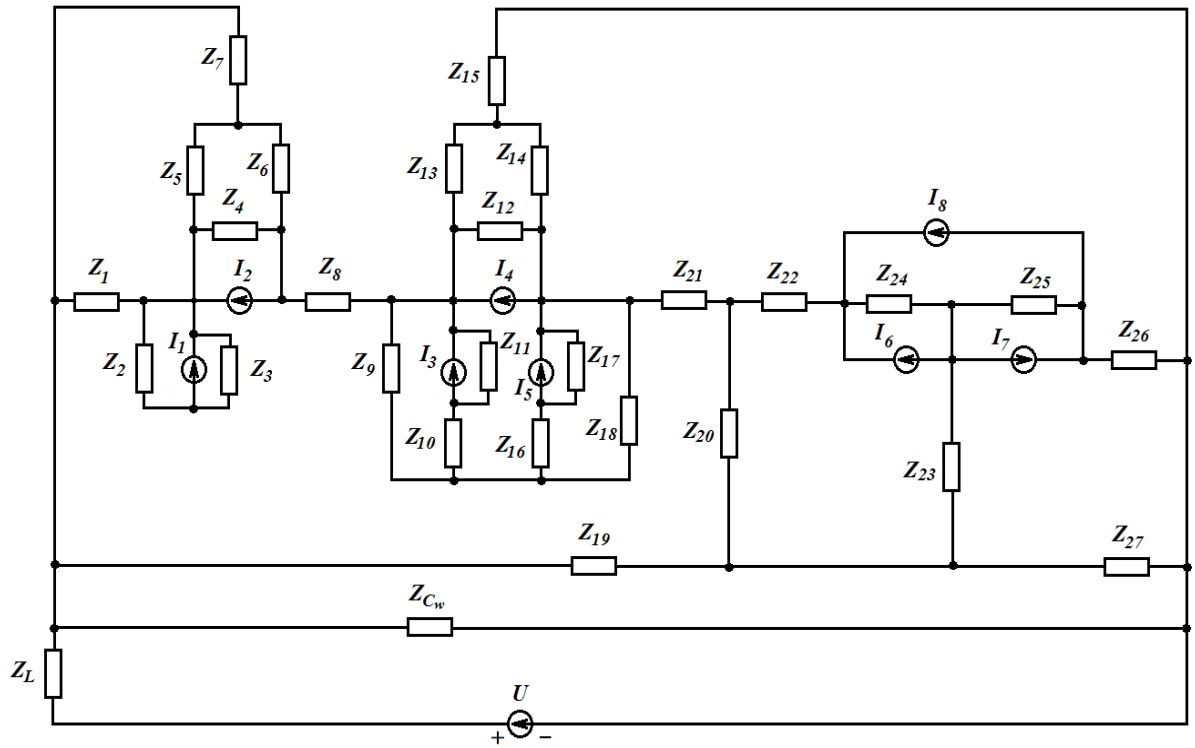
Радіовимірювальний  
параметричний сенсор вологи з вологочутливими  
ємнісними елементами  
Схема електрична принципова



Додаток В  
(обов'язковий)

**РАДІОВІМІРЮВАЛЬНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ ДЛЯ ВИЗНА-  
ЧЕННЯ ВОЛОГИ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

Радіовимірювальний параметричний сенсор вологи в газових середовищах з чу-  
тливим до вологи ємнісними елементами  
Схема еквівалентна нелінійна

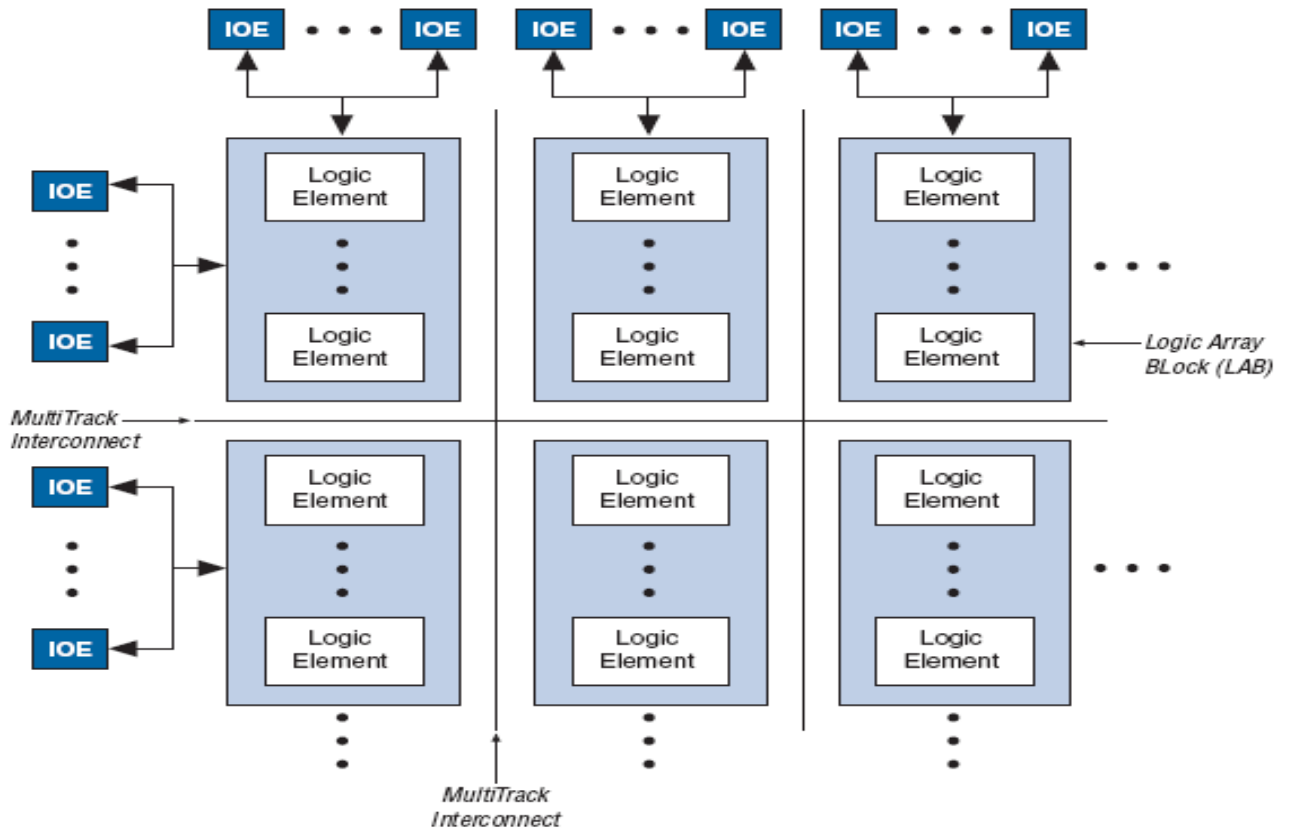


Додаток Д  
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ ДЛЯ ВИЗНА-  
ЧЕННЯ ВОЛОГИ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

Блок-схема мікросхеми CPLD сімейства MAX II

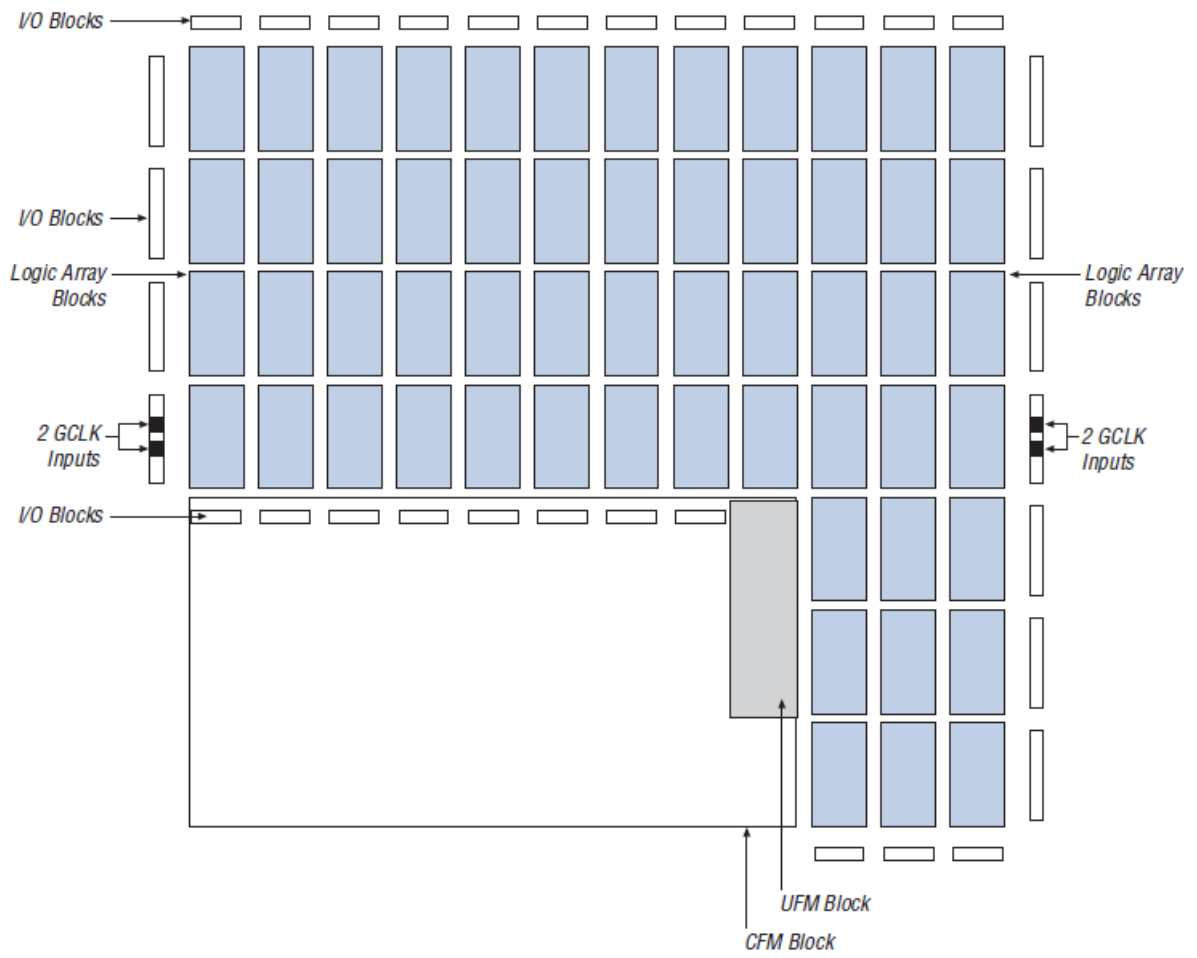




Додаток Е  
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ ДЛЯ ВИЗНА-  
ЧЕННЯ ВОЛОГИ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

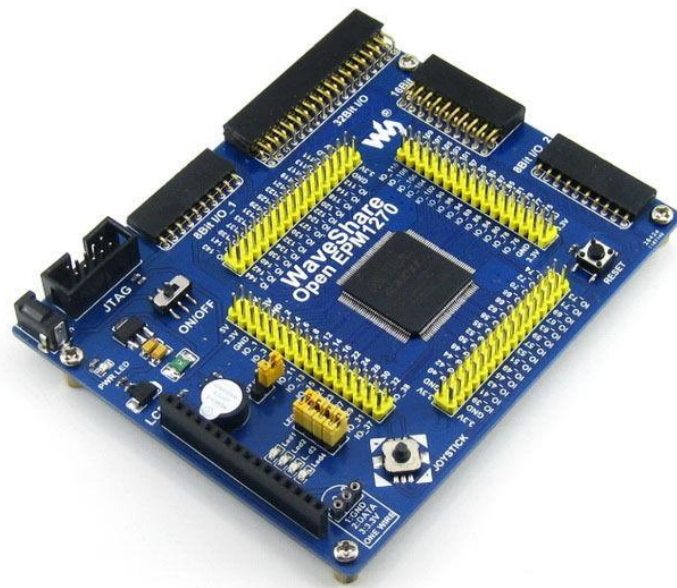
Архітектурний план CPLD MAX II



Додаток Ж  
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ ДЛЯ ВИЗНА-  
ЧЕННЯ ВОЛОГИ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

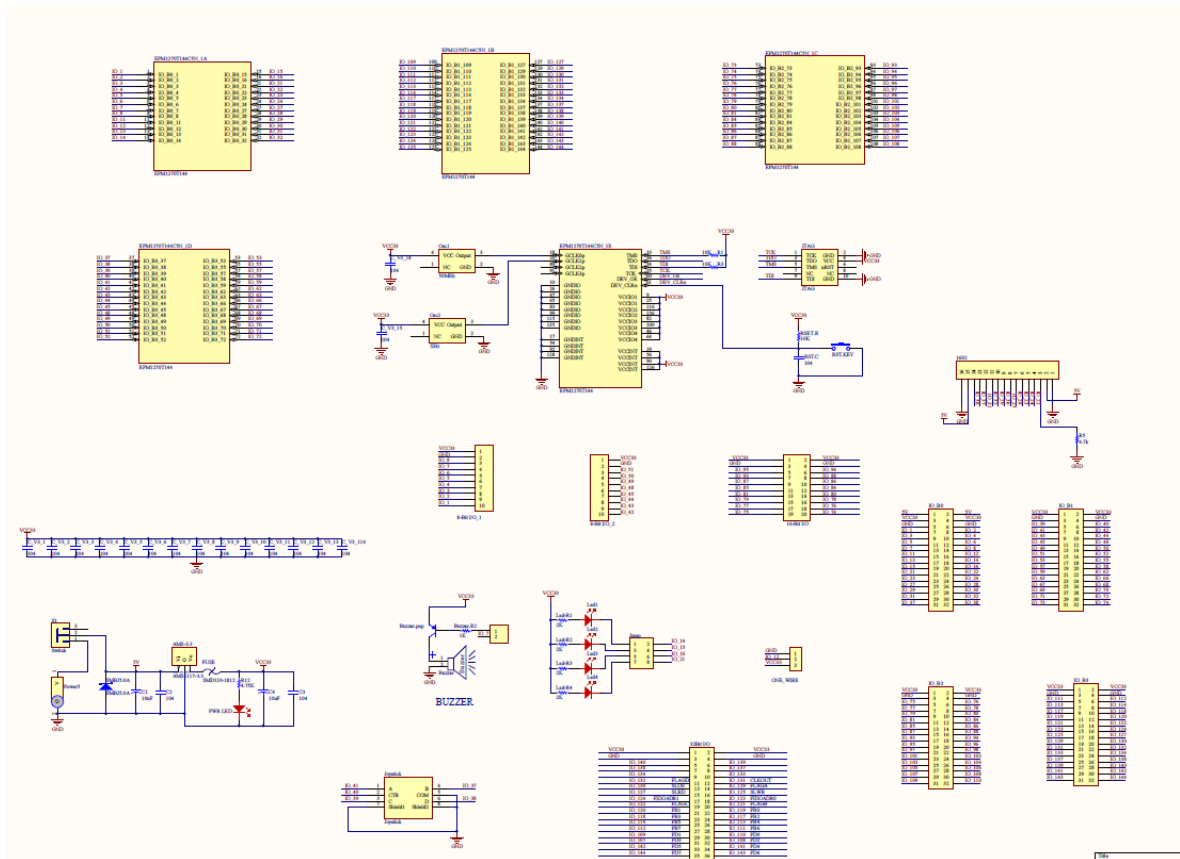
Відладочна плата ЕРМ1270



Додаток К  
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ ДЛЯ ВИЗНА-  
ЧЕННЯ ВОЛОГИ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

Схема програмованої логічної інтегральної схеми пристрою

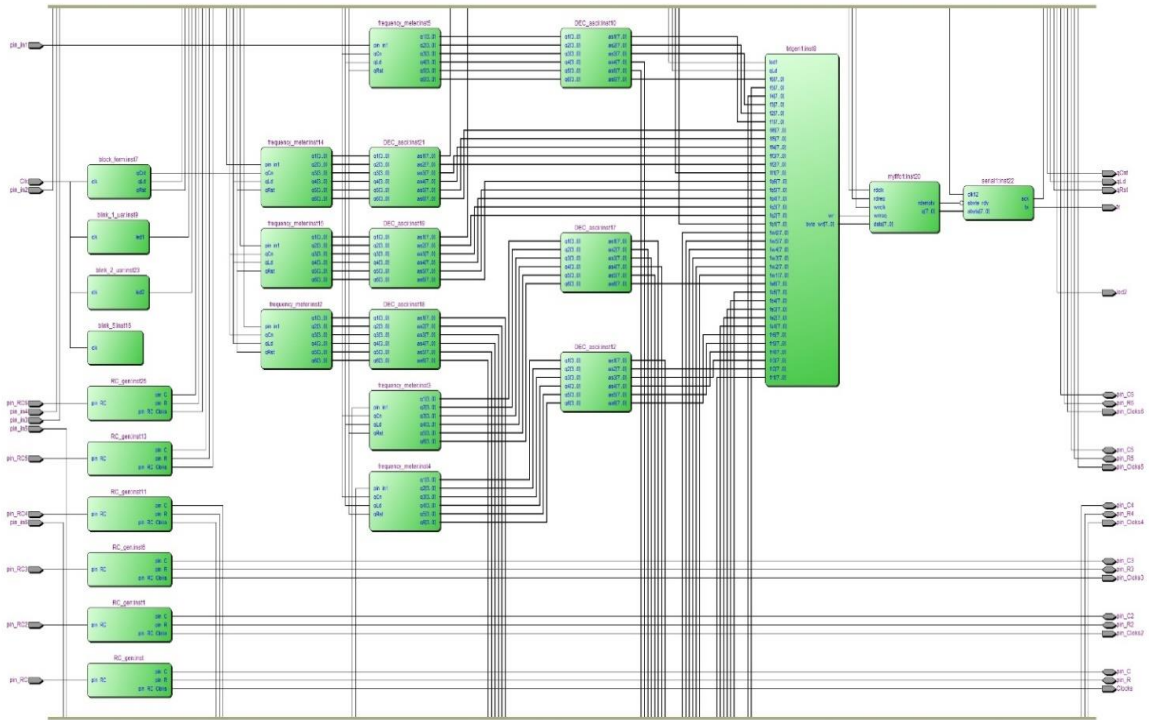


Додаток Л  
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ ДЛЯ ВИЗНА-  
ЧЕННЯ ВОЛОГИ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

Багатоканальний радіовимірювальний прилад вимірювального  
контролю вологості  
Схема структурна

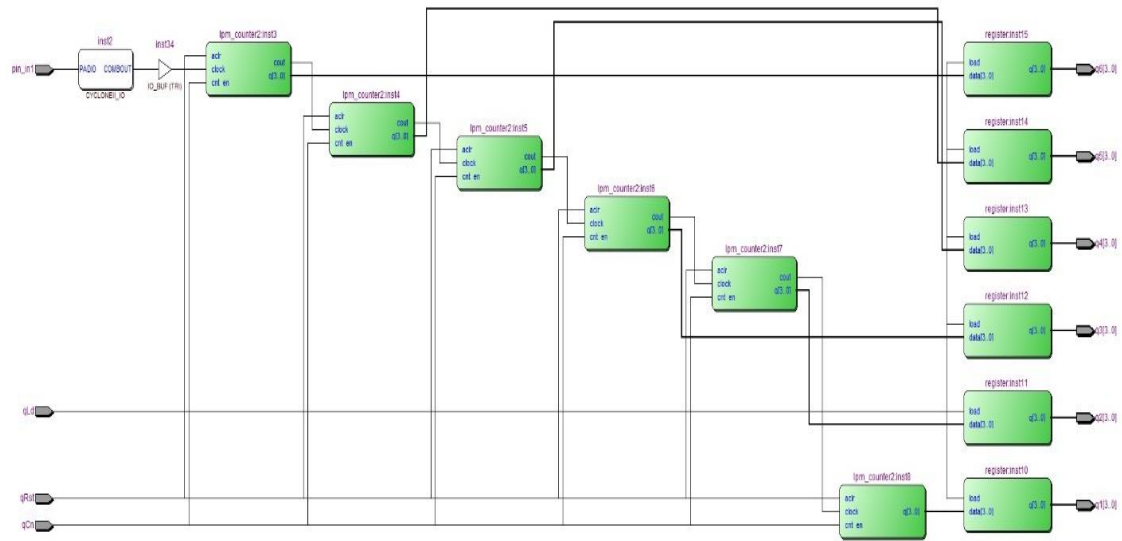




Додаток М  
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ ДЛЯ ВИЗНА-  
ЧЕННЯ ВОЛОГИ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

Блок схема частотоміра

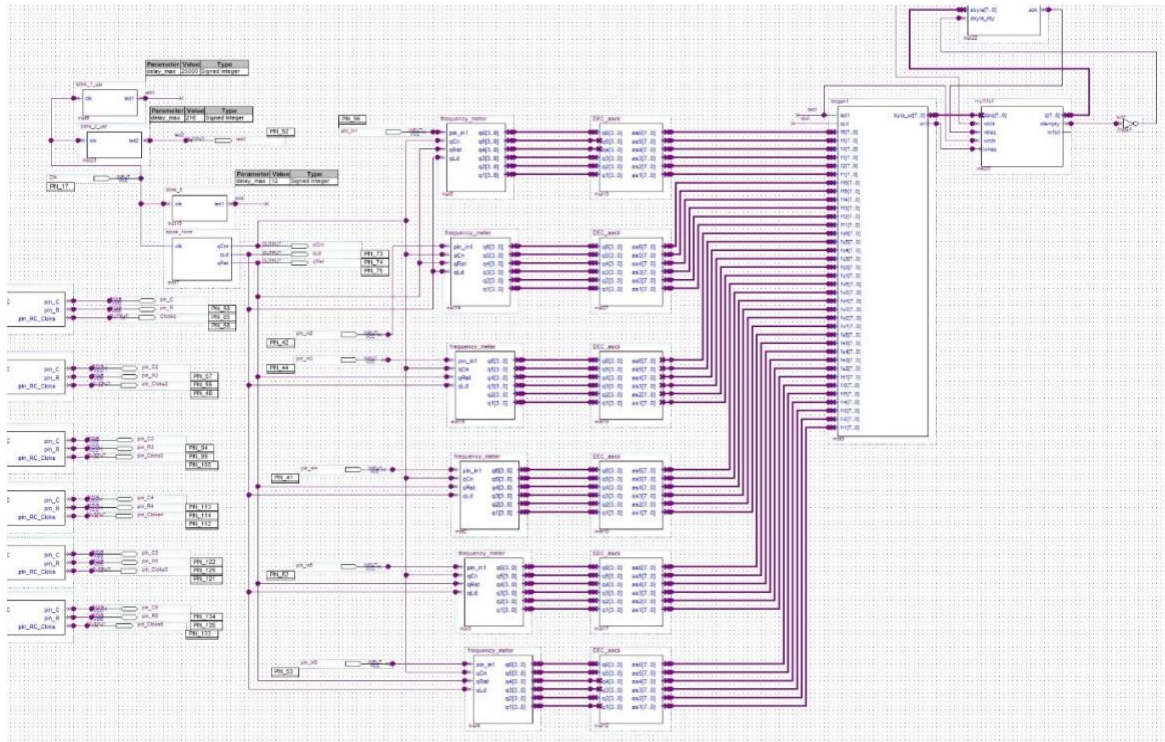


Додаток Н  
(обов'язковий)

**РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПАРАМЕТРИЧНІ СЕНСОРИ ДЛЯ ВИЗНА-  
ЧЕННЯ ВОЛОГИ В ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

Багатоканальний радіовимірювальний прилад вимірювального контролю  
вологості

Схема електрична принципова



Додаток П  
(довідниковий)

Програма моделювання радіовимірювального параметричного сенсора вологості в середовищі Matlab 9.2.

```

%
%   Розрахунок опору вологочутливого резистивного елемента
%
%
clear all
l=7.85e-2;
alh=0.2085;
F=96485;
n1=1;
n2=1;
b1=0.33;
b2=0.67;
ss=1.2e-6;
b=100e-6;
V=9e-2*7e-2*5e-6;
mrr=42.5e-3;
ms=1.0175e-8;
%
i=1;
for Tv=7:1:20,
Ps=[1001.93 1072.80 1148.06 1227.94 1312.67 1402.51 1497.72 1598.56 1705.32 1818.29 1937.78
2064.09 2197.57 2338.54 2487.37 2644.42 2810.06 2984.70 3168.74];
alh=[0.19 0.21 0.23 0.26 0.28 0.30 0.32 0.34 0.36 0.38 0.4 0.42 0.44 0.46 0.48 0.5 0.52 0.54];
%
si=0.622;
P=101.325e3;
T=20;
Cpa=1.006;
L0=2501.6;
A=(Cpa/(si*L0))*((P-Ps(i))/P);
HH=si*(Ps(i)-A*P*(T-Tv))/(P-(Ps(i)-A*P*(T-Tv)));
mvoz=8.53e-6;
mm=HH*mvoz;
Cm=(ms+mm)/(mrr*V);
R=l/(alh(i)*Cm*F*0.23*(n1*b1+n2*b2)*ss*b*10e-3);
RR1(i)=R;
i=i+1;
end
Tv=7:1:20;

```

```

plot(Tv, RR1)
%
% Розрахунок ємності вологочутливого ємнісного елементу
%
clear all
a=0.25e-3;
b=0.25e-3;
dp=0.56e-3;
l=6e-3;
p1=7.85e-2;
k=80e-6;
S=p1*k;
d1=5e-6;
V=S*d1;
enacl=5.9;
eh2o=80.1;
ll=0.95;
%
i=1;
for Tv=7:1:20,
Ps=[1001.93 1072.80 1148.06 1227.94 1312.67 1402.51 1497.72 1598.56 1705.32 1818.29 1937.78
2064.09 2197.57 2338.54 2487.37 2644.42 2810.06 2984.70 3168.74];
si=0.622;
P=101.325e3;
T=20;
Cpa=1.006;
L0=2501.6;
A=(Cpa/(si*L0))*((P-Ps(i))/P);
HH=si*(Ps(i)-A*P*(T-Tv))/(P-(Ps(i)-A*P*(T-Tv)));
HH1(i)=HH;
mvoz=8.53e-6;
Vmm=HH*mvoz/0.998;
VV=Vmm+V;
VV1=V/VV;
% VV2=Vmm/VV;
ee=2e3*((VV1)^.55*log10(enacl)+5*(1-VV1^ll)*HH*log10(eh2o));
EE(i)=ee;
A1=3*(dp/a)^(0.25)*(b/dp)^(0.44);
A2=0.77*b/((2*6-1)*(a+b))+0.41;
C=(8+ee+1)*8.85e-12*1*(2*A1*(6-1)+A2);
C1(i)=C;
i=i+1;
end
Tv=7:1:20;
plot(Tv, C1)

```

```

clear all
clc
disp('          Розрахунок повного опору          ');
disp(' вологочутливої структури на основі біполярних ');
disp('          транзисторів ');
%
RW=[15.8e6 14.2e6 13e6 10.5e6 9.5e6 8.1e6 6.8e6 5.7e6 4.1e6 3.5e6 2.9e6 2.6e6 1.8e6 1.2e6
900e3 650e3];
CW=[0.1375e-9 0.1311e-9 0.1404e-9 0.1559e-9 0.1748e-9 0.1960e-9 0.2192e-9 0.2439e-9
0.2703e-9 0.2980e-9 0.3272e-9 0.3579e-9 0.3900e-9 0.4237e-9 0.46e-9 0.51e-9];
i=sqrt(-1);
R1=27500; Rbt1=0.1; Rb1=500; Lb1=5e-9; Cp1=35e-12;
Cc1=6e-12; Ce1=1.2e-12; Rc1=900e3; Rct1=0.2;
Lc1=3e-9; Re1=5000; Re2=5000; Rc2=50e4;
Rct2=0.2; Lc2=3e-9; Ce2=1e-12; Cc2=5e-12;
Cp2=3.5e-12; Rb2=100; Rbt2=0.1; Lb2=5e-9;
R2=12000; R3=9700; C1=33e-9; L=260e-6;
f=40000; w=2*pi*f; n=.995895351395;
x=1; u1=0; u2=12; du=1;
for uz1=u1:du:u2,
uz2=1;
j=1;
for RT=1:1:16,
if uz1<0.7
aa1=4.95e-16*(exp(uz1/(0.026*n))-1);
aa2=9.75e-16*(exp(uz1/(0.026*n))-1);
else
aa1=4.95e-16*(exp(0.81/(0.026*.99))-1);
aa2=9.7525e-16*(exp(0.78016336/(0.026*.99))-1);
end
yu1=5.39e-8*(exp(uz2*.0151/(0.026*n))-1);
yu2=1.15e-7*(exp(uz2*.0121/(0.026*n))-1);
qq1=1/(1-uz1/8.33-uz2/4.2);
qq2=aa1/17.23e-2+aa2/1.2;
qb=qq1*(1+sqrt(1+0.04*qq2))/2;
I1=yu1;
I2=aa1;
I3=-(aa1-yu1)/qb;
I4=-(aa2-yu2)/qb;
I5=aa2; I6=yu2;
Cc1=(2e-11/(1.2*0.026))*(I3-I1);
Cc2=(5e-11/(1.2*0.026))*(I4-I6);
Ce1=(15e-11/(uz1*0.026))*(I3-I1);
Ce2=(17e-11/(uz1*0.026))*(I4-I6);

```



```

Rc1=-21e-5*uz2/(I2*1.2e-6*(1-0.95));
Rc2=-21.5e-5*uz2/(I5*1.3e-6*(1-0.95));
R2=12000;
ZR1=R1;
Z1=Rbt1+Rb1+i*w*Lb1;
Z2=1/(i*w*Cc1);
Z3=1/(i*w*Ce1);
Z4=Rc1+Rct1+i*w*Lc1;
Z5=Re1;
Z6=Re2;
Z7=Rc2+Rct2+i*w*Lc2;
Z8=1/(i*w*Ce2);    Z9=1/(i*w*Cc2);
Z10=Rb2+Rbt2+i*w*Lb2;
Z11=R2;    Z12=R3;
Z13=1/(i*w*C1);
ZCW=RW(RT)/(1+w*RW(RT)*CW(RT))-i*RW(RT)^2*
*CW(RT)/(1+w^2*CW(RT)^2*RW(RT)^2);
ZL=i*w*L;
a(1,1)=ZR1+Z1+Z3+Z5+Z6+Z8+Z9+Z7; a(1,2)=Z3+Z5+Z6+Z8;
a(1,3)=Z9+Z7; a(1,4)=0; a(1,5)=0;    a(1,6)=0;
a(2,1)=Z3+Z5+Z6+Z8; a(2,2)=Z4+Z2+Z3+Z5+Z6+Z8+Z10+Z11;
a(2,3)=-Z10; a(2,4)=Z11; a(2,5)=0; a(2,6)=0;
a(3,1)=Z7+Z9; a(3,2)=-Z10; a(3,3)=Z7+Z9+Z10+Z12;
a(3,4)=Z12; a(3,5)=0;    a(3,6)=0;
a(4,1)=0; a(4,2)=Z11; a(4,3)=Z12;
a(4,4)=Z11+ZCW+Z12; a(4,5)=0;    a(4,6)=ZCW;
a(5,1)=0; a(5,2)=0; a(5,3)=0; a(5,4)=0;
a(5,5)=Z13; a(5,6)=Z13; a(6,1)=0;
a(6,2)=0; a(6,3)=0; a(6,4)=ZCW;
a(6,5)=Z13; a(6,6)=ZL+ZCW+Z13;
bb(1,1)=-uz2-Z3*I2-Z3*I3-Z8*I4-Z8*I5-Z9*I4+Z9*I6;
bb(2,1)=Z2*I1-Z2*I3-Z3*I2-Z3*I3-Z8*I4-Z8*I5;
bb(3,1)=-Z9*I4+Z9*I6;
bb(4,1)=0;
bb(5,1)=uz1;
bb(6,1)=0;
I=-a\bb;
Z=uz1/I(6);
MR(j,x)=real(Z);
MX(j,x)=uz1*abs((imag(Z)));
MC(j,x)=(1/(real(MX(j,x)*w)));
F1(j,x)=(1/(2*pi*sqrt(L*real(MC(j,x)))));
II(j,x)=real(I(5));
j=j+1;
end

```

```

x=x+1;
end
pp=1:1:16;
plot(pp, II)
grid on

%
% Розрахунок параметрів напівпровідникового вологочутливого
%                ємнісного елемента
%
clear all
z=1;
for Tw=7:1:20,
ps=[1001.9 1072.80 1148.06 1227.94 1312.67 1402.51 1497.72 1598.56 1705.32 1818.29 1937.78
2064.09 2197.57 2338.54 2487.37 2644.42 2810.06 2984.70 3168.74];
Sasio2=2.56e-6;
dasio2=1e-6;
Vasio2=Sasio2*dasio2;
Cpa=1.006e3;
delta=0.622;
LTw=2453e3;
P=101325;
AA1=10*((Cpa*(P-ps))/(delta*LTw*P));
T=23;
kapa=delta*(ps-AA1*P*(T-Tw))/(P-(ps-AA1*P*(T-Tw)));
G=8.53e-1;
mH2O=kapa*G;
RoH2O=0.99823;
VH2O=mH2O/RoH2O;
Vsym=Vasio2+VH2O;
Vdasio2=Vasio2/Vsym;
EPSasio2=4;
EPSH2O=81.8;
EPSsym=Vdasio2*log(EPSasio2)+(1-Vdasio2)*0.002*kapa*log(EPSH2O);
LL=log(EPSsym);
LL1(z)=abs(LL);
z=z+1;
end
%
j=1;
i=sqrt(-1);
for Tw=7:1:20,
Pi=3.14159;
f=100e3;
w=2*Pi*f;

```

```

EPS0=8.849e-12;
EPSi=3.9;
S=2.56e-6;
di=.1e-6;
Ct=EPS0*EPSi*S/di;
EPSsi=12;
q=1.602e-19;
ni=1.5e10;
k=1.381e-23;
T=300;
beta=0.026;
Ef=0.91;
Ei=0.55;
Cs=80e13*q*9e-6;
Rs=1/(w*Cs);
t=Rs*Cs;
fib=(Ei-Ef)/q;
nn0=5e19;
%ni*exp(-beta*fib);
LD=102e-6;
pn0=2.5e15;
%ni*exp(beta*fib);
PSIS=0.3;
FF=0.001;
%sqrt(pn0*(exp(-beta*PSIS)+beta*PSIS-1)/nn0+(exp(beta*PSIS)-beta*PSIS-1));
Cnp=45.5e-12;
%EPSsi*(pn0*(1-exp(-beta*PSIS))/nn0+(exp(beta*PSIS)-1))/(sqrt(2)*LD*FF);
Rpor=5e6;
al=0.16;
d=1.2e-6;
Cpor=EPS0*LL1(j)*(1-al)*S/d;
Rpov=5e6;
Rbh=3e6;
Cbh=EPS0*LL1(j)*S/d;
EPSpov=1.00059;
x=al*S;
l=9.991e-7;
Cpov=EPSpov*EPS0*S*(1-x)*al/l;
Ref=2e6;
EPS1=1200;
Cef=EPS0*al*S*x*EPS1/d;
%Z1=(Rpor-i*w*Rpor^2*Cpor)/(w^2*Rpor^2*Cpor^2+1);
%Z2=(Rpov+Rbh-i*(Rpov+Rbh)^2*(w*Cbh+w*Cpov))/((Rpov+Rbh)^2*(w*Cbh+w*Cpov)^2+1);
%Z3=(Ref-i*w*Ref^2*Cef)/(1+w^2*Ref^2*Cef^2);
%ZT=(1/(i*w*Ct))^2;

```

```

%Znp=1/(i*w*Cnp);
%ZS=(t*w-i)/(w*Cs);
%Z123=(Z1*Z2*Z3)/(Z1*Z2+Z3*Z1+Z3*Z2);
%ZSUM=Z123+ZT+(Znp*ZS)/(Znp+ZS);
%
A1=1+w^2*Rpor^2*Cpor^2;
B1=(Rprov+Rbh)^2*(w*Cbh+w*Cpov)^2+1;
C1=1+w^2*Ref^2*Cef^2;
D1=w*Cbh+w*Cpov;
F1=Rprov+Rbh;
K=(Rpor*F1-Rpor^2*F1^2*w*Cpor*D1)*C1+B1*(Ref*Rpor-
Ref^2*Rpor^2*w^2*Cef*Cpor)+A1*(Ref*F1-Ref^2*F1^2*w*Cef*D1);
M=(C1*(Rpor*F1^2*D1+Rpor^2*F1*C1*w*Cpor^2)+B1*(Ref*Rpor^2*w*Cpor+Ref^2*Rpor*w
*Cef)+A1*(Ref*F1^2*D1+Ref^2*F1*w*Cef));
N=(Rpor*F1-w*Rpor^2*Cpor*F1^2*D1)*Ref-
(Rpor*F1^2*D1+w*Rpor^2*Cpor*F1)*w*Ref^2*Cef;
P=(w*Ref^2*Cef*(Rpor*F1-
w*Rpor^2*Cpor*F1^2*D1)+(Rpor*F1^2*D1+w*Rpor^2*Cpor*F1)*Ref);
NN=(N-i*P)/(K-i*M);
ZSUM=NN-(i/(w*Ct))^2-(i*w*t+1)/(w^2*Cnp*Cs*(-i/(w*Cnp)+(t*w-i)/(w*Cs)));
%
MR(j)=real(ZSUM);
MX(j)=imag(ZSUM);
MC(j)=1/(w*abs(MX(j)));
j=1+j;
end
TTw=7:1:20;
figure (1)
plot(TTw, MR)
figure (2)
plot(TTw, MX)
figure (3)
plot(TTw, MC)
figure (4)
plot(TTw, LL1)

clear all
%
%   Розрахунок повного опору вологочутливо сенсора на основі
%   структури з МДН транзисторами
%
i=sqrt(-1); R1=10000; Rz1=2e6; Rzpar1=0.2; Lz1=0.9e-9; Rci1=700e3;
Czc1=0.3e-9; Rc1=2; Rcp1=0.2; Lc1=0.12e-9; Cpc1=0.5e-12;
C1=0.085e-12; RS1=10; C2=0.017e-12; RS2=10; Czi1=0.3e-9;
Rp1=100e3; Cpi1=0.5e-12; Ri1=2; Rip1=0.2; Li1=0.12e-9; Li2=Li1;

```

```

%
Ri2=2; Ripar2=0.2; Li1=0.12e-9; Rp2=Rp1; Cpi2=Cpi1; RS3=RS1;
C3=C1; Czi2=Czi1; RS4=RS2; C4=C2; Rci2=Rci1; Cpc2=Cpc1;
Czc2=Czc1; Rz2=Rz1; Rzpar2=Rzpar1; Lz2=Lz1; Rcc=10; C5=C2;
RS5=RS4; Cpc3=Cpc1; Rc3=Rc1; Rpar3=Rpar1; Lc3=Lc1;
Rci3=Rci1; Czi3=Czi1; Czc3=Czc1; Rz3=10; Rzpar3=Rzpar1; Lz3=Lz1;
Cw=120e-12; L1=240e-6; f=10000; w=2*pi*f;
%
Z1=R1+Rz1+Rzpar1+i*w*Lz1;
Z2=Rci1;
Z3=1/(i*w*Czc1);
Z4=Rc1+Rcpar1+i*w*Lc1;
Z5=1/(i*w*Cpc1); Z6=1/(i*w*C1); Z7=RS1; Z8=1/(i*w*C2); Z9=RS2;
Z10=1/(i*w*Czi1);
Z11=Rp1/(1+w^2*Rp1^2*Cpi1^2)-i*(Rp1^2*w*Cpi1)/(1+w^2*Rp1^2*Cpi1^2);
Z12=Ri1+Ripar1+i*w*Li1; Z13=Ri2+Ripar2+i*w*Li2;
Z14=Rp2/(1+w^2*Rp2^2*Cpi2^2)-i*(Rp2^2*w*Cpi2)/(1+w^2*Rp2^2*Cpi2^2);
Z15=RS3; Z16=1/(i*w*C3); Z17=1/(i*w*Czi2); Z18=RS4;
Z19=1/(i*w*C4); Z20=Rci2; Z21=1/(i*w*Cpc2);
Z22=1/(i*w*Czc2); Z23=Rz2+Rzpar2+i*w*Lz2; Z24=Rcc;
Z25=1/(i*w*C5); Z26=RS5-i/(w*Cpc3); Z27=Rc3+Rcpar3+i*w*Lc3;
Z28=Rci3; Z29=1/(i*w*Czi3); Z30=1/(i*w*Czc3); Z31=Rz3+Rzpar3+i*w*Lz3;
ZL=i*w*L1;
%
vto=-.05; vto1=.5; vto2=.5; beta=5e-8; betal=5e-10; beta2=5e-10; lam=1.65;
u1=4.2; u2=5.5; du=0.1; j=1; n=.91; uz2=2.5;
Cw=[0.2346e-9 0.2361e-9 0.2378e-9 0.2396e-9 0.2416e-9 0.2438e-9 0.2464e-9
0.2493e-9 0.2528e-9 0.2570e-9 0.2624e-9 0.2699e-9 0.2824e-9 0.3288e-9 0.38e-9];
for uz1=u1:du:u2,
    uz1=uz1;
    xi=1;
    for Tw=1:2:15,
        if uz1<.5
            I2=2.75e-18*(exp(uz1/(0.026*n))-1);
            I3=2.55e-18*(exp(uz1/(0.026*n))-1);
            I4=I3;    I5=I2;    I8=I5;
        else
            I2=2.75e-19*(exp((0.7)/(0.026*n))-1);
            I3=.55e-19*(exp((0.7)/(0.026*n))-1);
            I4=I3;    I5=I2;    I8=I5;
        end
    end
    vgs=uz1-0.2;
    if vgs-vto<0
        I1=0;    I6=0;    I7=0;
    end
end

```

```

if vgs-vto<.2
    I1=beta*(1+lam*uz1)*(uz1-vto)^2;
    I6=beta1*(1+lam*uz1)*(uz1-vto1)^2;
    I7=beta2*(1+lam*uz1)*(uz1-vto2)^2;
else
    I1=beta*(1+lam*uz1)*uz1*(2*(uz2-vto)-uz1);
    I6=beta1*(1+lam*uz1)*uz1*(2*(vgs-vto1)-uz1);
    I7=beta2*(1+lam*uz1)*uz1*(2*(vgs-vto2)-uz1);
end
Zcw=1/(i*w*Cw(xi)^2.65);
a=zeros(14,14);
a(1,1)=Z1+Z10+Z12+Z13+Z14+Z21+Z24+Z28+Z25+Z26+Z27;
a(1,2)=Z10; a(1,6)=-Z14; a(1,8)=Z21;
a(1,10)=-Z12+Z13; a(1,11)=-Z24; a(1,12)=-Z25+Z26;
a(1,13)=-Z28; a(1,14)=Z27; a(2,1)=Z10; a(2,2)=Z3+Z2+Z10;
a(2,4)=Z2; a(3,3)=Z5+Z6+Z7; a(3,4)=-Z6+Z7;
a(3,10)=-Z5; a(4,2)=Z2;
a(4,3)=-Z6+Z7; a(4,4)=Z2+Z6+Z7+Z9+Z8;
a(4,5)=Z9+Z8;
a(5,4)=Z8+Z9; a(5,5)=Z8+Z9+Z11;
a(5,10)=Z11; a(6,1)=-Z14;
a(6,6)=Z14+Z15+Z16;
a(6,7)=Z15+Z16;
a(7,6)=Z15+Z16;
a(7,7)=Z15+Z16+Z20+Z19+Z18;
a(7,8)=-Z19+Z18;
a(7,9)=Z20;
a(8,1)=Z21;
a(8,7)=-Z18+Z19;
a(8,8)=Z18+Z19+Z21;
a(9,7)=Z20;
a(9,9)=Z17+Z20+Z22;
a(9,10)=-Z17;
a(9,11)=-Z22;
a(10,1)=-Z12+Z13;
a(10,3)=-Z5;
a(10,5)=Z11;
a(10,9)=-Z17;
a(10,10)=Z4+Z5+Z11+Z12+Z13+Z17+Z23;
a(10,11)=-Z23;
a(11,1)=-Z24;
a(11,9)=-Z22;
a(11,10)=-Z23;
a(11,11)=ZL+Z23+Z22+Z24+Z29+Z31+Zcw;
a(11,13)=-Z29;

```

```

a(11,14)=Z31+Zcw;
a(12,1)=- (Z25+Z26);
a(12,12)=Z25+Z26;
a(13,1)=-Z28;
a(13,11)=-Z29;
a(13,13)=Z29+Z28+Z30;
a(13,14)=Z30;
a(14,1)=Z27;
a(14,11)=Z31+Zcw;
a(14,13)=Z30;
a(14,14)=Z31+Z30+Z27+Zcw;
%
b(1,1)=-uz2-(Z1+Z10+Z12+Z13+Z14+Z21+Z24+Z28+Z25+Z26+Z27)*(I7+I8)-Z28*I7-Z25*I8;
b(2,1)=(Z3+Z2+Z10)*I1+Z2*I1;
b(3,1)=- (Z5+Z6+Z7)*I2-Z6*I2;
b(4,1)=- (Z2+Z6+Z7+Z9+Z8)*(I3-I1-I2)+Z6*I2-Z8*I3+Z2*I1;
b(5,1)=- (Z8+Z9+Z11)*I3-Z8*I3;
b(6,1)=- (Z14+Z15+Z16)*I4-Z16*I4;
b(7,1)=- (Z15+Z16+Z20+Z19+Z18)*(-I6+I4-I5)-Z16*I4+Z20*I6+Z19*I5;
b(8,1)=- (Z18+Z19+Z21)*I5-Z19*I5;
b(9,1)=(Z17+Z20+Z22)*I6+Z20*I6;
b(10,1)=0;
b(11,1)=uz1;
b(12,1)=(Z25+Z26)*I8+Z25*I8;
b(13,1)=(Z29+Z28+Z30)*I7+Z28*I7;
b(14,1)=0;
%
I=a\b;
Z=uz1/I(11);
II(xi,j)=I(11);
MR(xi,j)=real(Z);
MX(xi,j)=imag(Z);
MC(xi,j)=1/(w*imag(Z));
F1(xi,j)=1/(2*pi*sqrt(L1*MC(xi,j)));
xi=xi+1;
end
j=j+1;
end
clc
uz1=u1:du:u2;
figure (1)
plot(uz1, II)
grid on
figure (2)
plot(uz1, MR)

```

```
grid on  
figure (3)  
plot(uz1, MX)  
grid on  
end
```