

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інформаційних електронних систем

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

### «ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХІДНИМ СИГНАЛОМ»

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

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Вараниця С.А.

(прізвище та ініціали)

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

Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« 15 » 12 2023 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІКСТ

Михалевський Д.В.

(прізвище та ініціали)

« 18 » 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« 19 » 12 2023 р.

Вінниця ВНТУ - 2023 рік

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

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«16» вересня 2023 року

**ЗАВДАННЯ**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Вараниці Сергію Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом»  
керівник роботи д.т.н., проф., зав. кафедри ІРТС Осадчук О.В.

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

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

2. Строк подання студентом роботи 15.12.2023р.

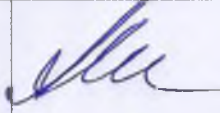

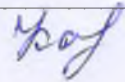
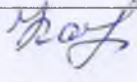


3. Вихідні дані до роботи: Робочий діапазон частот від 100 кГц до 7 МГц.  
Напруга живлення 5В. Струм споживання 1,5-15мА. Діапазон вимірювання  
вологості 5-99%.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Аналіз сучасного стану виготовлення та  
інтеграції матеріалів гнучких датчиків вологості для нових застосувань.  
Розробка та дослідження перетворювача вологості з частотним вихідним  
сигналом та вологочутливим ємнісним елементом з екрануючим електродом  
під міжштовховим електродом. Проектування інтегрованих інтерфейсів з  
малим потуженням для ємнісних датчиків. Економічна частина. Охорона  
праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних  
джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Різні парадигми застосування датчиків вологості. Ємнісні датчики  
вологості. Резонансні датчики вологості. Застосування плівкових сенсорів.  
Електрична схема перетворювача для вимірювання вологості з частотним  
виходом. Зміна вихідної напруги чутливої до вологості ємності від зміни часу  
за різних значень ємності вологочутливого конденсатора. Електрична схема  
перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та  
вологочутливим конденсатором в LTSpice. Блок-схема інтерфейсу ємнісного  
датчика ADXL50. Головна друкована плата. Друга друкована плата.



6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 17.09.2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

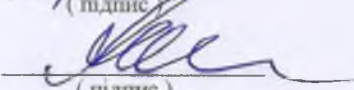
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2023-07.09.2023	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2023-17.09.2023	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.	18.09.2023-27.09.2023	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	28.09.2023-10.10.2023	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	11.10.2023-04.11.2023	
6.	Розробка графічної частини МКР.	05.11.2022-13.11.2022	
7.	Економічна частина.	14.11.2023-20.11.2023	
8.	Охорона праці (ОП).	21.11.2022-25.11.2022	
9.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	26.11.2023-01.12.2023	
10.	Нормоконтроль.	02.12.2023-09.12.2023	
11.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	10.12.2023-18.12.2023	
12.	Захист МКР ЕК.	19.12.2023-21.12.2023	

Студент

  
(підпис)

Вараниця С.А.

Керівник роботи

  
(підпис)

Осадчук О.В.

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.397

Вараниця С.А. Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма - радіотехніка. – Вінниця: ВНТУ, 2023. – 130 с. На українській мові. Бібліогр.: 66 назв; Рис. 48.

У магістерській кваліфікаційній роботі було розглянуто різноманітні матеріали, технології виготовлення та сенсорні механізми, які використовувалися для гнучких датчиків відносної вологості, щоб продемонструвати сучасний рівень техніки та надати критичний огляд їх ефективності разом із обговоренням. Про можливі сфери застосування сенсорів вологості.

У другому розділі було розроблено математичну модель перетворювача для вимірювання відносної вологості з вологочутливим ємнісним елементом. Проведено моделювання в середовищі Maple, яке довело адекватність розробленої математичної моделі. Дослідження показали, що на виході вимірювального генератора існують коливання, вихідна частота яких змінюється із зміною ємності чутливого до вологи елемента. Так, при значеннях  $C_W(W) = 305$  пФ частота  $F = 64,53$  МГц, а при значеннях  $C_W(W) = 354$  пФ частота складала  $F = 58,834$  МГц, при напрузі живлення перетворювача 5 В. Отримані експериментальні та теоретичні характеристики мають досить гарний збіг і відносна похибка лежить в межах 1,25 %.

У третьому розділі було розроблено та досліджено інтерфейси зчитування для ємнісних датчиків MEMS на основі перетворення ємнісної модуляції в частотну та широтно-імпульсну.

Розроблена система моніторингу погоди яка дозволяє використовуючи недорогі датчики для подолання проблем, пов'язаних із високими витратами та потребою в експертному персоналі, властивому існуючим технологіям. Його здатність здійснювати моніторинг у режимі реального часу та прогнозувати ключові змінні навколишнього середовища за допомогою моделі ARIMA.

Ключові слова: перетворювач вологості з частотним виходом, вологочутлива ємність, радіотехнічна системи, від'ємний диференційний опір.



## ABSTRACT

Varanytsia S.A. Humidity converters with a frequency output signal. Master's qualification work on specialty 172 - telecommunications and radio engineering, educational program - radio engineering. – Vinnytsia: VNTU, 2023. – 130 p. In Ukrainian language. Bibliography: 66 titles; 48 Fig. .

The master's thesis reviewed the various materials, fabrication techniques and sensing mechanisms used for flexible relative humidity sensors to demonstrate the state of the art and provide a critical review of their performance along with discussion. About the possible areas of application of humidity sensors.

In the second chapter, a mathematical model of a transducer for measuring relative humidity with a moisture-sensitive capacitive element was developed. Simulation was carried out in the Maple environment, which proved the adequacy of the developed mathematical model. Studies have shown that there are oscillations at the output of the measuring generator, the output frequency of which changes with the change in the capacity of the moisture-sensitive element. Thus, at  $\mu\text{F}$  values, the frequency was MHz, and at  $\text{pF}$  values, the frequency was MHz, at a converter supply voltage of 5 V. The obtained experimental and theoretical characteristics have a fairly good match and the relative error is within 1.25%.

In the third chapter, readout interfaces for capacitive MEMS sensors based on the conversion of capacitive modulation to frequency and pulse width modulation were developed and investigated.

A weather monitoring system has been developed that allows using inexpensive sensors to overcome problems associated with high costs and the need for expert personnel inherent in existing technologies. Its ability to perform real-time monitoring and forecasting of key environmental variables using an ARIMA model.

**Key words:** humidity converter with frequency output, humidity sensitive capacity, radio engineering systems, negative differential resistance

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ ГНУЧКИХ ДАТЧИКІВ ВОЛОГОСТІ ДЛЯ НОВИХ ЗАСТОСУВАНЬ</b> .....	7
1.1 Загальні відомості та застосування сенсорів вологості.....	7
1.2 Гнучкі датчики вологості .....	9
1.3 Ємнісні та резонансні датчики вологості та інтеграція матеріалів.....	11
1.4 П'єзоелектричні датчики вологості та інтеграція матеріалів .....	15
1.5 Оптичні датчики вологості та інтеграція матеріалів .....	17
1.6 Виготовлення плівкових сенсорів вологості.....	17
1.7 Застосування датчиків вологості .....	21
1.8 Сучасні системи моніторингу погоди .....	23
1.9 Висновки до розділу.....	30
<b>2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХІДНИМ СИГНАЛОМ ТА ВОЛОГОЧУТЛИВИМ ЄМНІСНИМ ЕЛЕМЕНТОМ З ЕКРАНУЮЧИМ ЕЛЕКТРОДОМ ПІД МІЖШТОВХОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ</b> .....	31
2.1 Вологочутливий ємнісний елемент з екрануючим електродом.....	31
2.2 Симуляція SIDE .....	34
2.3 Розробка перетворювача вологості з частотним вихідним сигналом.....	43
2.4 Висновки до розділу.....	53
<b>3 ПРОЕКТУВАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ З МАЛИМ ПОТУЖЕННЯМ ДЛЯ ЄМНІСНИХ ДАТЧИКІВ</b> .....	55
3.1 Інтегрований ємнісний датчик. Ємнісні датчики .....	55
3.2 Інтегровані інтерфейси для ємнісного датчика .....	59
3.3 Ємнісні перетворювачі сигналу в ШІМ. Перетворювач C-to-PWM.....	64
3.4 Розробка метеостанції.....	74
3.5 Висновки до розділу .....	81
<b>4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b> .....	82
4.1 Оцінювання наукового ефекту.....	82
4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи .....	85
4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	98
4.4 Висновок до розділу .....	99

<b>5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b> .....	100
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи .....	101
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії .....	103
5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи в умовах дії загрозливих факторів надзвичайних ситуацій .....	109
5.4 Висновок до розділу .....	111
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	112
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	114
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративна частина .....	120
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки магістерської кваліфікаційної роботи .....	130

## ВСТУП

**Актуальність.** За останнє десятиліття вимірювання вологості повсюдно набули уваги в широкому діапазоні прикладних парадигм, таких як промислове прогнозоване технічне обслуговування, контроль-вимірювальні прилади, автоматизація, сільське господарство, моніторинг клімату, охорона здоров'я та напівпровідникова промисловість [1-5]. Точні вимірювання вологості та рентабельні процеси виготовлення великогабаритних і високопродуктивних датчиків із гнучкими форм-факторами мають важливе значення для відповідності суворим вимогам до продуктивності нових областей застосування. Щоб задовольнити цю потребу, останні зусилля зосереджені на розвитку інноваційне відчуття модальності, процес технологій, а також дослідження та інтеграція нових матеріалів для забезпечення недорогих, надійних і гнучких датчиків вологості з надвисокою чутливістю та лінійністю, великим динамічним діапазоном, низьким гістерезисом і швидким часом відгуку. У цьому розділі представлено огляд гнучких датчиків вологості, заснованих на різних сенсорних механізмах, використовуваних методах обробки та різних функціональних сенсорних шарах і матеріалах підкладки для конкретних застосувань.

**Метою роботи** є покращення метрологічних характеристик та розробка перетворювачів вологості з частотним вихідним сигналом.

**Об'єктом дослідження** є процес перетворення відносної вологості у частотний сигнал за допомогою частотного перетворювача відносної вологості з ємнісним вологочутливим елементом на основі транзисторної структури з від'ємним диференційним опором.

**Предметом дослідження** – статичні і динамічні характеристики перетворювача відносної вологості з ємнісним вологочутливим елементом на основі транзисторної структури з від'ємним диференційним опором.

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

- проаналізувати існуючі сенсори вологості та обґрунтувати переваги частотного сенсора відносної вологості з ємнісним вологочутливим елементом на основі транзисторної структури з від'ємним диференційним опором на основі методу перетворення «відносна вологість–частота» по відношенню до існуючих;



- розглянути принципи роботи та побудови перетворювача відносної вологості з ємнісним вологочутливим елементом;
- розглянути основні аналітичні залежності методу «відносна вологість – частота»;
- розробити структурну та принципову схеми перетворювача відносної вологості з ємнісним вологочутливим елементом;
- розробити та дослідити інтерфейси зчитування для ємнісних датчиків MEMS на основі перетворення ємнісної модуляції в частотну та широтно-імпульсну;
- розробити систему моніторингу погоди яка дозволяє використовуючи недорогі датчики.

**Методи дослідження ґрунтуються на використанні:** основних положень теорії функції комплексної змінної для визначення функції перетворення та рівняння чутливості; рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей перетворювача відносної вологості з ємнісним вологочутливим елементом; диференціального та інтегрального числення для створення математичної моделі; теорії розрахунку нелінійних електричних кіл для визначення основних параметрів перетворювача відносної вологості з ємнісним вологочутливим елементом.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Розглянуто принципи роботи та побудови перетворювача відносної вологості з ємнісним вологочутливим елементом.
2. Розглянуто основні аналітичні залежності методу перетворення «відносна вологість–частота».
3. Представлено математичні моделі перетворювача відносної вологості з ємнісним вологочутливим елементом, в яких враховано залежність параметрів нелінійних еквівалентних елементів транзисторів які входять до складу перетворювача відносної вологості з ємнісним вологочутливим елементом від зміни відносної вологості, що дало змогу отримати аналітичні вирази для опису чутливості і функції перетворення.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

1. Проведено моделювання в середовищі Maple, яке довело адекватність розробленої математичної моделі. Дослідження показали, що на виході вимірювального генератора існують коливання, вихідна частота яких змінюється із зміною ємності чутливого до вологи елемента. Так, при значеннях  $C_W(W) = 305$  пФ

частота  $F = 64,53$  МГц, а при значеннях  $C_W(W) = 354$  пФ частота складала  $F = 58,834$  МГц, при напрузі живлення перетворювача 5 В. Отримані експериментальні та теоретичні характеристики мають досить гарний збіг і відносна похибка лежить в межах 1,25 %.

2. Розроблено та досліджено інтерфейси зчитування для ємнісних датчиків MEMS на основі перетворення ємнісної модуляції в частотну та широтно-імпульсну.
3. Розроблена система моніторингу погоди яка дозволяє використовуючи недорогі датчики для подолання проблем, пов'язаних із високими витратами та потребою в експертному персоналі, властивому існуючим технологіям. Його здатність здійснювати моніторинг у режимі реального часу та прогнозувати ключові змінні навколишнього середовища за допомогою моделі ARIMA.

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

**Структура і обсяг роботи.** Магістерська кваліфікаційна робота складається з 5 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел.

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ ГНУЧКИХ ДАТЧИКІВ ВОЛОГОСТІ ДЛЯ НОВИХ ЗАСТОСУВАНЬ

За останнє десятиліття вимірювання вологості повсюдно набули уваги в широкому діапазоні прикладних парадигм, таких як промислове прогнозоване технічне обслуговування, контроль-но-вимірювальні прилади, автоматизація, сільське господарство, моніторинг клімату, охорона здоров'я та напівпровідникова промисловість [1-5]. Точні вимірювання вологості та рентабельні процеси виготовлення великогабаритних і високопродуктивних датчиків із гнучкими форм-факторами мають важливе значення для відповідності суворим вимогам до продуктивності нових областей застосування. Щоб задовольнити цю потребу, останні зусилля зосереджені на розвитку інноваційне відчуття модальності, процес технологій, а також дослідження та інтеграція нових матеріалів для забезпечення недорогих, надійних і гнучких датчиків вологості з надвисокою чутливістю та лінійністю, великим динамічним діапазоном, низьким гістерезисом і швидким часом відгуку. У цьому розділі представлено огляд гнучких датчиків вологості, заснованих на різних сенсорних механізмах, використовуваних методах обробки та різних функціональних сенсорних шарах і матеріалах підкладки для конкретних застосувань [6-10]. Крім того, ми представляємо критичні конструктивні параметри пристрою, які вважаються індикативними для продуктивності датчика, наприклад діапазон відносної вологості, разом з обговоренням деяких конкретних застосувань і випадків використання.

## 1.1 Загальні відомості та застосування сенсорів вологості

Вологість, як правило, визначається як концентрація водяної пари, присутньої в повітрі. Він відіграє життєво важливу роль у підтримці біологічного життя на Землі. Зміни рівня вологості істотно впливають на умови навколишнього середовища та життя живих організмів. Тому абсолютно необхідно постійно вимірювати та контролювати рівень вологості в різних умовах навколишнього середовища. Наприклад, у сільському господарстві загальний ріст врожаю сильно залежить від вмісту вологи в ґрунті [11-12]. Крім того, обробка, транспортування та зберігання зерна та крупи вимагають оптимального рівня вологості для продовження



терміну зберігання. З іншого боку, в системах охорони здоров'я датчики вологості широко використовуються для респіраторного обладнання, інкубаторів, процесів стерилізації, виробництва ліків і зберігання.

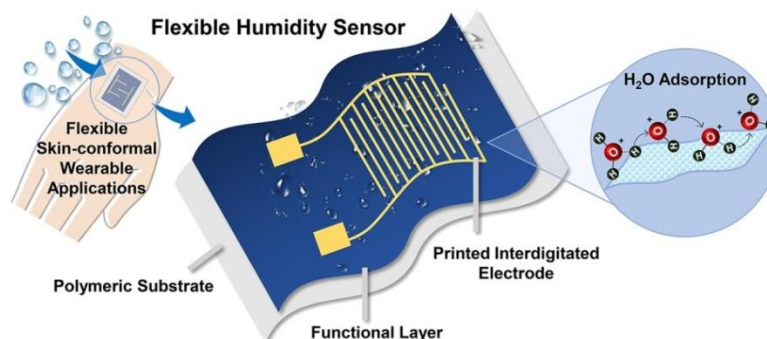


Рисунок 1.1 – Деякі приклади застосування сенсорів вологості

Так само широкий спектр датчиків вологості використовується для інтелектуального контролю навколишнього середовища будівель та інфраструктури. Основні області застосування датчиків вологості проілюстровано на рис.1.2 [13], (та наведено в додатку А рис.1). Щоб вимірювати рівні вологості з точністю та точністю в такому широкому спектрі застосування, неминуче покращити характеристики датчиків з точки зору чутливості, лінійності, гістерезису, повторюваності, часу відгуку, динамічного діапазону тощо, щоб відповідати конкретним вимогам. вимоги до кожної програми. Потреба у вимірюванні вологості за різних обставин призводить до інновацій у конструкції пристрою, дослідженні матеріалу та вдосконаленні технології виготовлення. Крім того, мініатюризація датчиків вологості разом із широким попитом вимагає нових технологічних рішень, які пропонують легку інтеграцію з периферійною електронікою зчитування та забезпечують економічно ефективну можливість серійного виробництва.

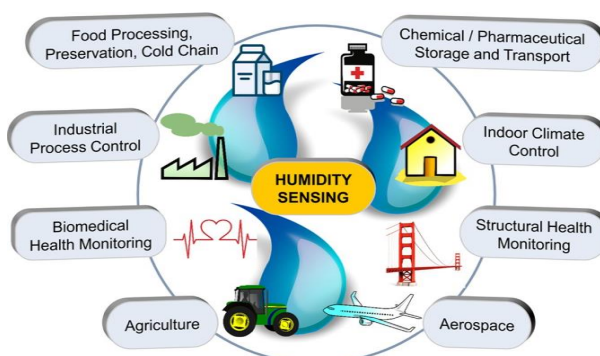


Рисунок 1.2 – Різні парадигми застосування датчиків вологості

Гнучкість датчиків вологості є ключовим аспектом, який привернув увагу в останніх роботах. У зв'язку з появою таких сфер застосування, як моніторинг працездатності та людино-машинні інтерфейси, потреба в гнучкості ще більше зростає. Для досягнення довговічності і чутливості пристроїв, дуже важливо вибрати та обробити відповідні чутливі шари та підкладки [15].

З точки зору архітектури пристрою, датчик вологості містить чутливий трансдукційний шар на підкладці з електродами, розміщеними для фізичного інтерфейсу. Доступні різні типи датчиків вологості, які в першу чергу відрізняються механізмами чутливості, включаючи ємнісні, резистивні та п'єзоелектричні/поверхневі акустичні хвилі та оптичні принципи. Вимірювання вологості зазвичай кількісно визначається двома типами одиниць вимірювання. Найчастіше вона виражається через відносну вологість (RH). Відносна вологість визначається як відношення вмісту водяної пари, присутньої в повітрі, до максимальної (насиченої) кількості вмісту пари, яка може утримуватися в повітрі за певної температури та тиску. Іноді вимірювання вологості подаються як абсолютна вологість (AH), яка вимірює масу вмісту пари в повітрі до об'єму повітря.

В подальшому розглянемо датчики на основі відносної вологості та представляє короткий огляд поточних досліджень і розробок гнучких датчиків вологості для різноманітних застосувань. Потік організований таким чином, що в підрозділі 1.3 пояснює важливість вибору матеріалу та представляє гнучкі матеріали, нещодавно використані в датчиках з різними принципами чутливості, а в підрозділі 1.4 містяться різні технології виготовлення та обробки; деякі конкретні нові сфери застосування датчиків вологості обговорюються в підрозділі 1.5.

## 1.2 Гнучкі датчики вологості

Гнучкість є прямим результатом матеріалів, які використовуються переважно як чутливі шари та підкладки. Зосередження на цьому способі надає пріоритет отриманню та використанню гнучких матеріалів, які є не лише перспективними з точки зору визначення вологості, але й також легкий, розкладається та має низьку вартість [16].

Для чутливих шарів у минулих роботах повідомлялося про такі

матеріали, як оксид графену (GO), вуглецеві нанотрубки та наноспіралі, а також композити, утворені полімерами, керамікою та напівпровідниками. У таких роботах намагаються підвищити чутливість матеріалів різними методами. В таблиці 1.1 представлені, різні гнучкі датчики вологості з різними чутливими шарами.

Для підкладок найчастіше повідомляють про такі гнучкі матеріали, як поліімід (PI), полідиметилсилоксан (PDMS), поліестер (PE), поліетиленнафталат (PEN) і поліетилентерефталат (PET). PI є широко переважним матеріалом як підкладка завдяки своїй хімічній стабільності, радіаційній стійкості, електричній ізоляції та температурі стабільності (190 до 540 °C). Подібним чином PET є ще однією широко використовуваною гнучкою підкладкою,<sup>4</sup> завдяки своїй відповідній термостійкості (120 °C), хорошій адгезійній властивості, низька вартість виробництва та комерційна доступність [5]. Особливо для умов, що вимагають стійкості до високих температур і стабільності хімічних властивостей, підкладка PI була б кращим вибором порівняно з PET.

Таблиця 1.1 – Гнучкі датчики вологості з різними чутливими шарами

ref	sensing principle	flexible sensing material	RH range	T (°C)	sensitivity	response/recovery times (s)
6	capacitive	hydrophilic polytetrafluoroethylene	45–90%	35		
5	capacitive	cellulose acetate butyrate	10–70%		2.36 ± 0.08 fF/%RH	response: 24 ± 3 s recovery: 22 ± 4 s
7	capacitive	yarn (compositions: polyester (Coolmax, Pentas, and Cleancool) and polyimide fibers)	6–97%	25	82.4 pF/%RH (for Cleancool)	response: 3.5 s recovery: 4 s
24	capacitive	nanoscaled polypyrrole	30–90%			418 s
25	resistive	Ag/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> NWs	11–95%	25	2.14 at 11%RH 64.67 at 95%RH	RH-dependent
9	resistive	functionalized multiwalled carbon nanotube/hydroxyethyl cellulose	20–80%	25	0.048/%RH	response: 20 s
11	resistive	PEDOT:PSS confined in 1D nanowire (core conductive PEDOT nanocrystal wrapped by nonconductive water-soluble PSS)	0–13%	37	5.46%	response: 0.63 s recovery: 2.05 s
10	resistive	polyvinyl alcohol/KOH polymer gel electrolyte (porous ionic membrane)	10.89–81.75%	25	10, 22, 30% at distances 0.5, 0.3, 0.1 cm	response: 0.4 s recovery: 2.6 s
4	resistive	poly(3,4-ethylenedioxythiophene)/reduced graphene oxide/Au nanoparticles	11–98%			response: 20 s
12	resistive	rGO/WS <sub>2</sub>	0–91.5%	25	0.18/%RH	recovery: 35 s response: 31 s
26	resistive	CuO				recovery: 95 s response: 17.8 s
27	resistive	sulfonate polystyrene poly(3,4-ethylenedioxy-thiophene) (PEDOT) nanoparticles and graphene oxide (SPS:PEDOT NP/RGO)	0–98%	25	0.13–68.46%	recovery: 5.5 s response: 39 s
28	resistive/capacitive	graphene oxide, poly(3,4-ethylenedioxy-thiophene) doped with poly(styrene sulfonate) anions (PEDOT:PSS) and C <sub>15</sub> H <sub>15</sub> N <sub>3</sub> O <sub>2</sub> (methyl red)	0–100%	~21	180 kΩ/%RH	recovery: 57 s response: 1 s
29	impedance	biopolymer kappa-carrageenan (KC) carbon nanotubes (CNTs)	20–90%	25		recovery: 3.5 s response: ~200 s (20 to 80%RH)
30	impedance	polypyrrole (PPy)	20–97%	25		RH-dependent
15	piezoelectric	cadmium-doped zinc oxide nanowire nanogenerator (Cd–ZnO NW NG)	20–70%	25	85.7%	
17	piezoelectric	sodium niobate (NaNbO <sub>3</sub> NFs)	5–80%	24–80	2 mV/%RH	response: <12 s response: 20 s (16–22)
16	SAW	graphene oxide microflakes (initially 50 μm)	10–85%	25	145.83 ppm/%RH at 85%RH	recovery: 5 s
22	optical	CdTe@Au/NaOH film	5–97%	25	254 au/%RH (5–to 50%RH) 910 au/%RH (50–97%RH)	response: 29 s recovery: 23 s



Інтерес до цих традиційних органічних матеріалів був втрачений, оскільки вони страждають від таких проблем, як здатність до розкладання. Для запобігання такого електронного сміття також повідомлялося, що нові матеріали, такі як целюлозний папір, також функціональні як чутливий шар і підкладка [1]. Подальше дослідження нещодавно використаних матеріалів у датчиках з різними принципами чутливості представлені в підрозділі 1.3.

### 1.3 Ємнісні та резонансні датчики вологості та інтеграція матеріалів

Загально досліджені та комерціалізовані ємнісні датчики покладаються головним чином на зміни діелектричної проникності чутливого матеріалу, розміщеного між парою електродів. У різних дослідженнях було використано кілька підходів для збільшення номінальної ємності датчиків.

Наприклад, було підвищено рівень гідрофільності діелектричної плівки, гідрофільного політетрафторетилену (Н-PTFE) шляхом вступу додаткових груп OH– на чутливу до вологи поверхню Н-PTFE [6] (рисунок 1.3а). Цей підхід призвів до збільшення ємності в  $2 \times 10^4$  разів, ніж її початкове значення з лінійним відгуком.

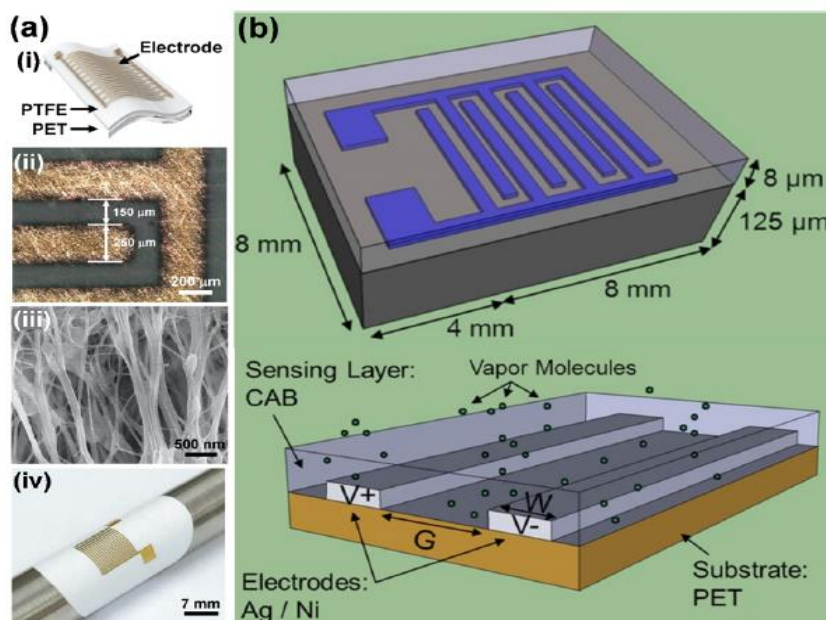


Рисунок 1.3 – Ємнісні датчики вологості

На рисунку 1.3 (та наведено в додатку А рис.2) представлено: (а) Ілюстрація та фотографія датчика вологості Н-PTFE, що демонструє гнучкі

властивості, коли Н-PTFE та PET використовуються як чутливий шар і підкладка відповідно. На вставках (ii) і (iii) показано зображення електродів, отримане за допомогою оптичного мікроскопа, і зображення чутливих мембран, отримане за допомогою автоемісійної скануючої електронної мікроскопії. (b) Механізм чутливості ємнісного датчика вологості з ацетатбутиратом целюлози як чутливий шар і Ag/Ni як електроди. Чутливий шар набухає через вологість і змінюється його діелектрична проникність.

У роботі [17] авторами повідомлено про тип ємнісного датчика вологості з унікальною структурою. Два електроди з мідного дроту були обмотані нитками з різною площею поперечного перерізу, спочатку навколо першого дроту, а потім навколо обох дротів, що призводить до двовісної оболонки. Нитки з більшою кількістю поверхневих каналів показали кращу продуктивність, оскільки через канали могло транспортуватися більше молекул води. Гістерезис був низький під час вимірювань.

Деякі підходи також були розроблені для покращення гідрофільності чутливого шару, включаючи обробку гідрофільного політетрафторетилену (Н-PTFE) гідроксидом натрію (NaOH) для подальшого покращення гідрофільності поверхні Н-PTFE шляхом введення додаткових гідроксильних (OH) груп, завдяки чому досягається підвищена чутливість [16].

Резистивні датчики вологості та інтеграція матеріалів. Резистивне зондування є ще одним найбільш широко використовуваним механізмом, і воно пояснюється іонною провідністю, яка має місце в чутливому шарі. Реакція опору на підвищення відносної вологості може мати позитивну або негативну тенденцію, залежно від чутливого шару та, відповідно, використовуваного механізму.

В іншій роботі використовувався ацетатбутират целюлози (СAB) як чутливий шар на підкладці з PET (рисунок 1.3б).

Одним із прикладів резистивного датчика є дослідження, про яке повідомили в роботі [8], де анодний оксид алюмінію (AAO) за допомогою дисульфід молібдену MoS<sub>2</sub> (відомий як AMHS) був використаний для побудови датчика вологості, який досяг значення чутливості 668 (без одиниці), що значно перевищує рівень чутливості конструкцій, заснованих на чистих датчиках на основі плівки MoS<sub>2</sub> (рисунок 1.4а).

В іншій роботі резистивний датчик з функціоналомбагатошарова вуглецева нанотрубка (FMWCNT)/гідроксіетилцелюлоза (HEC) як чутливий шар (рисунок 1.4б) було повідомлено [9]. У мережі MWCNT провідність забезпечується дірками. Завдяки різниці електричних потенціалів між молекулами води та MWCNTs, електрони від молекул води, які адсорбуються, починають приєднуватися до мережі MWCNT, заповнюючи ці дірки. Зі зменшенням кількості отворів питомий опір зростає. Крім того, через адсорбцію HEC набухає, що призводить до розширення контакту, і підвищена кількість іонів гідроксиду може мігрувати з PVA в адсорбовану воду, фактично збільшуючи кількість перенесених електронів і знижуючи опір. Таким чином, спостерігалось збільшення провідності пористої чутливої мембрани в 70 разів при досягненні температурно-інваріантної роботи.

Опір змінюється на 290%. Подібним чином, в іншому датчику вологості з відновленим вмістом оксиду графену в іншій роботі, як сенсорний матеріал використовувався одновимірний нанобмежений PEDOT:PSS.11 PSS діє як оболонка для ПЕДОТ. Внаслідок адсорбції води спостерігається набухання PSS, а відстань між PEDOT збільшується, що призводить до збільшення питомого опору. Цей датчик залишається в робочому стані та зберігає продуктивність під час згинання до 1000 разів.

В роботі, про яку повідомляють Лі та ін. [10] концентрацію гідроксиду калію (KOH) було змінено, щоб вплинути на провідність пористого іонного шару (ПІМ), що складається з полі(вінілового спирту) (ПВС)/KOH гелю електроліту (рисунок 1.5в). Оскільки KOH краще розчиняється у воді, ніж у PVA, повідомлялося про деяку кількість калію та (rGO) як чутливого шару, а також порівнювали дві альтернативи (rGO та rGO, посилені наночастинками WS<sub>2</sub>). Датчик rGo/WS<sub>2</sub> виявився більш чутливим, ніж датчик rGO [12].

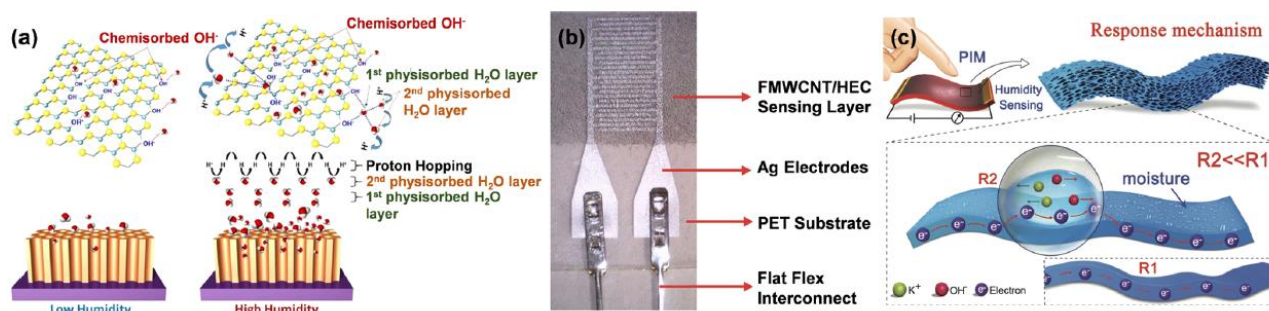


Рисунок 1.4 – Резистивні датчики вологості



На рисунку 1.4 наступні позначення – (a) Перестрибування протонів: іони  $H^+$  зв'язуються з молекулами  $H_2O$  з утворенням гідронієвих іонів ( $H_3O^+$ ), які потім вивільняють  $H^+$  своїм сусіднім молекулам  $H_2O$ , викликаючи безперервний стрибок між послідовними молекулами  $H_2O$ . (b) Фотографія надрукованого датчика вологості FMWCNT/HEC. (c) Сенсорний механізм датчика на основі PIM. Іони  $K^+$  і  $OH^-$  вивільняються з PVA у вологий шар, збільшуючи кількість рухомих електронів і зменшуючи опір.

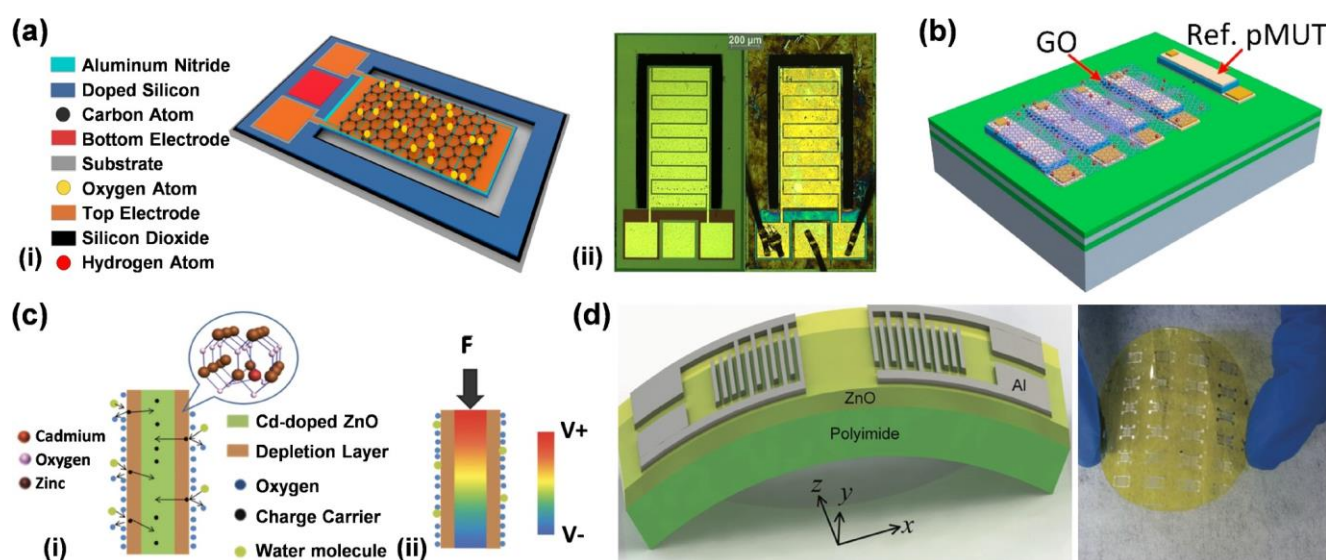


Рисунок 1.5 – Резонансні датчики вологості

На рисунку 1.5 наступні позначення: (a) Резонансний п'єзоелектричний датчик вологості кантилеверного типу з плівкою GO як чутливим шаром: (i) конструкція та матеріали кантилевера, (ii) оптична мікрофотографія сенсора з покриттям GO та без нього. (b) П'єзоелектричний мікромашинний ультразвуковий перетворювач (pMUT) з GO як чутливим шаром. (c) Механізм чутливості п'єзоелектричного датчика вологості: (i) Електронні вакансії у виснаженому шарі заміщуються молекулами води під час адсорбції, електрони вивільняються, а виснажений шар стискається. Збільшення вільних електронів означає зменшення вихідної напруги. (ii) При застосуванні сили вільні електрони зміщуються, і спостерігається спектр напруги через екранування п'єзоелектричних поляризаційних зарядів. (d) Ілюстрація та фотографія датчика вологості SAW на основі Alелектроди та п'єзоелектричні тонкі плівки ZnO.

#### 1.4 П'єзoeлектричні датчики вологості та інтеграція матеріалів

Датчики вологості, що містять п'єзoeлектричний ефект, запропоновані як надійний індикатор рівня вологості з додатковою перевагою механізму збору енергії для забезпечення пристроїв автономним живленням. У роботі, опублікованій Гу та ін. [17]. Нановолокна  $\text{NaNbO}_3$  були запропоновані як активатори для гнучких датчиків вологості разом із забезпеченням збору п'єзoeлектричної енергії, чому сприяє потік електронів до зовнішнього контуру та генерація п'єзoeлектричного потенціалу під напругою згину.

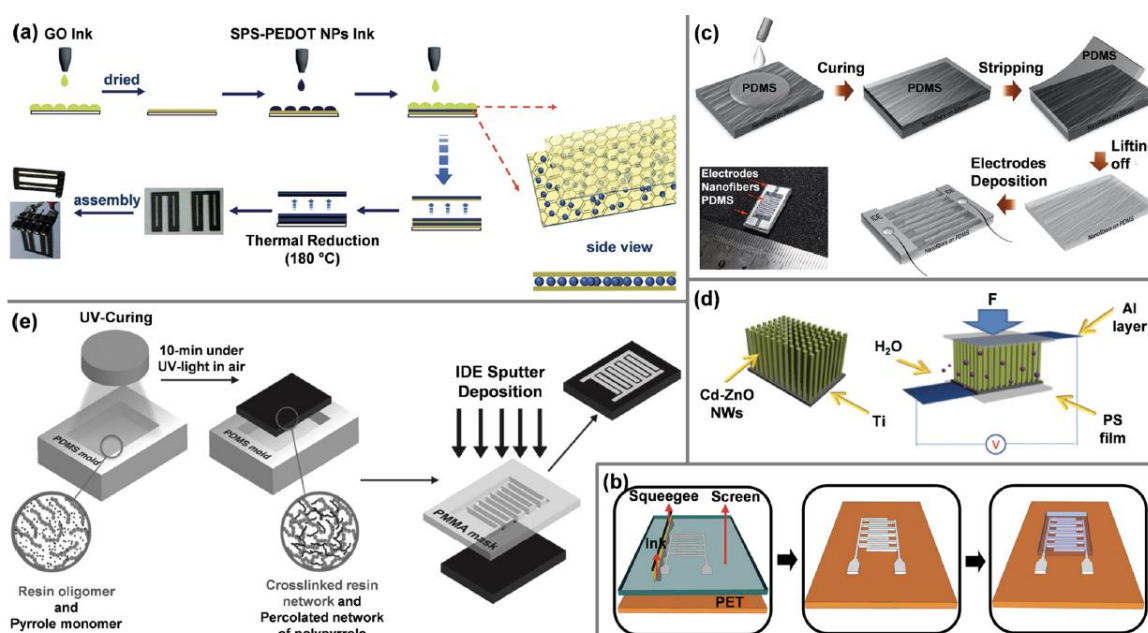


Рисунок 1.6 – П'єзoeлектричні датчики вологості

На рисунку 1.6 прийняті наступні позначення: (a) Наночастинки GO та SPS-PEDOT, надруковані струменевим способом, процес термічного відпалу. (b) Електроди Ag із трафаретним друком і чутливий шар FMWCNT/PEC із глибоким друком. (c) Синтез нановолокон  $\text{NaNbO}_3$  за допомогою електроспінінгу в дальньому полі, спін-покриття PDMS на нановолокна, підйом до передача нановолокна на PDMS, і осадження електродів шляхом розпилення через а тінь маска. (d) Вирощування нанодротів Cd-ZnO вологим хімічним методом, кінцева структура пристрою. (e) Формування полімерної сітки шляхом УФ-затвердіння з наступним осадженням міжпальцевих електродів за допомогою

розпилення постійного струму з акриловою (PMMA) тіньовою маскою.

Резонансний кантилевер, що базується на високому режимі резонатора, використовує GO та нітрид алюмінію (AlN) як чутливий та п'єзоелектричний шари відповідно (рисунок 1.6а). Частотні зрушення відстежували при нормальному збудженні та міжпальцевому перетворювачі (IDT), які демонстрували невеликий гістерезис. Подібним чином була продемонстрована топологія датчика на основі п'єзоелектричного мікромашинного ультразвукового перетворювача (pMUT), спостерігати зміщення частоти з вологістю, де GO був відкладений як чутливий шар (рисунок 1.6б). Наявність вологи призводить до міжшарового розширення між шарами GO та результати при формуванні внутрішньої напруги на шарі pMUT. Відповідно, резонансна частота PMUT змінюється з вологістю, і може бути досягнуто значення чутливості до 719 Гц/%RH [14].

Крім того, виявлення електронів також може відігравати важливу роль у вимірюванні вологості. Повідомлялося, що наногенератор нанодроту ZnO, легований кадмієм, є п'єзоелектричним датчиком вологості на основі принципу детектування електронів, проілюстрованого на рисунку 1.5в. Завдяки легуванню кадмієм (Cd) на поверхні нанодротів утворюється багато кисневих вакансій, що покращує ефективність вимірювання вологості. При значеннях відносної вологості 27, 37 і 65% вимірювання індукованої напруги становили приблизно 0,217, 0,173 і 0,050 В відповідно.

Датчики вологості, що використовують пристрої з поверхневою акустичною хвилею (SAW), пропонують додаткові переваги, такі як менша вартість, низька потужність і простота виготовлення. Як правило, пристрої SAW виготовляються на кремнієвих і поліїмідних підкладках; деякі роботи з PEN гнучкими підкладками також були продемонстровані з використанням кристали LiNbO<sub>3</sub> або LiTaO<sub>3</sub> як п'єзоелектричний матеріал [18]. В іншій роботі пропонується вискоефективний гнучкий датчик вологості SAW з хвилею ягнати, який використовує GO як чутливий шар, виготовлений на п'єзоелектричній плівці ZnO, нанесеній на гнучкополіїмідні підкладки (рисунок 1.6г). Подібним чином повідомлялося про гнучкі та прозорі датчики SAW, що використовують п'єзоелектричний шар ZnO на підкладках PI/PET, де додавання шару GO-сенсору значно покращило чутливість до вологості.



## 1.5 Оптичні датчики вологості та інтеграція матеріалів

Хоча датчики вологості засновані на оптичних волокнах, як правило, не друкують на пластикових підкладках, через гнучку природу особливо пластикових оптичних волокон все ж варто розглядати їх як «гнучкі датчики вологості», враховуючи їх широке використання та деякі основні переваги. Волоконно-оптичні датчики вологості є відносно стійкими до перешкод і можуть передавати дані на великі відстані завдяки низькому затуханню волокон, швидкій реакції, що потенційно дозволяє здійснювати моніторинг у реальному часі, високій чутливості та можливості розгортання в суворих умовах, особливо для моніторингу промислових процесів. на відміну від звичайних датчиків вологості [20].

Оптичні датчики, засновані на поглинанні, також включають датчики, засновані на адсорбції молекул води на чутливій плівці. Наприклад, оптичний датчик вологості покриває ксерогелеву плівку на кінці багатомодового оптичного волокна як чутливий шар, утворюючи два інтерфейси, включаючи волоконний ксерогель і ксерогель пар, повідомлялося.

Було показано, що відбивна здатність плівки зменшується за рахунок збільшення концентрації водяної пари в камері. Підвищення загальної чутливості сенсорної плівки та аналіз ефективних параметрів для покращення продуктивності датчика справді є предметом інтересу для сенсорного механізму. Наприклад, у роботі [22] показано, що додавання Au наночастинки на сенсорній плівці покращують загальну продуктивність.

Було запропоновано датчик швидкоплинних хвиль, що включає чутливу плівку з кобальту, диспергованого в поліанілінових нанокompозитах, яка була нанесена зануренням на ділянку волокна, де було видалено оболонку [23]. Це дозволило частині хвилі поглинатися чутливою плівкою, де поглинений оптичної потужності змінюється залежно від рівня вологості навколишнього середовища.

## 1.6 Виготовлення плівкових сенсорів вологості

Хоча повідомлялося про деякі нетрадиційні методи обробки, процеси друку, такі як струменевий, глибокий і трафаретний друк, є найбільш широко використовуваними підходами до виготовлення гнучких датчиків

вологості.

Струменевий друк. Струменевий друк є універсальною технікою виготовлення гнучких датчиків вологості, оскільки це дозволяє створювати візерунки без масок і пропонує нанесення різноманітних хімікатів чорнила. Одним із прикладів є виготовлений ємнісний датчик вологості на підкладках з ПЕТ за допомогою струминного друку САВ як чутливого шару та чорнила на основі наночастинок срібла для формування міжпальцевої електродної структури.

Подібним чином використовувався метод струминного друку виготовити датчик із діапазоном відносної вологості від 0 до 100%, використовуючи три електроди IDT, з'єднані послідовно з комбінацією PEDOT (poly3,4-ethylenedioxythiophene)-легованих полі-(стиролсульфонат) аніонів (PEDOT:PSS), C<sub>15</sub>H<sub>15</sub>N<sub>3</sub>O<sub>2</sub> (метиловий червоний), і GO [28].

І останнє, але не менш важливе, техніка струминного друку була використана для розробки датчика вологості на основі наночастинок на ПЕТ субстрат з відносною вологістю в діапазоні 11-98%. Зокрема, PEDOT, rGO та відновлення наночастинок золота (NP), модифікованих поліетиленіміном (PEI), були використані для створення чорнила з наночастинок PEDOT:rGO-PEI/Au, яке потім було нанесено за допомогою струминного друку, хімічного осадження з парової фази, нанесення крапельного покриття, і методи лиття на поверхні підкладки для отримання датчика на основі ПЕТ.

Нарешті, шар за шаром застосовувався струменевий спосіб друку для подолання труднощів друку PEDOT під час його проходження через сопло стандартного принтера. У роботі [29] підготовлені наночастинок сульфонатного полістиролу: PEDOT (SPS:PEDOT NPs) і rGO використовували для формування композитної плівки на підкладці з ПЕТ після термічного відпалу (рисунок 1.6а).

**Глибокий та трафаретний друк.** Сумісність із обробкою з рулону на рулон робить технології глибокого та трафаретного друку сприятливими для масового виготовлення недорогих, гнучких датчиків вологості. Наразі кілька досліджень продемонстрували використання підходів глибокого та трафаретного друку, де вивчалися різні комбінації шарів, що сприймають підкладку.

Альтернативний підхід, який поєднує підходи глибокого та трафаретного друку, був використаний для виготовлення датчика вологості на основі композиту зі срібними електродами та функціональними

багатошаровими вуглецевими нанотрубками як чутливим шаром, друк вуглецевих електродів на поліаніліні для завершення виготовлення. Відтворюваність цих методів була продемонстрована шляхом виготовлення партії датчиків і тестування в аналогічних умовах [31].

Процеси чистих приміщень, хоча загалом дорогі, також використовувалися для виготовлення датчиків вологості. Один із підходів, який потенційно можна масштабувати для виробництва рулонів, використовує техніку нановідбитка для створення наноканалів як шаблонів для керування формуванням паралельних масивів нанодротів PEDOT:PSS безпосередньо на підкладці PET при випаровуванні водного розчину PEDOT:PSS.

**Нетрадиційні методи.** Окрім струминного, глибокого та трафаретного друку, для демонстрації датчиків вологості також використовувалися методи обробки, які зазвичай не є стандартними для виготовлення рулонів.

Наприклад, сенсори на основі композитів були реалізовані з використанням гнучкого каппа-карагенану (КС) і вуглецевих нанотрубок (як одностінних, так і багатошарових) методом випарного лиття. Подібним чином повідомлялося про п'єзоелектричні датчики вологості на основі ніобату натрію ( $\text{NaNbO}_3$ ) на основі нановолокон, де нановолокна готували шляхом електро спінінгу в дальньому полі на кремнієвих підкладках і потім переносили на еластомери PDMS. Процедура перенесення включала триетапний підхід, включаючи нанесення PDMS центрифугуванням, затвердіння та відривання PDMS від підкладки. Після перенесення нановолокон між штичкові електроди були сформовані шляхом напилення на тіньову маску для завершення виготовлення пристрою (рисунок 1.6в).

В іншій роботі розчин ПВС і приготовлений холодний водний розчин KOH, що утворює полімерний гелевий електроліт PVA/KOH, використовувався для виготовлення гнучкого датчика PIM за допомогою процесу лиття розчину.

Додатково до легких підходів, заснованих на фазі розчинення, належать дослідження, які включають вологий хімічний синтез чутливих до вологості шарів з наступними такими простими методами пакування, як обклеювання або склеювання. Наприклад, легований кадмієм гнучкий датчик вологості на основі п'єзоелектричних нанодротів (NW) ZnO був реалізований шляхом хімічного синтезу NW Cd-ZnO, які потім наносили на титанову фольгу шляхом занурення фольги в розчин NW. Виготовлення

пристрою було завершено прикріпленням алюмінієвої фольги за допомогою срібної пасти (рисунок 1.7г).

Методи, засновані на полімеризації, також використовувалися для розробки гнучких датчиків вологості. Одним із прикладів є робота з індукованої полімеризацією адсорбції для формування нанорозмірного шару поліпіролу (PPy) на целюлозних поверхнях для формування гнучких датчиків вологості ємнісного типу, виготовлених із целюлозо-поліпірольних нанокомпозитів. Альтернативно, фотохімічна полімеризація PPy (рисунок 1.7д) було повідомлено, при цьому одночасно було проведено УФ-затвердіння ізоляційної мережі (акрилової або епоксидної) та продемонстровано одно етапний метод виготовлення.

Покриття розпиленням та його варіанти є ще одним підходом до ефективної реалізації чутливих до вологи стійких покриттів на полімерних підкладках. Наприклад, кінетичний метод розпилення використовувався для реалізації напівпрозорої гнучкої вологості. Датчик на основі оксиду міді (CuO) як чутливий шар, (рисунок 1.7б). Так само виготовлення датчика аміаку, який також був випробуваний як датчик вологості, включало технології глибокого та трафаретного друку. Поліаніліновий чутливий шар був надрукований глибоким друком на підкладці з ПЕТ з подальшим трафаретним друком мідь частинки були депоновані за а система осадження наночастинок і пізніше окислюється шляхом відпалу в навколишньому середовищі і повітря для отримання шару CuO з хорошою адгезією до поліімідної основи.

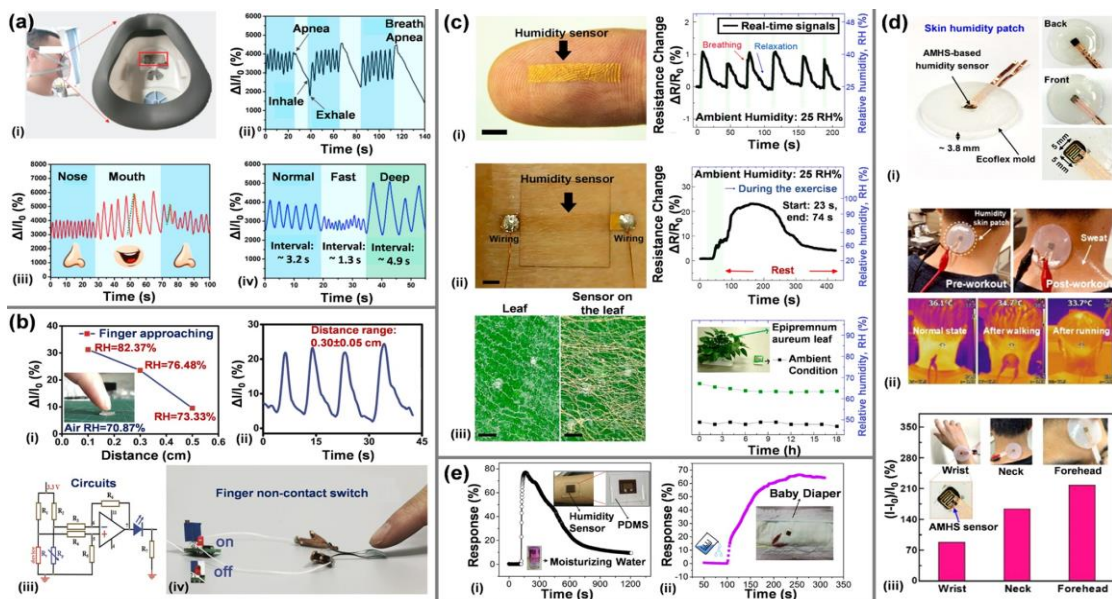


Рисунок 1.7 – Застосування плівкових сенсорів



На рисунку 1.7 (та наведено в додатку А рис.4) прийняті такі позначення: (а) Датчик  $\text{Ag@Fe}_3\text{O}_4\text{-MS}$ : (i) датчик, розміщений усередині респіратору, (ii) моделі дихання, які представляють періоди вдиху, видиху та апное, (iii) дихання носом і ротом, (iv) виявлення нормальне, швидке і глибоке дихання. (b) Датчик вологості на основі пористої іонної мембрани: (i) відгук датчика на різних відстанях при наближенні пальця, (ii) повторюваність через чотири цикли, (iii) схема схеми та (iv) демонстрація безконтактного перемикача. (c) Датчик вологості з наносіткою, протестований на (i) пальці людини, (ii) шкірі на тильній стороні тіла людини та (iii) листі рослини, де реакція викликана змінами дихання людини, поту та умов навколишньої вологості проводився моніторинг. (d) Пластир вологості на основі  $\text{MoS}_2$  (AMHS) із застосуванням ААО: (i) фотографія накладки датчика, (ii) фотографії накладки до та після тренування, прикріпленої до шиї, та ІЧ-зображення при різних температурах під час нормальної роботи, після ходьби та після бігу, (iii) вимірювання відносного струму, отримані, коли накладка розташована на зап'ясті, шиї та лобі. (e) Реакція датчика  $\text{MWCNTs/PLL}$  на зміни вологості на (i) шкірі та (ii) дитячому підгузку.

### 1.7 Застосування датчиків вологості

У літературі представлені численні застосування датчиків вологості, переважно для медичних цілей. Багато повідомлених робіт продемонстрували прототипи програм, які є перспективний з точки зору чутливості та застосовності.

Особливо для відстеження дихання дуже корисні датчики вологості з швидкою реакцією. Під час дихання тепло і вологе повітря видихається, тоді як сухе повітря вдихається, і ця картина аналізується, щоб виявити аномалії в диханні. Гнучкий датчик вологості був прикріплений до пальця досліджуваного та розміщений перед його носом у межах 3 см. Була сформована система бездротової передачі, а чіп Bluetooth передавав сигнали на мобільний телефон для відстеження дихання. Повідомлялося, що глибоке, швидке та нормальне дихання, а також періоди апное в циклі сну успішно розрізняються.

Подібним чином датчик у формі пряжі був вшитий всередині маски.

Для передачі сигналу була сформована бездротова система LC щоб розвинути розумну маску. Результати цієї роботи підтвердили сумісність із

комерційно доступним датчиком. Завдяки винятковому підходу, датчики Zhang et al. [25] були розроблені таким чином, щоб їх можна було легко розрізати на частини, щоб розширити можливості використання. У першій демонстрації датчик Ag@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-MS було розміщено всередині респіратору з метою виявлення дихання (рисунок 1.7а). Крім цього, дихання з носа і рота також правильно розрізняли. Як друге застосування, деякі шматки були нанесені на маску та рукав. За допомогою цього додатка визначається стан гідратації людини до та після вживання води, а також вологість рівень шкіри відстежено успішно.

Поліелектролітні датчики вологості, що забезпечують дуже швидкий час відгуку, використовувалися для моніторингу та виявлення певних моделей дихання або частоти дихання, включаючи нормальне, повільне, швидке, глибоке, випадкове дихання та дихання з паузами. Розвинений датчики вологості також були протестовані в безконтактних датчиках, де вологість і піт на кінчику пальця викликають локальні коливання відносної вологості навколишнього повітря над поверхнею датчика. У датчику на основі РІМ цей принцип використовувався для відстеження змін відносної вологості, що виникають при наближенні пальця, разом із альтернативним сценарієм використання в програмах для оздоровлення та догляду за шкірою, де вміст води на шкірі обличчя відстежувався за різних умов, включаючи використання косметичні продукти (рисунок 1.7б). Результати показали, що існує лінійна тенденція між чутливістю та вмістом води на обличчі, і виявилися сумісними з вимірюванням отримані за допомогою комерційних датчиків.

Окрім відстеження дихання, відстеження поту також привернуло увагу протягом багатьох років. Повітропроникний датчик вологості випробували на пальці, на шкірі та на листі рослини (рисунок 1.7в). Унікальна структура наносітки забезпечувала покращену повітропроникність, де продуктивність датчика була перевірена шляхом тестування на диханні людини, поті під час тренувань, а також відстеженням відносний рівень вологості на поверхні листя рослини. В якості іншого застосування датчика вологості для відстеження інтенсивності потовиділення було запропоновано анодний датчик вологості на основі стільникової структури MoS<sub>2</sub> з Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рисунок 1.7г). Дані відповіді були зібрані за допомогою патч-датчика до тренування, після ходьби та після бігу. Крім того, пластир був протестований на зап'ясті, шиї та лобі, а порівняння відносно повідомлено про поточні зміни.

Ще одна корисна програма - це відстеження вологості дитини пелюшки. Для цієї мети було виготовлено та протестовано датчик на основі композитної плівки MWCNTs/полі-L-лізін (PLL). У порівнянні з сенсорами з чистого MWCNT виготовлена композитна плівка краще реагувала на зміни відносної вологості через гідрофільну природу PLL. Вологість шкіри, а також вологість дитячих підгузників були визначені правильно, і реакція датчика проілюстрована на рисунку 1.7д.

Не в останню чергу Park et al. [6] продемонстрував установку моніторингу в реальному часі, де датчик вологості був розміщений на вигнутій поверхні. Система була розташована над склянкою з водою, а потім видалена, щоб зміни рівня вологості навколишнього середовища відстежувалися за допомогою безперервної передачі сигналу на мобільний телефон.

### 1.8 Сучасні системи моніторингу погоди

Сучасні системи моніторингу погоди часто залишаються недоступними для дрібних користувачів і місцевих громад через їх високу вартість і складність. Цей документ розглядає цю важливу проблему, представляючи економічно ефективну, просту у використанні місцеву метеостанцію. Використовуючи недорогі датчики, ця метеостанція є ключовим інструментом для того, щоб зробити моніторинг навколишнього середовища більш доступним і зручним, особливо для тих, хто має обмежені ресурси. Він пропонує ефективні вимірювання на місці різноманітних параметрів навколишнього середовища, таких як температура, відносна вологість, атмосферний тиск, концентрація вуглекислого газу та твердих часток, у тому числі PM 1, PM 2,5 та PM 10. Результати демонструють здатність станції контролювати ці параметри, змінні віддалено та забезпечують прогнози з високим ступенем точності, відображаючи похибку лише 0,67%. Крім того, використання станцією моделі авторегресійної інтегрованої ковзної середньої (ARIMA) дозволяє складати короткострокові надійні прогнози, важливі для застосування в сільському господарстві, транспорті та моніторингу якості повітря. Крім того, відкритий вихідний код метеостанції значно покращує доступність моніторингу навколишнього середовища для невеликих користувачів і заохочує ширший обмін даними для громадськості. Завдяки такому підходу, який має вирішальне значення для вирішення проблем,

пов'язаних зі зміною клімату, станція дає можливість громадам приймати обґрунтовані рішення на основі даних у реальному часі. При проектуванні та розробці цієї недорогої, ефективної системи моніторингу ця робота забезпечує цінний план для майбутніх досягнень екологічних технологій, наголошуючи на стійкості. Запропонована автоматична метеостанція не тільки пропонує економічне рішення для моніторингу навколишнього середовища, але також має зручний інтерфейс для безперебійного обміну даними між сенсорною платформою та кінцевими користувачами. Ця система забезпечує передачу даних через різні веб-платформи, призначені для користувачів із різним технічним досвідом. Крім того, використовуючи історичні дані за допомогою моделі ARIMA, станція підвищує свою корисність у наданні короткострокових прогнозів і підтримці критичних процесів прийняття рішень у різних секторах.

Моніторинг місцевого середовища є надзвичайно важливим заходом, який дозволяє краще зрозуміти виклики зміни клімату та способи на них реагувати. Зміни навколишнього середовища зазвичай стосуються змін у природному оточенні Землі, які можуть статися через різні фактори, такі як діяльність людини, зміна клімату, стихійні лиха та інші природні процеси. Ці зміни можуть значно вплинути на навколишнє середовище та вплинути на багато сфер, включаючи екосистеми, біорізноманіття, водні ресурси та здоров'я людини [31]. Однією з основних сфер, на яку впливають зміни навколишнього середовища, є екосистеми. Екосистеми — це складні системи живих організмів, їхнього фізичного середовища та їх взаємодії [32].

Зміни навколишнього середовища можуть порушити крихкий баланс цих систем і завдати значної шкоди видам рослин і тварин і цілим екосистемам. Наприклад, вирубка лісів може призвести до втрати середовища існування та поставити під загрозу виживання багатьох видів рослин і тварин. У той же час підкислення океану може завдати шкоди морським екосистемам і порушити харчовий ланцюг [33]. Зміни навколишнього середовища також впливають на біорізноманіття; біорізноманіття відноситься до різноманітності живих організмів на Землі та екосистем, які вони населяють. Зміни навколишнього середовища, такі як руйнування середовища існування, зміна клімату та забруднення, можуть призвести до втрати біорізноманіття, оскільки види не можуть адаптуватися до мінливих умов [34]. Ця втрата біорізноманіття може мати далекосяжні наслідки, включаючи втрату



екосистемних послуг, таких як запилення та очищення води.

Водні ресурси також зазнають впливу змін навколишнього середовища. Зміни температури, режиму опадів і землекористування можуть вплинути на наявність і якість водних ресурсів. Наприклад, зміна клімату може призвести до зміни режиму опадів, що може вплинути на доступність води та призвести до посух і повеней. Забруднення внаслідок діяльності людини також може забруднювати джерела води та впливати на здоров'я водних екосистем. Крім того, зміни навколишнього середовища також можуть мати значний вплив на здоров'я людини. Забруднення повітря, наприклад, може спричинити проблеми з диханням, тоді як вплив хімічних речовин та інших забруднювачів може призвести до довгострокових проблем зі здоров'ям, таких як рак і репродуктивні проблеми [35]. Температурний режим і режим опадів також можуть впливати на поширення таких хвороб, як малярія та лихоманка денге [36, 37]. У результаті зміни навколишнього середовища можуть суттєво вплинути на багато сфер, включаючи екосистеми, біорізноманіття, водні ресурси та здоров'я людини.

Звернення до цих змін і робота над стійкими рішеннями є важливими для забезпечення здорової та придатної для життя планети. На жаль, існуючі рішення для моніторингу погоди обмежені високими витратами, пов'язаними з датчиками, цифровими системами, пристроями зв'язку, джерелами живлення, навченим персоналом для обслуговування та експлуатації, обмеженим охопленням і недостатнім обміном даними з громадськістю [38]. Ці обмеження заважають дрібним користувачам, таким як фермери, транспортні компанії та місцеві урядові установи, отримати доступ до надійних і доступних даних про погоду. Технологія моніторингу погоди постійно розвивається, щоб подолати ці обмеження та надати кращі рішення для користувачів.

Актуальність економічно ефективного моніторингу погоди очевидна в сучасному кліматичному ландшафті. Такий моніторинг є ключовим, особливо з огляду на виклики швидких змін навколишнього середовища та потребу в своєчасному реагуванні. Національне управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA) було в авангарді цього, розробляючи наземні причали, обладнані економічно ефективними датчиками для моніторингу взаємодії повітря і моря, поглинання вуглекислого газу та параметрів верхніх шарів океану, наголошуючи на важливості даних у реальному часі. обмін [39]. Однією з важливих тенденцій у технології

моніторингу погоди є бездротові сенсорні мережі (WSN), рішення, яке є доступним і ефективним [40]. WSN складаються з невеликих малопотужних датчиків, розподілених на великій території та зв'язаних із центральною базовою станцією для передачі даних [41]. Ця технологія збирає дані з високою роздільною здатністю в режимі реального часу та знижує вартість традиційних рішень моніторингу погоди та вимоги до обслуговування [42].

Еволюція обміну даними, сприяла прогресом як державних, так і приватних онлайн-платформ, гарантує, що користувачі отримують інформацію в реальному часі, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень у різних секторах [13]. У результаті дані про погоду можна використовувати для розробки програм, які надають цінну інформацію та підтримку прийняття рішень для різних галузей промисловості. Сучасна технологія моніторингу погоди постійно вдосконалюється за допомогою WSN, IoT, AI та вдосконалення обміну даними [14]. Завдяки цим технологіям доступ до надійних і точних даних про погоду, що має вирішальне значення для реагування на виклики, пов'язані зі зміною клімату, стає більш доступним для маленьких користувачів.

Стаціонарні станції — це наземні станції, призначені для прийому та передачі сигналів із супутників. Ці станції зазвичай мають системи супутникового зв'язку, такі як супутникове телебачення та Інтернет-послуги. Стаціонарні станції стаціонарні та не рухаються, що робить їх ідеальними для встановлення стабільного зв'язку із супутниками та довготривалих досліджень [43].

З іншого боку, супутникові зображення - це фотографії Землі, зроблені з космосу за допомогою супутників. Ці зображення можна використовувати для різних цілей, наприклад для прогнозування погоди, міського планування та управління природними ресурсами. Супутникові зображення зроблені за допомогою супутникових камер, що обертаються навколо Землі [38].

Для комплексного вирішення складнощів екологічного моніторингу важливо розуміти різноманітність технологічних систем і методологій, що застосовуються в цій галузі:

- **Стаціонарні станції:** наземні станції, які приймають і передають сигнали від супутників.
- **Супутникові зображення:** фотографії Землі, зроблені з космосу за допомогою супутникових камер.

- **Мобільні станції:** станції, які можуть рухатися та використовуються в системах мобільного супутникового зв'язку, таких як супутникові телефони та пристрої GPS.
- **Дистанційне зондування:** процес збору даних про Землю на відстані, зазвичай за допомогою супутників або літаків. Дистанційне зондування можна використовувати для різних застосувань, наприклад для моніторингу навколишнього середовища та картографування землекористування.
- **Спостереження Землі:** використання супутників та інших платформ для моніторингу та вивчення поверхні Землі, атмосфери та океанів. Спостереження Землі можна використовувати для різних цілей, таких як прогноз погоди, реагування на стихійні лиха та управління сільським господарством.

Місцеві метеостанції надають точні дані в реальному часі для різних застосувань, від сільського господарства до міського планування. Однак із швидкими змінами умов навколишнього середовища та зростанням складності погодних умов зростає потреба в розширених вимірюваннях та інноваційних методах моніторингу. Останні досягнення, такі як інтеграція машинного навчання з міськими автобусами, показали багатообіцяючі результати в моніторингу та прогнозуванні погоди в режимі реального часу, підкреслюючи важливість локалізованого збору даних [44]. Крім того, включення бездротових сенсорних мереж у процеси управління сільським господарством підкреслює важливість індивідуальних вимірювань на місцях для оптимізації виробництва та забезпечення екологічної стійкості [45].

У цьому документі представлено інноваційне рішення для усунення вищезазначених обмежень шляхом впровадження локальної метеостанції з відкритим кодом (OSWS), локалізованої та доступної платформи зондування. OSWS призначений для моніторингу ряду змінних навколишнього середовища, включаючи температуру, відносну вологість, атмосферний тиск, концентрацію CO<sub>2</sub> і тверді частинки (PM 1, PM 2,5 і PM 10), пропонуючи швидкі та економічно ефективні вимірювання на місці. Крім того, станція володіє цими змінними і може прогнозувати їх значення, використовуючи історичні дані, отримані за допомогою моделі авторегресійної інтегрованої ковзної середньої (ARIMA). Можливості моніторингу в реальному часі OSWS відіграють вирішальну роль у наданні точних даних, які допомагають процесам прийняття рішень у

різноманітних сферах, таких як сільське господарство, транспорт і додатки моніторингу якості повітря [18].

Основні цілі цього дослідження зосереджені навколо розробки та впровадження OSWS, який пропонує економічно ефективне рішення для моніторингу навколишнього середовища, особливо для невеликих користувачів. Цей документ має на меті використовувати відкритий вихідний код OSWS для покращення обміну публічними даними та забезпечення безперебійного зв'язку між платформою зондування та кінцевими користувачами, забезпечуючи доступність цінних даних для прийняття обґрунтованих рішень і вирішення екологічних проблем, пов'язаних зі зміною клімату.

Крім того, проектування, розробка та оцінка цієї метеостанції служать моделлю для майбутніх недорогих і ефективних систем моніторингу. Його доступність і можливості моніторингу в реальному часі можуть значно сприяти просуванню зусиль щодо сталого розвитку та пом'якшенню несприятливих наслідків зміни клімату. Інтерфейс WS з кінцевими користувачами має вирішальне значення для ефективного обміну даними та прийняття обґрунтованих рішень.

Загалом доступність і можливості моніторингу в реальному часі OSWS є економічно ефективним рішенням для моніторингу навколишнього середовища та обміну даними. Комплексний підхід у проектуванні, розробці та оцінці цього пристрою містить цінну інформацію для розробки аналогічних недорогих і ефективних систем моніторингу, що в кінцевому підсумку сприяє стійкості та пом'якшенню впливу зміни клімату.

Було проведено систематичний огляд, щоб забезпечити повне розуміння недорогого місцевого прогнозу погоди. Стратегія пошуку була націлена на авторитетні наукові журнали, запитуючи різні бази даних, зосереджуючись на статтях, які наголошують на інноваційних методах або пристроях моніторингу погоди. Критерії відбору були вдосконалені, щоб віддати пріоритет рецензованим журнальним статтям, які обговорювали проблеми та потенціал економічно ефективних і локалізованих методів прогнозування погоди. Після визначення відповідних журнальних статей було застосовано ретельний метод аналізу даних. Це включало вилучення та синтез даних, пов'язаних з ефективністю, витратами та використаними матеріалами (таблиця 1.1). Синтезовані дані дозволили зрозуміти прогрес і проблеми недорогого місцевого прогнозування погоди. На рисунку 1.8 показано порівняння вартості комерційних метеостанцій, прототипів і



OSWS.

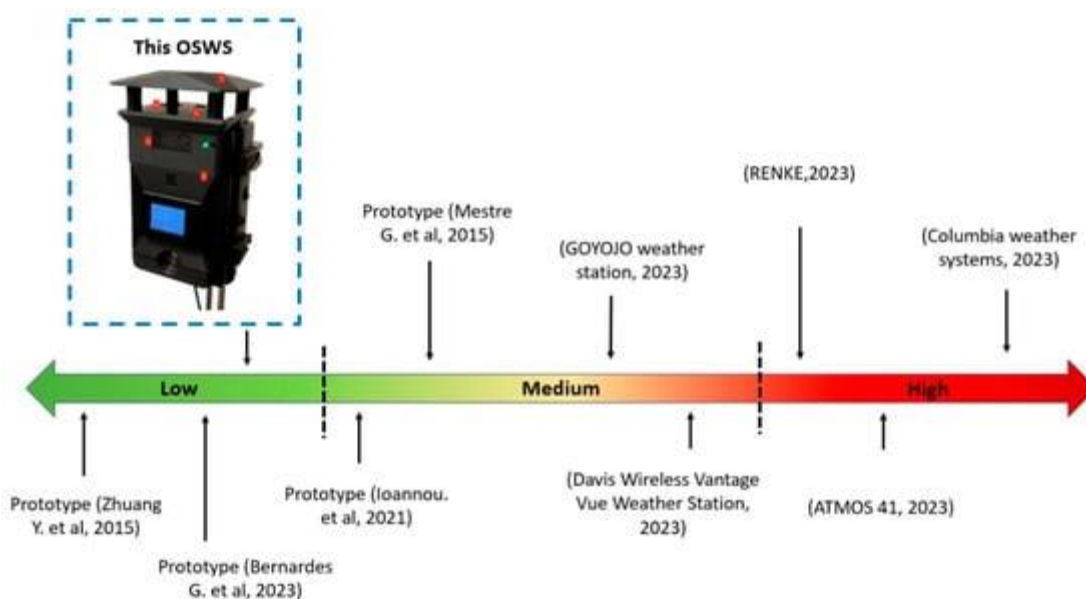


Рисунок 1.8 – Порівняння вартості між різними метеостанціями

Таблиця 1.1 – Сучасний стан на основі суміжних проєктів

Variables	IN/OUT	DY	ST	WT	MIT	PS	Aut. B	Op-S	IW	Design
Temperature and RH SH1775 Solar radiation: SP110	Both: Ip65 Box Solar radiation shield 2 m mast	No	RPI SQLite and send to ThingSpeak	Xbee RF	Configurable between 30 s to 5 min	Solar panel with battery 10 Ah AC	24 h	No	No	Compact
NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> : NO2A43F/OXA431 PM 10, PM 2.5: SD5011 Temperature, humidity, atmospheric pressure	Both: Ip 67	No	SD Card	Bluetooth	25 s fixed	Internal rechargeable battery AC	8 h	No	No	Compact
PM 2.5, temperature, humidity	No	No	SD Card	No	Not specified	Alkaline 9V battery	Not specified	No	No	Compact
NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, PM 2.5, temperature, and humidity	Both	No	No local storage. Only Server connection	Lora	10 s fixed	Solar panel	Not specified	Yes	No	Compact
Air temperature, rainfall, wind speed, wind direction, relative humidity, atmospheric pressure	Both	No	2 GB SD Card	SIM900 GPRS	1 min fixed	55 W Solar panel	Not specified	No	No	Compact
Soil humidity Soil temperature Air temperature Air humidity Atmospheric pressure Wind vane Wind direction Rain gauge	Both	No	16 GB SD Card	ESP32 WiFi	1 h fixed	Solar panel 55 W Li-ion battery	1.5 months Only 1 mea- surement per hour	No	No	Compact
Air temperature, relative humidity, atmospheric pressure, CO <sub>2</sub> , PM 1, PM 2.5, PM 10	Both IP65 box 1.6 mast	Yes 24" TFT	32 GB SD Card ThingSpeak server	ESP8266 WiFi	Configurable: 30 s, 1 min, 10 min, 30 min, 1 h, 12 h, 24 h.	Solar panel 100 W AC Internal Li-ion battery	48 h in full mode	Yes Exportable data in CSV API integration	Yes Aluminum foil	Compact All-in-one

## 1.9 Висновки до розділу

У цьому розділі було розглянуто різноманітні матеріали, технології виготовлення та сенсорні механізми, які використовувалися для гнучких датчиків відносної вологості, щоб продемонструвати сучасний рівень техніки та надати критичний огляд їх ефективності разом із обговоренням. Про можливі сфери застосування сенсорів вологості. Грунтуючись на останніх тенденціях розвитку, показано, що гнучкі датчики вологості продовжуватимуть привертати увагу, оскільки вони виявилися корисними для багатьох застосувань, у яких сенсорний елемент потрібно згинати, розтягувати чи згинати, як у носимих додатках, або потрібно відповідати попередньо налаштованій поверхні, які водночас можуть перебувати в екстремальних середовищах. Хоча на ринку в даний час домінують датчики вологості, які засновані в основному на ємнісних і резистивних принципах сприйняття, розробки оптичних і п'єзоелектричних датчиків також є перспективними завдяки їхнім унікальним перевагам у стійкості до перешкод і роботі з автономним живленням. Завдяки подальшим розробкам чутливих до вологості функціональних чорнил, матеріалів підкладки та технологічних процесів стануть можливими недорогі та повсюдні гнучкі датчики вологості з чудовою чутливістю та радіусом дії, які також, як очікується, призведуть до нових додатків IoT та IoHT.

## **2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХІДНИМ СИГНАЛОМ ТА ВОЛОГОЧУТЛИВИМ ЄМНІСНИМ ЕЛЕМЕНТОМ З ЕКРАНУЮЧИМ ЕЛЕКТРОДОМ ПІД МІЖШТОВХОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ**

Останнім часом датчики вологості були широко досліджені через їх широке застосування у виробництві мікросхем, охороні здоров'я, сільському господарстві тощо. Пропонується ємнісний датчик вологості з екрануючим електродом під міжштовховим електродом (SIDE) на основі поліамід (PI). Завдяки екрануючому електроду цей датчик вологості поєднує в собі високу чутливість ємнісних датчиків з паралельними пластинами та швидку реакцію ємнісних датчиків з міжштовховими електродами. Ми використовуємо COMSOL Multiphysics для розробки та оптимізації структури SIDE. Експериментальні дані показують дуже хорошу згоду з моделюванням. Чутливість датчика SIDE становить  $0,0063\% \pm 0,0002\% \text{ RH}$ . Його час відгуку/відновлення становить 20 с/22 с. Максимальний дрейф ємності за різної відносної вологості становить 1,28% RH.

### **2.1 Вологочутливий ємнісний елемент з екрануючим електродом**

Крім повсякденних застосувань, таких як кондиціонери та зволожувачі повітря, датчики вологості широко використовуються в управлінні промисловими процесами, медицині, виробництві харчових продуктів, сільському господарстві та метеорологічному моніторингу [47]. У промисловості багато виробничих процесів, таких як виробництво напівпровідників і хімічне очищення газу, покладаються на точно контрольований рівень вологості. У медичній науці під час операцій необхідно контролювати вологість навколишнього середовища. У сільському господарстві датчики вологості використовуються для кондиціонування теплиць, захисту насаджень (запобігання росі), моніторингу вологості ґрунту та зберігання зерна. Крім того, у метеорологічному моніторингу бюро погоди та програми моніторингу морського середовища покладаються на точне вимірювання вологості. Для сучасного сільського господарства [48] і метеостанції [49] точне та швидке вимірювання вологості стає все більш важливим. У

порівнянні з існуючими інфрачервоними датчиками вологості, електронні датчики вологості дешевші, легші та менші, що робить їх більше підходить для сенсорних мереж для живлення моделей погоди. Тим не менш, високоточні датчики зі швидким відгуком важливі для багатьох сфер. Наприклад, швидке й точне вимірювання вологості має вирішальне значення для вихрових коваріаційних систем [50]. Отже, електронні датчики мають стати швидшими та точнішими. Електронні датчики вологості можна розділити на резистивні та ємнісні [51]. Резистивні датчики вологості, як правило, мають більший коефіцієнт підсилення та зазвичай дешевші у виробництві, ніж ємнісні датчики вологості датчики. Однак ці датчики погано реагують на роботу при низькій відносній вологості (приблизно 10% відносної вологості), оскільки вони демонструють дуже низьку провідність у середовищах із низькою відотною вологістю, що ускладнює вимірювання вихідної реакції [52]. Навпаки, ємнісні датчики вологості краще лінійність, точність і вищу термічну стабільність, ніж резистивні датчики вологості [53]. Ємнісний датчик вологості реагує на зміни вологості змінами відносної діелектричної проникності чутливого шару, наприклад полімерної плівки, після поглинання водяної пари. Таким чином, можна безпосередньо виявляти зміни ємності, щоб стежити за змінами вологості. На відміну від резистивного датчика вологості, ємнісні датчики вологості відповідають лінійно на вологість, що спрощує зчитування датчика.

Як датчики вологості можна використовувати різні матеріали, наприклад електроліт [20], кераміка [21], пористий неорганічний матеріал [23] та полімери [27]. Зокрема, полімери використовувалися як чутливі матеріали для ємнісних датчиків вологості завдяки їх хорошим діелектричним властивостям, що виникають через їхню мікропористу структуру та вимірні зміни фізичних властивостей через водопоглинання. PI є одним з найбільш часто використовуваних матеріалів для визначення вологи [30] завдяки хорошій механічній міцності, електрохімічній стабільності та гнучкості [31]. Він залишається стабільним після тривалого впливу вимірювального середовища. Крім того, PI є мікропористим матеріалом з імідомгрупи, які міцно зв'язують молекули води, що робить діелектричну проникність матеріалу дуже чутливою до вологості. Тому в пропонованому ємнісному датчику ми використали PI.

Ємнісні датчики вологості мають дві основні структури: ємність паралельної пластини (PP) (рис.2.1a) (та наведено в додатку А рис.5) і

ємність міжпальцевого електрода (IDE) (рис.2.1б).

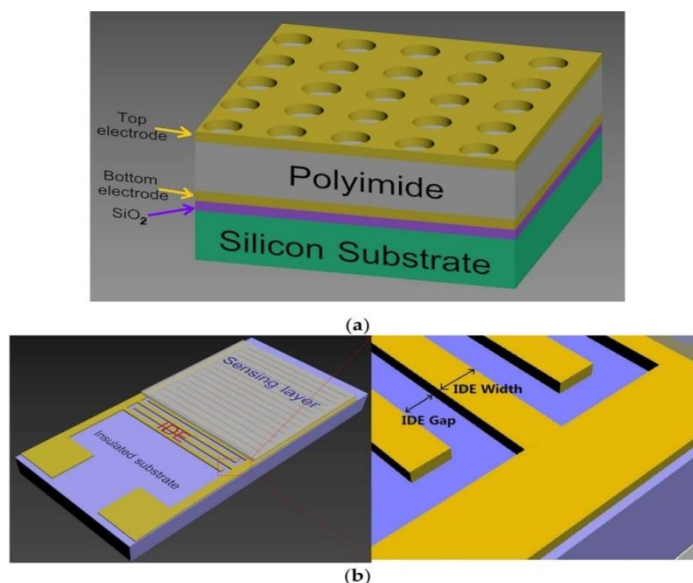


Рисунок 2.1 – Структурна схема датчиків з паралельними пластинами (PP) і міжпальцевими електродами (IDE). (а) PP датчики, що складаються з твердої підкладки, двох шарів паралельного пластинчастого електрода та чутливого матеріалу між ними. (б) Датчики IDE, що складаються з інертної підкладки, IDE та шару чутливого матеріалу поверх IDE. Праворуч показано частково збільшену деталь IDE

У датчиках ПП верхня пластина перфорована низкою отворів або паралельних смуг, щоб дозволити молекулам води з повітря досягти чутливого матеріалу під ним. Оскільки зона чутливості конденсатора PP розташована між двома паралельними пластинами, зміна відносної діелектричної проникності чутливого матеріалу в датчиках PP впливає на загальну зміну ємності. На відміну від датчиків PP, датчики IDE зазвичай впливають лише на зміну верхньої ємності IDE, що робить їх менш чутливими, ніж датчики PP. Однак відкрита зона чутливості датчиків PP менша, ніж для датчиків IDE, що спричиняє повільнішу реакцію, ніж для IDE.

IDE виготовляються на інертній твердій або гнучкій підкладці у вигляді паралельних гребінчастих електродів, які перекривають один одного [32]. Датчики IDE легше виготовити, ніж датчики PP. Чутлива площа IDE зазвичай становить кілька квадратних міліметрів, а проміжок між електродами становить кілька мікрон. Чутливість цього типу датчика зростає зі зменшенням кроку [33]. Напруженість



електричного поля над IDE експоненціально зменшується від поверхні електрода і стає однією тридцятою або навіть нижче значення поверхні через кілька мікрон. Тому у випадку, коли проміжок між IDE становить кілька мікрон, достатньо чутливого шару товщиною лише кілька мікрон. Завдяки тому, що цей шар повністю відкритий для вимірювального середовища, датчики IDE працюють швидше. Проте в IDE лише половина ліній електричного поля проходить через чутливий шар, а інша половина ліній електричного поля проходить через підкладку, що лежить під ним. Таким чином, датчики IDE матимуть лише половину або менше чутливості (залежно від відносної діелектричної проникності підкладки) порівняно з еквівалентним датчиком PP [36].

Зрозуміло, що є переваги та недоліки цих двох типів датчиків. Були докладені значні зусилля для вдосконалення структур датчиків. Наприклад, Zhao et al. використовували RIE (Reactive Ion Etching) і ICP (Inductively Couple Plasma) для травлення чутливих матеріалів між паралельними пластинами датчиків, щоб отримати більшу площу контакту з тестованим середовищем, щоб зменшити час відгуку з 35 с до 25 с [37], але це все одно було повільніше порівняно з типовими еквівалентними IDE.

Натхненний поєднанням переваг структур PP та IDE, у цій статті пропонується новий датчик вологості IDE з екрануючим електродом під IDE, а саме SIDE. Збоку ємність нижньої половини IDE екранується додатковим електродом під IDE, що ефективно збільшує відносну зміну ємності під час впливу вологи. Таким чином, датчик вологості SIDE поєднує в собі високу чутливість датчиків PP і швидку реакцію (20 с), як у IDE.

У цьому розділі перевірено структури SIDE, промодельовано товщину чутливого шару з різними проміжками між електродами та товщина діелектрика між екрануючим електродом і IDE були оптимізовані щодо чутливості та швидкості відгуку.

## 2.2 Симуляція SIDE

COMSOL Multiphysics® (Стокгольм, Швеція) використовується для моделювання структури SIDE та IDE. Рисунок 2.2а (та наведено в додатку А рис.б) показує структуру SIDE. Розмір цього датчика становить 13 мм × 6 мм із зоною сприйняття 1,6 мм × 1 мм. Датчик

складається з екрануючого електрода товщиною 100 нм, діелектричного шару діоксиду кремнію товщиною 1 мкм, стандартного шару IDE 100 нм і плівки PI як чутливого шару. Довжина пальця міжпальцевого електрода становить 1 мм, а ширина та зазор 5 мкм. Всього використовується 80 пар IDE. Шар PI товщиною 5 мкм використовується як чутливий до вологості шар. Оскільки відносна діелектрична проникність PI лінійно зростає з вологістю [44], ми моделюємо зміни вологості шляхом безпосередньої зміни відносної діелектричної проникності PI. Реалізована модель IDE з такими ж структурними параметрами, як і SIDE, з тією лише різницею, що відсутність екрануючого електрода.

Рисунок 2.2b показує результати моделювання швидкості зміни ємності ( $\Delta C/C_0$ ) SIDE та IDE за різної відносної діелектричної постійної PI, що представляє умови вологості.  $C_0$  — загальна ємність, коли відносна діелектрична проникність чутливого шару становить 2,9.  $\Delta C$  — це різниця ємностей між будь-якою іншою відносною діелектричною проникністю PI та 2,9. Можна побачити, що за тих же умов  $\Delta C/C_0$  структури SIDE приблизно в 4 рази більше, ніж у структури IDE, що означає, що SIDE матиме набагато вищу чутливість, ніж IDE з такими ж параметрами.

Вплив товщини сенсорної плівки на  $\Delta C_{\max}/C_0$  також моделюється COMSOL Multiphysics® (Стокгольм, Швеція). Ми визначаємо, що  $\Delta C_{\max}/C_0$  дорівнює  $\Delta C/C_0$  з відносною діелектричною проникністю PI 2,9 ( $C_0$ ) і 3,7 ( $C_{\max}$ ), що вказує на чутливість датчика.

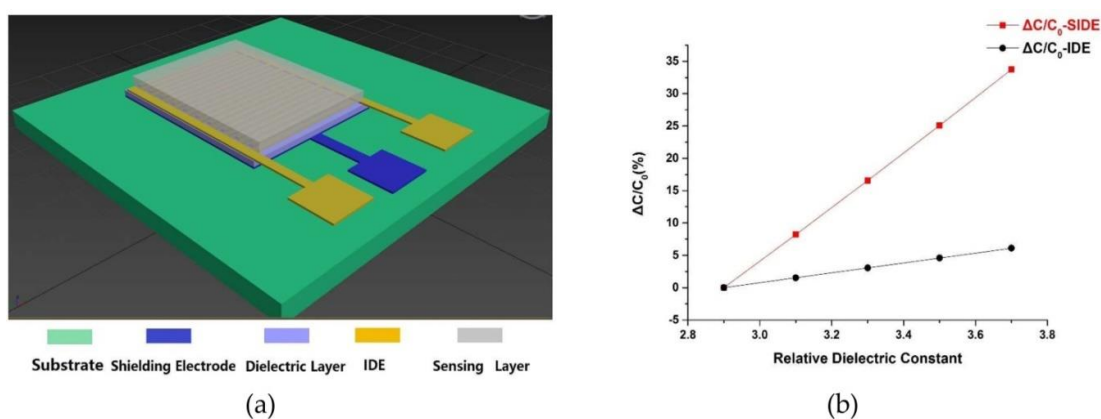


Рисунок 2.2 – Структура SIDE та результати моделювання. (a) 3D модель структури SIDE; (b) Порівняння відносної зміни ємності структур SIDE (червона лінія) і IDE (чорна лінія) відповідно до чисельного моделювання

Рисунок 2.3 показує, що  $\Delta C_{\max}/C_0$  збільшується зі збільшенням товщини сенсорної плівки, але вирівнюється при більшій товщині. Щоб оптимізувати товщину чутливої плівки, слід взяти до уваги два факти. З одного боку, зрозуміло, що коли товщина сенсорної плівки дорівнює проміжку між IDE (як пунктирні лінії на рисунку 2.3),  $\Delta C_{\max}/C_0$  майже досягає насичених значень. Немає значного збільшення  $\Delta C_{\max}/C_0$  із товщою чутливою плівкою, ніж зазор. З іншого боку, товщина чутливої плівки також впливає на швидкість молекул води, які повністю дифундують у чутливу плівку, який визначає реакцію датчика та час відновлення. Тому ми вибираємо оптимізовану товщину сенсорної плівки, що дорівнює проміжку між IDE. Враховуючи лабораторні умови, ми встановили ширину та зазор IDE на 5 мкм.

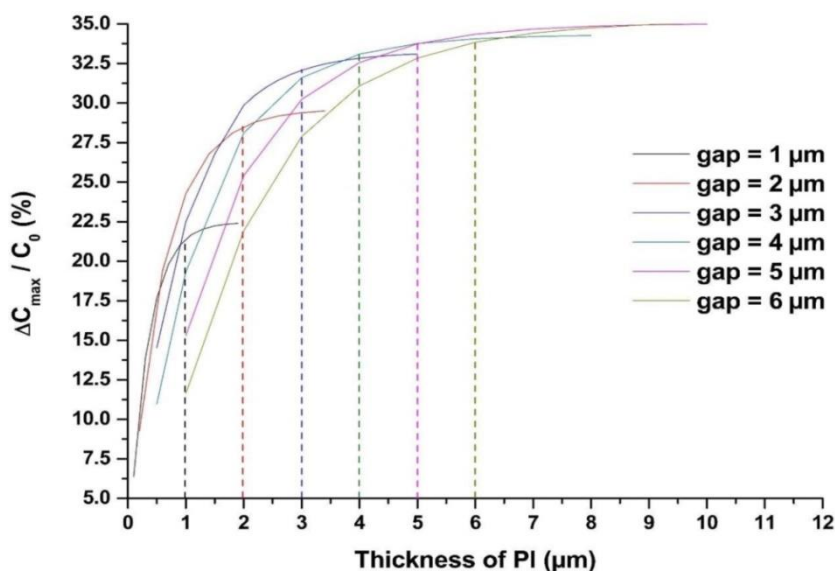


Рисунок 2.3 – Вплив товщини сенсорної плівки на чутливість датчика. Вертикальна ордината перетину всіх пунктирних ліній і суцільних кривих представляє  $\Delta C_{\max}/C_0$ , коли товщина чутливої плівки дорівнює проміжку між IDE

Також вивчається вплив відстані між екрануючим електродом і IDE, тобто товщина діоксиду кремнію під IDE, на чутливість у структурі SIDE. Рисунок 2.4 показує, що зі збільшенням товщини шару діоксиду кремнію  $\Delta C_{\max}/C_0$  спочатку зростає, а потім зменшується з оптимальним значенням товщини SiO<sub>2</sub> 1 мкм.

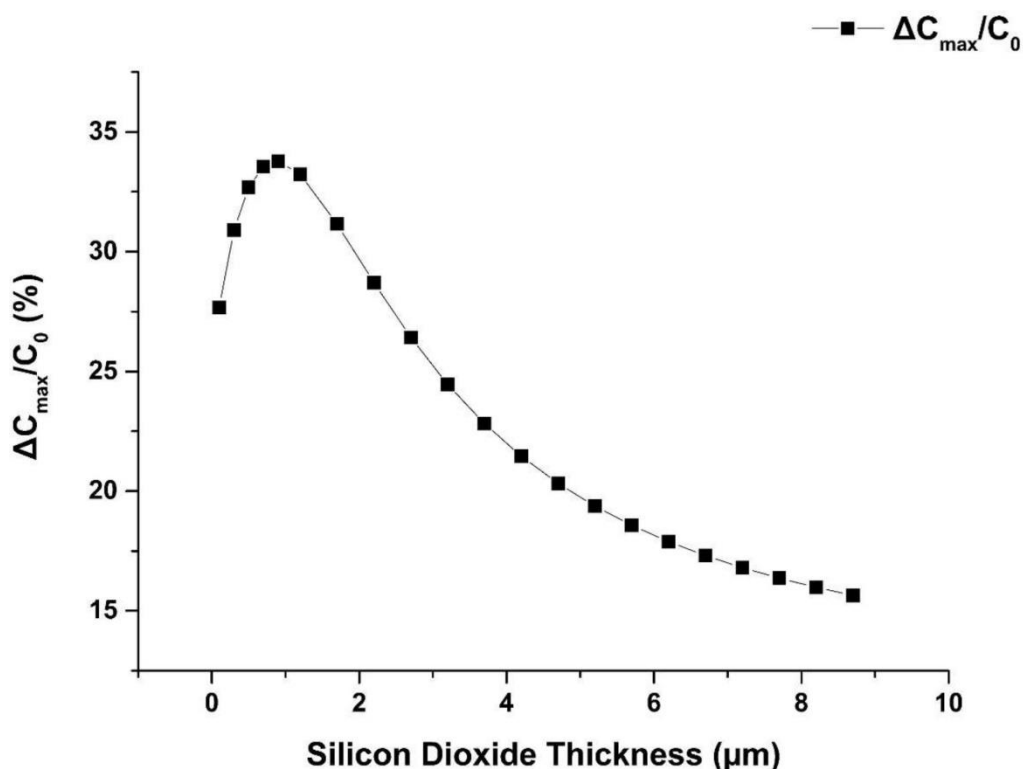
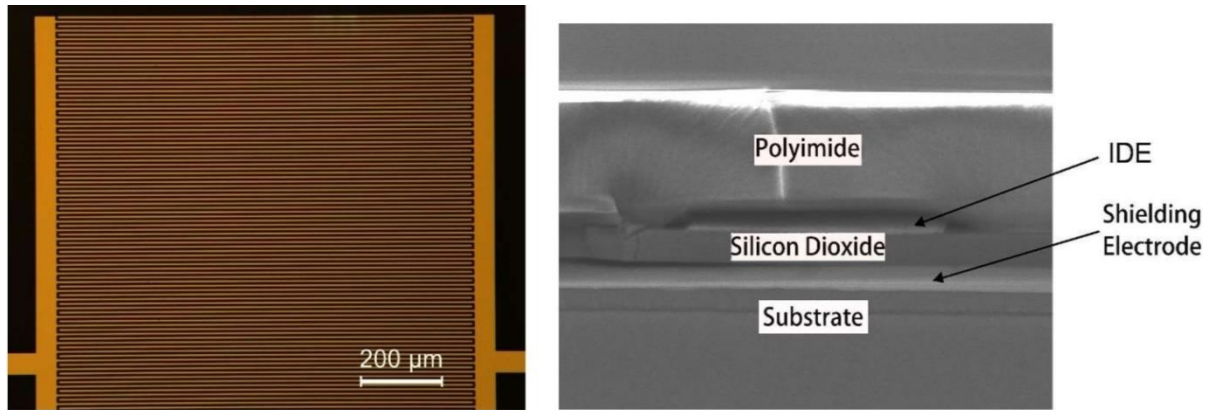


Рисунок 2.4 – Вплив товщини діоксиду кремнію на чутливість сенсора. Для збільшення товщини шару діоксиду кремнію повна чутливість спочатку збільшується, а потім зменшується після оптимального значення

Існує кілька параметрів оптимізованої структури SIDE за допомогою моделювання: проміжок між IDE та товщина чутливої плівки, покритої центрифугуванням, становлять 5 мкм, а товщина шару діоксиду кремнію становить 1 мкм. Ці параметри використовуються при виготовленні датчика. Датчик виготовляється на 3-дюймовій кремнієвій пластині за такими етапами:

- (a) Негативний фоторезист товщиною 2,5 мкм має малюнок.
- (b) Нанесено шар Ti/Au, випарений електронним пучком і вибірково видалається процесом відриву для формування нижнього екрануючого електрода.
- (c) Шар діоксиду кремнію товщиною 1 мкм наноситься методом PECVD (плазмове хімічне осадження з парової фази).
- (d) IDE виготовляються на діоксиді кремнію за допомогою тієї ж послідовності літографії, випаровування електронним променем і відриву.
- (e) PI товщиною 5 мкм покритий центрифугуванням. Потім пристрій запікають при 120 °C протягом 1 години, 180 °C протягом 1 години та

250 °C протягом 6 годин для затвердіння чутливого шару. Готовий датчик і поперечний переріз структури SIDE під скануючим електронним мікроскопом (SEM) показані на рисунку 2.5. Така сама структура IDE виготовлена на скляній підкладці без екрануючого електрода досліджується як контрольний експеримент.



(a) (b)  
Рисунок 2.5 – Зображення бокового датчика під мікроскопом і його поперечне зображення під мікроскопом

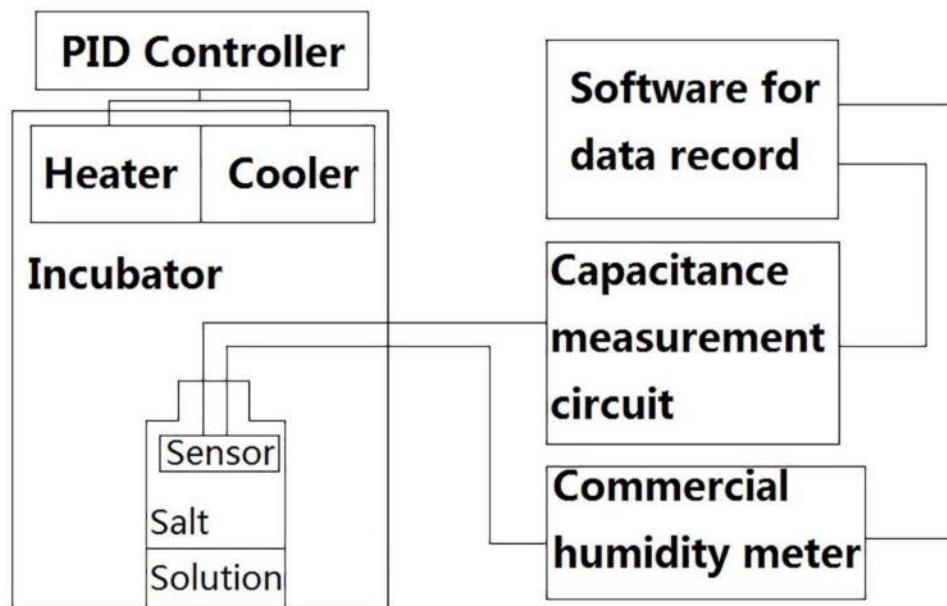


Рисунок 2.6 – Блок-схема вимірювальної системи, що складається з інкубатора, вимірювальної схеми та програмного забезпечення для запису

Налаштування для вимірювання вологості показано на рисунку 2.6. Тест завжди проводиться в інкубаторі. Ми будемо простий інкубатор з нагрівачами та напівпровідниковими охолоджувачами всередині. Кожен з них контролюється зовнішнім PID (пропорційно-інтегральною похідною)



контролером для підтримки постійної температури. В інкубатор поміщаємо пляшку з насиченим сольовим розчином і датчик. Вологість також контролюється комерційним вологоміром (Rotronic, HC2-S) одночасно і в тому самому інкубаторі. Похибка HC2-S становить  $\pm 0,8\%$  RH. Для вимірювання ємності використовується інтегральна мікросхема (UTI03 від SMARTEC) і додаткові схеми. Комерційний датчик вологості та схема вимірювання ємності взаємодіють із комп'ютером за допомогою послідовного порту одночасно. Вологість і ємність паралельно записуються комп'ютером для подальшого аналізу.

Ємність над екрануючим електродом  $C_x$  можна безпосередньо виміряти за допомогою схеми, показаної на рисунку 2.7 без змішування ємності між екрануючим електродом і IDE  $C_{pn}$  ( $n = 1, 2$ ).  $C_x$  — ємність чутливості, пропорційна вологості.  $C_{p1}$  і  $C_{p2}$  — це ємності між екрануючим електродом і IDE.  $C_f$  — постійна ємність мікросхеми.  $U_1$  і  $U_2$  — це потенціали перед датчиком вологості та після мікросхеми, які можна виміряти. Тому  $C_x$  можна розрахувати за допомогою рівняння (2.1).

$$C_x = -U_1/U_2 \cdot C_f \quad (2.1)$$

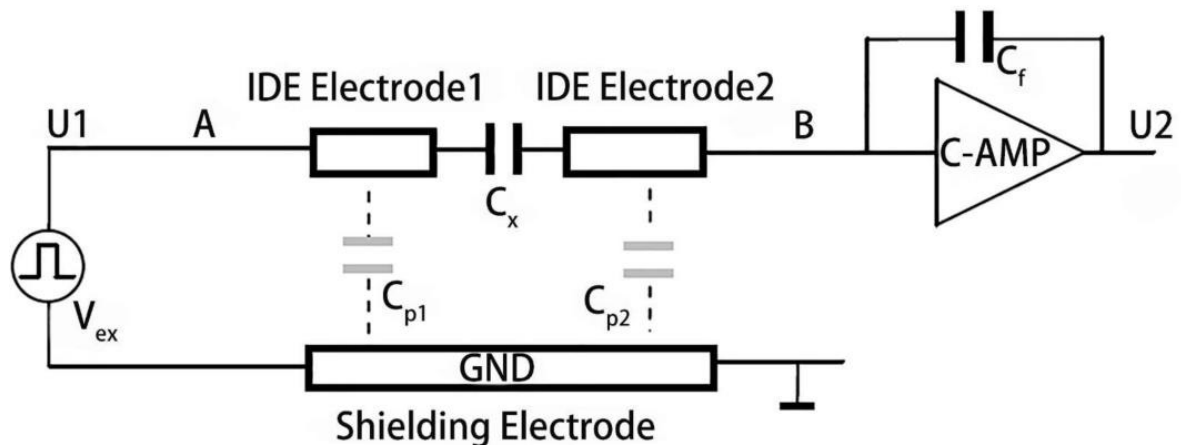


Рисунок 2.7 – Принцип роботи вимірювання ємності вологості. Ключовим моментом є обчислення ємності  $C_x$  шляхом вимірювання індукованого заряду, що утворюється в точці В

Перед тестом кожен прилад поміщають у духовку при  $100\text{ }^\circ\text{C}$  на 10 хв, щоб позбутися ефекту попереднього вимірювання.

Чутливість ( $S$ ) можна виразити у вигляді рівняння (2.2):

$$S = (\Delta C / C_0) / \Delta(\% \text{ відносної вологості}) \quad (2.2)$$

де  $\Delta C = C_1 - C_0$ ,  $C_0$  – це ємність, виміряна при відносній вологості, яка становить  $23,7\% \pm 0,8\%$ , а  $C_1$  – це ємність, виміряна при відносній вологості, яка становить  $73,0\% \pm 0,8\%$ .  $\Delta(\% \text{ RH})$  – це різниця між значеннями відносної вологості при вимірюванні  $C_1$  і  $C_0$ .

Відповідь і динаміка відновлення є одними з найважливіших характеристик для оцінки продуктивності датчиків вологості. Час відгуку для підвищення відносної вологості та час відновлення для зниження відносної вологості зазвичай визначають для датчика як час, необхідний для досягнення 90% від його загальної зміни ємності. Криві відгуку та відновлення вимірюються під впливом бокового датчика на різні рівні вологості від  $2,0\% \pm 0,8\%$  до  $77,0\% \pm 0,8\% \text{ RH}$ .

Щоб оцінити роботу датчика вологості протягом тривалих періодів часу, ми вимірювали ємність датчика протягом 20 годин при  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  з рівнями відносної вологості  $25,7\% \pm 0,8\%$ ,  $34,4\% \pm 0,8\%$ ,  $45,0\% \pm 0,8\%$ ,  $57,0\% \pm 0,8\%$  і  $73,5\% \pm 0,8\% \text{ RH}$ .

Тест на чутливість проводиться на SIDE та IDE структурі. Рисунок 2.8 показує ємність, виміряну від SIDE і IDE при різних рівнях вологості, і їх лінійну відповідність з  $R^2$  0,996 і 0,991 відповідно. Нахили лінії, тобто  $S$  SIDE і IDE, становлять 0,0063 і 0,001,65 відповідно. Беручи до уваги невизначеність HC2-S,  $S$  SIDE і IDE становлять  $0,0063 \pm 0,0002$  і  $0,001,65 \pm 0,000,05$  відповідно. Таким чином, чутливість структури SIDE в 3,82 рази більша, ніж у IDE. Ці результати демонструють значне покращення чутливості завдяки екранувальному електроду, який мінімізує велику постійну ємність підкладки. Дійсно, незалежно від того, на якій підкладці побудовано IDE, відносна діелектрична проникність підкладки більша (наприклад,  $\text{Si}$  становить 11,9, скло — 10) або близька до (наприклад, гнучкі полімерні плівки) відносної діелектричної проникності  $\text{PI}$  (2,9–3,7).). Експериментальний результат і дані моделювання підтверджують вплив екрануючого електрода і також показують високу згоду. Зрозуміло, що запропонована нами структура SIDE може забезпечити ефективний спосіб більш чутливого й точного вимірювання відносної вологості. Ще одна перевага екрануючого електрода полягає в тому, що він може ефективно пригнічувати зовнішні електромагнітні перешкоди та зменшувати шум у процесі вимірювання.

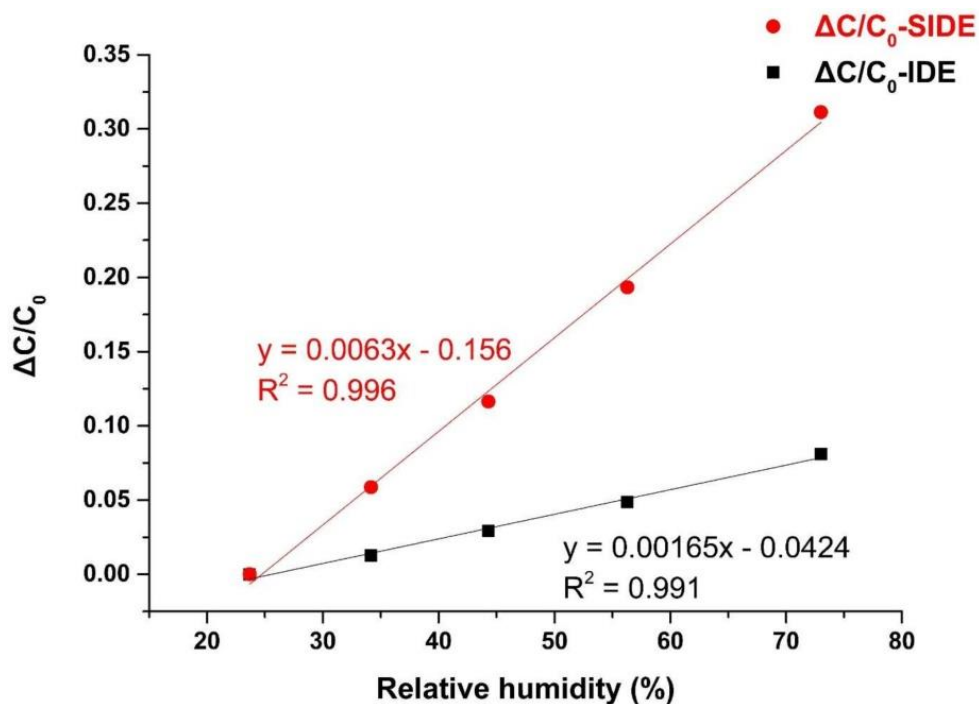


Рисунок 2.8 – Експериментальне вимірювання чутливості датчиків вологості SIDE і IDE

Рисунок 2.9 показує відгуки бокового датчика. Крива поглинання відображає реакцію датчика як функцію часу від середовища з низькою відносною вологістю до середовища з високою відносною вологістю. Крива десорбції відображає реакцію датчика як функцію часу від середовища з високою відносною вологістю до середовища з низькою відносною вологістю. Крива може швидко переходити до стійких станів після зміни рівня RH. Час відгуку/відновлення нашого датчика становить 20 с/22 с, що можна порівняти з 1 с/15 с для звичайного IDE, про які повідомляється в літературі [39], але трохи гірше. Це пояснюється тим, що в їхній роботі товщина сенсорної плівки становить лише 0,65 мкм, тоді як у нас – 5 мкм. Якщо ми зменшимо масштаб наших датчиків, щоб зменшити проміжок IDE, необхідна товщина сенсорної плівки також зменшиться, що призведе до значного покращення швидкості відгуку. Обмежуючись лабораторними умовами, ми виготовили датчик із зазором 5 мкм. Однак час відгуку/відновлення нашого датчика все ще набагато кращий, ніж 122 с для датчиків PP.

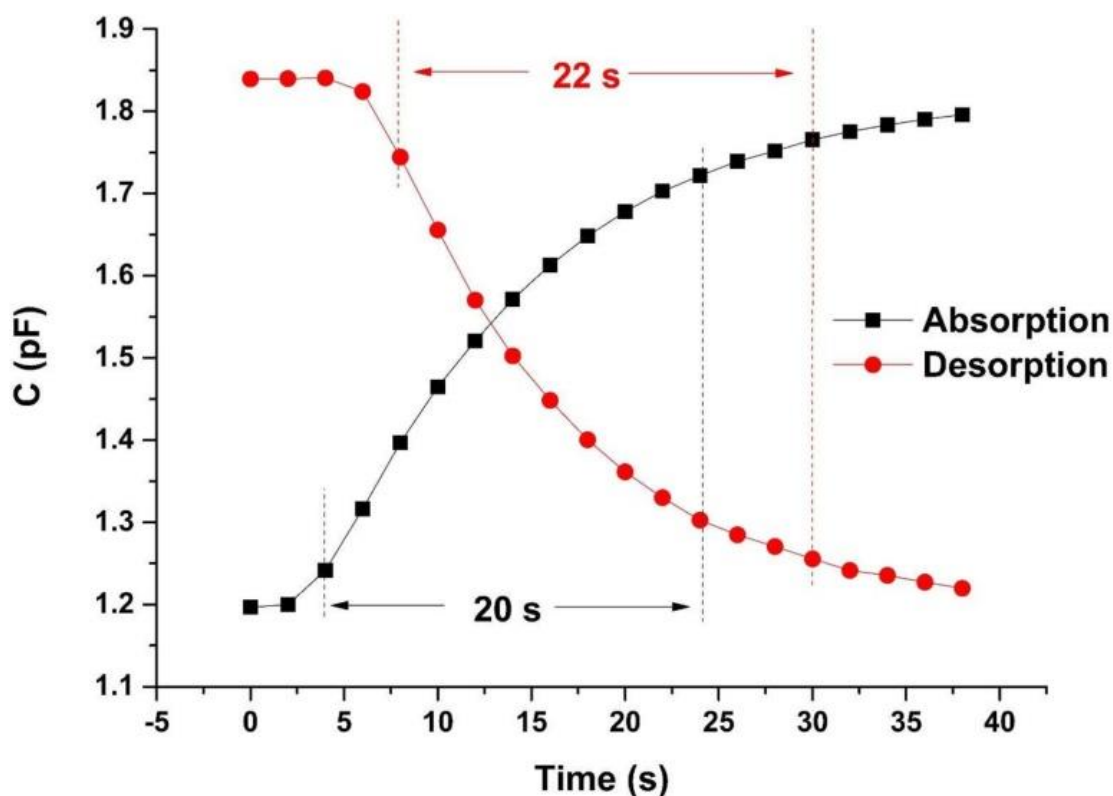


Рисунок 2.9 – Криві відповіді та відновлення вимірюються шляхом попереминого перемикаання датчика SIDE між  $2,0\% \pm 0,8\%$  і  $77,0\% \pm 0,8\%$  RH

Час реакції/відновлення становить 20 с/22 с. Рисунок 2.10 показує характеристику стабільності датчика SIDE. Датчик витримують в інкубаторі протягом 20 годин при  $25,7\% \pm 0,8\%$ ,  $34,4\% \pm 0,8\%$ ,  $45,0\% \pm 0,8\%$ ,  $57,0\% \pm 0,8\%$  і  $73,5\% \pm 0,8\%$  відповідно.

Величина дрейфу ємності датчика перетворюється на видимі зміни відносної вологості D, які розраховуються за

$$D = (C_{\max} - C_{\text{середнє}}) / (C_0 \cdot S) \quad (2.3)$$

де  $C_{\max}$  — максимальна виміряна ємність після впливу на датчик різна відносна вологість атмосфери, а  $C_{\text{середнє}}$  — це середня ємність усіх зареєстрованих значень за певної відносної вологості,  $C_0$  — це ємність, виміряна, коли RH становить  $23,7\% \pm 0,8\%$ . Максимальне значення дрейфу (D), отримане з рис.2.10 при різній відносній вологості становила  $1,28\%$  RH. Таким чином, наш датчик здатний досягти задовільної стабільності з

практичної точки зору, що робить його перспективним як комерційно доступний датчик.

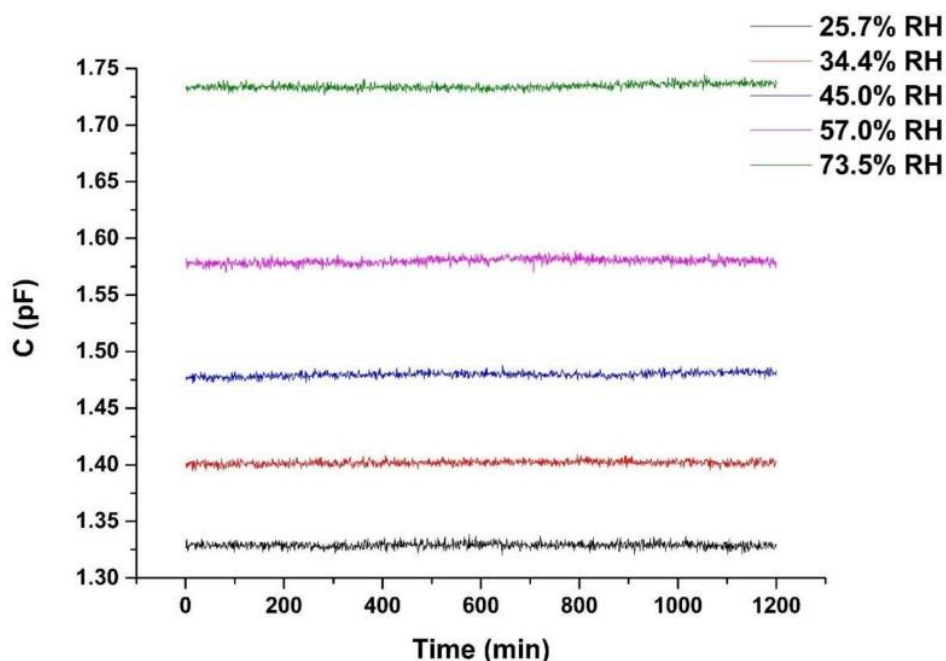


Рисунок 2.10 – Стабільність датчика SIDE. Датчик витримують в інкубаторі протягом 1200 хв при 25,7%  $\pm$  0,8%, 34,4%  $\pm$  0,8%, 45,0%  $\pm$  0,8%, 57,0%  $\pm$  0,8% і 73,5%  $\pm$  0,8% відповідно

### 2.3 Розробка перетворювача вологості з частотним вихідним сигналом

Використання перетворювачів вологості в радіотехнічних частотних пристроях вимірювання, які реалізують метод перетворення «відносна вологість-частота», дозволяє на порядок підвищити чутливість та точність вимірювання відносної вологості, а також спростити схему технічну реалізацію подальшої обробки інформативного сигналу. В даному випадку необхідно використовувати чутливий до вологи елемент у вигляді волого чутливого конденсатора, який є оптимальним по параметрам для таких інформаційно-вимірювальних систем: забезпечує великий діапазон вимірювань вологості, високу надійність та низьку собівартість у випадку використання мікропроцесорної техніки. Завдяки чому отримаємо мінімальні габарити чутливого до вологи елемента [50-60]. Тобто, для



вимірювання відносної вологості застосування ємнісного методу є одним з найкращих методів.

Метою даного підрозділу є розробка та дослідження математичної моделі перетворювача відносної вологості повітря з частотним виходом на основі транзисторної конструкції з негативним диференціальним опором, вологочутливим ємнісним елементом який розглянуто в попередньому підрозділі.

Радіотехнічний перетворювач для вимірювання відносної вологості представлений на рисунку 2.11, (та наведено в додатку А рис.7).

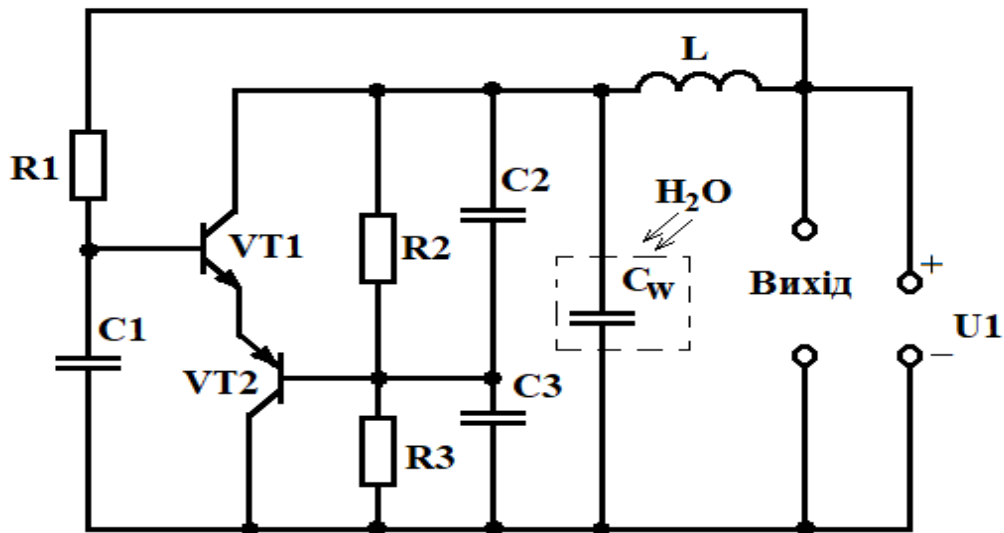


Рисунок 2.11 – Електрична схема перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом

Перетворювач для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим ємнісним елементом побудовано на основі транзисторної структури з негативним диференціальним опором. Структура побудована на основі двох біполярних транзисторів  $VT1$  та  $VT2$  з різним типом провідності. За допомогою резисторів  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$  створюється такий режим роботи, коли негативний диференціальний опір, який утворений включенням імпедансу транзисторної структури з ємнісною складовою на електродах колектор-колектор транзисторів  $VT1$  і  $VT2$  та пасивної індуктивності, що приводить до появи коливань в контурі автогенераторного вимірювального пристрою. Резистор  $R1$  і конденсатор  $C1$  застосовуються як фазозсувний ланцюг і забезпечує баланс фаз в автогенераторному вимірювальному пристрої. Чутлива до вологості ємність  $C_w$  підключена паралельно імпедансу транзисторної структури з ємнісною

складовою на електродах колектор-колектор транзисторів. Під час дії вологи на вологочутливий конденсатор  $C_w$  змінюється ємнісна складова імпедансу на електродах автогенераторного пристрою, що викликає зміну частоти на виході перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом.

Для експериментального дослідження схема перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором (рис.2.11) зібрана на біполярних транзисторах BFP92 та BFT93. Режим роботи біполярних транзисторів за постійним струмом був наступним: струм у колі колектора транзистора  $VT1$  – 3,55 мА, а напруга на колекторі транзистора – 5 В.

Для визначення основних електричних характеристик перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом, в яких враховується залежність від впливу відносної вологості реактивних властивостей основних компонентів транзисторних структур з негативним диференціальним опором, розроблено нелінійну еквівалентну схему (рис.2.12.), (та наведено в додатку А рис.8).

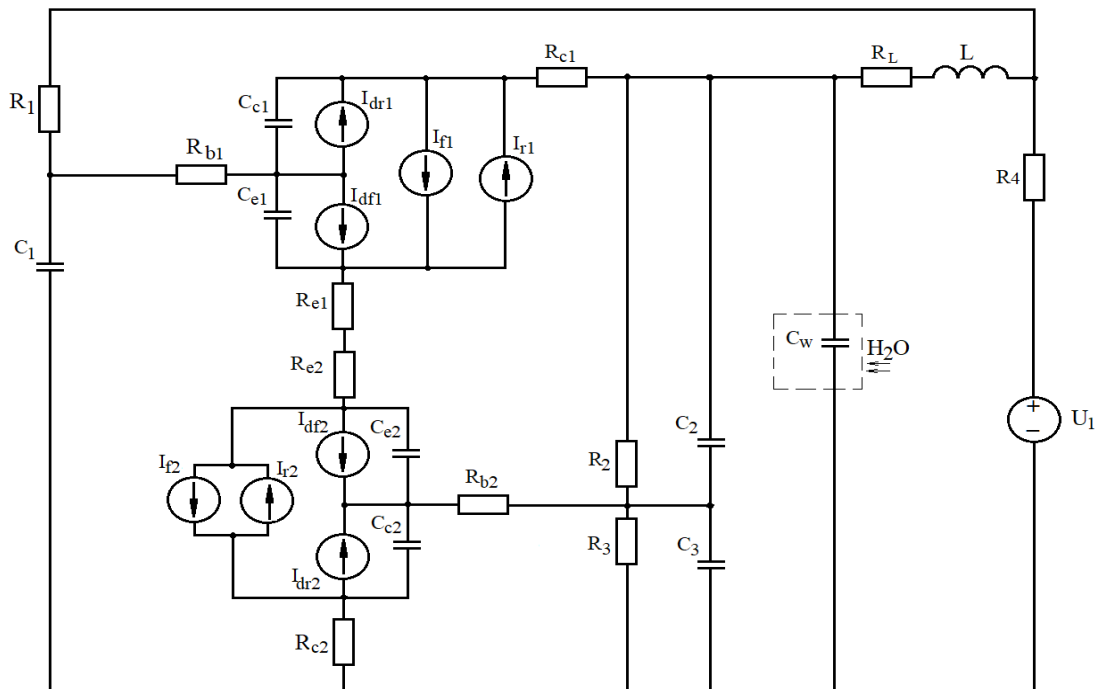


Рисунок 2.12 – Нелінійна еквівалентна схема перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором

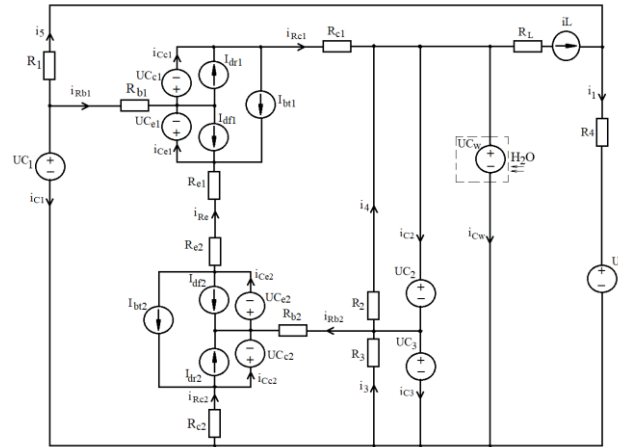


Рисунок 2.13 – Перетворена еквівалентна схема перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором

Для зручності розрахунків електричних параметрів перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором, об'єднавши струми  $I_f$  і  $I_r$  у  $I_{bt} = (I_f - I_r) / QB$ , і скориставшись методом змінних станів, на рисунку 2.13 наведено перетворену нелінійну еквівалентну схему пристрою. На підставі вибраних напрямків струмів для перетвореної еквівалентної схеми перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором було складено систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_L = i_5 R_1 - i_{Rb1} R_{b1} - i_L R_L - i_{Rc1} R_{c1} - U_{C_{e1}}, \\ i_{Re} = (i_4 R_2 - i_{Rb2} R_{b2} - i_{Rc2} R_{c2} - U_{C_{e1}} - U_{C_{e2}} - U_{C_{c1}}) / R_{ee}, \\ i_{Rb2} = (U_{C_{c2}} + i_{Rc2} R_{c2} - i_3 R_3) / R_{b2}, \\ i_{Rb1} = (U_{C_{c2}} + U_{C_{e1}} + U_{C_{e2}} + U_{C_1} + i_{Rc2} R_{c2} + i_{Re} R_{ee}) / R_{b1}, \\ i_1 = (U_{C_w} - U_1 - U_L - i_L R_L) / R_4, \\ i_3 = -U_{C_3} / R_3, \\ i_4 = -U_{C_4} / R_4, \\ i_{Rc1} = (U_{C_1} - U_{C_{c1}} - U_{C_w} - i_{Rb1} R_{b1}) / R_{c1}, \\ i_{C_1} = -i_5 - i_{Rb1}, \\ i_{C_w} = i_3 - i_1 - i_{C_1} - i_{C_3} + i_{Rc2}, \\ i_{C_{e1}} = i_{Re} + I_{bt1} - I_{dr1}, \\ i_{C_2} = i_4 - i_{C_w} - i_L + i_{Rc1}, \\ i_{C_{e1}} = i_{Re} + I_{bt1} + I_{df1}, \\ i_{C_{e2}} = i_{Re} + I_{bt2} + I_{df2}, \\ i_{C_{c2}} = i_{C_{e2}} - i_{Rb2} - I_{dr2} - I_{df2}, \\ i_{Rc2} = i_{C_{c2}} - I_{bt2} + I_{dr2}, \\ i_5 = i_1 - i_L, \\ i_{C_3} = i_3 - i_4 - i_{Rb2} + i_{C_2}, \end{array} \right. \quad (2.1)$$

де  $R_1, R_2, R_3, C_1, C_2, C_3$  – опори та ємності конденсаторів дільників

напруги перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором;  $R_{b1}, R_{b2}, R_{e1}, R_{e2}, R_{c1}, R_{c2}$  – об’ємні опори базової, емітерної та колекторної областей транзисторів перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором;  $R_{ee}$  – опір емітерів транзисторів перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором;  $C_{e1}, C_{e2}, C_{c1}, C_{c2}$  – ємності емітера та колектора транзисторів перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором;  $C_W$  – ємність чутливого до вологи конденсатора;  $I_{dr1}, I_{dr2}, I_{df1}, I_{df2}$  – струми переходів база–колектор та база–емітер транзисторів перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором;  $L$  – величина індуктивності;  $U_1$  – напруга джерела живлення;  $I_{f1}, I_{f2}, I_{r1}, I_{r2}$  – прямі та зворотні струми транзисторів перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором.

На підставі значення відповідних напруг на ємностях та струмів через пасивну індуктивність, розв’язок системи рівнянь (2.1) відповідно до значень:  $U_L, i_{C_W}, i_{c1}, i_{c2}, i_{c3}, i_{c_{e1}}, i_{c_{e2}}, i_{c_{c1}}, i_{c_{c2}}$  буде мати вигляд:

$$\begin{cases} U_L = U_{C_W} - U_{C_{c1}} + A_6 R_1 - i_L (R_1 + R_L) - A_3, \\ i_{C_W} = A_5 - A_6 + i_{C_{c2}} - I_{br2} + I_{dr2} - i_{c1} - i_{c3}, \\ i_{c1} = -A_6 + i_L - A_{10}, \\ i_{c2} = A_4 - i_{C_W} - i_L + A_{11}, \\ i_{c3} = -A_5 + A_4 - A_8 + i_{c2}, \\ i_{c_{e1}} = A_9 + I_{br1} + I_{df1}, \\ i_{c_{e2}} = A_9 + I_{br2} + I_{df2}, \\ i_{c_{c1}} = A_{11} + I_{br1} - I_{dr1}, \\ i_{c_{c2}} = i_{c_{e2}} - A_8 - I_{dr2} - I_{df2}, \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \text{де} \quad R_{ee} &= R_{e1} + R_{e2}, & A_1 &= U_{C_{e1}} + U_{C_{e2}} + U_{C_{c1}}, & A_2 &= U_{C_{c2}} + U_{C_{e1}} + U_{C_{e2}} + U_{C_1}, \\ A_3 &= U_{C_1} - U_{C_{c1}}, & A_4 &= U_{C_4} / R_4, & A_5 &= U_{C_3} / R_3, & A_6 &= (U_{C_W} - U_1 - U_L - i_L R_L) / R_4, \\ A_7 &= (i_{C_{c2}} - I_{br2} + I_{dr2}) \cdot R_{c2}, & & & & A_8 &= (U_{C_{c2}} + A_7 + U_{C_3}) / R_{b2}, \\ A_9 &= (A_4 R_2 - A_8 R_{b2} - A_7 - A_1) / R_{ee}, & & & & A_{10} &= (A_2 + A_7 + A_9 R_{ee}) / R_{b1}, \\ A_{11} &= (A_3 - U_{C_W} - A_{10} R_{b1}) / R_{c1}. \end{aligned}$$

Здійснимо заміну в лівій частині рівнянь системи (2.2) згідно виразів, які описують протікання змінних струмів через ємності  $i_C(t) = C \frac{dU_C(t)}{dt}$  та падіння напруги на індуктивностях  $U_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$ , а також враховуючи, що всі струми та напруги у системі змінюються з часом:

$$\left\{ \begin{array}{l} L \frac{di_L(t)}{dt} = U_{C_W}(t) - U_{C_{c1}}(t) + A_6 R_1 - i_L(R_1 + R_L) - A_3, \\ C_W \frac{dU_{C_W}(t)}{dt} = A_5 - A_6 + i_{C_{e2}} - I_{br2} + I_{dr2} - i_{C_1} - i_{C_3}, \\ C_1 \frac{dU_{C_1}(t)}{dt} = -A_6 + i_L - A_{10}, \\ C_2 \frac{dU_{C_2}(t)}{dt} = A_4 - i_{C_W} - i_L + A_{11}, \\ C_3 \frac{dU_{C_3}(t)}{dt} = -A_5 + A_4 - A_8 + i_{C_2}, \\ C_{e1} \frac{dU_{C_{e1}}(t)}{dt} = A_9 + I_{bt1} + I_{df1}, \\ C_{e2} \frac{dU_{C_{e2}}(t)}{dt} = A_9 + I_{br2} + I_{df2}, \\ C_{c1} \frac{dU_{C_{c1}}(t)}{dt} = A_{11} + I_{bt1} - I_{dr1}, \\ C_{c2} \frac{dU_{C_{c2}}(t)}{dt} = i_{C_{e2}} - A_8 - I_{dr2} - I_{df2}. \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Система рівнянь (2.3) являється нелінійною системою, оскільки містить нелінійні елементи, такі як джерела струмів  $I_{dr}$ ,  $I_{df}$ ,  $I_{bt} = (I_f - I_r) / QB$  та ємності емітера та колектора  $C_e$ ,  $C_c$ , відповідно:

$$I_f = I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{VT \cdot NF}} - 1 \right), \quad I_r = I_S \left( e^{\frac{V_{BC}}{VT \cdot NR}} - 1 \right), \quad I_{df} = \frac{I_f}{BF}, \quad I_{dr} = \frac{I_r}{BR}, \quad (2.4)$$

де  $I_S$  – струм насичення транзистора;  $V_{BE}$ ,  $V_{BC}$  – напруги на внутрішніх комутаційних точках емітер-база, колектор-база;  $VT$  – температурний потенціал;  $NF$ ,  $NR$  – коефіцієнти які характеризують неідеальності у прямому та інверсному режимах, відповідно;  $BF$ ,  $BR$  – коефіцієнти передачі струму в схемі з загальним емітером в прямому та інверсному режимах роботи транзистора;  $QB$  – коефіцієнт неідеальності переходів.

Дифузійна та бар'єрна складові ємності біполярного транзистора, які

описуються наступними виразами:

$$C_c bar = \begin{cases} \frac{CJC}{\left(1 - \frac{V_{BC}}{V_{JC}}\right)^{MJC}}, & V_{BC} < 0; \\ CJC, & V_{BC} \geq 0. \end{cases} \quad C_c = C_c dif + C_c bar, \quad C_c dif = \frac{(I_r + I_s) \cdot TR}{VT \cdot NR}. \quad (2.5)$$

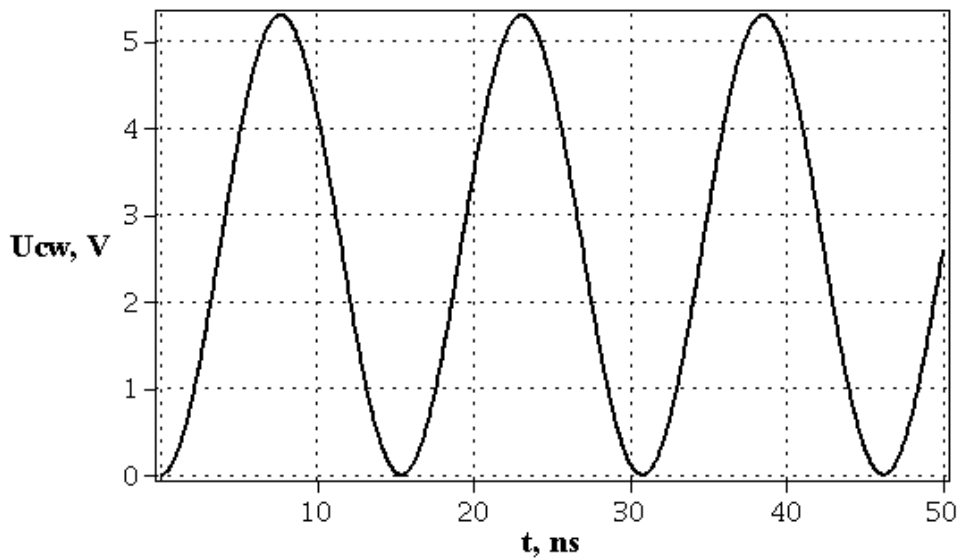
$$C_e bar = \begin{cases} \frac{CJE}{\left(1 - \frac{V_{BE}}{V_{JE}}\right)^{MJE}}, & V_{BE} < 0; \\ CJE, & V_{BE} \geq 0, \end{cases} \quad C_e = C_e dif + C_e bar; \quad C_e dif = \frac{(I_f + I_s) \cdot TF}{VT \cdot NF}; \quad (2.6)$$

де  $C_c dif$ ,  $C_c bar$ ,  $C_e dif$ ,  $C_e bar$  – бар’єрні та дифузійні ємності колекторного і емітерного переходів, відповідно;  $V_{JE}$ ,  $V_{JC}$  – контактна різниця потенціалів переходів біполярного транзисторів;  $TF$ ,  $TR$  – час переносу заряду через базу в прямому й інверсному режимах роботи біполярного транзистора;  $MJE$ ,  $MJC$  – коефіцієнти плавності переходів біполярного транзистора;  $CJE$ ,  $CJC$  – ємність емітерного та колекторного переходів біполярного транзистора при нульовому зміщені.

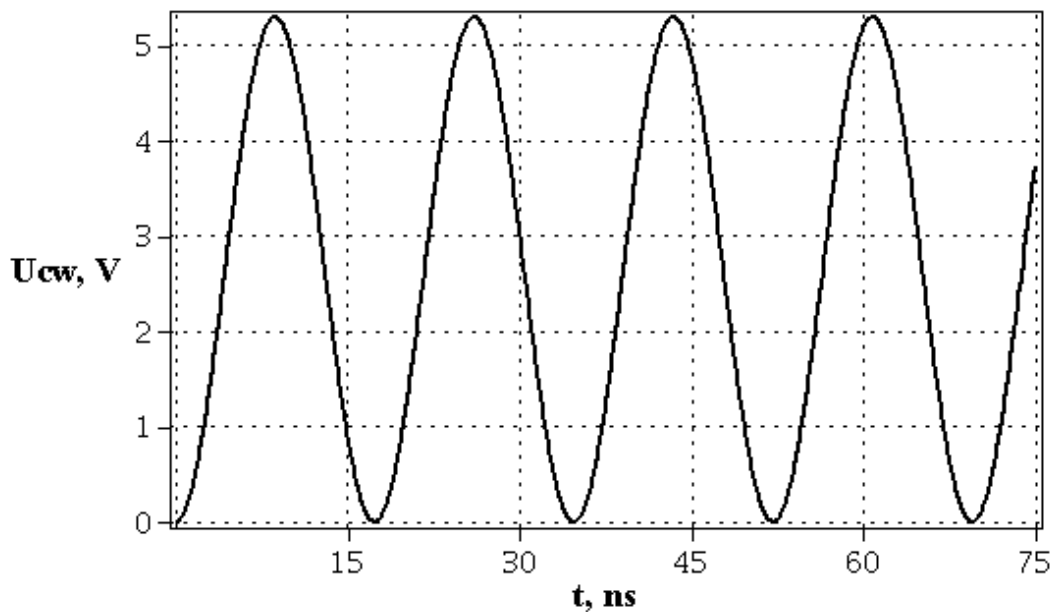
Вище наведена система рівнянь (2.3) є динамічною моделлю перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором, яка дозволяє обчислити значення напруг та струмів влюбій точці схеми у заданий момент часу.

Для перевірки правильності розробленої математичної моделі створено програму для розрахунку основних характеристик схеми в середовищі Maple. Математичне моделювання показує, що на виході перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором будуть існувати коливання (рис. 2.14), (та наведено в додатку А рис.9) частота яких змінюється із зміною ємності чутливого до вологості конденсатора  $C_W(W)$ .





$$C_W(W) = 305 \text{ pF}, \quad T = 15,5 \text{ ns}, \quad F = 64,530 \text{ MHz}$$



$$C_W(W) = 354 \text{ pF}, \quad T = 17 \text{ ns}, \quad F = 58,834 \text{ MHz}$$

Рисунок 2.14 - Зміна вихідної напруги чутливої до вологості ємності від зміни часу за різних значень ємності вологочутливого конденсатора

При значенні ємності  $C_W(W) = 305$  пФ вихідна частота перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором складає  $F = 64,530$  МГц, а при значенні ємності  $C_W(W) = 354$  пФ вихідна частота складає  $F = 58,834$  МГц, при напрузі живлення  $U = 5$  В. Для підтвердження математичного моделювання проведено комп'ютерне імітаційне моделювання та експериментальні дослідження перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором (рис. 2.11). Для даної схеми

було проведено комп'ютерне імітаційне моделювання в середовищі схемотехнічного моделювання LTSpice. Моделювання проводились в діапазоні зміни чутливого до вологості конденсатора від  $C_W(W) = 305$  пФ до  $C_W(W) = 354$  пФ, яке відповідає зміні значення відносної вологості від 15 % до 99 %.

За результатами моделювання перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором в середовищі LTSpice видно, що на ємність  $C_5$  діє гармонічна напруга (рисунок 2.15), (та наведено в додатку А рис.10). На основі підрахунку частоти можна побачити, що із збільшенням чутливої до вологості ємності від 300 пФ ( $W = 15$  %) до 360 пФ ( $W = 99$  %) частота вихідного сигналу зменшується з 63,356 МГц до 57,982 МГц. На рисунку 2.16 представлено експериментальну залежність вихідної змінної напруги на чутливій до вологості ємності від зміни часу за відносної вологості  $W = 15$  %. Частота вихідного сигналу перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором складає  $F = 64,516$  МГц. На рисунку 2.17 (та наведено в додатку А рис.11), представлено експериментальну залежність вихідної змінної напруги на чутливій до вологості ємності від зміни часу при відносній вологості  $W = 99$  %, при цьому частота вихідного сигналу перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором складає  $F = 57,982$  МГц.

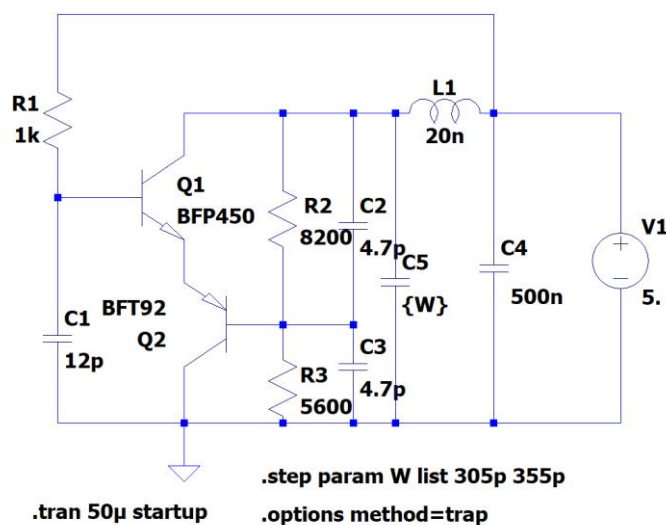


Рисунок 2.15 – Електрична схема перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором в LTSpice

За результатами експериментальних та теоретичних досліджень перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором видно, що на виході розробленого пристрою будуть існувати періодичні коливання, вихідна частота цих коливань зменшується із збільшенням значення вологості.

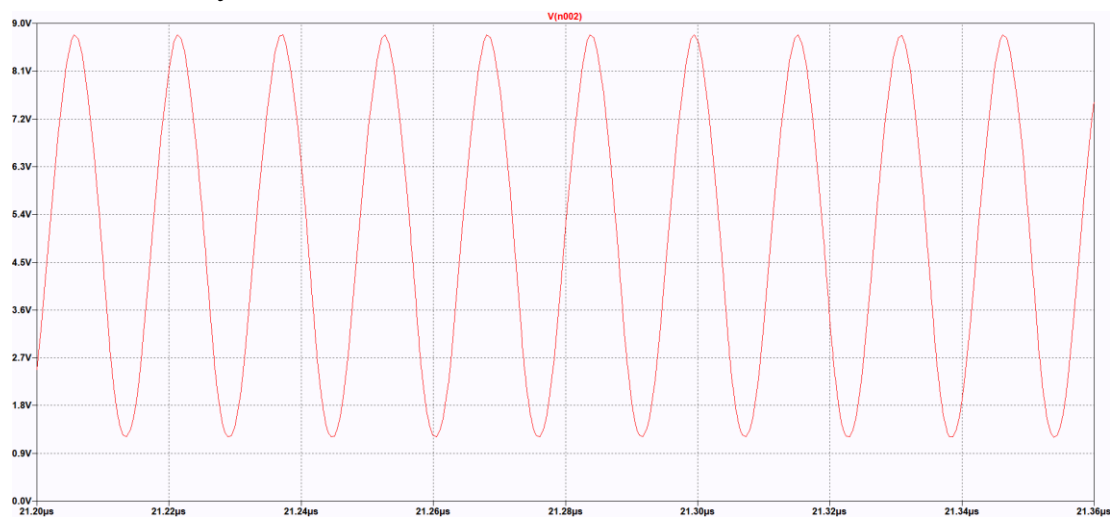


Рисунок 2.16 – Експериментальна залежність вихідної напруги чутливого до вологи конденсатора від зміни часу при відносній вологості  $W = 15\%$

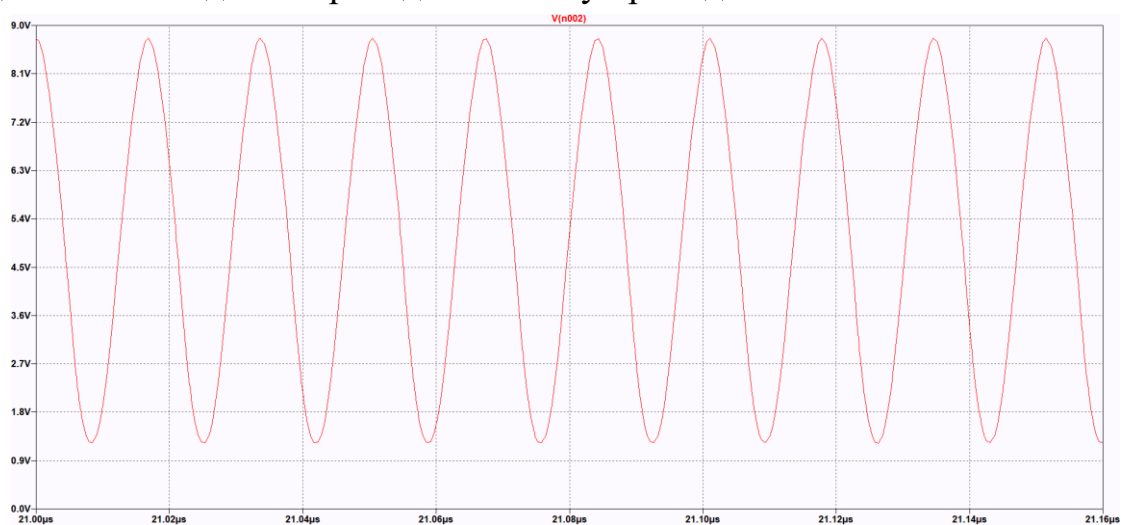


Рисунок 2.17 – Експериментальна залежність вихідної напруги чутливого до вологи конденсатора від зміни часу при відносній вологості  $W = 99\%$

Після порівняння отриманих теоретичних та експериментальних значень частоти вихідного сигналу перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором було встановлено, що відносна похибка складає  $1,25\%$ .

## 2.4 Висновки до розділу

Підводячи підсумок, ми пропонуємо нову структуру екранованого електрода для вимірювання вологості. Ми виконуємо комплексне моделювання цієї структури, щоб оптимізувати параметри для виготовлення датчика. Під час моделювання та фактичного тестування ми виявили, що чутливість структури SIDE набагато вища, ніж структури IDE, через вплив екрануючого електрода на швидкість зміни ємності. Оскільки поверхнева структура SIDE залишається такою ж, як і IDE, датчик SIDE поєднує в собі високу чутливість датчиків паралельних пластин і швидку реакцію датчиків IDE. Чутливість SIDE становить  $0,0063\% \pm 0,0002\% \text{ RH}$ , а час відповіді/відновлення становить 20 с/22 с. Також була охарактеризована стабільність датчика SIDE. Максимальне значення дрейфу за різної відносної вологості становить 1,28% RH.

Тим часом, оскільки основний принцип роботи багатьох ємнісних датчиків однаковий, структуру SIDE можна застосовувати навіть до ємнісних газових датчиків, таких як леткі органічні сполуки (VOC) датчики, які використовуються для контролю токсичних газів. Це показує, що SIDE може замінити IDE в різних датчиках, які більш чутливі до точності та швидкості відгуку.

Розроблено математичну модель перетворювача для вимірювання відносної вологості з вологочутливим ємнісним елементом. Проведено моделювання в середовищі Maple, яке довело адекватність розробленої математичної моделі. Дослідження показали, що на виході вимірювального генератора існують коливання, вихідна частота яких змінюється із зміною ємності чутливого до вологи елемента. Так, при значеннях  $C_W(W) = 305 \text{ пФ}$  частота  $F = 64,53 \text{ МГц}$ , а при значеннях  $C_W(W) = 354 \text{ пФ}$  частота складала  $F = 58,834 \text{ МГц}$ , при напрузі живлення перетворювача 5 В.

Проведено комп'ютерне моделювання перетворювача вологості з частотним виходом в середовищі моделювання LTSpice. Комп'ютерне моделювання проводились в діапазоні зміни ємності від 300 пФ до 360 пФ, такі дослідження відповідали збільшенню відносної вологості від 15 % до 99 %. За результатами моделювання встановлено, що при збільшенні ємності чутливого до вологи елемента від 300 пФ ( $W = 15\%$ ) до 360 пФ ( $W = 99\%$ ) вихідна частота перетворювача зменшується від 63,356 МГц до 57,982 МГц.

Результати експериментальних та теоретичних досліджень довели, що на виході перетворювача вологості з частотним вихідним сигналом існують коливання, частота яких зменшується із збільшенням відносної вологості. Отримані експериментальні та теоретичні характеристики мають досить гарний збіг і відносна похибка лежить в межах 1,25 %.

### 3 ПРОЕКТУВАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ З МАЛИМ ПОТУЖЕННЯМ ДЛЯ ЄМНІСНИХ ДАТЧИКІВ

Розробка інтегрованих інтерфейсів з низьким енергоспоживанням для ємнісних датчиків відбулася у спільній діяльності з доктором Ніколо Ніцца в дослідницькій групі Microsystem Департаменту інформаційної інженерії Університету Пізи. У цій главі, після короткого вступу до ємнісних датчиків і методів їх зчитування, буде представлено інноваційний підхід, заснований на перетворенні сигналу з ємності в широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ), який також детально обговорюється в [52]. Схема була розроблена спільно та виготовлена з використанням 0,32 мкм/3,3 В КМОП-пристроїв із процесу VCD6s компанії STMicroelectronics, демонструючи дуже цікаві вимірювані характеристики з точки зору чудової лінійності, температурного дрейфу (300 ppm/°C), споживання електроенергії (84) мкВт від джерела живлення 3,3 В), а також відмінне усунення паразитних ємностей між з'єднаннями. Динамічний діапазон такої схеми досить низький, в результаті чого виміряно на неоптимізованому прототипі 48 дБ. Тим не менш, деякі методи, спрямовані на покращення роздільної здатності та точності інтерфейсу, можливі. Остання частина цього розділу має на меті описати такі методи та обговорити фундаментальні компроміси в дизайні.

#### 3.1 Інтегрований ємнісний датчик. Ємнісні датчики

В електромагнітному полі ємність, виражена в одиницях фаради, – це здатність тіла утримувати електричний заряд (кулон), коли на нього прикладено електричний потенціал (вольт). Ідеальний конденсатор - це пристрій з двома доступними ідеально провідними електродами, розділеними діелектричним матеріалом. Цей пристрій повністю характеризується лише параметром ємності, який залежить від геометрії конденсатора та діелектричних властивостей внутрішніх матеріалів.

Для наочності розглянемо просту паралельну пластинчасту структуру, подібну до тих, що на рис. 3.1. Ігноруючи окантовкові поля, ємність цієї простої структури можна виразити як

$$C(\epsilon_r, A, d) = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (3.1)$$



де  $\epsilon_r$  – відносна діелектрична проникність матеріалу,  $\epsilon_0$  – вакуумна проникність між пластинами,  $A$  – площа перекриття між електродами,  $d$  – відстань між електродами. У ємнісному датчику та сама фізична величина викликає зміну одного з цих параметрів, що відображається на зміні ємності, як чітко показано виразом (3.1).

Наприклад, зміщення рухомого електрода може бути спричинене зовнішньою силою, такою як тиск, або внаслідок прискорення. Крім того, на діелектричні властивості середовища між електродами можуть впливати інші величини, наприклад хімічна концентрація.

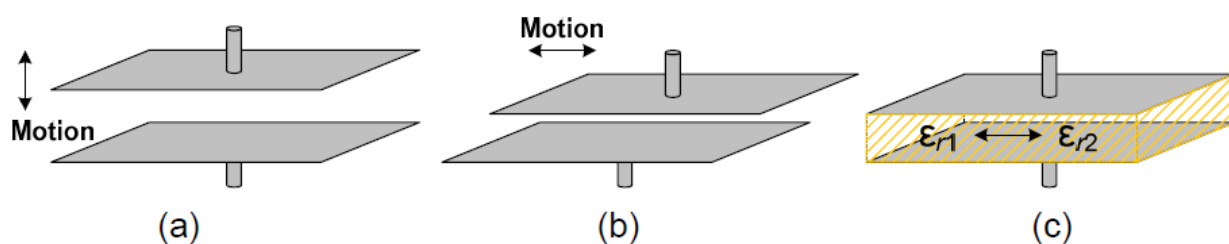


Рисунок 3.1 – Паралельний пластинчастий ємнісний датчик, де (a)  $d$  і (b)  $A$  змінюється зміщенням рухомого електрода; у (c) відносна діелектрична проникність змінюється

На рисунку 3.1(a) показаний простий випадок, коли нижній електрод нерухомий, а верхній рухається. У цьому випадку розділення  $d$  змінюється, і, отже, ємність змінюється нелінійним чином. На рисунку 3.1(b) зображено пристрій, де поділ  $\epsilon$  фіксованим, а площа перекриття змінюється. У цій конфігурації існує лінійна залежність між ємністю та площею перекриття. На рисунку 3.1(c) показано структуру, де на діелектричний матеріал впливає зміна відносної діелектричної проникності.

В інтегрованих технологіях диференціальні ємнісні структури дифузно використовуються як загальний метод для запобігання сильному впливу змін кутів процесу, старіння матеріалу та зміни температури на вимірювані величини. Розглянемо структуру, зображену на рис. 3.2, (та наведено в додатку А рис.12), що реалізує диференційний ємнісний датчик;  $E1$  і  $E3$  є нерухомими електродами, тоді як  $E2$  може вільно рухатися в паралельному напрямку (вздовж осі  $x$ ).

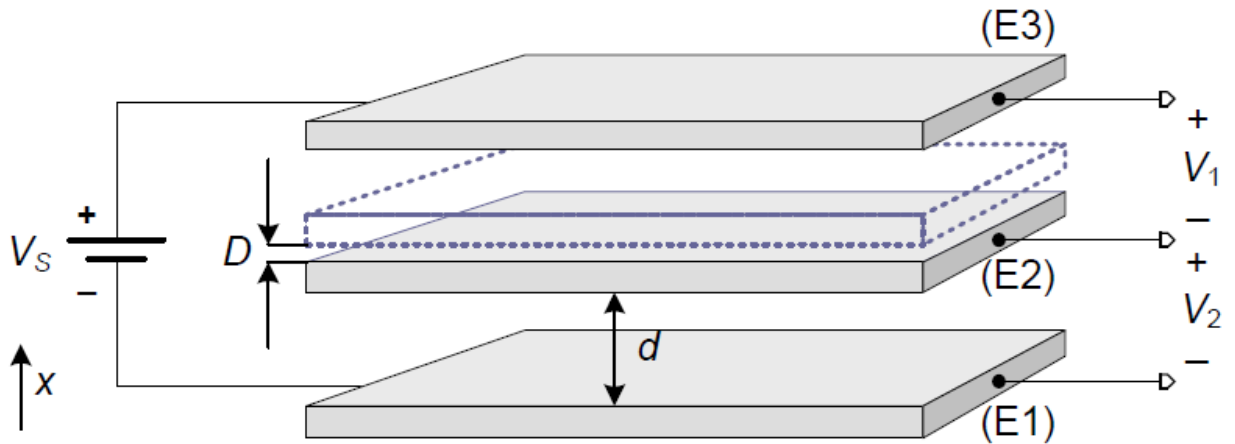


Рисунок 3.2 – Схематичне зображення диференційного ємнісного датчика. На нерухомі електроди E1 і E3 подається напруга живлення  $V_S$ , тоді як E2 вільно переміщується вздовж осі  $x$ . Вихідний сигнал подається різницею напруг  $V_2 - V_1$

Дві ємності  $C_1$ ,  $C_2$  можна розрахувати між центральним електродом і нерухомими електродами E1 і E3 відповідно:

$$C_1 = C \cdot \frac{d}{d+D}; \quad (3.2a)$$

$$C_2 = C \cdot \frac{d}{d-D} \quad (3.2b)$$

де  $C$  - ємність, розрахована відповідно до формули (3.1), для нульового переміщення ( $D=0$ ) для E2. Диференціальну вихідну напругу можна легко розрахувати як

$$V_1 - V_2 = \frac{C_2 - C_1}{C_1 + C_2} \cdot V_S = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{1-D/d} - \frac{1}{1+D/d} \right) \cdot V_S \cong \frac{D}{d} \cdot V_S \quad (3.3)$$

для  $D \ll d$ . Варто зазначити, що синфазні ефекти, тобто ефекти, що діють як на  $C_1$ , так і на  $C_2$  ідентичним чином, такі як розповсюдження  $C$  з процесом або можлива температурна залежність  $\epsilon$ , були виключені з рівняння (3.3).

Різноманітність фізичних величин можна перетворити на варіації ємності, що робить ємнісне вимірювання особливо важливим у

мікроелектро механічних системах (MEMS). Серед усіх фізичних величин, які можна відчувати, ми згадуємо тиск, прискорення та вологість. Крім того, ємнісні датчики дуже привабливі завдяки нульовому статичному споживанню енергії та низькій температурній залежності. Конденсаторні структури відносно прості у виготовленні, і пристрої мембранного типу часто використовуються як основа для датчиків тиску та мікрофонів [53, 54]. Приклад датчика тиску схематично зображено на рис. 3.3. Більш складні структури, такі як показані на рис. 3.4, утворені підвішеною пробною масою, також використовуються для інтегрованих акселерометрів, де наявність міжштирькових конденсаторів забезпечує як зондування, так і примусову (через ємнісні приводи) функціональність [55]. Для таких структур не можна ігнорувати ефекти смугового поля, а їхня ємність має більш складний вираз, ніж у виразі (3.1), хоча використання диференціальних структур все ще є дійсним методом для відхилення змін або збурень загального режиму. Були також реалізовані інтегровані ємнісні датчики на основі зміни  $\epsilon$ : у [56] представлено датчик вологості, заснований на цьому принципі.

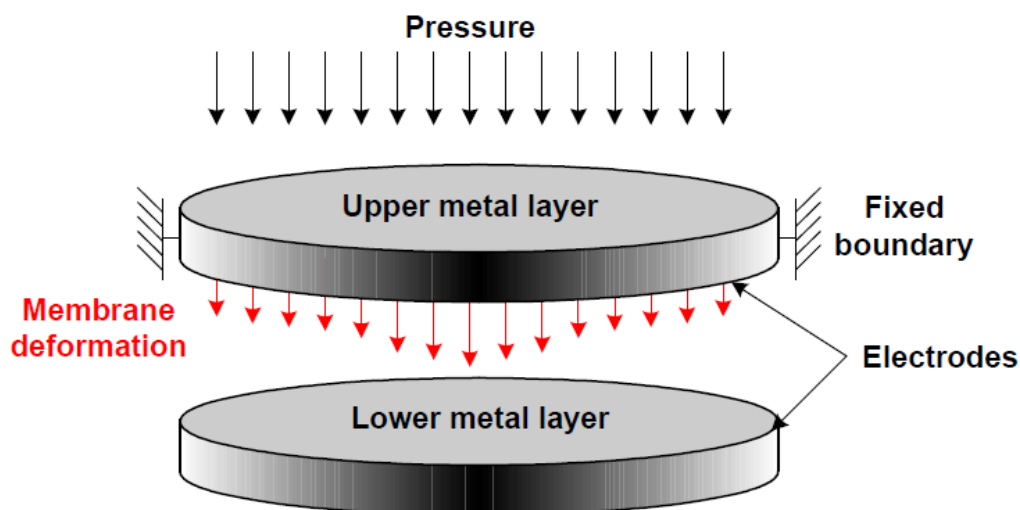


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення круглого мембранного датчика тиску

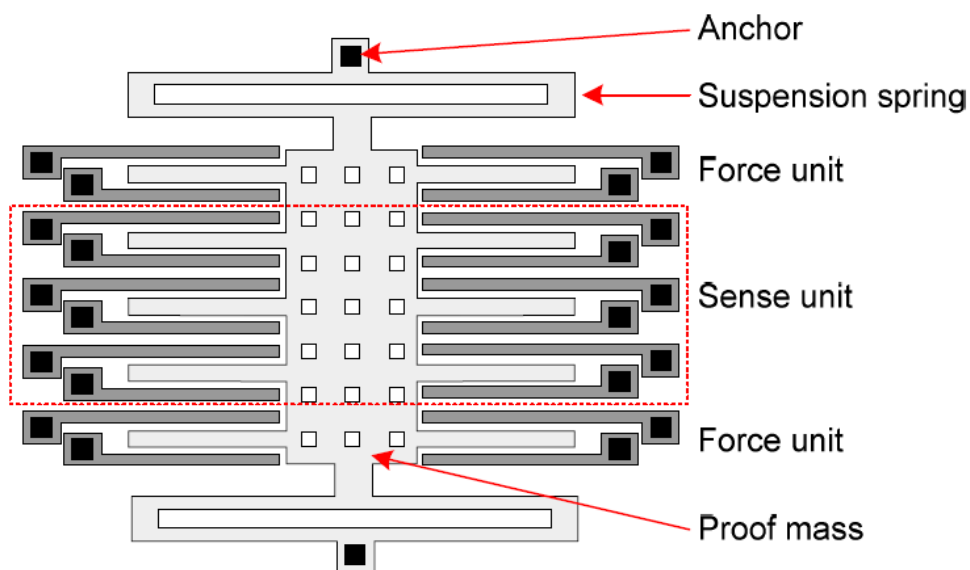


Рисунок 3.4 – Типове розташування структури пробної маси для інтегрованих кремнієвих акселерометрів

### 3.2 Інтегровані інтерфейси для ємнісного датчика

Ємнісні датчики забезпечують високу відносну чутливість, малу температурну залежність, практично незначне енергоспоживання та дуже низький рівень власного шуму. З іншого боку, необхідно виявляти дуже невеликі варіації ємності, як правило, у діапазоні фемто-фарад, що вимагає розробки інтерфейсу, ретельно розробленого та адаптованого до датчика, щоб не погіршити згадані вище переваги датчика.

Системи на чіпі — це розсіяні схеми, де електронні схеми мають таку саму масу, що й сенсорні структури. Іноді економічно вигідніше обробляти електроніку та датчики на окремих чіпах [57], кожен з яких має свій спеціальний процес, і робити остаточне складання в одній упаковці (система на упаковці). У цьому випадку помітні паразитні ємності вводяться через з'єднання між мікросхемою датчика та електронним інтерфейсом. Нечутливість до паразитів є важливою вимогою для останніх.

Добре відомі підходи до інтерфейсів ємнісних датчиків: вимірювачі імпедансу (IM), комутовані підсилювачі заряду конденсатора (SCCA) і перетворювачі ємності в частоту (C-to-f).

**Вимірювач опор** – Техніка IM використовується, наприклад, в Analog Devices ADXL50 [58]. На рисунку 3.5 (та наведено в додатку А рис.13) показана спрощена принципова діаграма останнього, де

використовується структура диференціального датчика, така як на рис. 3.2.

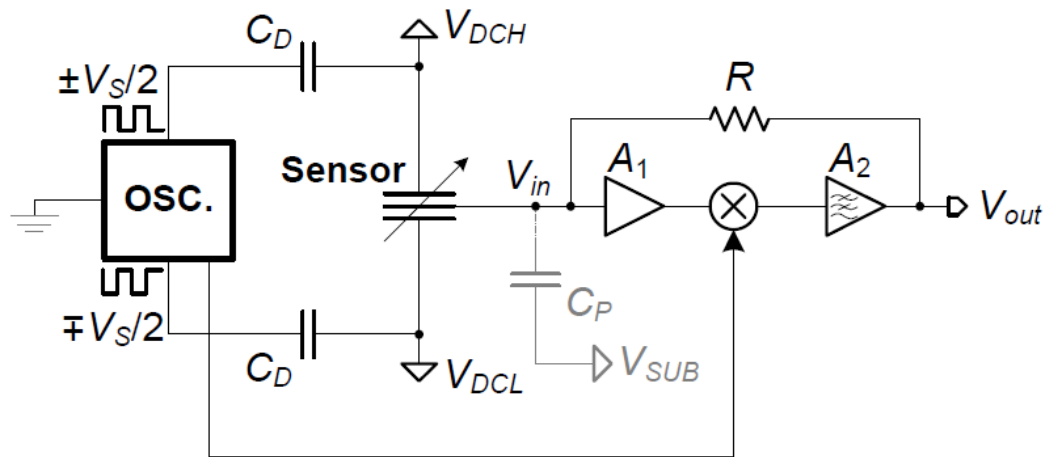


Рисунок 3.5 – Блок-схема інтерфейсу ємнісного датчика ADXL50

Датчик зазвичай стимулюється прямокутною напругою, яку забезпечує блок коливань. Враховуючи паразитну ємність  $C_P$ , рівняння (3.3) можна переписати як

$$V_{in} = \frac{\Delta C}{C_0 \cdot \left(1 + \frac{C_P}{2C_0}\right)} \cdot \frac{V_S}{2} + \frac{C_P}{C_0 \cdot \left(1 + \frac{C_P}{2C_0}\right)} \cdot V_{SUB} \quad (3.4)$$

де  $C_0$  — ємність спокою,  $\Delta C$  — різниця ємностей, яку потрібно виміряти, а  $C_P$  і  $V_{SUB}$  — паразитна ємність і напруга підкладки відповідно. Це видно з рівняння (3.4) шкідливий вплив  $C_P$ : (i) він знижує ефективну чутливість датчика; (ii) це дозволяє ввести збурення від підкладки. Рівень сигналу в цій точці становить кілька мікрвольт, починаючи з  $V_S$  порядку одного вольт, тому необхідний каскад підсилення. Варто зазначити, що сигнал, який переноситься  $\Delta C$ , проходить через підсилювач модульованим способом, як це відбувається в модульованій схемі чоппера. Потім забезпечується синхронна стадія демодуляції для повернення сигналу в базову смугу. Різниця ємностей  $\Delta C$  пропорційна зміщенню, але лише для малих значень останнього, як уже обговорювалося. ADXL50 використовує контур керування негативним зворотним зв'язком через резистор  $R$ , щоб переконатися, що переміщення маси залишається невеликим, щоб наведений вище вираз залишався правильним. Крім того, забезпечується шлях постійного струму для центрального електрода датчика.

**Підсилювачі заряду комутованих конденсаторів** – Найкращий динамічний діапазон досягається за допомогою підсилювачів заряду на комутованих конденсаторах. Було продемонстровано, що дуже високі динамічні діапазони можна досягти за допомогою схеми, показаної на рис. 3.6, (та наведено в додатку А рис.14), яка детально обговорюється в [59]. З іншого боку, інжекція заряду, шум  $kT/C$  і невідповідність між елементами  $C_{fb1}$ - $C_{fb2}$  створюють досить складні, повністю диференціальні архітектури з кількома входними і вихідними синфазними стабілізаціями та цифровими схемами підстроювання.

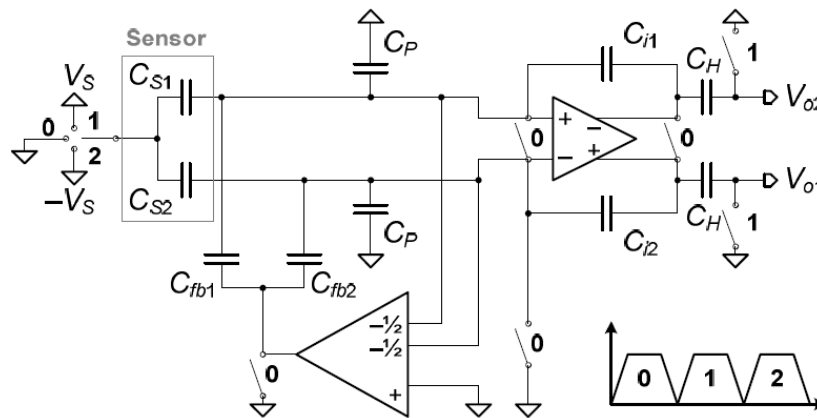


Рисунок 3.6 – Блок-схема повністю диференційного ємнісного інтерфейсу на основі підсилювачів заряду

Вплив шуму операційного підсилювача можна оцінити за спрощеною схемою, наведеною на рис. 3.7. Вихідна напруга в кінці фази 2 може бути легко розрахована як

$$V_{out} = \frac{C_1 - C_2}{C_i} \cdot \Delta V_S = \frac{\Delta C}{C_i} \cdot \Delta V_S \quad (3.5)$$

Враховуючи натурну різницю ємностей  $\Delta C_{FS}$ , отримуємо

$$V_{out,FS} = \frac{\Delta C_{FS}}{C_i} \cdot \Delta V_S \quad (3.6)$$



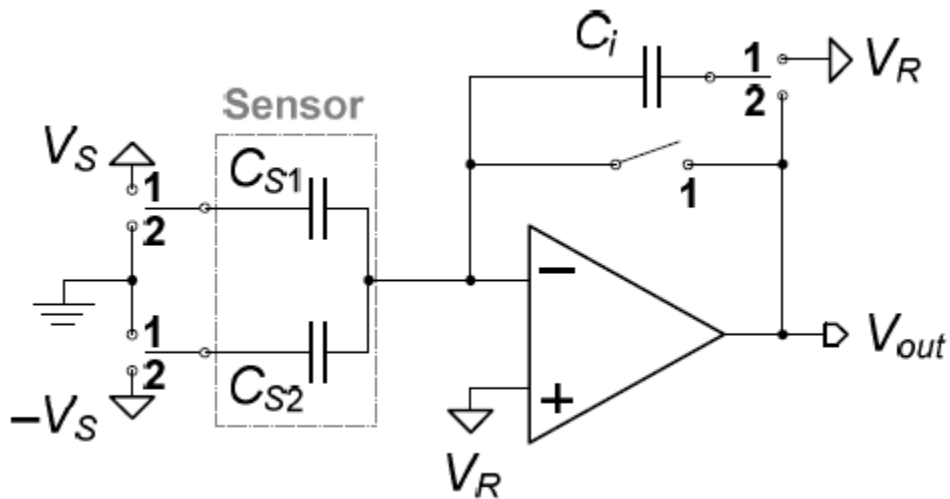


Рисунок 3.7 – Схема спрощеного інтерфейсу комутованого конденсатора для аналізу шуму

Спектральну щільність вхідної потужності каскаду операційного підсилювача можна зменшити шляхом ретельного проектування до єдиного внеску вхідної диференціальної пари

$$\frac{\langle V_{n\_OPAMP,in}^2 \rangle}{\Delta f} = \frac{16}{3} \cdot \frac{kT}{g_m} \quad (3.7)$$

У наведеному вище рівнянні шум мерехтіння не враховується, оскільки ми припускаємо, що система працює на частоті, достатньо вищій за кут теплового мерехтіння, так що домінує лише тепловий внесок. Наведений вище вираз виражає лише шум операційного підсилювача PSD; оскільки шум операційного підсилювача має пропускну здатність більше, ніж частоти дискретизації, виникає псевдонім, що призводить до згортання  $2\pi$  реплік PSD у формулі (3.7) у базовій смузі, де, вказуючи за допомогою  $B_{OPAMP}$  і  $f_{СК}$  смугу пропускання операційного підсилювача та частоту дискретизації відповідно, ми маємо:

$$n = \frac{B_{OPAMP}}{f_{СК}} \quad (3.8)$$

Отже, можна оцінити потужність вихідного шуму

$$\langle V_{n,out}^2 \rangle = \frac{32n}{3} \cdot \frac{kT}{g_m} \cdot A_i^2 B \quad (3.9)$$

де ми мали спостерігати явища  $V_{n,out}$  лише в строго необхідній смузі пропускання датчика  $B$ . Посилення  $A_i$  просто визначається як:

$$A_i = 1 + \frac{C_1 + C_2}{C_i} \quad (3.10)$$

Тепер можна зробити деякі заміни в формулі (3.9), враховуючи теплову напругу  $V_{TH} = kT/q$  і виражаючи вхідну пару  $g_m$  як функцію ID та напруги перевантаження ( $V_{GS} - V_t$ ):

$$\langle V_{n,out}^2 \rangle = \frac{16n}{3} \cdot \frac{V_{TH} \cdot (V_{GS} - V_t)}{I_D} \cdot A_i^2 B \quad (3.11)$$

Рівняння (3.5), (3.6) і (3.11) можна поєднати, щоб знайти вираз динамічного діапазону схеми на рис. 3.7.

$$DR = \left( \frac{\Delta C_{FS}}{\Delta C_{min}} \right)^2 = \frac{V_{out,FS}^2}{\langle V_{n,out}^2 \rangle} = \frac{3}{16n} \cdot \frac{\Delta V_S^2}{V_{TH}(V_{GS} - V_t)} \cdot \left( \frac{\Delta C_{FS}}{C_i + C_1 + C_2} \right)^2 \cdot \frac{I_D}{qB} \quad (3.12)$$

Рівняння (3.12) чітко демонструє, як можна зменшити шум операційного підсилювача шляхом збільшення ID струму зміщення вхідних транзисторів. Термін  $qB$ , який також має одиницю вимірювання струму, має дуже низьке значення в практичних конструкціях. Наприклад, для  $B = 30$  кГц  $qB$  становить приблизно 4 фА. З іншого боку,  $n$  і коефіцієнт ємності змушують використовувати відносно великий ID, лише частково пом'якшений членом співвідношення напруг. Типова проектна ситуація досягається шляхом зниження внеску теплового шуму до такого рівня, що шум  $kT/C$  є єдиним внеском в обмеження динамічного діапазону. За допомогою підходу заряду CDS було продемонстровано динамічний діапазон до 89 дБ із струмом 27 мА, споживаним від джерел живлення [59].

**Ємність до перетворювачів частоти** –Перетворювачі C-to-f характеризуються надзвичайно низьким енергоспоживанням, порядку

кількох мікровоат, але мають сильний температурний дрейф у чутливості та помітну нелінійність. Приклади проілюстровано на рис. 3.8: на (а) простий релаксаційний осцилятор [60], подібний до описаного в розділі 3.1.1. використовується, тоді як у (b) показаний простий кільцевий генератор [61], де датчик  $C_S$  розміщений паралельно одній із власних ємностей  $C_L$  кільця. Варто зазначити, що в цих схемах структура диференціального датчика не використовується, тому дрейф характеристик датчика додається до дрейфу характеристик інтерфейсу, що призводить до дуже низької точності вимірювань.

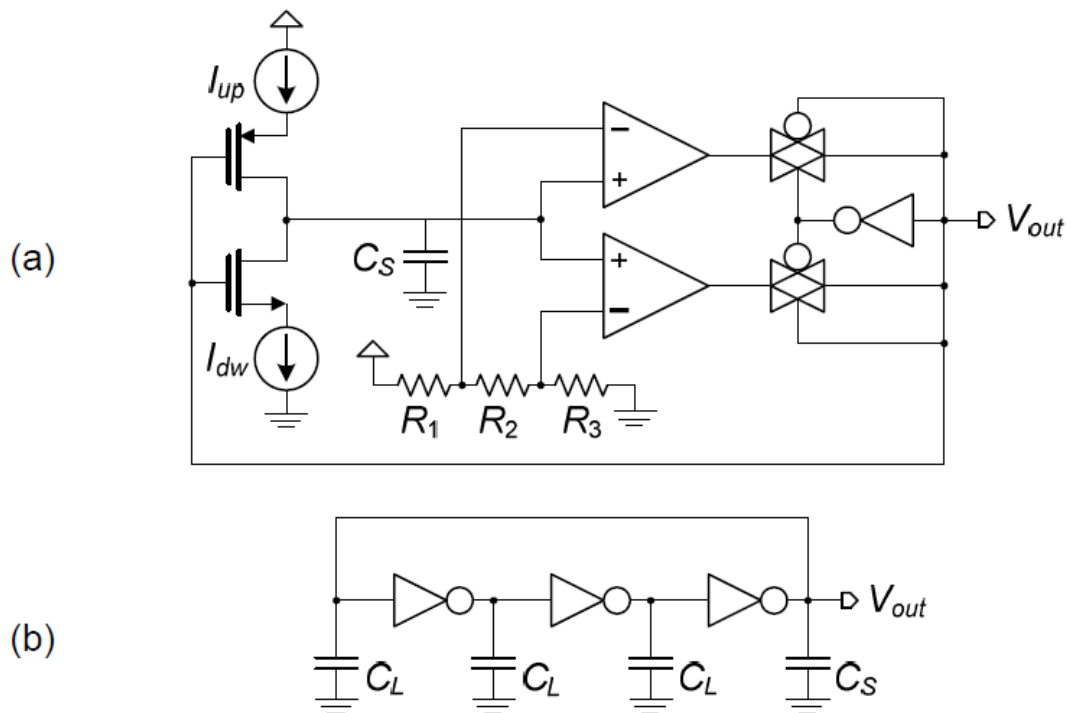


Рисунок 3.8 – Принципова схема C-to-f перетворювача: (а) на основі релаксаційного генератора та кільцевого генератора

### 3.3 Ємнісні перетворювачі сигналу в ШІМ. Перетворювач C-to-PWM

У цьому підрозділі проілюстровано альтернативний і оригінальний метод, заснований на перетворенні ємності в ширину імпульсу (C-to-PWM). Схема створює періодичний імпульс на виході: період встановлюється зовнішнім годинником, а тривалість імпульсу пропорційна чутливому конденсатору. Стосовно розглянутих раніше рішень можна відзначити деякі особливі переваги:

(i) загальна інтеграція системи на чіпі, без зовнішніх компонентів, легко досягається на відміну від класичного ІМ, де потрібні

великі розв'язувальні конденсатори;

(ii) на відміну від SCCA, не відбувається зміщення високочастотного шуму, що послаблює шумові обмеження та дозволяє працювати з дуже низькою потужністю;

(iii) схема синхронізується зовнішнім годинником, що полегшує взаємодію з мікроконтролерами, ніж для перетворювачів C-to-f. Температурний дрейф, який можна отримати, набагато нижчий, а характеристики набагато більш лінійні.

Сигнали з широтно-імпульсною модуляцією можна передавати через канали з помірним шумом і нелінійними характеристиками, такі як радіочастотні або оптичні канали. Крім того, ШІМ-сигнал можна легко зчитати недорогим мікроконтролером або перетворити на аналоговий сигнал, використовуючи лише фільтр низьких частот. У першому випадку інформація витягується шляхом цифрової вибірки періодичної форми сигналу та підрахунку кількості старших бітів у загальній кількості вибірок за період. Ту ж функцію виконує

аналогічно за допомогою простого рухомого вікна фільтра низьких частот, встановлюючи вікно інтеграції рівним періоду сигналу (або кратному йому, якщо потрібне усереднення) і (аналогічно) вибірку виходу фільтра в кінці кожного часового кадру.

**Принцип роботи перетворювача C-to-PWM.** Блок-схема системи показана на рис. 3.9(а), де структура диференціального датчика представлена двома конденсаторами CR і CX. Кількість, яку потрібно придбати, є різницею

$$\Delta C = CX - CR.$$

СК це тактовий сигнал із 50 % шпаруватістю, який має період TCK і частоту f<sub>CK</sub>. Вихідний сигнал, позначений Р, є послідовністю імпульсів частоти f<sub>CK</sub> і тривалості τ, пропорційної τС. Для правильної роботи інтерфейсу □С має дорівнювати або бути більше нуля. Цього можна легко досягти в структурі диференціального датчика, де еталонний CR реалізований за допомогою фіктивної структури, тобто нечутливої до фізичної величини, яку потрібно відчутти.

Блок RG (генератор змінного струму) виробляє трикутну форму сигналу VS(t), синхронну з тактовим сигналом, тоді як блок CA є диференціальним підсилювачем струму з посиленням 1/2. CMP є компаратором з низьким гістерезисом, тоді як CM1 і CM2 є простими переривними модуляторами.

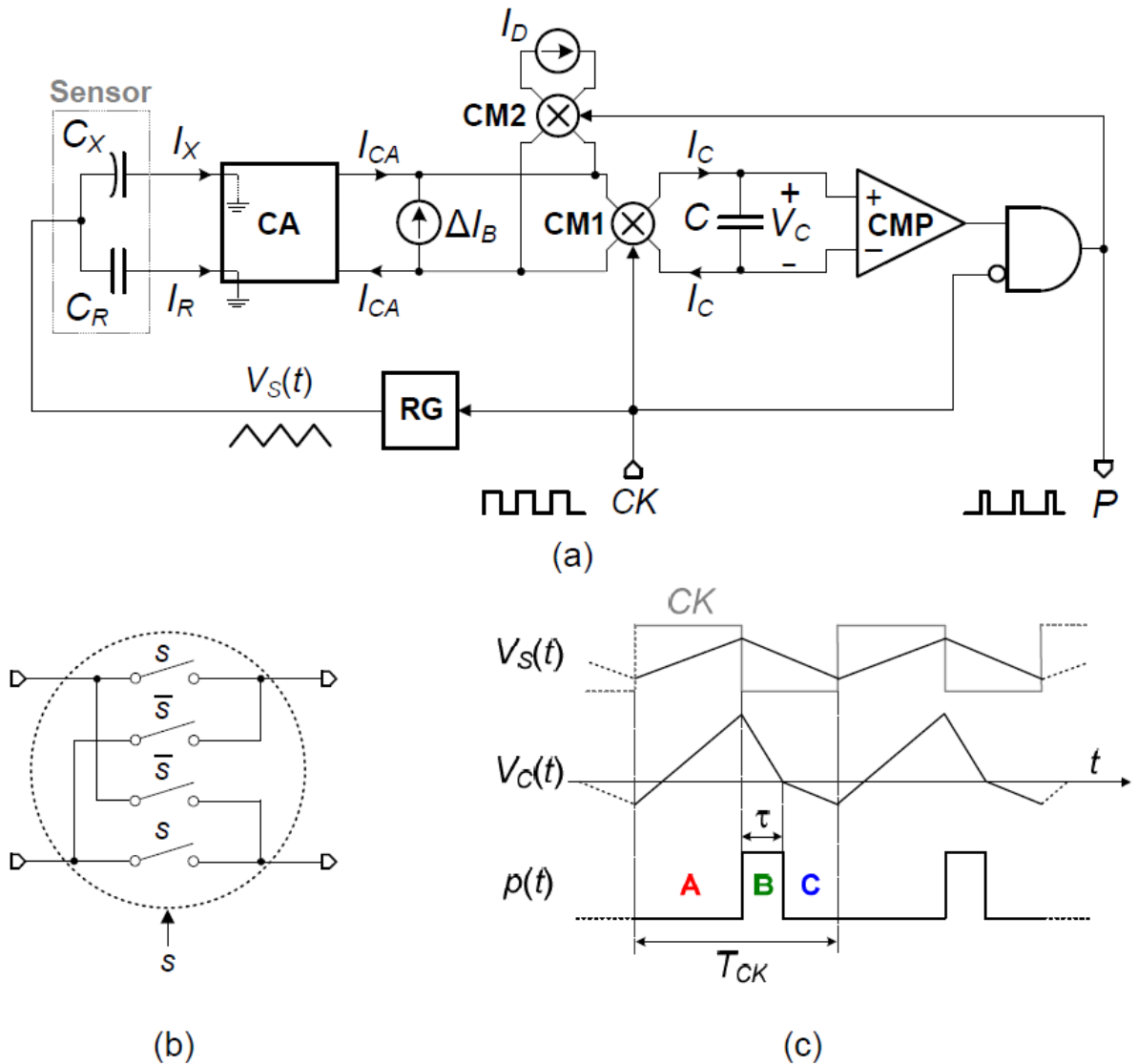


Рисунок 3.9 – (а) Схематичні блок-схеми C-to-PWM: (б) функціональний вигляд модуляторів переривника CM1, CM2, (с) ідеальні форми сигналів у схемі

Конденсатор  $C$  заряджається струмами  $I_{CA}$ ,  $I_D$  і  $\Delta I_B$ , знак яких залежить від стану  $M1$  і  $M2$ . Струми  $I_D$  та  $\Delta I_B$  є постійними та вибрані так, щоб задовольняли наступні умови:

$$I_D \geq \max|I_{CA}|; \quad (3.13a)$$

$$\Delta I_B > I_D + \max|I_{CA}| \quad (3.13b)$$

Зрозуміло, що для того, щоб сигнал  $V_C$  був стаціонарним, чистий заряд, накопичений на  $C$  за тактовий період ( $T_{СК}$ ), повинен дорівнювати

нулю. Щоб спростити розуміння циклу вимірювання, ідеальні форми сигналів у схемі показані на рис. 3.9(с), (та наведено в додатку А рис.15). У наступному аналізі вхідний опір СА буде вважатися нульовим; цей пункт важливий для досягнення низької температурної залежності і буде розглянутий у наступному розділі. Вираз поточного  $I_{CA}$  тоді:

$$I_{CA} = \frac{I_X - I_R}{2} = \frac{1}{2} \frac{dV_S}{dt} \cdot \Delta C. \quad (3.14)$$

Зауважимо, що  $I_{CA}$ , який пропорційний  $\Delta C$ , змінює знак на половині такту через інверсію нахилу  $V_S$ . Однак  $M1$  створює іншу зміну знака одночасно, так що внесок заряду  $I_{CA}$  завжди позитивний і визначається як:

$$Q_{CA} = \frac{\Delta C}{2} \cdot \int_0^{T_{CK}/2} \frac{dV_S}{dt} dt - \frac{\Delta C}{2} \cdot \int_{T_{CK}/2}^{T_{CK}} \frac{dV_S}{dt} dt = \Delta C \cdot \Delta V_S. \quad (3.15)$$

де  $\Delta V_S$  – амплітуда від піку до піку  $V_S$ . З іншого боку, внесок  $I_D$  змінює знак на половині такту, так що чистий заряд, накопичений за весь період такту, дорівнює нулю. Роль цього струму полягає в тому, щоб збільшити  $V_C$  на першій половині такту і зменшити на другій, незалежно від значення та знаку  $I_D$  та  $I_{CA}$ . Це гарантується умовами (3.13b). З цієї причини  $V_C$  досягає свого максимуму в кінці першої половини тактового циклу. Як показано на рис. 3.9(с), тепер ми припустимо, що максимум позитивний, і обговоримо це в кінці цього розділу. Враховуючи вплив  $CM1$  і каскадного логічного вентиля, вихідний сигнал ( $P$ ) вмикається на початку другого півперіоду синхронізації, як показано на рис. 3.9(с).

Внесок  $I_D$  є від'ємним у першій половині тактового періоду через зміну знака, керовану  $CM2$ . Наприкінці цього періоду і  $CM2$ , і  $CM1$  змінюють стан, так що внесок продовжує бути від'ємним. Нарешті, коли  $V_C$  перетинає нуль і  $CM1$  змінює стан, внесок  $I_D$  стає позитивним. Підсумовуючи внески за три фази, позначені буквами А, В і С на рис. 1(с), чистий внесок  $I_D$  дорівнює:

$$Q_D = -2\tau I_D. \quad (3.16)$$

Прирівнюючи до нуля загальний заряд, накопичений за період (тобто  $Q_D + Q_{CA}$ ), ми отримуємо тривалість імпульсу:



$$\tau = \Delta C \cdot \frac{\Delta V_S}{2I_D} \quad (3.17)$$

Легко показати, що система досягає стійкого стану незалежно від початкового стану. Дійсно, якщо максимум  $V_S$  негативний,  $C_{M2}$  залишається в інвертованому стані і, подібно до  $\Delta I_B$ ,  $I_D$  не дає внеску заряду. Таким чином, незбалансований позитивний внесок  $I_{CA}$  прогресивно підвищує форму сигналу  $V_S$ , досягаючи ситуації на рис. 3.9(с). З іншого боку, якби  $V_S$  завжди був додатним, внесок  $I_D$  був би від'ємним протягом усього періоду синхронізації, і через умову (3.13а)  $V_S$  поступово зменшувався б, знову досягаючи стабільної ситуації.

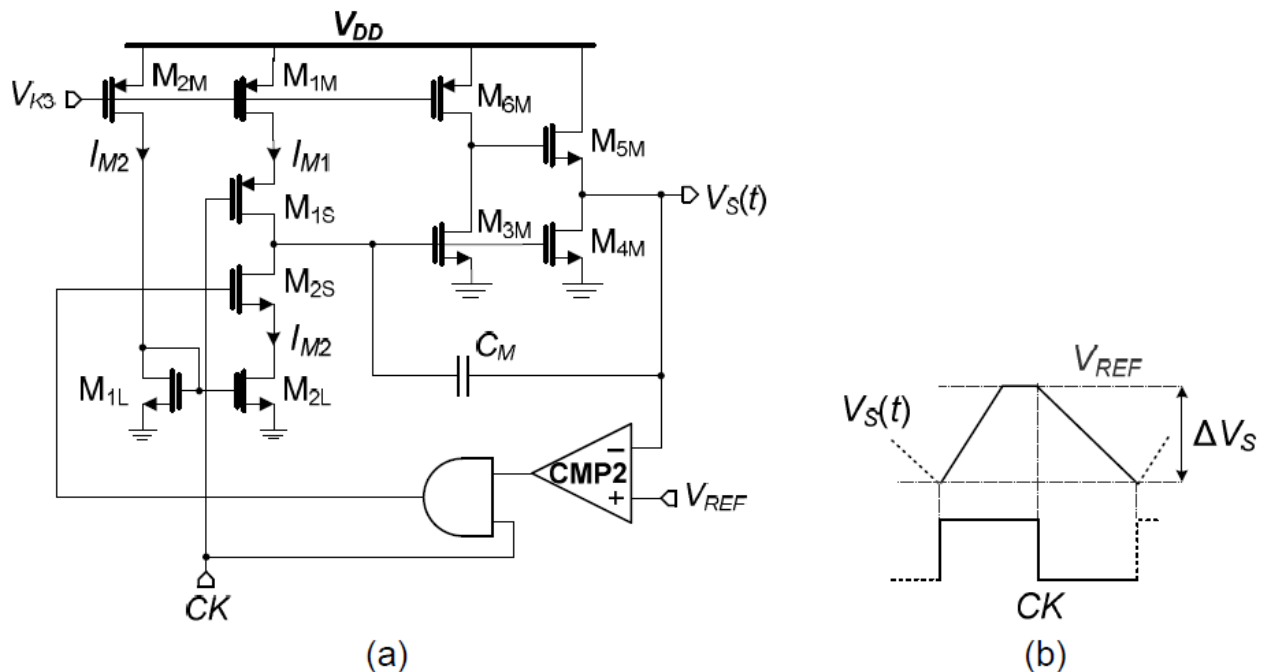


Рисунок 3.10 – Схематичний вигляд (а) блоку RG і (б) форми сигналу  $V_S(t)$

**Реалізація блоків** – Спрощене схематичне зображення RG показано на рис. 3.10. Схема складається з інвертувального інтегратора Міллера, що складається з  $M_{3M}$ - $M_{6M}$ , і двох джерел струму  $M_{1M}$  і  $M_{2M}$ , які можна підключити до входу інтегратора через  $M_{1S}$  і  $M_{2S}$  відповідно.

У першому напівперіоді ( $CK = 1$ )  $M_{2L}$  отримує струм  $I_{M2}$  від інтегратора, так що  $V_S$  зростає з постійною швидкістю. Припустимо, що  $V_S$  досягає  $V_{REF}$  до того, як годинник змінить стан. З цього моменту  $CMP2$  утримує  $M_{2S}$  вимкненим, а  $V_S$  є постійним. У другому напівперіоді ( $CK = 0$ )  $M_{1S}$  включає подачу струму  $I_{M1}$  на інтегратор.  $V_S$  зменшується

протягом усього періоду другої половини такту з меншим нахилом, ніж наростаючий ( $I_{M1} < I_{M2}$ , за проектом), так що  $V_s$  справді досягає  $V_{REF}$  у наступній фазі збільшення, як припускалося вище. Отримана форма хвилі надійно синхронізована з годинником, але не ідеально трикутна. Однак можна легко показати, що рівняння (3.15) і (3.17) все ще цілком справедливі і що:

$$\Delta V_s = \frac{1}{C_M} \cdot \frac{T_{CK}}{2} \cdot I_{M1}. \quad (3.18)$$

Поєднання рівнянь (3.17-3.18) нарешті знаходимо:

$$\tau = \frac{\Delta C}{C_M} \cdot \frac{I_{M1}}{4I_D} \cdot T_{CK}. \quad (3.19)$$

Таким чином ми отримали, що ширина імпульсу  $\tau$  пропорційна тактовому періоду та  $\Delta C$ , за бажанням. Зауважте, що в (3.19) вказано лише співвідношення струму та ємності, тому очікується дуже мала чутливість до температури.

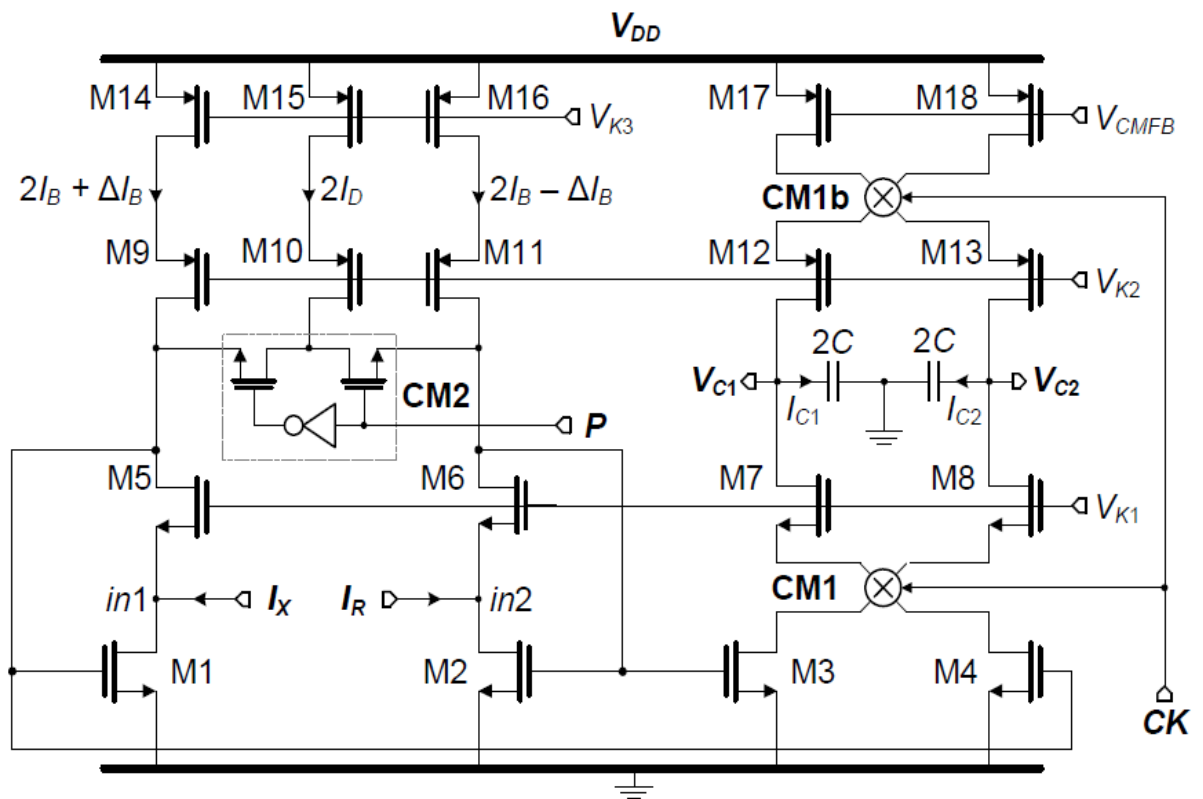


Рисунок 3.11 – Принципова схема підсилювача струму (СА), що включає також функцію джерел струму  $I_D$  та  $\Delta I_B$  та  $CM1$ ,  $CM2$ .

Зверніть увагу, що модулятор СМ2 реалізований з двома додатковими керованими перемикачами. Крім того, СМ1 був продубльований (СМ1b), щоб модулювати низькочастотний шум М17-М18

На рисунку 3.11 (та наведено в додатку А рис.16) показано схему, призначену для включення функцій блоків СА, СМ1, СМ2, а також джерел струму ID і ΔВ. М14, М16 і М15 є джерелами постійного струму, які задають струми витоку М5 і М6. Зокрема, ID15 може передаватися до М6 або М5 залежно від значення сигналу Р. Струми IX та IR входять у СА у точках, зазначених на рисунку з in1 та in2. Завдяки М1-М5 і М2-М6, вхідний опір постійного струму має порядок (1/g 2r).

Зрозуміло, що через кінцеву смугу підсилення петлі вхідний опір на робочій частоті ( $f_{СК} = 1/T_{СК}$ ) вищий за значення постійного струму. Однак, як підтверджено моделюванням, опір досить низький, щоб варіації вхідної напруги були незначними щодо коливання VS. Ця умова важлива для того, щоб вхідні струми не залежали від параметрів пристрою та температури. Струми в М1 і М2 дзеркально відображаються на М4 і М3 відповідно. Тому:

$$I_{D3} = I_R + I_{D16} + P \cdot I_{D15} \cdot \quad (3.20a)$$

$$I_{D4} = I_X + I_{D14} + \bar{P} \cdot I_{D15} \cdot \quad (3.20b)$$

Роботу модулятора СМ1 на струмах ID3, ID4 можна легко описати введенням ідеального модулюючого сигналу  $m(s)$ , який приймає значення «+1», коли цифровий керуючий сигнал  $s$  високий, і «-1», коли  $s$  є низький. Завдяки цій конвенції ми маємо:

$$I_{D8} - I_{D7} = m(СК) \cdot (I_{D4} - I_{D3}) = m(СК) \cdot (I_X - I_R + I_{D14} - I_{D16} - m(P) \cdot I_{D15}) \cdot \quad (3.21)$$

Інтегруючий конденсатор С на рис. 3.9(a) замінено двома заземленими конденсаторами номіналом 2С. Еквівалентність гарантується стабілізацією загального

режимна напруга вузлів VC1 і VC2, що керується звичайною петлею зворотного зв'язку, що діє на М17 і М18. Оскільки М17 і М18 номінально ідентичні, ми маємо, що  $ID17 = ID18$ , і застосовуючи закон Кірхгофа струму до вихідних вузлів, ми легко знаходимо:

$$I_{D7} + I_{D8} = I_{D17} + I_{D18} = 2I_{D17}. \quad (3.22a)$$

$$I_{C1} = I_{D17,18} - I_{D7}. \quad (3.22b)$$

$$I_{C2} = I_{D17,18} - I_{D8}. \quad (3.22c)$$

З виразів (3.22abc) можна легко знайти, що  $I_{C2} = -I_{C1}$ , а з рівнянь (3.12):

$$I_{C1} = \frac{I_{D8} - I_{D7}}{2} = m(CK) \cdot \left( \frac{I_X - I_R}{2} + \frac{I_{D14} - I_{D16}}{2} - m(P) \cdot \frac{I_{D15}}{2} \right). \quad (3.23)$$

$VC = VC_1 - VC_2$ ,  $IC = IC_1$ ,  $ID = ID_{15}/2$ ,  $\Delta IB = (ID_{14} - ID_{16})/2$ , що доводить, що схема на рис. 11 дійсно реалізує необхідну функцію.

Варто зазначити, що  $\Delta IB$  виходить шляхом створення різних за конструкцією M14 і M16 (тобто ID14 і ID16). Подібно до цієї навмисної невідповідності струму, випадкові струми зсуву в СА модулюються CM1 і не впливають на баланс заряду протягом тактового періоду, тобто на ширину імпульсу. Модулятор CM1b був доданий, щоб поширити цей корисний ефект на можливу невідповідність пари M17-M18. Компоненти шумового струму на частоті, значно нижчій за  $f_{CK}$ , також відхиляються цим механізмом, як це відбувається в модульованому каскаді переривника.

Таблиця 3.1 – Конструкційні дані прототипу: Співвідношення сторін MOSFET W/L виражаються в мкм/мкм

Ramp generator (SG)		Current amplifier (CA)			
M1M	14/50	M1-4	4/12	M14	54/50
M2M	14/50	M5-8	2/2.5	M15	7.5/100
M3M	2.5/8	M9	43.2/10	M16	46/50
M4M	5/8	M10	7.5/20	M17-18	4/4
M5M	4/2	M11	36.8/10	C	0.5 pF
M6M	50/50	M12-13	4/1	C <sub>M</sub>	3 pF

Полікремнієві n+імплантовані конденсатори були використані для компонентів C і CM. Щоб полегшити характеристику пристрою, на тестовому чіпі був включений фіктивний датчик. CR був постійним конденсатором 500 фФ, тоді як CX був сумою постійної ємності, ідентичної CR, і конденсатора змінної ємності, що складається з чотирьох

двійкових зважених конденсаторів, які можна вибірково з'єднувати паралельно. Загальна диференціальна ємність  $\Delta C$  може змінюватися від 16 до 256 фФ з кроком 16 фФ за допомогою чотирьох бітів конфігурації. Через необхідні малі значення ємності, нестандартні конденсатори були розроблені з використанням перекриття трьох доступних металевих шарів. Щоб максимізувати лінійність, усі значення ємності були отримані шляхом паралельного з'єднання одного елементарного конденсатора. Обидва компаратори СМР і СМР2 є звичайними компараторами. До блоку СМР додано простий 6-транзисторний повністю диференціальний підсилювач, показаний на рис. 3.12, щоб отримати компаратор з низьким гістерезисом.

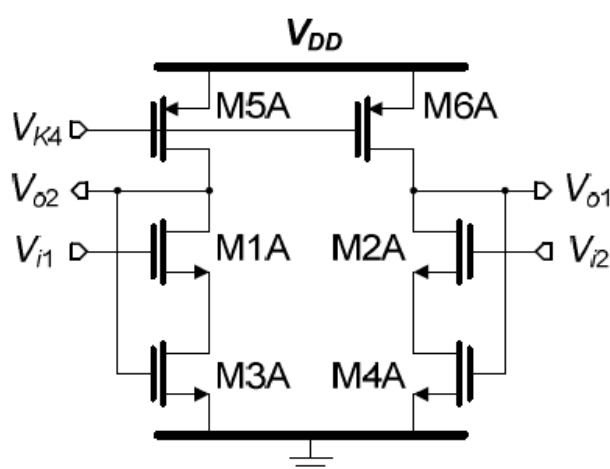


Рис. 3.12 – Принципова схема повністю диференціального підсилювача, що використовується для зниження гістерезису в СМР

Усі джерела постійного струму, зазначені в схемі, були отримані від одного джерела дрейфового струму (CS) малої потужності та низької температури. Основні сигнали направляються на діагностичні панелі через буфери з низькою вхідною ємністю. Для буферів і послідовного інтерфейсу використовується окрема лінія живлення.

Для всіх вимірювань, наведених у цій роботі, тактова частота 30 кГц забезпечувалася генератором сигналів HP 33120A, а форми сигналів були отримані за допомогою цифрового осцилографа Tektronix TDS220. Температуру мікросхеми змінювали за допомогою криостата Пельтье з точністю 0,1 °С. Джерело живлення встановлено на 3 В. Основний сигнал у схемі показаний на рис. 3.13 для  $\Delta C = 160$  пФ. Порівняння з ідеальною формою сигналу на рис. 3.9(с) доводить правильну роботу схеми.

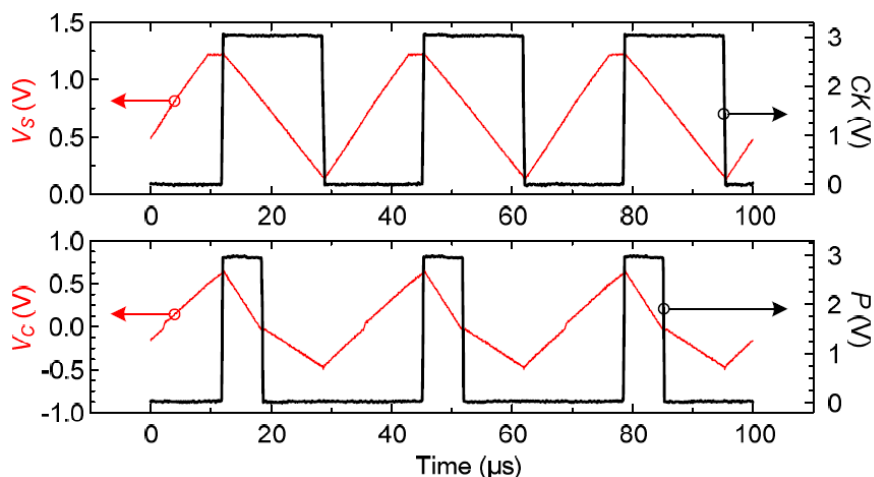


Рисунок 3.13 – Експериментальна форма сигналу, виміряна на тестовому чіпі з  $\Delta C = 160$  фФ

Залежність ширини імпульсу від диференціальної ємності  $\Delta C$  показано на рис. 3.14 для двох різних температур ( $0^\circ\text{C}$  і  $80^\circ\text{C}$ ). Криві при проміжних температурах знаходяться між ними. Можна спостерігати задовільну лінійну реакцію лише з локальними відхиленнями, які можна віднести до паразитних ємностей фіктивного датчика.

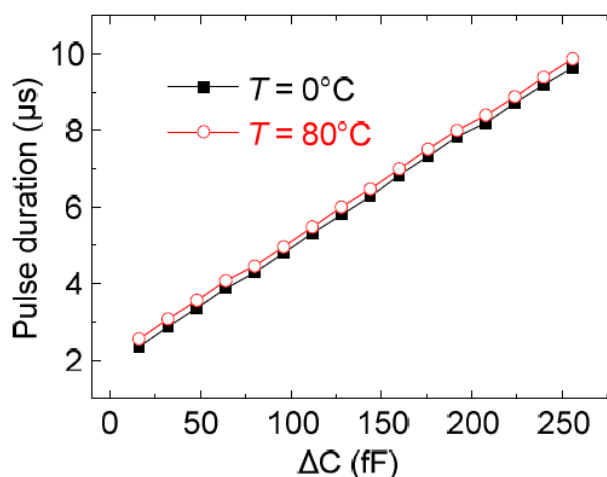


Рисунок 3.14 – Виміряна залежність тривалості вихідного імпульсу як функції диференціальної ємності датчика для двох різних температур

Очікувана низька чутливість до температури підтверджується. Залишковий температурний дрейф у всьому температурному діапазоні становить менше 2,5 % повної шкали, що відповідає  $300$  ppm/ $^\circ\text{C}$ . Що стосується шуму, видимим ефектом є тремтіння на задньому фронті вихідного імпульсу. Отримане стандартне відхилення тривалості імпульсу, оцінене за набором із 200 випадково проведених вимірювань, становило  $\sigma$

= 0,4 % повної шкали. Загальний струм живлення (за винятком діагностичних буферів) становить лише 28 мкА.

### 3.4 Розробка метеостанції

Етапи проектування, застосовані в цьому дослідженні, зображені на рис.3.15, де представлено огляд процесу дослідження. Початковий етап, позначений зеленим блоком, охоплює розробку та виготовлення сенсорної платформи для вимірювання змінних навколишнього середовища, таких як температура повітря, відносна вологість, атмосферний тиск, концентрація CO<sub>2</sub> і концентрації твердих частинок (PM 1, PM 2,5, PM 10). Під час цього етапу використовувалася інформація, надана ВМО. Ця міжнародна агенція забезпечує високу якість доставки даних кінцевим користувачам.

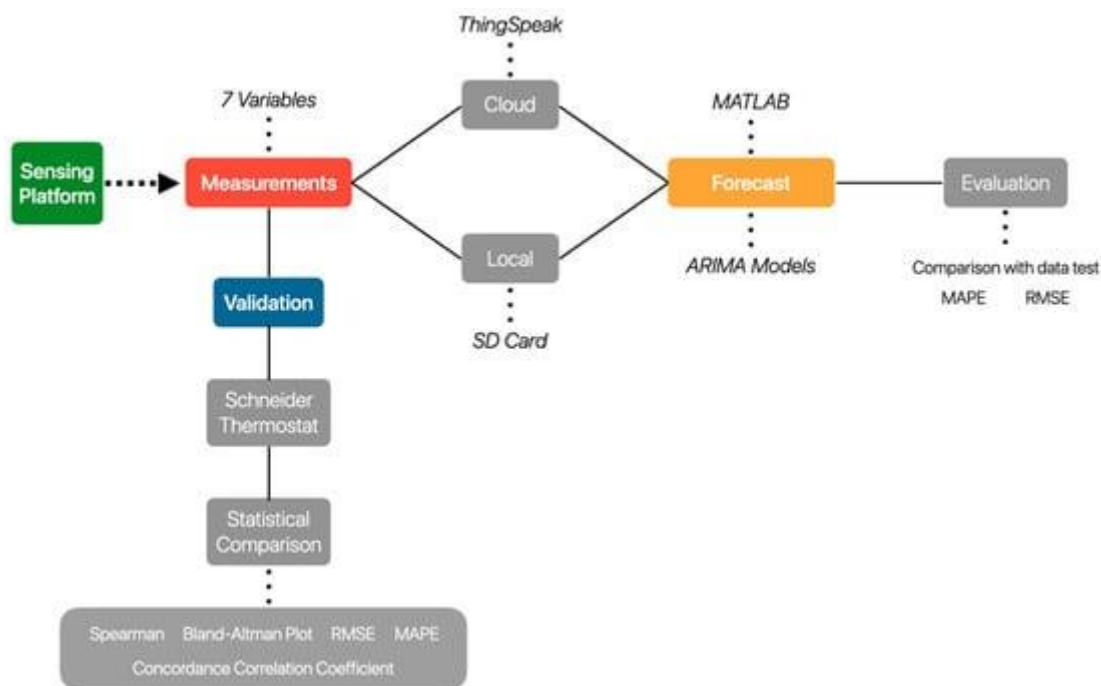


Рисунок 2.15 – Загальна методологія

Згодом, коли дані для всіх змінних були отримані, було проведено порівняння з комерційними продуктами, щоб оцінити близькість вимірювань запропонованої станції до вимірювань спеціалізованих пристроїв. Для порівнянь у приміщенні термостат Schneider був обраний як еталонний інструмент, тоді як для порівнянь поза приміщенням використовувався датчик Purple Air. Важливо підкреслити, що еталонні датчики, хоча й не повністю захищені від помилок вимірювання, були обрані на основі їх використання в промисловості та доступності на ринку,



а також їх сертифікації, що гарантує мінімальні помилки. Отже, порівняння було зосереджено на оцінці монотонного співвідношення між OSWS і цими пристроями та визначенні похибок (RMSE і MAPE) між ними.

Крім того, щоб полегшити зберігання даних, було реалізовано локальне сховище (SD-карта) і віддалене сховище (сервер ThingSpeak). Модель прогнозу ARIMA також була застосована для прогнозування значень у короткостроковому періоді часу з використанням історичних даних. Примітно, що використана модель була однофакторною, враховуючи лише одну змінну на модель. Таким чином, часові ряди, що містять значення однієї змінної (наприклад, температури), виключно передбачають значення тієї самої змінної. Нарешті, модель прогнозу пройшла оцінку та порівняння з відомими даними, в результаті чого були розраховані параметри для оцінки її ефективності.

Документи Всесвітньої метеорологічної організації були дотримані для розробки надійної та максимально точної метеостанції. Існує категорія під назвою «Автоматизовані метеостанції» (AWS), і поточна пропозиція вписується в категорію багатоцільових AWS. Головною особливістю цих пристроїв є те, що вони вимірюють, зберігають і передають зібрані дані автоматично. Крім того, вони повинні мати принаймні три частини:

1. Чутливі прилади.
2. Локальний модем або інтерфейс для підключення до мережі.
3. Центральний процесор.

Тим не менш, деякі інші частини були додані до проекту, щоб покращити їх зручність у використанні та продуктивність. Серед функцій були:

1. Джерела живлення.
2. Людино-машинний інтерфейс.

Підсумовуючи, п'ять модулів показано на рисунку 3.16. Вони обробляються блоком мікроконтролера (MCU); у цьому випадку було реалізовано STM32F103C8T6.

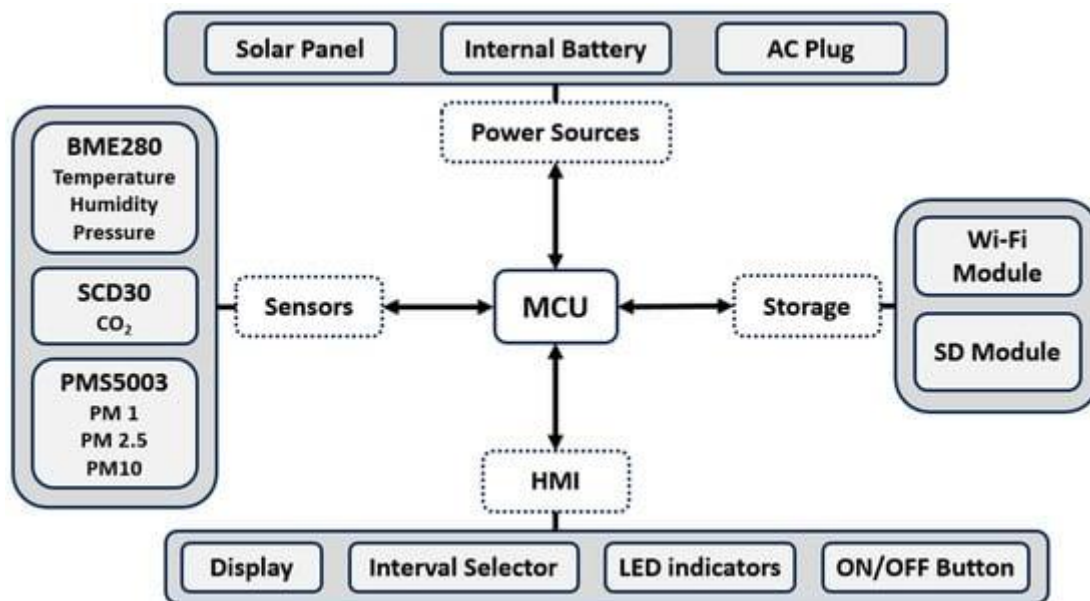


Рисунок 3.16 – Модулі для відкритої метеостанції (OSWS)

Для чутливого приладу було обрано три датчики (ці датчики можуть вимірювати змінні в межах звичайних діапазонів). З метою універсальності було обрано три різних джерела живлення, щоб станцію можна було розмістити в сценаріях з кількома умовами:

- Сонячна панель 100 Вт
- Літій-іонний внутрішній акумулятор
- Роз'єм змінного струму

Для накопичувача доступні два варіанти зберігання: локальне та віддалене. Для першого варіанту до системи додано SD-карту на 32 ГБ. Оскільки CSV є гнучким і сумісним форматом, усі значення вимірювань і часові мітки зберігаються в цьому файлі.

З іншого боку, віддалене сховище керувалося через модем ESP8266 з інтегрованим WiFi; значення були відправлені на платформу ThingSpeak; ця служба зберігає кожну змінну (тобто температуру, відносну вологість, PM 2,5) в одному каналі, а зібрані значення можна експортувати через API або у формат CSV.

Нарешті, було реалізовано людино-машинний інтерфейс, щоб користувачі могли ефективно керувати OSWS. Включені елементи:

- Дисплей: щоб показати вимірювання в реальному часі.
- Відображення кнопки ввімкнення/вимкнення.
- Кнопка вибору інтервалу: для налаштування часу інтервалу вимірювання.
- Світлодіодні індикатори: для вказівки стану пристрою.

- Загальна кнопка увімкнення/вимкнення.

Процес прогнозування є завершальним етапом методології, показаної на діаграмі на рис.3.17 .

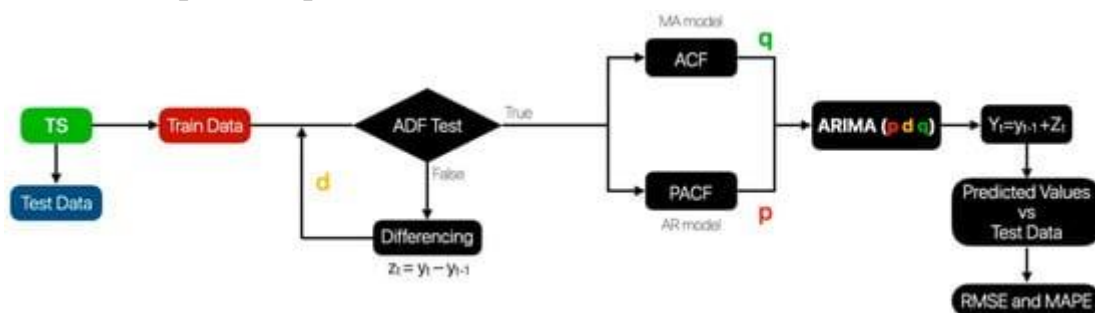


Рисунок 3.17 – Методологія процесу прогнозування

Як зазначалося раніше, модель прогнозу ARIMA є однофакторною; отже, вважається, що одна змінна передбачає значення тієї самої змінної. Наприклад, якщо очікувані значення температури, у моделі враховуються попередні значення температури. Кожен набір значень (температура, PM 1, PM 2,5, CO<sub>2</sub> тощо) розглядається як часовий ряд, оскільки кожне вимірювання має позначку часу та рівномірно розподілено. Цей проміжок між значеннями налаштовується за допомогою кнопки, яка встановлює інтервал вимірювання, описаний в інтерфейсі людина–машина.

Крім того, оскільки модель ARIMA вимагає, щоб часовий ряд був стаціонарним, середнє значення та стандартне відхилення мають бути постійними, тому для оцінки цього реквізиту було реалізовано статистичний тест під назвою Augmented Dickey–Fuller. Якщо часовий ряд був нестационарним, застосовувався інший метод, щоб перетворити його на стаціонарний. Цей метод віднімає попереднє значення від поточного. Після застосування цього методу тест ADF можна використовувати для часового ряду  $Z_t$ , щоб визначити, чи він стаціонарний. Коли цей реквізит виконано, необхідно оцінити замовлення на модель. Ця модель складається з трьох частин: авторегресійна AR(p), інтегрована I(d) і ковзне середнє MA(q); тому необхідно оцінити три параметри: p, d і q.

Параметр «d» представляє кількість разів, коли метод розрізнення застосовувався до часового ряду. У випадку параметра «p» він оцінюється за допомогою графіка часткової автокореляційної функції (PACF); з

іншого боку, параметр «q» обчислюється за допомогою функції автокореляції (ACF).

Запропоновану систему було перевірено на сценаріях у приміщенні та на вулиці та порівняно з еталонним приладом. Перший сценарій був у закритій кімнаті, і контрольним приладом був термостат Шнайдера (ST), який вимірює лише температуру та вологість і показує результати вимірювань у реальному часі на дисплеї.

Дотримуючись рекомендацій ВМО, описаних раніше та натхненних найсучаснішими проектами, був розроблений прототип OSWS. Кінцевий результат показаний на рисунку 3.18, (та наведено в додатку А рис.17), який ілюструє вимірювання розміру. Усі електронні компоненти, які обслуговують та керують системою, розміщені всередині корпусу.

Два мікропроцесори та бездротова плата були встановлені для роботи з усіма датчиками та НМІ. Це рішення запобігає перегріву окремого мікроконтролера та забезпечує більш простий спосіб модульності підсистем. Відповідно до цієї конструкції було розроблено дві друковані плати: головну друковану плату (рис.3.18) і другу друковану плату (рис.3.19), (та наведено в додатку А рис.18).

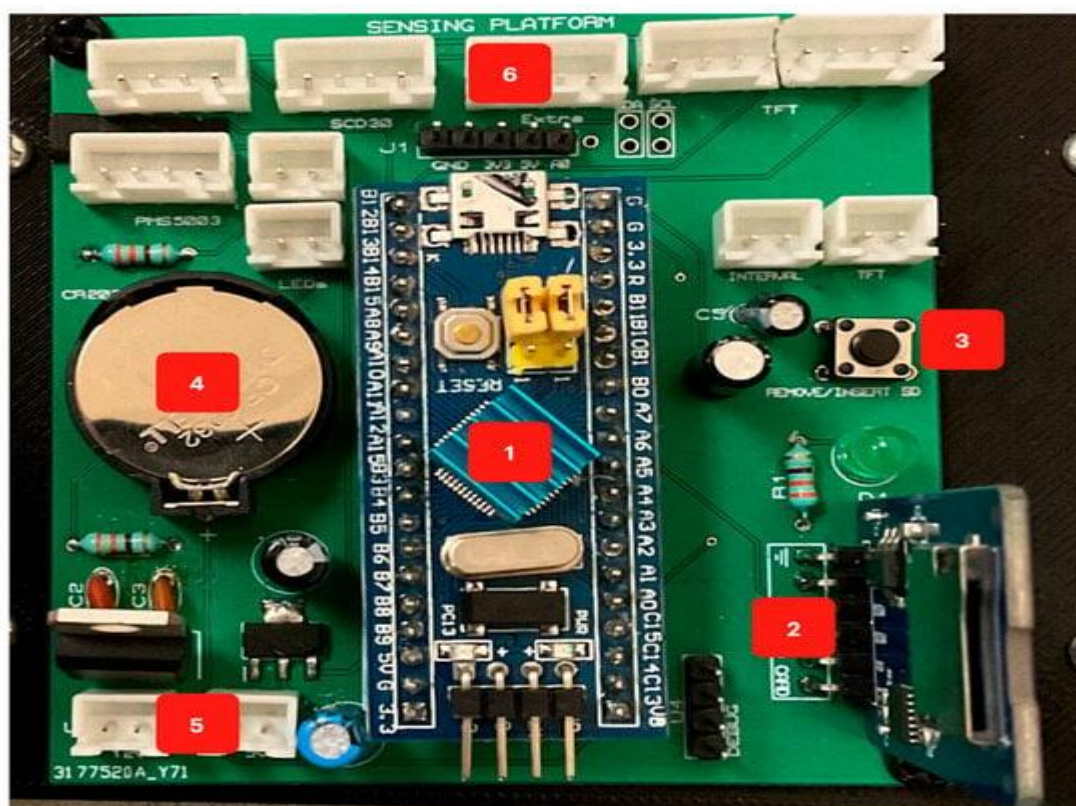


Рисунок 3.18 – Головна друкована плата





Рисунок 3.19 – Друга друкована плата

Основна плата включає:

1. Основний мікроконтролер, який керує датчиками, зберігає дані на SD-карті, контролює мітку часу, отриману від RTC, і надсилає дані, що відображаються на дисплеї.
2. Модуль SD, керований протоколом SPI.
3. Кнопка для безпечного вилучення або вставлення SD.
4. Батарея типу «таблетка» 3 В для живлення RTC, навіть коли основне джерело живлення відключено.
5. Регулятори напруги.
6. Роз'єми JST для безпечного з'єднання компонентів.

З іншого боку, друга друкована плата включає:

1. MCU, який керує дисплеєм 2,4 дюйма та керує платою WiFi.
2. Роз'єм JST для зв'язку з основною платою.
3. Плата WiFi (ESP8266), яка надсилає дані через Інтернет до ThingSpeak.
4. Заголовки для кріплення дисплея.

При оцінці вимірювань вологості на рис.3.20 показано порівняльний аналіз між запропонованим OSWS і термостатом Schneider за визначений період часу. Водночас представлено графік Бланда–Альтмана, підкреслюючи, що більшість значень знаходиться в межах встановлених меж. Ця закономірність свідчить про сприятливий рівень узгодженості між двома вимірюваннями (температурою повітря та відносною вологістю), оскільки більшість точок знаходяться між двома червоними лініями, що представляють межі узгодження, в які, як очікується, потраплять 95% відмінностей між двома вимірюваннями.

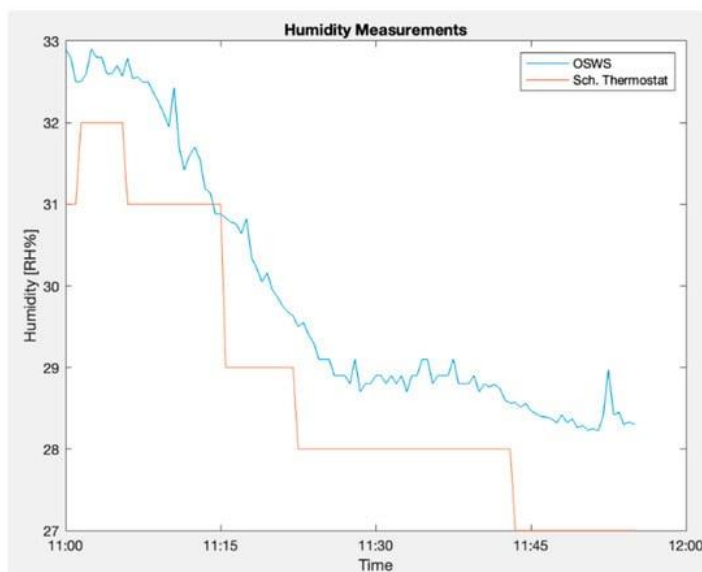


Рисунок 3.20 – OSWS і еталонний пристрій у сценарії відносної вологості в приміщенні.

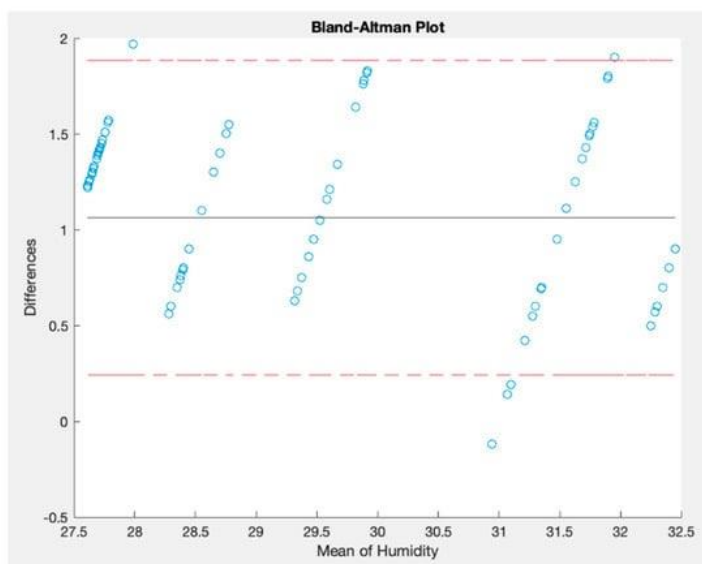


Рисунок 3.21 – Графік Бланда–Альтмана для відносної вологості, виміряної в приміщенні

Впровадження OSWS у сферу моніторингу погоди дає значний крок вперед. Крім того, можливості обміну даними та моніторингу в реальному часі відрізняють OSWS від багатьох звичайних систем. У секторах, де швидке реагування на зміну погодних умов має першочергове значення, миттєвість даних стає незамінною. Потенціал OSWS для створення об'єднаної мережі метеостанцій експоненціально посилює цю перевагу, підвищуючи доступність даних і корисність у різних регіонах.

Розроблена система моніторингу погоди дозволяє використовувати недорогі датчики для подолання проблем, пов'язаних із високими

витратами та потребою в експертному персоналі, властивому існуючим технологіям. Його здатність здійснювати моніторинг у режимі реального часу та прогнозувати ключові змінні навколишнього середовища за допомогою моделі ARIMA найкраще підходить для моніторингу сільського господарства, транспорту та якості повітря. Його природа з відкритим вихідним кодом ще більше розширює доступність даних, сприяючи прийняттю обґрунтованих рішень, необхідних у нашу нинішню епоху зміни клімату.

### 3.5 Висновки до розділу

Представлена конструкція спеціальної схеми для виділення та кондиціонування сигналу. Інструментальний підсилювач CMOS, заснований на модуляції чоппера, був створений прототип відповідно до принципів раціонального проектування з метою оптимізації ланцюга зчитування, збереження динамічного діапазону датчиків. Допоміжний ланцюг зчитування компенсує вплив зовнішніх факторів на чутливість датчика, розширюючи робочий діапазон.

Розроблено та досліджено інтерфейси зчитування для ємнісних датчиків MEMS на основі перетворення ємнісної модуляції в частотну та широтно-імпульсну, які можна використовувати для інтегрованих вологомірів, акселерометрів, гіроскопів, датчиків тиску, датчиків кутового зміщення та хімічних речовин. Вимірювання продемонстрували надзвичайно низьке енергоспоживання (<100 мкВт) і низьку температурну чутливість (<300 ppm/°C) запропонованої схеми. Можливості точності були додатково досліджені, що призвело до підвищення продуктивності за допомогою простих топологічних модифікацій.

Розроблена система моніторингу погоди дозволяє використовувати недорогі датчики для подолання проблем, пов'язаних із високими витратами та потребою в експертному персоналі, властивому існуючим технологіям. Його здатність здійснювати моніторинг у режимі реального часу та прогнозувати ключові змінні навколишнього середовища за допомогою моделі ARIMA найкраще підходить для моніторингу сільського господарства, транспорту та якості повітря. Його природа з відкритим вихідним кодом ще більше розширює доступність даних, сприяючи прийняттю обґрунтованих рішень, необхідних у нашу нинішню епоху зміни клімату.



## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

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

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

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

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

### 4.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом » можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

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

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

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	55	0	57
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	40	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>		50,7		

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

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

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПШБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	60	0	62
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	58	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>	60,0		

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

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [55]

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

де  $k_{\text{нов}}$ ,  $k_{\text{теор}}$  - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи,  $k_{\text{нов}} = 50,7$ ,  $k_{\text{теор}} = 60,0$  балів;

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

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 50,7 + 0,4 \cdot 60,00 = 54,40 \text{ балів.}$$

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

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

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

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом », даний рівень становить 54,40 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

#### 4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом », під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

##### 4.2.1 Витрати на оплату праці

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

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [55]

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

де  $k$  – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;  
 $M_{ni}$  – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, (грн.);

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

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

$$Z_o = 15150,00 \cdot 30 / 22 = 20659,09 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи з дослідження перетворювача вологості з частотним вхідним сигналом	15150,00	688,64	30	20659,09
Старший науковий співробітник	15090,00	685,91	28	19205,45
Інженер-дослідник (інженер-розробник РЕА 1-ї категорії)	14750,00	670,45	22	14750,00
Фахівець 1-ї категорії	6950,00	315,91	11	3475,00
Всього				58089,55

#### Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом» розраховуємо за формулою

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

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

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

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

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

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

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [Козловський В.О., Лесько О.Й., Кавецький В.В.];

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

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

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

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

$$Z_{pl} = 56,53 \cdot 3,85 = 217,65 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Підготовка робочого місця дослідника	3,85	2	1,10	56,53	217,65
Монтаж дослідного обладнання	8,00	5	1,70	87,37	698,93
Встановлення обчислювальних систем	4,60	4	1,50	77,09	354,61
Монтаж дослідних радіотехнічних схем	8,00	5	1,70	87,37	698,93
Обслуговування експерименту	12,00	3	1,35	69,38	832,55
Формування бази даних результатів дослідження	15,50	2	1,10	56,53	876,23
Демонтаж обладнання	7,20	3	1,35	69,38	499,53
Всього					4178,43

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

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

де  $H_{\text{доп}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{доп}} = (58089,55 + 4178,43) \cdot 11 / 100\% = 6849,48 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

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

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

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

$$Z_n = (58089,55 + 4178,43 + 6849,48) \cdot 22 / 100\% = 15205,84 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом».

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



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

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

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

$n$  – кількість видів матеріалів;

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

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

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

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

$$M_1 = 1,0 \cdot 179,00 \cdot 1,05 - 0 \cdot 0 = 187,95 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
USB-пам'ять (32 ГБ) Class 10	179,00	1,0	0	0	187,95
USB-пам'ять (64 ГБ) Class 10 A	229,00	1,0	0	0	240,45
Диск оптичний (CD-R)	22,00	3,0	0	0	69,30
Диск оптичний (CD-RW)	29,00	3,0	0	0	91,35
Картридж для принтера	1560,00	1,0	0	0	1638,00
Начиння канцелярське FX	174,00	4,0	0	0	730,80
Органайзер офісний Office	199,00	4,0	0	0	835,80
Папір для заміток ОМІС (A5)-60	114,00	4,0	0	0	478,80
Папір канцелярський офісний ОМІС (A4-500)	211,00	3,0	0	0	664,65

## Продовження таблиці 4.6 – Витрати на матеріали

Склотекстоліт СТФ 2–1.5	155,00	0,1000	0,000	0,00	16,28
Дріт монтажний	16,00	0,0100	0,000	0,00	0,17
Лак УР-231	320,00	0,0300	0,000	0,00	10,08
Припій ПОС-61	513,00	0,2500	0,000	0,00	134,66
Спирт етиловий	290,00	0,0500	0,000	0,00	15,23
Флюс БС-2	260,00	0,1000	0,000	0,00	27,30
Хлорне залізо	175,00	0,1000	0,000	0,00	18,38
Всього					5159,19

## 4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_e$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом », розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

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

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

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

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

$$K_e = 1 \cdot 482,00 \cdot 1,05 = 506,10 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Мікроконтролер ESP 32 DIVKIT3	1	482,00	506,10
Сенсор вологості	1	133,90	140,60
Транзистори			
BF928	1	22,8	23,94
BFP450	1	36,99	38,84
BFT93	1	55,5	58,28
Всього			767,75

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

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

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

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

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

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

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

$k$  – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 12340,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 12957,00 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Осцилограф Singlent	1	12340,00	12957,00
Паяльна станція ПС-280-А/8	1	1263,00	1326,15
Вольтметр цифровий	1	3220,00	3381,00
Психрометр промисловий	1	6150,00	6457,50
Всього			24121,65

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

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм,

алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

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

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

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

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

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прз}} = 6599,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 6928,95 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Пакет Visual System Simulator	1	6599,00	6928,95
Пакет MATLAB SIMULINK	1	8650,00	9082,50
Пакет Microwave Office	1	5430,00	5701,50
Всього			21712,95

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

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

$$A_{\text{обл}} = \frac{C_{\text{обл}}}{T_{\text{в}}}. \frac{t_{\text{вик}}}{12}, \quad (4.11)$$

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

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

$T_v$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (18999,00 \cdot 2) / (4 \cdot 12) = 791,63 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Персональний комп'ютер інженера-дослідника НОУТБУК ASUS VIVOBOOK GO 15 E1504FA-BQ008 (90NB0ZR1-M00400)	18999,00	4	2	791,63
Робоче місце інженера-дослідника	8220,00	5	2	274,00
Електронно-обчислювальна система на основі ПК VINGA WOLVERINE D5305 (I5M32G3060.D5305)	39799,00	4	2	1658,29
Метрологічний комплекс	11799,00	5	2	393,30
Програмне забезпечення Microsoft Co	10359,00	4	2	431,63
Лабораторія досліджень	415200,00	25	2	2768,00
Всього				6316,84

## 4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

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

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

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

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

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

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

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

$$B_e = 0,08 \cdot 240,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 144,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер інженера-дослідника НОУТБУК ASUS VIVOBOK GO 15 E1504FA-BQ008 (90NB0ZR1-M00400)	0,08	240,0	144,00
Робоче місце інженера-дослідника	0,05	240,0	90,00
Електронно-обчислювальна система на основі ПК VINGA WOLVERINE D5305 (I5M32G3060.D5305)	0,25	240,0	450,00
Метрологічний комплекс	0,12	110,0	99,00
Осцилограф Singlent	0,13	110,0	107,25
Паяльна станція ПС-280-А/8	0,10	10,0	7,50
Вольтметр цифровий	0,05	45,0	16,88
Психрометр промисловий	0,05	110,0	41,25
Всього			955,88

#### 4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом » належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

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

де  $H_{cv}$  – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», приймемо  $H_{cv} = 23\%$ .

$$B_{cv} = (58089,55 + 4178,43) \cdot 23 / 100\% = 14321,63 \text{ (грн.)}$$

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

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

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

де  $H_{cn}$  – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», приймемо  $H_{cn} = 32\%$ .

$$B_{cn} = (58089,55 + 4178,43) \cdot 32 / 100\% = 19925,75 \text{ (грн.)}$$



#### 4.2.11 Інші витрати

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

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

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

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

$$I_s = (58089,55 + 4178,43) \cdot 50 / 100\% = 31133,99 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

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

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

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

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo  $H_{нзв} = 110\%$ .

$$B_{нзв} = (58089,55 + 4178,43) \cdot 110 / 100\% = 68494,77 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом» розраховуємо

як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

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

$$B_{\text{заг}} = 58089,55 + 4178,43 + 6849,48 + 15205,84 + 5159,19 + 767,75 + 24121,65 + 21712,95 + 6316,84 + 955,88 + 14321,63 + 19925,75 + 31133,99 + 68494,77 = 277233,69 \text{ (грн.)}$$

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

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

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

$$ZB = 277233,69 / 0,9 = 308037,44 \text{ (грн.)}$$

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

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

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом » використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

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

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

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

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

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

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

$B$  – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo  $B = 308037,44$  грн;

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

Визначення показників  $I, n, T_C, R, B, t$  здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [55].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 3 \cdot 4 / 308,0 \cdot 0,17 = 14,96.$$

Якщо  $K_p > 1$ , то науково-дослідну роботу на тему «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

#### 4.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом» складають 308037,44 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи  $K_p > 1$ , що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

На початковому етапі розвитку охорони праці та забезпечення здоров'я працівників, коли виробництво було незначним і технології були нескладними, безпекові заходи проводилися безпосередньо на рівні виробництва. Роботодавці були відповідальними за забезпечення безпеки своїх працівників і вживали заходів, таких як надання захисного одягу, навчання працівників основам безпеки праці та забезпечення належних умов праці. Однак з появою нових науково-технічних досягнень, які призвели до ускладнення технологій і виробництва, цей підхід став недостатнім для вирішення вимог сучасної техносфери. Вчасне впровадження заходів безпеки на етапі проектування, конструювання і експлуатації виробів є одним із ключових принципів сучасної охорони праці. Це дозволяє усунути або зменшити до мінімуму шкідливий вплив технологічних процесів на здоров'я людини.

Предметом дослідження є перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом. На дослідника, відповідно до Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», мали вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; недостатня освітленість робочої зони [56].

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

У відповідності до визначених факторів розробляємо технічні рішення щодо безпечного виконання роботи, а також з гігієни праці та виробничої санітарії.

## 5.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи

### 5.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Оптимальне обладнання робочого місця є важливим фактором для забезпечення комфортних і безпечних умов праці, а також підвищення продуктивності праці. Воно має враховувати такі ключові аспекти:

- антропометричні вимоги. Робоче місце має бути обладнане таким чином, щоб його було зручно використовувати людям різного зросту і статури. Для цього необхідно правильно підібрати висоту столу і стільця, а також розташувати обладнання в доступній зоні;

- фізичні вимоги. Робоче місце має бути обладнане таким чином, щоб мінімізувати ризик виникнення травм і захворювань, пов'язаних з фізичним навантаженням. Для цього необхідно забезпечити достатнє освітлення, правильне освітлення, а також уникати зайвого шуму і вібрації;

- психологічні вимоги. Робоче місце має бути обладнане таким чином, щоб сприяти комфортному і продуктивному виконанню роботи. Для цього необхідно створити сприятливу атмосферу, забезпечити достатній рівень особистого простору, а також можливість відпочинку.

При плануванні та облаштування робочого місця необхідно враховувати такі ключові аспекти:

1. Розташування обладнання. Обладнання, яке входить до складу робочого місця, має бути розташоване таким чином, щоб його було зручно використовувати. При цьому необхідно забезпечити достатній робочий простір, що дозволяє виконувати всі необхідні рухи і переміщення.

2. Достатній робочий простір. Робоче місце має бути обладнане таким чином, щоб залишалася достатньо місця для маневрування. Це важливо для забезпечення безпеки праці, а також для комфортного виконання роботи.

Площа приміщення, де здійснювалося дослідження на тему «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом», становить 22,6 м<sup>2</sup>, а висота стелі складає 3,3 метра. В цьому приміщенні розміщено 3 робочі місця з комп'ютерами. Площа приміщення, що припадає на кожного працівника, становить 7,5 м<sup>2</sup>, а об'єм повітря в робочій зоні – 20,9 м<sup>3</sup>. Знайдені значення відповідають встановленим вимогам, оскільки площа одного робочого місця для працівника, що використовує комп'ютер, не повинна бути меншою за 6 м<sup>2</sup>, а об'єм – не менший за 20 м<sup>3</sup>, відповідно до НПАОП 0.00-7.15-18 [57]. Кожне робоче місце обладнане

робочим столом площею 1,3 м<sup>2</sup>, стільцем і персональним комп'ютером, який включає в себе монітор, системний блок, клавіатуру та мишу.

Раціональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і сталість розміщення інструментів і пристосувань, документації, деталей як у процесі роботи, так і при їх зберіганні і забезпечувати зручну робочу позу, виконання трудових процесів з максимальною економією рухів робітника, а також повну безпеку праці. Важливою вимогою є правильне використання відведеної для робочого місця виробничої площі. На робочому місці фіксуються оперативне і допоміжне робочі простору. В оперативному просторі розміщується необхідне обладнання, у допоміжному – рідше використовувані засоби і предмети праці. Оперативний простір може підрозділятися на робочі зони різної значимості.

### 5.1.2 Електробезпека приміщення

Приміщення, де здійснювалося дослідження перетворювачів вологості з частотним вихідним сигналом, належать до приміщень без підвищеної небезпеки. Для забезпечення електробезпеки та пожежної безпеки в приміщеннях, де використовуються ПК, обладнання, проводи та кабелі, необхідно, щоб ці об'єкти відповідали вимогам безпеки та були захищені від короткого замикання. Вимоги з електробезпеки та пожежної безпеки для приміщень, де використовуються ПК, полягають у тому, що:

- ПК та обладнання повинні бути виготовлені з негорючих матеріалів, мати відповідні ізоляцію та опірність струму, а також бути сертифіковані відповідно до чинних нормативних документів;

- у приміщенні повинні бути встановлені пристрої захисту від короткого замикання. Ці пристрої запобігають виникненню пожежі внаслідок перевантаження електричної мережі.

Лінії електричної мережі ПК у приміщенні реалізовані як окрема групова трипровідна мережа, використовуючи фазовий, нульовий робочий та нульовий захисний провідники. При цьому площа перерізу нульового робочого та нульового захисного провідників повинна бути не меншою за площу перерізу фазового провідника. Напруга в цій мережі складає 380 x 220 В (фазна напруга (фаза - "нуль") - 220 В, а міжфазна лінійна (фаза - фаза) - 380 В). Категорія умов з приводу небезпеки електротравматизму вважається без підвищеної небезпеки.

В досліджуваному приміщенні мережі для підключення ПК мають

електричні з'єднання та розетки, які забезпечують захист від ураження електричним струмом. Це досягається за рахунок того, що нульовий захисний провідник підключається до розетки перед фазовим і нульовим робочим провідниками. При відключенні мережі порядок дій повинен бути зворотним. Мережі штепсельних з'єднань та електричних розеток виконані за типовою схемою, по 3-6 в одному ланцюжку. Оскільки вони розташовані вздовж стін, проводи прокладені по підлозі в металевих трубах і гнучких металевих каналах. Металеві трубки і гнучкі металеві канали заземлені для захисту від ураження електричним струмом у разі пробою ізоляції проводів.

Для забезпечення безпеки від електротравм в приміщенні вживаються наступні заходи:

1. Заземлення електроустановок, що передбачає відведення надлишкового електричного струму в землю, запобігаючи перенапрузі та можливим електротравмам.

2. Використання захисних пристроїв (автоматичні вимикачі та розетки з реле напруги (RCD)), які реагують на надлишковий струм або замикання і відключають електроустановку для захисту від електротравм та пожеж.

3. Систематичне обслуговування електрообладнання (правильне підключення та розміщення кабелів та приладів, регулярна перевірка наявності пошкоджень) та заміну старого обладнання.

4. Безпечна організація робочого простору, зокрема відведення електричних кабелів та проводів від місця знаходження персоналу, щоб уникнути їх потрапляння під ноги.

5. Правильна експлуатація електричних приладів, що передбачає уникання перевантаження розеток, неправильного вставлення штекерів та відключення невикористаних приладів від електромережі.

6. Періодичне навчання персоналу вимогам безпеки, щоб працівники усвідомлювали ризики та мали знання про заходи для уникнення електротравм та нещасних випадків.

## 5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 5.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат виробничих приміщень – це сукупність фізичних факторів виробничого середовища (температура, вологість, швидкість руху



повітря, температура поверхонь та інтенсивність опромінення), що впливають на тепловий обмін працюючих. Нормування мікроклімату виробничих приміщень здійснюється в залежності від теплових характеристик виробничого приміщення, категорії робіт по важкості і періоду року.

Мікроклімат виробничих приміщень впливає на організм людини через теплообмін. При несприятливих умовах мікроклімату (надмірна температура, вологість, швидкість руху повітря, температура поверхонь тощо) може виникнути тепловий дискомфорт, який може призвести до перегрівання або переохолодження організму, зниження працездатності, порушення здоров'я та ускладнення перебігу захворювань. Забезпечення норм мікроклімату є важливим фактором охорони праці, оскільки дозволяє створити безпечні умови праці та знизити ризик виникнення нещасних випадків і професійних захворювань.

Проведення дослідження відноситься до категорії робіт Ia. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл. 5.1 [58]

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

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

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату здійснюється організована вентиляція приміщення, регулювання опалення та кондиціонування повітря.

### 5.2.2 Склад повітря робочої зони

Чисте повітря в робочій зоні – це не лише комфортність умова, а й важливий фактор здоров'я та продуктивності працівників. Воно допомагає зменшити ризик розвитку проблем зі здоров'ям, пов'язаних з роботою, таких як астма, алергія та респіраторні захворювання. Чисте повітря також сприяє кращому самопочуттю працівників, підвищує їхню концентрацію та працездатність.

В приміщенні, де проводилося дослідження, може спостерігатися

збільшена концентрація пилу та озону. Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин, які присутні в даному приміщенні, перелічені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

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

Для забезпечення чистоти повітря робочої зони застосовується механічна вентиляція, яка видаляє забруднене повітря та подає свіже. Крім того, необхідно регулярно прибирати та провітрювати приміщення, щоб видалити пил, бруд та інші забруднювачі.

### 5.2.3 Виробниче освітлення

Виробниче освітлення – це важливий фактор безпеки, продуктивності та комфорту працівників. Воно впливає на такі показники, як:

1. Безпека праці. Достатнє освітлення допомагає працівникам бачити небезпечні зони та перешкоди, що може допомогти запобігти нещасним випадкам. Натомість, недостатня освітленість може призвести до падінь, травмування рук та очей, а також до помилок під час роботи з обладнанням.

2. Продуктивність праці. Достатнє освітлення сприяє кращій концентрації працівників, підвищує їхню працездатність та зменшує стомлюваність.

Виробниче освітлення може бути природним або штучним. Природне освітлення створюється сонячним світлом, яке проникає через вікна або світлові люки. Воно є найкращим типом освітлення, м'яким і комфортним для очей. Коли природне освітлення є недостатнім або неможливим, необхідно використовувати штучне освітлення. Штучне освітлення створюється за допомогою штучних джерел світла, таких як люмінесцентні лампи, світлодіодні лампи тощо. Воно може бути різним за типом джерела

світла, характером світлового потоку та способом розміщення світильників. Для забезпечення безпечних і комфортних умов праці необхідно правильно підібрати тип штучного освітлення та забезпечити його правильну організацію.

Норми освітленості для штучного освітлення та КПО при природному та комбінованому освітленні, відповідно до умов виконання роботи наведені у таблиці 5.4 [59].

Таблиця 5.4 - Норми освітленості в приміщенні

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

Заходи, що передбачені для забезпечення відповідного освітлення, включають: встановлення достатньої кількості освітлювальних приладів, використання підсвічування, розміщення джерел світла на оптимальній висоті та регулярне обслуговування освітлювальної системи.

#### 5.2.4 Виробничий шум

У процесі виконання дослідження на робочому місці можлива поява шуму, який походить від різних джерел, зокрема таких як системні блоки, принтери, сканери, обладнання для кондиціонування повітря, вентилятори систем охолодження та трансформатори. Нормативні вимоги щодо шуму,

ультразвуку та інфразвуку на робочому місці описані в ДСанПіН 3.3.6.037-99. За умови виконання роботи (характер робіт і характер шуму), допустимі рівні звукового тиску повинні відповідати гігієнічним стандартам, і рівні звуку  $L_A$  не повинні перевищувати 50 дБА, що можна знайти в таблиці 5.5 [60].

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні звукового тиску та звуку

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

Для забезпечення прийнятних рівнів шуму (поліпшення шумового середовища) в приміщенні передбачено дотримання правил виробничої поведінки. Рівень шуму в приміщенні відповідає нормативним вимогам.

#### 5.2.5 Виробничі випромінювання

Електромагнітне випромінювання може впливати на здоров'я людини по-різному, залежно від його частоти та інтенсивності. Інтенсивне випромінювання може викликати онкозахворювання, а слабке – головний біль, запаморочення та проблеми зі сном. Виконання дослідження здійснювалося за допомогою ПК, тому на робочому місці можливе підвищення рівня електромагнітного випромінювання.

Гранично допустимі значення напруженості електричного та магнітного полів промислової частоти, при врахуванні тривалості їх впливу, регулюються відповідно до Санітарних правил і нормативів (СанПіН) 2.2.4.1191-03 [64]. Для електромагнітних полів промислової частоти (50-60 Гц) допустима напруженість поля становить 5 кВ/м. Для радіочастотних полів (від 30 Гц до 300 ГГц) допустимі рівні становлять 25 В/м для електричного поля та 250 нТл для магнітного поля.

Для зменшення впливу електромагнітного випромінювання на розробника слід дотримуватися раціонального режиму роботи та відпочинку. Це означає, що розробник повинен робити регулярні перерви в

роботі, виходити на свіже повітря, займатися спортом та дотримуватися здорового способу життя. Регулярні перерви в роботі допоможуть зменшити загальну тривалість впливу електромагнітного випромінювання. Заняття спортом допоможуть зміцнити загальний стан здоров'я та підвищити імунітет. Здоровий спосіб життя допоможе зменшити ризик розвитку захворювань, пов'язаних з впливом електромагнітних випромінювань.

#### 5.2.6. Психофізіологічні фактори

Важливою складовою частиною системи охорони праці є створення таких умов праці, за яких зберігаються високі психофізіологічні можливості людини в процесі трудової діяльності. Психофізіологічні чинники, що впливають на працівника під час виконання дослідження, визначаються відповідно до Гігієнічної класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу.

Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження:

Зміст роботи – рішення складних завдань з вибором за алгоритмом;

Сприймання інформації та їх оцінка – сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій;

Розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, контроль, перевірка завдання.

Сенсорні навантаження:

Зосередження (%за зміну) – до 50%;

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

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

Навантаження на голосовий апарат ( протягом тижня) – від 20 до 25%.

Емоційне навантаження:

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

Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – виключений.

Режим праці:

Тривалість робочого дня – 8 год;

Змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

Відтак, за показниками напруженості праці проведене дослідження належить до допустимого класу (напруженість праці середнього ступеня).

5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи в умовах дії загрозливих факторів надзвичайних ситуацій

### 5.3.1 Дія повені на виробничі приміщення

Повінь – це тимчасове заповнення частини суші водою в результаті інтенсивного танення снігів, сильних злив, забруднення русел рік під час льодоходу, утворення приливної хвилі, зсувів і обвалів гірських порід, раптового прориву дамб та гребель.

Критерієм стійкості виробничих приміщень в умовах дії повені є фактична швидкість потоку затоплення та глибина затоплення, в залежності від яких можна визначити ступінь руйнування споруд [66].

Уражаюча дія хвилі затоплення визначається її швидкістю і висотою. Наприклад, цегельні житлові будинки одержують:

- слабкі руйнування при  $V_{\phi} = 1,5$  м/с,  $h_3 = 2,5$  м;
- середні руйнування при  $V_{\phi} = 2,5$  м/с,  $h_3 = 4$  м;
- сильні руйнування при  $V_{\phi} = 3$  м/с,  $h_3 = 6$  м.

5.3.2 Оцінка стійкості роботи виробничого приміщення в умовах дії повені

Вихідні дані:  $V_{3B} = 0,6$  м/с,  $h_{3B} = 1,5$  м,  $h = 4$  м,  $h_M = 1$  м,  $\alpha = 25^\circ$ .

Визначаємо максимальну швидкість потоку при повені

$$V_{\max} = V_{3B} \sqrt[3]{\left(\frac{h_{3B} + h}{h_{3B}}\right)^2} \quad [\text{м/с}]; \quad (5.1)$$

$$V_{\max} = 0,6 \sqrt[3]{\left(\frac{1,5+4}{1,5}\right)^2} = 1,4267 \text{ (м/с)}.$$

Знаходимо ширину затопленої території

$$L = \frac{h}{\sin \alpha} \quad [\text{м}]; \quad (5.2)$$

$$L = \frac{4}{\sin 25^\circ} = 9,702 \text{ ( м)}$$

Визначимо глибину затоплення

$$h_{зам} = h - h_M \text{ [м].} \quad (5.3)$$

$$h_{зам} = 4 - 1 = 3 \text{ ( м)}.$$

Знайдемо фактичну швидкість потоку затоплення

$$V_3 = V_{max} f \text{ [м/с];} \quad (5.4)$$

$$V_3 = 1,4267 \cdot 1,2 = 1,712 \text{ (м/с),}$$

де  $f = 0,3 \dots 1,3 = 1,2$  – параметр, що враховує зміщення об'єкта від русла річки.

Оскільки  $V_3 = 1,712$  м/с і  $h_{зам} = 3$  м, то виробниче приміщення отримає слабкі руйнування від повені.

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

Основний напрям боротьби з повенями в зменшенні максимальних витрат води в річці завдяки перерозподілу стоку в часі (насадження лісозахисних смуг, оранка ґрунту поперек схилу, збереження узбережних смуг рослинності, терасування схилів тощо). Для середніх та великих річок досить дійовим засобом є регулювання паводкового стоку за допомогою водосховищ. Окрім того, для захисту від повеней широко застосовується давно відомий спосіб – влаштування дамб. Для ліквідації небезпеки утворення заторів проводиться розчищення та заглиблення окремих ділянок русла ріки, а також руйнування криги вибухами за 10-15 днів до початку льодоходу.

Сигнал про очікувану повінь передається з деяким випередженням для того, щоб населення покинуло своєчасно загрозований район і вийшло за межу осередку повені.

Люди, матеріальні цінності, складські приміщення, техніка та інше зостануться не ураженими тільки в тому випадку, коли будуть знаходитись вище максимально можливого рівня підйому води, очікуваного на даній території. В інших випадках прийдеться ризикувати і приймати міри по

евакуації людей, тварин, техніки, майна тощо.

#### 5.4 Висновки до розділу

Було досліджено стійкість роботи в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій. Із дослідження впливу повені на стійкість роботи виробничого приміщення можна сказати, що виробниче приміщення отримає слабкі руйнування від повені. Тому розроблено превентивні заходи з підвищення безпеки роботи в умовах дії надзвичайних ситуацій.



## ВИСНОВКИ

У першому розділі було розглянуто різноманітні матеріали, технології виготовлення та сенсорні механізми, які використовувалися для гнучких датчиків відносної вологості, щоб продемонструвати сучасний рівень техніки та надати критичний огляд їх ефективності разом із обговоренням. Про можливі сфери застосування сенсорів вологості. Грунтуючись на останніх тенденціях розвитку, показано, що гнучкі датчики вологості продовжуватимуть привертати увагу, оскільки вони виявилися корисними для багатьох застосувань, у яких сенсорний елемент потрібно згинати, розтягувати чи згинати, як у носимих додатках, або потрібно відповідати попередньо налаштованій поверхні, які водночас можуть перебувати в екстремальних середовищах. Хоча на ринку в даний час домінують датчики вологості, які засновані в основному на ємнісних і резистивних принципах сприйняття, розробки оптичних і п'єзоелектричних датчиків також є перспективними завдяки їхнім унікальним перевагам у стійкості до перешкод і роботі з автономним живленням. Завдяки подальшим розробкам чутливих до вологості функціональних чорнил, матеріалів підкладки та технологічних процесів стануть можливими недорогі та повсюдні гнучкі датчики вологості з чудовою чутливістю та радіусом дії, які також, як очікується, призведуть до нових додатків IoT та IoHT.

У другому розділі було розроблено математичну модель перетворювача для вимірювання відносної вологості з вологочутливим ємнісним елементом. Проведено моделювання в середовищі Maple, яке довело адекватність розробленої математичної моделі. Дослідження показали, що на виході вимірювального генератора існують коливання, вихідна частота яких змінюється із зміною ємності чутливого до вологи елемента. Так, при значеннях  $C_W(W) = 305$  пФ частота  $F = 64,53$  МГц, а при значеннях  $C_W(W) = 354$  пФ частота складала  $F = 58,834$  МГц, при напрузі живлення перетворювача 5 В.

Проведено комп'ютерне моделювання перетворювача вологості з частотним виходом в середовищі моделювання LTSpice. Комп'ютерне моделювання проводились в діапазоні зміни ємності від 300 пФ до 360 пФ, такі дослідження відповідали збільшенню відносної вологості від 15 % до 99 %. За результатами моделювання встановлено, що при збільшенні ємності чутливого до вологи елемента від 300 пФ ( $W = 15$  %) до 360 пФ ( $W$

= 99 %) вихідна частота перетворювача зменшується від 63,356 МГц до 57,982 МГц.

Результати експериментальних та теоретичних досліджень довели, що на виході перетворювача вологості з частотним вихідним сигналом існують коливання, частота яких зменшується із збільшенням відносної вологості. Отримані експериментальні та теоретичні характеристики мають досить гарний збіг і відносна похибка лежить в межах 1,25 %.

У третьому розділі було розроблено та досліджено інтерфейси зчитування для ємнісних датчиків MEMS на основі перетворення ємнісної модуляції в частотну та широтно-імпульсну, які можна використовувати для інтегрованих вологомірів, акселерометрів, гіроскопів, датчиків тиску, датчиків кутового зміщення та хімічних речовин. Вимірювання продемонстрували надзвичайно низьке енергоспоживання (<100 мкВт) і низьку температурну чутливість (<300 ppm/°C) запропонованої схеми. Можливості точності були додатково досліджені, що призвело до підвищення продуктивності за допомогою простих топологічних модифікацій.

Розроблена система моніторингу погоди дозволяє використовуючи недорогі датчики для подолання проблем, пов'язаних із високими витратами та потребою в експертному персоналі, властивому існуючим технологіям. Його здатність здійснювати моніторинг у режимі реального часу та прогнозувати ключові змінні навколишнього середовища за допомогою моделі ARIMA найкраще підходить для моніторингу сільського господарства, транспорту та якості повітря. Його природа з відкритим вихідним кодом ще більше розширює доступність даних, сприяючи прийняттю обґрунтованих рішень, необхідних у нашу нинішню епоху зміни клімату.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Tai, H.; Duan, Z.; Wang, Y.; Wang, S.; Jiang, Y. Paper-Based Sensors for Gas, Humidity, and Strain Detections: A Review. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2020, 12, 31037–31053.
2. Oxide/Au Nanoparticles with High Performance. *Compos. Sci. Technol.* 2018, 168, 118–125.
3. Park, H.; Lee, S.; Jeong, S. H.; Jung, U. H.; Park, K.; Lee, M. G.; Kim, S.; Lee, J. Enhanced Moisture-Reactive Hydrophilic-PTFE- Based Flexible Humidity Sensor for Real-Time Monitoring. *Sensors (Switzerland)* 2018, 18, 921.
4. Ma, L.; Wu, R.; Patil, A.; Zhu, S.; Meng, Z.; Meng, H.; Hou, C.; Zhang, Y.; Liu, Q.; Yu, R.; Wang, J.; Lin, N.; Liu, X. Y. Full-Textile Wireless Flexible Humidity Sensor for Human Physiological Monitoring. *Adv. Funct. Mater.* 2019, 29, 1904549.
5. Nanotube Array-Based Wearable Sensors for Noninvasive Detection of Human Skin Moisture. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2020, 12, 17029–17038.
6. Turkani, V. S.; Maddipatla, D.; Narakathu, B. B.; Saeed, T. S.; Obare, S. O.; Bazuin, B. J.; Atashbar, M. Z. A Highly Sensitive Printed Humidity Sensor Based on a Functionalized MWCNT/HEC Composite for Flexible Electronics Application. *Nanoscale Adv.* 2019, 1, 2311–2322.
7. Zhou, C.; Zhang, X.; Tang, N.; Fang, Y.; Zhang, H.; Duan, X. Rapid Response Flexible Humidity Sensor for Respiration Monitoring Using Nano-Confined Strategy. *Nanotechnology* 2020, 31, 125302.
8. Duan, Z. H.; Zhao, Q. N.; Li, C. Z.; Wang, S.; Jiang, Y. D.; Zhang, Y. J.; Liu, B. H.; Tai, H. L. Enhanced positive humidity sensitive behavior of p-reduced graphene oxide decorated with n-WS<sub>2</sub> nanoparticles. *Rare Met.* 2020, DOI: 10.1007/s12598-020-01524-z.
9. Pang, J.; Le, X.; Xie, J. A Piezoelectric Resonant Humidity Sensor with Enhanced Sensitivity Based on High Mode Driven by
10. Interdigital Transducers Coated with Uniform Graphene Oxide Film. 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS EUROSENSORS XXXIII), 2019; pp 1957–1960.
11. Yu, B.; Fu, Y.; Wang, P.; Zhao, Y.; Xing, L.; Xue, X. Enhanced Piezo-Humidity Sensing of a Cd-ZnO Nanowire Nanogenerator as a Self-Powered/Active Gas Sensor by Coupling the Piezoelectric Screening Effect and

- Dopant Displacement Mechanism. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2015, 17, 10856–10860.
12. Xuan, W.; He, X.; Chen, J.; Wang, W.; Wang, X.; Xu, Y.; Xu, Z.; Fu, Y. Q.; Luo, J. K. High Sensitivity Flexible Lamb-Wave Humidity Sensors with a Graphene Oxide Sensing Layer. *Nanoscale* 2015, 7, 7430–7436.
  13. Gu, L.; Zhou, D.; Cao, J. C. Piezoelectric Active Humidity Sensors Based on Lead-Free NaNbO<sub>3</sub> Piezoelectric Nanofibers. *Sensors* 2016, 16, 833.
  14. Rimeika, R.; Sereika, A.; Čiplys, D. Acoustoelectric Effects in Reflection of Leaky Acoustic Waves from LiTaO<sub>3</sub> Crystal Surface Coated with Metal Film. *Appl. Phys. Lett.* 2011, 98, 052909.
  15. Luo, J.; He, X.; Zhou, J.; Wang, W.; Xuan, W.; Chen, J.; Jin, H.; Xu, Y.; Dong, S. Flexible and Transparent Surface Acoustic Wave Microsensors and Microfluidics. *Procedia Eng.* 2015, 120, 717–720.
  16. Ascorbe, J.; Corres, J. M.; Arregui, F. J.; Matias, I. R. Recent Developments in Fiber Optics Humidity Sensors. *Sensors* 2017, 17, 893.
  17. Chen, M.; Xue, S.; Liu, L.; Li, Z.; Wang, H.; Tan, C.; Yang, J.; Hu, X.; Jiang, X. F.; Cheng, Y.; Wang, H.; Xing, X.; He, S. A Highly Stable Optical Humidity Sensors Based on Nano-Composite Film. *Sens. Actuators, B* 2019, 287, 329–337.
  18. Vijayan, A.; Fuke, M.; Hawaldar, R.; Kulkarni, M.; Amalnerkar, D.; Aiyer, R. C. Optical Fibre Based Humidity Sensor Using Co- Polyaniline Clad. *Sens. Actuators, B* 2008, 129, 106–112.
  19. Zhang, M.; Wang, M.; Zhang, M.; Qiu, L.; Liu, Y.; Zhang, W.; Zhang, Y.; Hu, J.; Wu, G. Flexible and Highly Sensitive Humidity Sensor Based on Sandwich-Like Ag/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanowires Composite for Multiple Dynamic Monitoring. *Nanomaterials* 2019, 9, 1399.
  20. Kim, H.; Park, S.; Park, Y.; Choi, D.; Yoo, B.; Lee, C. S. Fabrication of a Semi-Transparent Flexible Humidity Sensor Using Kinetically Sprayed Cupric Oxide Film. *Sens. Actuators, B* 2018, 274, 331–337.
  21. Yuan, Y.; Peng, B.; Chi, H.; Li, C.; Liu, R.; Liu, X. Layer-by-Layer Inkjet Printing SPS:PEDOT NP/RGO Composite Film for Flexible Humidity Sensors. *RSC Adv.* 2016, 6, 113298–113306.
  22. Hassan, G.; Sajid, M.; Choi, C. Highly Sensitive and Full Range Detectable Humidity Sensor Using PEDOT:PSS, Methyl Red and Graphene Oxide Materials. *Sci. Rep.* 2019, 9, 15227.
  23. Peng, X.; Chu, J.; Aldalbahi, A.; Rivera, M.; Wang, L.; Duan, S.; Feng, P. A Flexible Humidity Sensor Based on KC–MWCNTs Composites. *Appl. Surf.*

Sci. 2016, 387, 149–154.

24. Razza, N.; Blanchet, B.; Lamberti, A.; Pirri, F. C.; Tulliani, J.M.; Bozano, L. D.; Sangermano, M. UV-Printable and Flexible Humidity Sensors Based on Conducting/Insulating Semi-Inter-penetrated Polymer Networks. *Macromol. Mater. Eng.* 2017, 302, 1700161.

25. Syrový, T.; Kuberský, P.; Sapurina, I.; Pretl, S.; Bober, P.; Syrová, L.; Hamáčěk, A.; Stejskal, J. Gravure-Printed Ammonia Sensor Based on Organic Polyaniline Colloids. *Sens. Actuators, B* 2016, 225, 510–516.

26. Jeong, W.; Song, J.; Bae, J.; Nandanapalli, K. R.; Lee, S. Breathable Nanomesh Humidity Sensor for Real-Time Skin Humidity Monitoring. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019, 11, 44758–44763.

27. Zhao, Q.; Yuan, Z.; Duan, Z.; Jiang, Y.; Li, X.; Li, Z.; Tai, H. An Ingenious Strategy for Improving Humidity Sensing Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes via Poly-L-Lysine Modification. *Sens. Actuators, B* 2019, 289, 182–185.

28. Tételin, A.; Pellet, C.; Laville, C.; N’Kaoua, G. Fast response humidity sensors for a medical microsystem. *Sensors Actuators B Chem.* 2003, 91, 211–218.

29. Chen, Z.; Lu, C. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sens. Lett.* 2005, 3, 274–295.

30. Lee, C.W.; Lee, S.J.; Kim, M.; Kyung, Y.; Eom, K. Capacitive Humidity Sensor Tag Smart Refrigerator System using the Capacitive to Voltage Converter (CVC). *Int. J. Adv. Sci. Technol.* 2011, 36, 15–26.

31. Kolpakov, S.A.; Gordon, N.T.; Mou, C.; Zhou, K. Toward a new generation of photonic humidity sensors. *Sensors* 2014, 14, 3986–4013.

32. Farahani, H.; Wagiran, R.; Hamidon, M.N. Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: A comprehensive review. *Sensors* 2014, 14, 7881–7939.

33. Pavinatto, F.J.; Paschoal, C.W.A.; Arias, A.C. Printed and flexible biosensor for antioxidants using interdigitated ink-jetted electrodes and gravure-deposited active layer. *Biosens. Bioelectron.* 2015, 67, 553–559.

34. Imam, S.A.; Choudhary, A.; Sachan, V.K. Design issues for wireless sensor networks and smart humidity sensors for precision agriculture: A review. In *Proceedings of the 2015 International Conference on Soft Computing Techniques and Implementations (ICSCTI)*, Faridabad, India, 8–10 October 2015; pp. 181–187.

35. Chandana, L.S.; Sekhar, A.J.R. Weather Monitoring Using Wireless Sensor

Networks based on IOT. *Int. J. Sci. Res. Sci. Technol.* 2018, 4, 525–531.

36. Yawut, C.; Kilaso, S. A Wireless Sensor Network for Weather and Disaster Alarm Systems. *Int. Conf. Inf. Electron. Eng.* 2011, 6, 155–159.

37. Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nanoporous Polymer Membranes // Appeared in *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006. Vol. 114. № 1. P. 254–262.

38. Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review // *Sensors*. 2014. № 14. P. 7881–7939.

39. 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*. 2016. № 16. P. 1135.

40. Zhi, Chen, Chi Lu. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*. 2005. Vol. 3. P. 274–295.

41. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Крилик Л.В. Сенсори вологості : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2003. 208 с.

42. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. Винница : «Универсум-Винница», 1999. 275 с.

43. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors // *Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2019. 111761I.

44. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov. Optical transducers with frequency output // *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, 2017, 104451X.

45. Osadchuk A., Osadchuk V., Seletska O., L. Krylik L. Microelectronic Transducer of Gas Concentration based on MOSFET with an Active Inductive Element. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, R. 95. Warszawa, Poland. 2019. NR 4. P. 237 – 241.

45. Осадчук О.В., Крилик Л.В., Селецька О.О. Математична модель мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2019. № 5 (277). С. 195–198.

46. Осадчук О.В., Крилик Л.В., Осадчук Я.О. Математична модель параметричного перетворювача вологості з частотним виходом // Прикладні питання математичного моделювання. Т.3. №2.1. 2020. С.206–215.
47. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Звягін О.С. Проблеми вимірювання вологості нафтопродуктів та метод підвищення його точності // Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління. 2010. № 1 (27). С. 135–139.
48. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Крилик Л.В., Селецька О.О., Мартинюк В.В. Мікроелектронний перетворювач «вологість-частота» з ємнісними елементами на основі вологочутливих пористих шарів // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2018. № 1 (257). С. 83–87.
49. Осадчук О.В., Звягін О.С., Савицький А.Ю., Барабан С.В., Селецька О.О. The radiomeasuring humidity sensor with the frequency output signal // Вісник Хмельницького національного університету. 2016. № 6. С. 216–218.
50. Осадчук В.С. Осадчук О.В., Звягін О.С. Частотні перетворювачі для контролю вологості нафтопродуктів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2014. 152 с.
51. Effects|Facts—Climate Change: Vital Signs of the Planet. Available online: <https://climate.nasa.gov/effects/> (accessed on 2 October 2023).
52. United Nations. What Is Climate Change? Available online: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change> (accessed on 2 October 2023).
53. Lai, C. How Does Deforestation Affect the Carbon Cycle? Earth.Org. Available online: <https://earth.org/how-does-deforestation-affect-the-carbon-cycle/> (accessed on 2 October 2023).
54. Kulkarni, M.A.; Duguay, C.; Ost, K. Charting the Evidence for Climate Change Impacts on the Global Spread of Malaria and Dengue and Adaptive Responses: A Scoping Review of Reviews. *Glob. Health* 2022, 18, 1.
55. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
56. ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення». [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3074958732556240833?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2)
57. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затверджених

наказом Міністерства охорони здоров'я України від 08 квітня 2014 року № 248.

58. ДСан ПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ. Режим доступу: <http://document.ua/derz-nor4881.html>

59. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

60. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Режим доступу до сторінки: [http://hrliga.com/index.php?module=norm\\_base&op=view&id=819](http://hrliga.com/index.php?module=norm_base&op=view&id=819)

61. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>.

62. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=71028](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028).

63. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=88004](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004).

64. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=77160](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77160)

65. НПАОП 40.1-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

66. Сакевич В. Ф. Основи розробки питань цивільної оборони в дипломних проектах / В. Ф. Сакевич. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 109 с.



Додаток А  
(обов'язковий)

## ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

### ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХІДНИМ СИГНАЛОМ

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

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Вараниця С.А.

(прізвище та ініціали)

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

 Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«15» 12 2023 р.

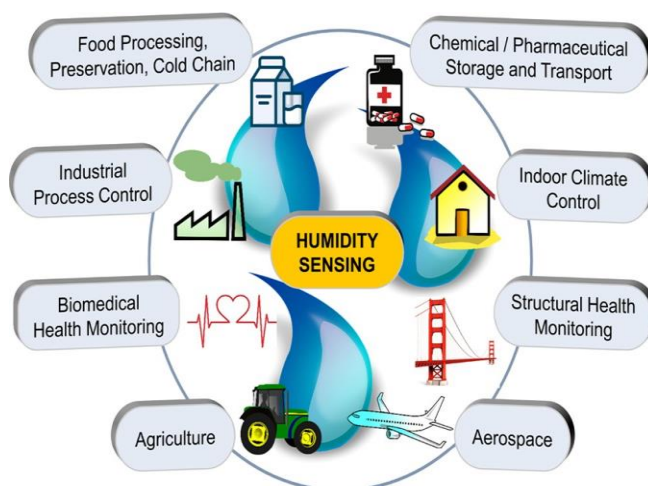


Рисунок 1 – Різні парадигми застосування датчиків вологості

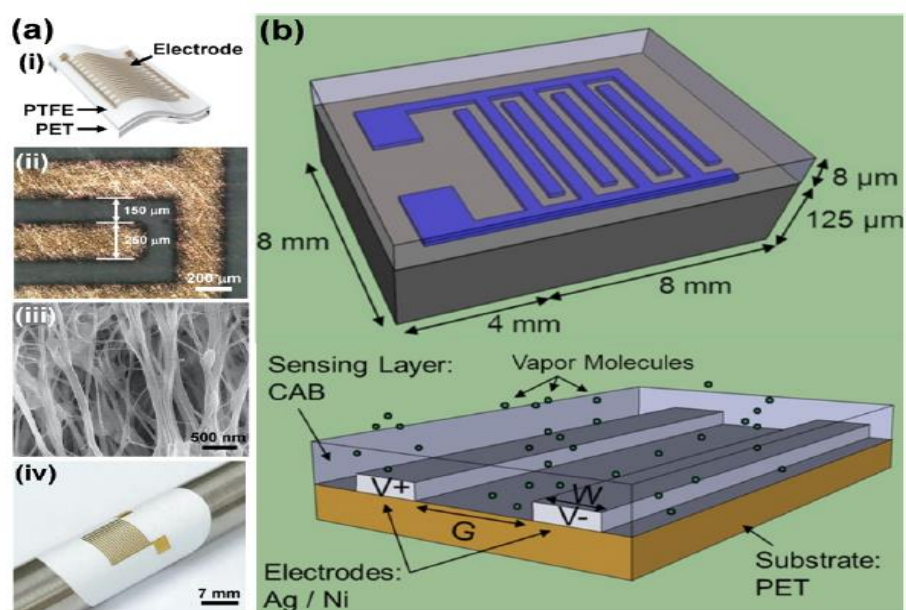


Рисунок 2 – Ємнісні датчики вологості

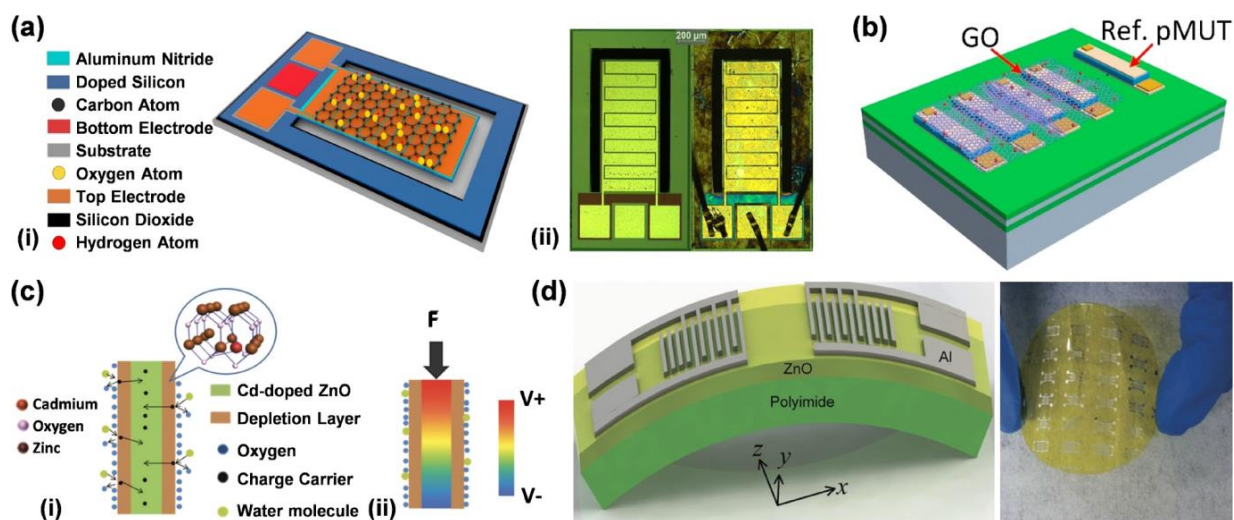


Рисунок 3 – Резонансні датчики вологості

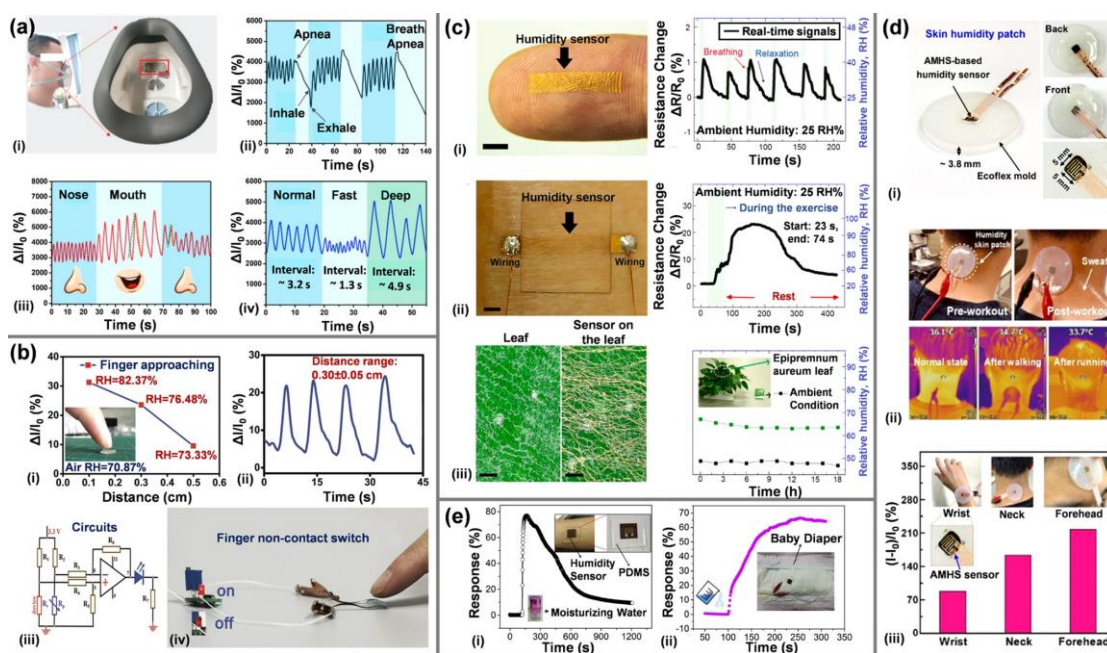


Рисунок 4 – Застосування плівкових сенсорів

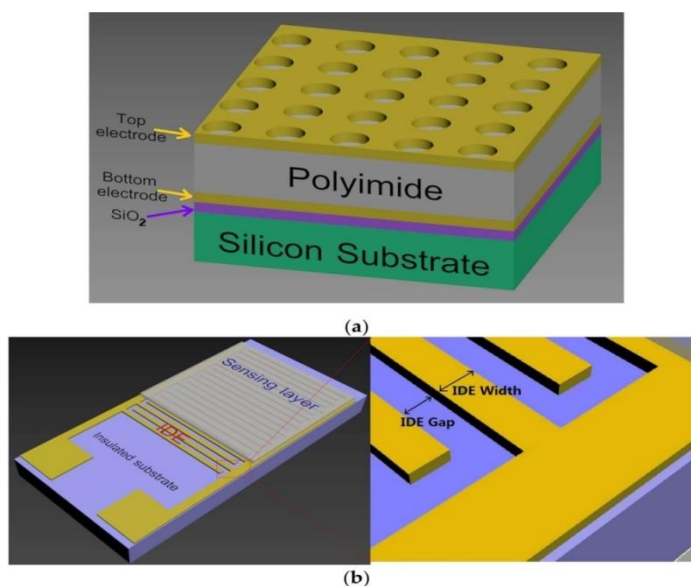


Рисунок 5 – Структурна схема датчиків з паралельними пластинами (PP) і міжпальцевими електродами (IDE). (a) PP датчики, що складаються з твердої підкладки, двох шарів паралельного пластинчастого електрода та чутливого матеріалу між ними. (b) Датчики IDE, що складаються з інертної підкладки, IDE та шару чутливого матеріалу поверх IDE. Праворуч показано частково збільшену деталь IDE

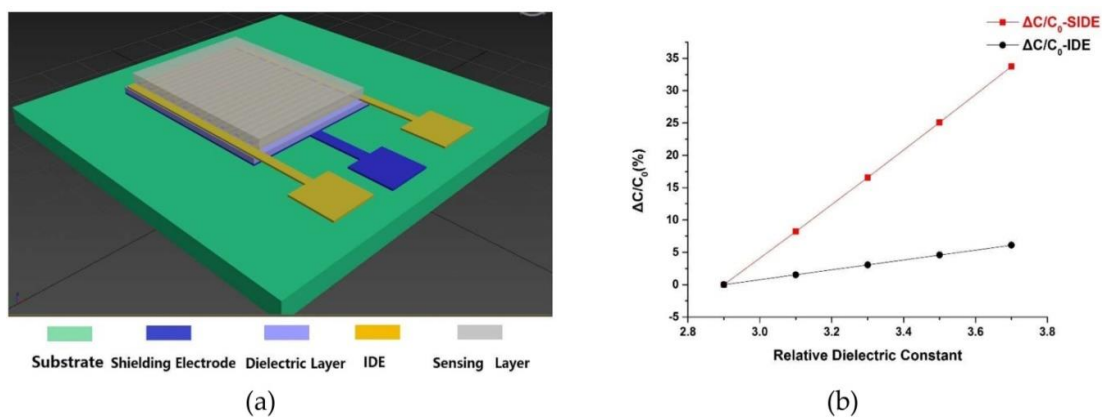


Рисунок 6 – Структура SIDE та результати моделювання. (a) 3D модель структури SIDE; (b) Порівняння відносної зміни ємності структур SIDE (червона лінія) і IDE (чорна лінія) відповідно до чисельного моделювання

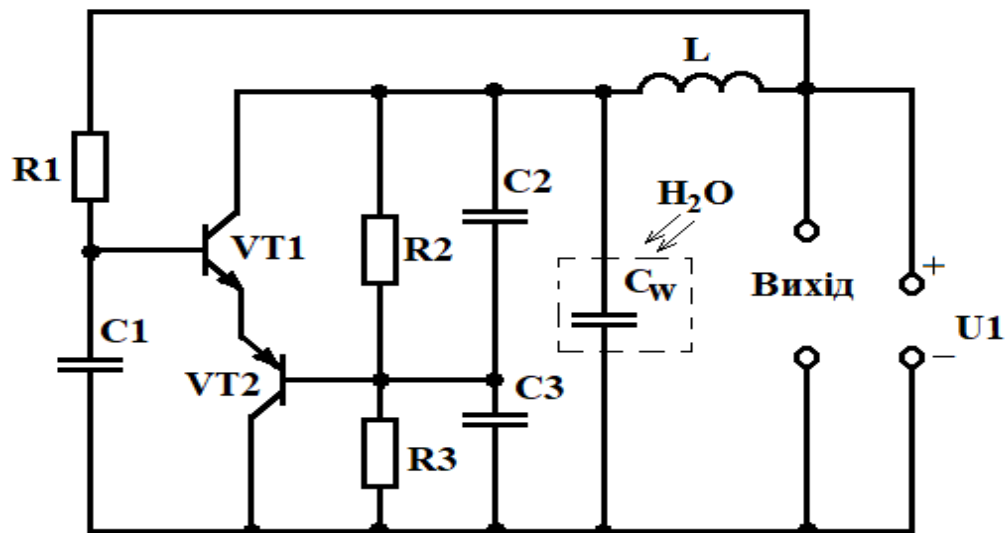


Рисунок 7 – Електрична схема перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом

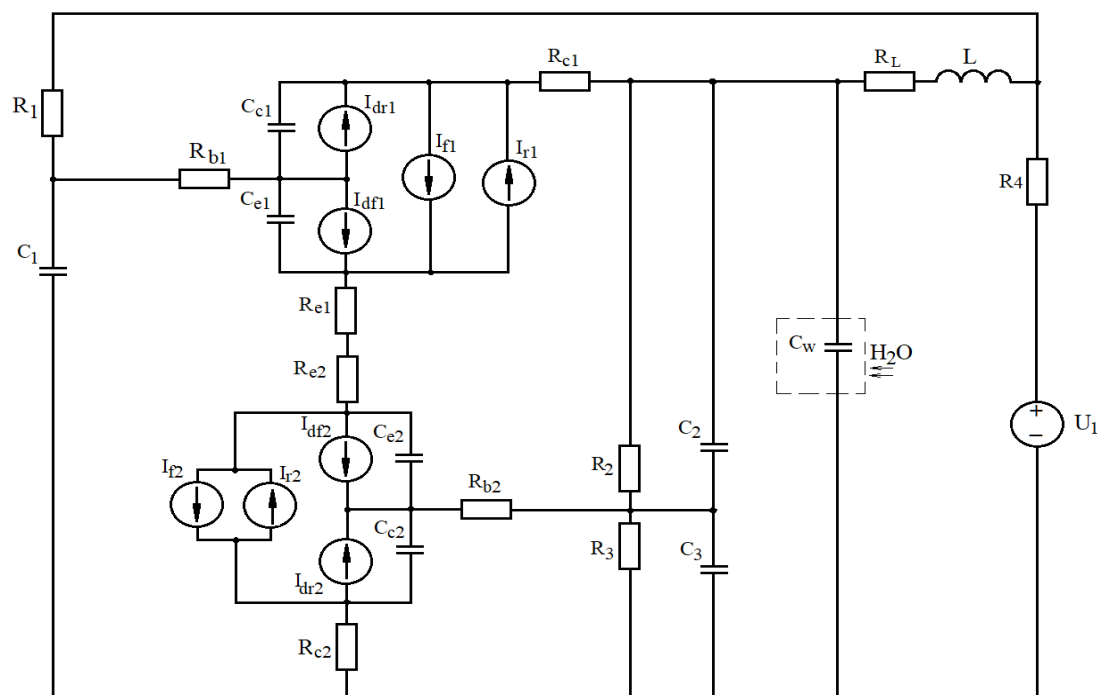
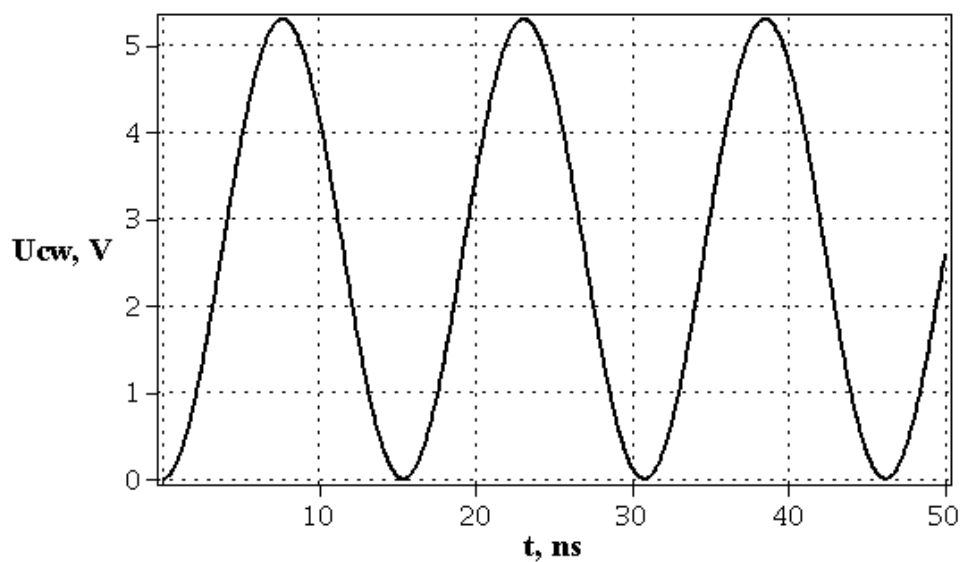
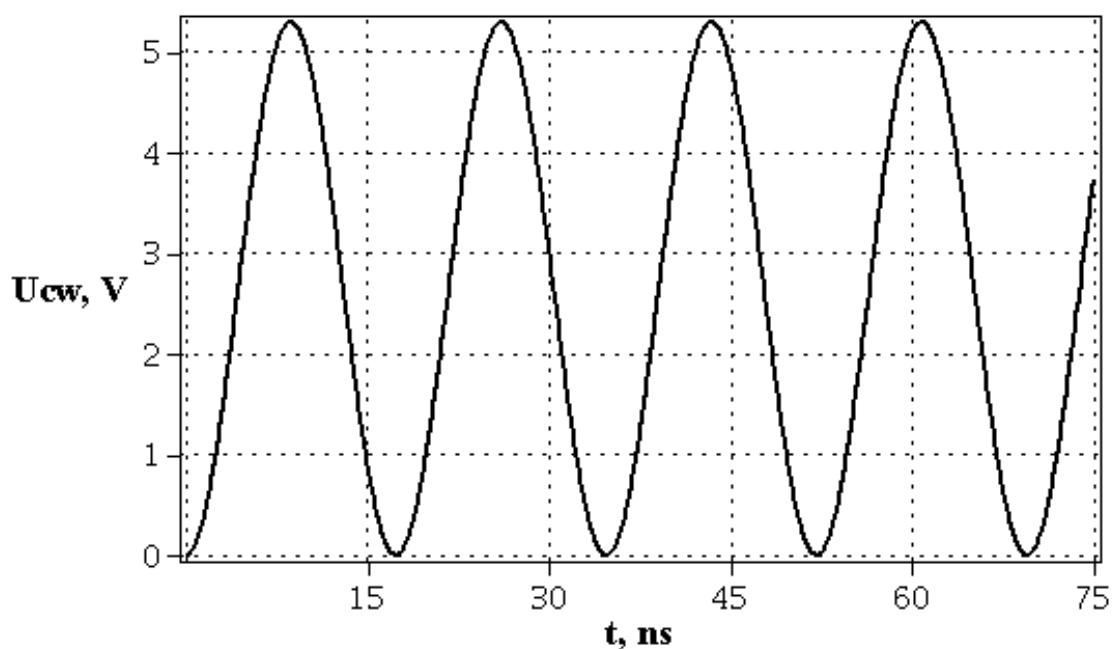


Рисунок 8 – Нелінійна еквівалентна схема перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором



$$C_W(W) = 305 \text{ pF}, \quad T = 15,5 \text{ ns}, \quad F = 64,530 \text{ MHz}$$



$$C_W(W) = 354 \text{ pF}, \quad T = 17 \text{ ns}, \quad F = 58,834 \text{ MHz}$$

Рисунок 9 - Зміна вихідної напруги чутливої до вологості ємності від зміни часу за різних значень ємності вологочутливого конденсатора



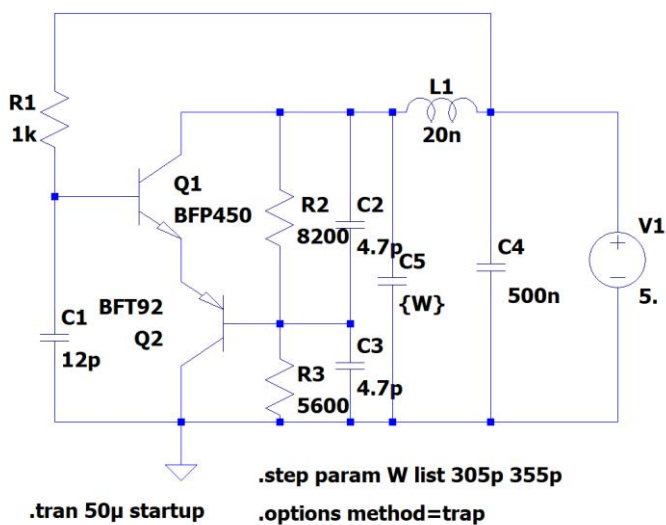


Рисунок 1.10 – Електрична схема перетворювача для вимірювання вологості з частотним виходом та вологочутливим конденсатором в LTSpice

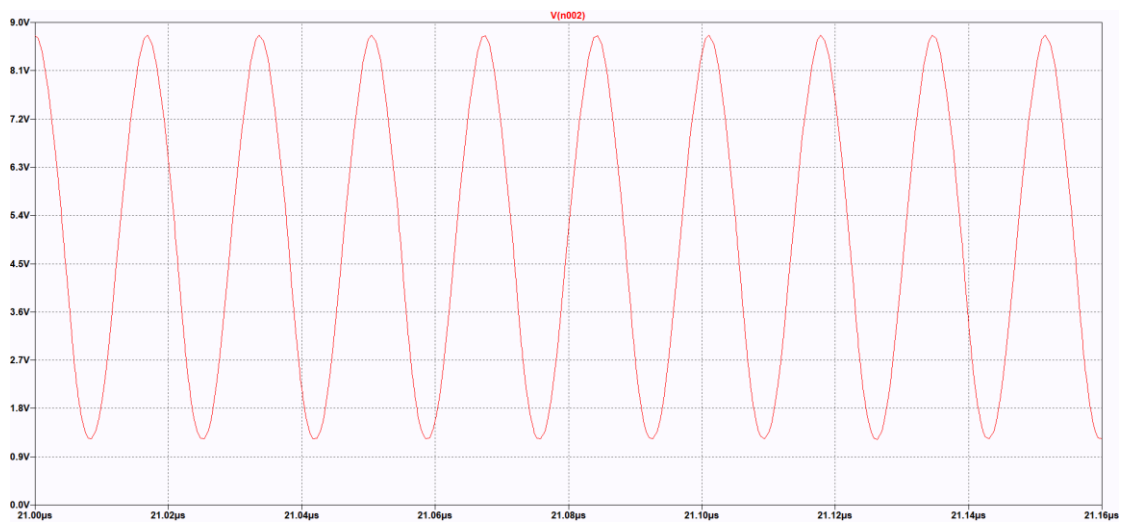


Рисунок 1.11 – Експериментальна залежність вихідної напруги чутливого до вологи конденсатора від зміни часу при відносній вологості  $W = 99\%$

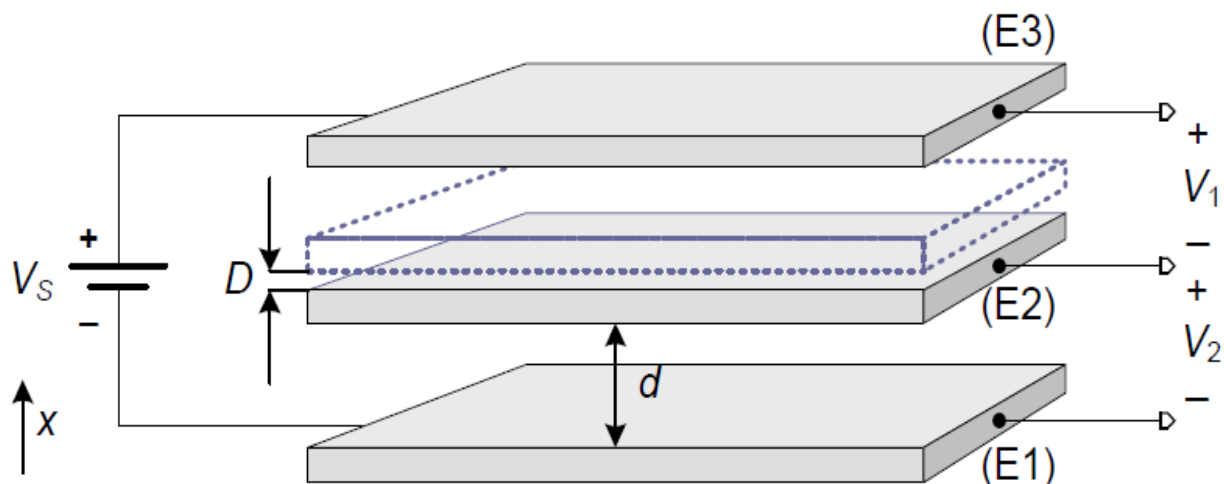


Рисунок 12 – Схематичне зображення диференційного ємнісного датчика. На нерухомі електроди E1 і E3 подається напруга живлення  $V_S$ , тоді як E2 вільно переміщується вздовж осі x. Вихідний сигнал подається різницею напруг  $V_2 - V_1$

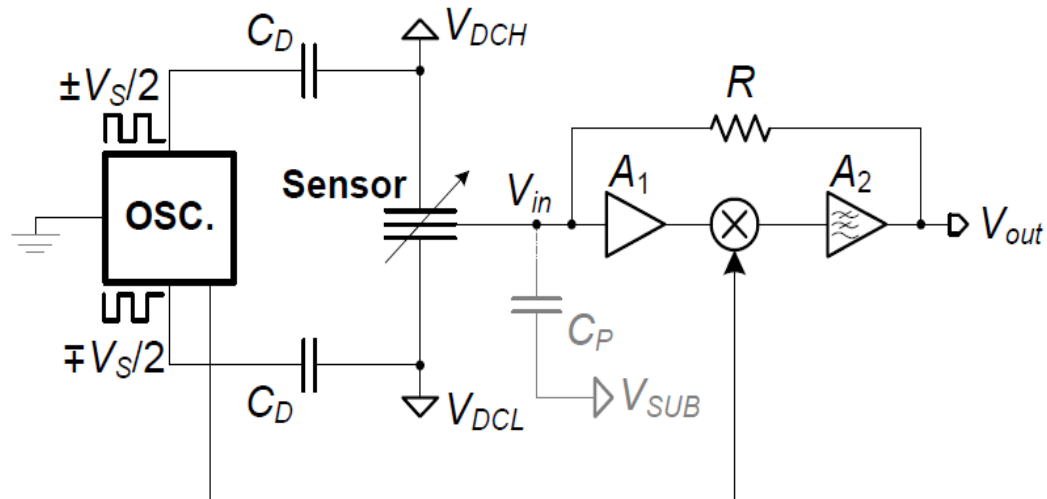


Рисунок 13 – Блок-схема інтерфейсу ємнісного датчика ADXL50



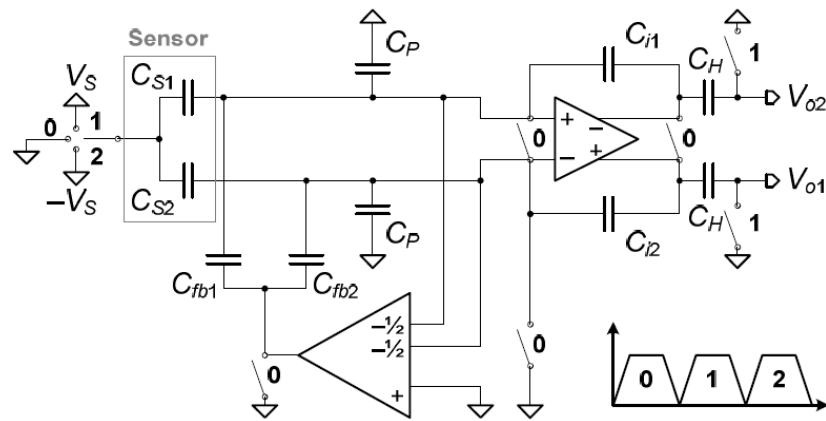


Рисунок 14 – Блок-схема повністю диференційного ємнісного інтерфейсу на основі підсилювачів заряду

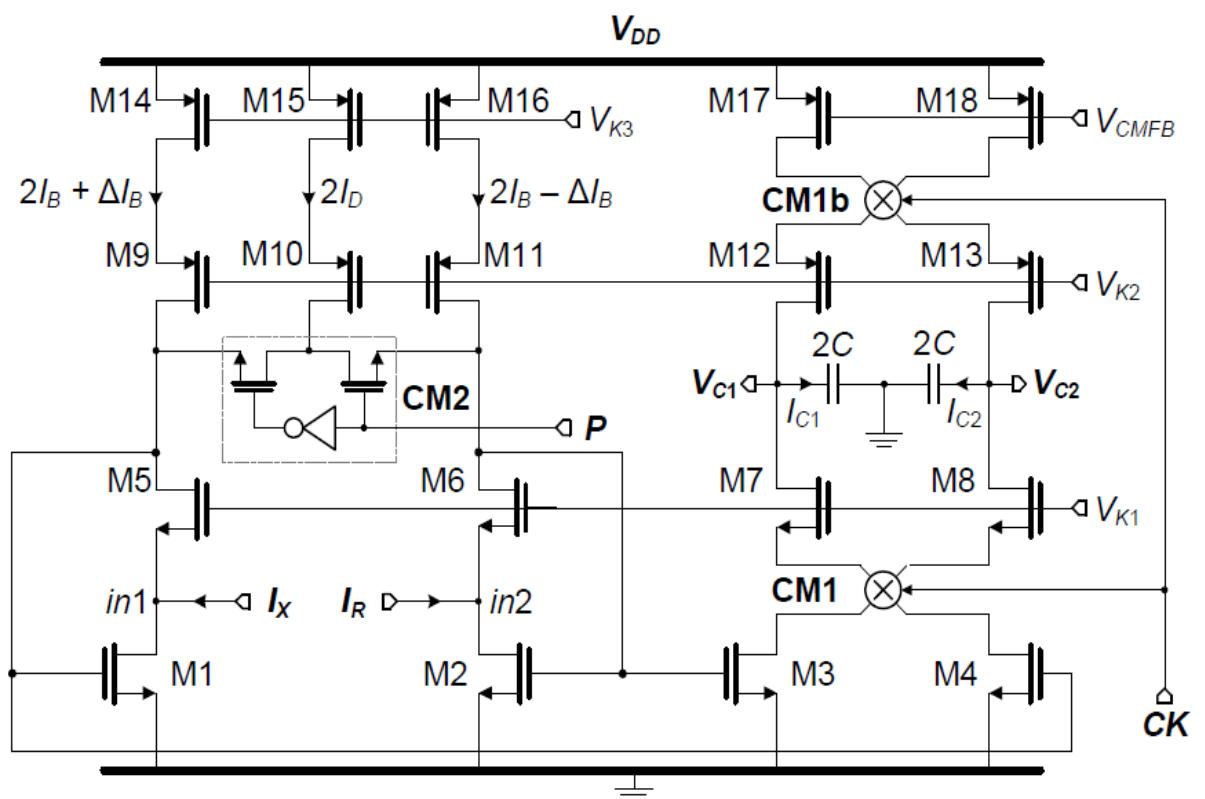


Рисунок 15 – Принципова схема підсилювача струму (СА), що включає також функцію джерел струму  $I_D$  та  $\Delta I_B$  та  $CM1$ ,  $CM2$ .

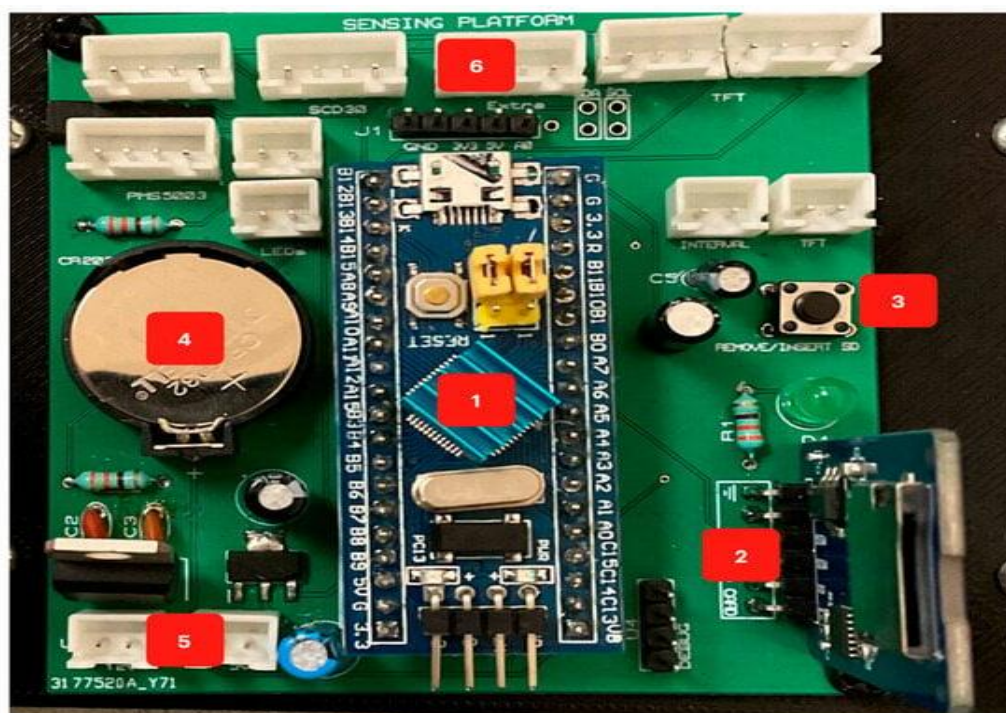


Рисунок 16 – Головна друкована плата



Рисунок 17 – Друга друкована плата

Додаток Б  
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ВОЛОГОСТІ З ЧАСТОТНИМ ВИХІДНИМ  
СИГНАЛОМ**

ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Перетворювачі вологості з частотним вихідним сигналом»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра ІРТС  
(кафедра, факультет)

**Показники звіту подібності Unicheck**

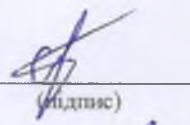
Оригінальність 97.33% Схожість 2.67%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

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

Особа, відповідальна за перевірку  Звягін О.С.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

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

Автор роботи  Вараниця С.А.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи  Осадчук О.В.  
(підпис) (прізвище, ініціали)