

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:

### «ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ»

Виконав: студ. 2-го курсу, групи КІВТ-22м  
спеціальності 152 Метрологія та  
інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Минаш Д.Б.  
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент, доцент каф. ІРТС

Савицький А.Ю.  
(прізвище та ініціали)

«18» 12 2023 р.

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

Семенова О.О.  
(прізвище та ініціали)

«19» 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«20» 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 – 15 Автоматизація та приладобудування  
Спеціальність – 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка  
Освітньо-професійна програма – Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«16» вересня 2023 року

**ЗАВДАННЯ  
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Минашу Дмитру Борисовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ»

керівник роботи к.т.н., доц., доцент, кафедри ІРТС Савицький А.Ю.

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

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

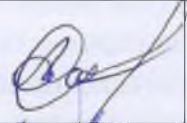
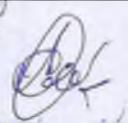
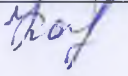
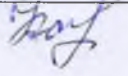
2. Строк подання студентом роботи 15.12.2023р.

3. Вихідні дані до роботи: Робочий діапазон частот від 2 ГГц до 8 ГГц. Напруга живлення 3,3-5В. Струм споживання 15-150мА. Діапазон вимірювання вологості 10-95%.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Сучасний стан розробок датчиків вологості. Безчипові датчики RFID для інтернету речей та можливість їх застосування для покращення метрологічних параметрів сенсорів вологості. Розробка та дослідження датчика вологості на основі NAFION 117 без мікросхем RFID. Економічна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Психрометрична діаграма, де  $T_{\text{повітря}}$  це температура навколишнього повітря. Якщо температура падає нижче точки роси,  $T_d(^{\circ}\text{C})$ , відбувається конденсація води. Ємнісні датчики вологості з міжштифтовими електродами. Загальні схеми п'єзорезистивних датчиків вологості. Схема бістатичного зчитувача. Схема моностатичного зчитувача. Структура мітки датчика RFID без мікросхем. Схема безчипової системи міток. Конфігурація мікросмужкового резонатора. Випробування характеристики вимірювання температури мітки. Динамічне виявлення спектру та архітектура системи передачі даних. Динамічний моніторинг спектру RFID-мітки та експеримент бездротової передачі даних.

6. Консультанти розділів роботи

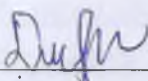
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	к.т.н., доц., доц. каф. ІРТС Савицький А.Ю.		
Економічна частина	доцент каф. ЕПВМ, доцент, к.е.н., Кавецький В.В.		

7. Дата видачі завдання 17.09.2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

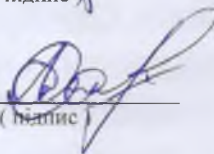
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2023-07.09.2023	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2023-17.09.2023	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.	18.09.2023-27.09.2023	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	28.09.2023-15.10.2023	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	16.10.2023-09.11.2023	
6.	Розробка графічної частини МКР.	10.11.2022-20.11.2022	
7.	Економічна частина.	21.11.2023-30.11.2023	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	01.12.2023-14.12.2023	
9.	Нормоконтроль.	15.12.2023-18.12.2023	
10.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	19.12.2023-20.12.2023	
11.	Захист МКР ЕК.	21.12.2023-22.12.2023	

Студент

  
(підпис)

Минаш Д.Б.

Керівник роботи

  
(підпис)

Савицький А.Ю.

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.397

Минаш Д.Б. Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2023. – с. На українській мові. Бібліогр.: 64назв; Рис. 39.

У магістерській кваліфікаційній роботі було проведено аналіз сучасного стану розвитку сенсорів вологості. Представлено огляд оптичних, гравіметричних, ємнісних, резистивних, п'єзорезистивних датчиків вологості. Датчики вологості широко застосовуються в моніторингу навколишнього середовища, електроніці, сільському господарстві та біомедичній галузі. Тому існує великий попит на просто виготовлені вбудовані датчики вологості та температури в багатьох галузях.

У другому розділі досліджені безчипові датчики RFID. Проведено моделювання впливу матеріалу підкладки на продуктивність датчика RFID без мікросхем. Перевірено змодельовані результати за допомогою вимірювань реальних резонаторів. Діелектричні параметри матеріалу підкладки виявилися дуже важливими для максимізації продуктивності датчика по відношенню до робочого діапазону датчика. При низьких значеннях вологості найкращим вибором є субстрати з низькою діелектричною проникністю. Якщо датчику вологості потрібно працювати в режимі підвищеної вологості або загалом у ширшому діапазоні вологості, підкладка з високою діелектричною проникністю може бути найкращим вибором для того, щоб резонансний пік добре виявлявся.

Розроблено 6-бітний безчиповий RFID-датчик вологості на основі частотної області. Запропонований резонатор CSRR виконано у вигляді зв'язку з мікросмужковою лінією, а резонатор ELC доданий як блок вимірювання вологості. У третьому розділі порівнюється та аналізується чутливість до вологи резонатора ELC і резонатора CSRR, а також аналізується чутливість до температури CSRR. Чутливість кожного сенсорного блоку, що використовується в мітці, була розрахована методом лінійної нормалізації. Усі три сенсорні функції запропонованого багатопараметричного датчика RFID кількісно визначені у відповідних робочих частотних діапазонах. Запропонована недорога схема мобільного виявлення яка базується на полегшеній VNA.

**Ключові слова:** сенсор вологості, вологочутлива ємність, безчиповий RFID-датчик, мікросмужкова лінія.

## ABSTRACT

Minash D.B. Increasing the sensitivity of measuring the humidity of gaseous media. Master's qualification work. – Vinnytsia: VNTU, 2023. – p. In Ukrainian language. Bibliography: 64 titles; Fig. 39 .

In the master's qualification work, an analysis of the current state of development of humidity sensors was carried out. An overview of optical, gravimetric, capacitive, resistive, piezoresistive humidity sensors is presented. Humidity sensors are widely used in environmental monitoring, electronics, agriculture and biomedical fields. Therefore, there is a great demand for simply manufactured embedded humidity and temperature sensors in many industries.

In the second chapter, chipless RFID sensors are investigated. The influence of the substrate material on the performance of the RFID sensor without chips was simulated. The simulated results were verified using measurements of real resonators. The dielectric parameters of the substrate material have been shown to be very important in maximizing sensor performance over the sensor operating range. At low humidity values, substrates with low dielectric constant are the best choice. If the humidity sensor needs to operate in high humidity or in general over a wider humidity range, a substrate with a high dielectric constant may be the best choice so that the resonant peak is well detected.

A 6-bit chipless RFID humidity sensor based on the frequency domain has been developed. The proposed CSRR resonator is made as a microstrip line connection, and the ELC resonator is added as a humidity measurement unit. The third section compares and analyzes the moisture sensitivity of the ELC cavity and the CSRR cavity, and analyzes the temperature sensitivity of the CSRR. The sensitivity of each sensor unit used in the tag was calculated using the linear normalization method. All three sensor functions of the proposed multi-parameter RFID sensor are quantified in their respective operating frequency ranges. A low-cost mobile detection scheme based on a lightweight VNA is proposed.

**Keywords:** humidity sensor, moisture-sensitive capacity, chipless RFID sensor, microstrip line.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗРОБОК ДАТЧИКІВ ВОЛОГОСТІ</b> .....	7
1.1 Основні підходи та принципи використання сенсорів вологості .....	7
1.2 Оптичні датчики вологості.....	9
1.3 Гравіметричні датчики вологості .....	13
1.4 Ємнісні датчики вологості .....	15
1.5 Резистивні датчики вологості .....	21
1.6 П'єзорезистивні датчики вологості .....	26
1.7 П'єзорезистивні датчики вологості.....	26
1.8 Висновки до розділу .....	29
<b>2 БЕЗЧИПОВІ ДАТЧИКИ RFID ДЛЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ТА МОЖЛИВІСТЬ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СЕНСОРІВ ВОЛОГОСТІ</b> .....	31
2.1 Датчики радіочастотної ідентифікації (RFID) .....	31
2.2 Безчиповий RFID для поширення Інтернету речей: архітектура системи .....	35
2.3 Матеріали для RFID датчиків .....	43
2.4 Методи виготовлення датчиків.....	46
2.5 Датчики фізичних величин .....	51
2.6 Висновки до розділу.....	57
<b>3 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДАТЧИКА ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ NAFION 117 БЕЗ МІКРОСХЕМ RFID</b> .....	58
3.1 Проектування та моделювання датчиків вологості .....	58
3.2 Проектування та моделювання датчиків вологості .....	60
3.3 Математичне моделювання.....	62
3.4 Виготовлення сенсора та результати експерименту .....	66
3.5 Моніторинг у реальному часі та бездротова передача даних зондування .....	76
3.6 Висновки до розділу .....	81

	3
<b>4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b> .....	83
4.1 Оцінювання наукового ефекту .....	83
4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	86
4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	98
4.4 Висновок до розділу .....	99
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	100
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	102
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративна частина .....	107
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки магістерської кваліфікаційної роботи .....	117

## ВСТУП

**Актуальність.** Вологість є однією з найбільш часто вимірюваних фізичних величин і має велике значення в широкому спектрі комерційних і промислових застосувань, у тому числі пов'язаних з керуванням вентиляцією будівель, чистими приміщеннями в напівпровідниковій і автомобільній промисловості, екологічними камерами для тестування електроніки, промислове сушіння та моніторинг процесів у хімічній, електроніці, харчовій промисловості/напоях, фармацевтиці, косметичці та біомедичному аналізі [1].

Датчики радіочастотної ідентифікації (RFID) є одним із фундаментальних компонентів Інтернету речей, метою якого є підключення кожного фізичного об'єкта до хмари для обміну інформацією. У цій структурі безчипові RFID є проривною технологією, оскільки вони знімають вартість, пов'язану з чіпом, водночас придатні для друку, пасивні, малопотужні та придатні для суворих умов. Після важливих результатів, досягнутих за допомогою багатобітових безчипових міток, є чітка мотивація та зацікавленість розширити функціональні можливості безчипового зондування на фізичні, хімічні, структурні параметри та параметри середовища. Ці можливості викликали сильний інтерес у науковому та промисловому співтоваристві до такого типу застосування. Датчики температури та вологості, а також прототипи локалізації, близькості та структурного стану здоров'я вже були продемонстровані, і незабаром очікується багато інших сенсорних застосувань.

За останні кілька років ми спостерігаємо різке поширення бездротових технологій. Якщо говорити точніше, технологічний прогрес останніх років проклав шлях для поширення та все більшого поширення технологій бездротових датчиків у рамках Інтернету речей (IoT). IoT — це система, що складається з різноманітних пристроїв і організована як мережа. Кожному пристрою (речі) надається унікальний ідентифікатор (UID) і можливість обмінюватися інформацією або передавати дані через бездротову або дротову мережу без участі людини. Щоб покращити поширеність системи IoT, терміново потрібні пристрої з високим ступенем мініатюризації, низькою потужністю та низькою вартістю. У такому сценарії використання радіочастотної ідентифікації (RFID) є дуже цікавим і поширеним рішенням для впровадження систем IoT або мереж розподілених датчиків. RFID є досить дешевими, забезпечені унікальними ідентифікаторами та можуть бути оснащені різноманітними сенсорними можливостями. Завдяки цим характеристикам RFID були успішно використані в багатьох практичних застосуваннях.

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



**Об'єктом дослідження** є процес перетворення відносної вологості у частотний сигнал за допомогою RFID сенсорів вологості.

**Предметом дослідження** – статичні і динамічні характеристики сенсора вологості з ємнісним вологочутливим елементом.

**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;
- розглянути принципи роботи та побудови безчіпових датчиків RFID;
- провести моделювання впливу матеріалу підкладки на продуктивність датчика RFID без мікросхем;
- перевірити змодельовані результати за допомогою вимірювань реальних резонаторів;
- розробити 6-бітний безчіповий RFID-датчик вологості на основі частотної області;
- порівняти та проаналізувати чутливість до вологи резонатора ELC і резонатора CSRR, а також проаналізувати чутливість до температури CSRR.

**Методи дослідження ґрунтуються на використанні:** основних положень теорії функції комплексної змінної для визначення функції чутливості; рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей сенсора вологості; диференціального та інтегрального числення для створення математичної моделі.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

Проведено аналіз сучасного стану розвитку сенсорів вологості. Представлено огляд оптичних, гравіметричних, ємнісних, резистивних, п'єзорезистивних датчиків вологості.

Досліджено безчіпові датчики RFID. Проведено моделювання впливу матеріалу підкладки на продуктивність датчика RFID без мікросхем. Перевірено змодельовані результати за допомогою вимірювань реальних резонаторів. Діелектричні параметри матеріалу підкладки виявилися дуже важливими для максимізації продуктивності датчика по відношенню до робочого діапазону датчика. При низьких значеннях вологості найкращим вибором є субстрати з низькою діелектричною проникністю. Якщо датчику вологості потрібно працювати в режимі підвищеної вологості або загалом у ширшому діапазоні вологості, підкладка з високою діелектричною проникністю може бути найкращим вибором для того, щоб резонансний пік добре виявлявся.

**Практичне значення одержаних результатів:**

Розроблено 6-бітний безчиповий RFID-датчик вологості на основі частотної області. Запропонований резонатор CSRR виконано у вигляді зв'язку з мікросмушковою лінією, а резонатор ELC доданий як блок вимірювання вологості.

Порівняно та проаналізовано чутливість до вологи резонатора ELC і резонатора CSRR, а також проаналізовано чутливість до температури CSRR. Чутливість кожного сенсорного блоку, що використовується в мітці, була розрахована методом лінійної нормалізації. Усі три сенсорні функції запропонованого багатопараметричного датчика RFID кількісно визначені у відповідних робочих частотних діапазонах.

Запропонована недорога схема мобільного виявлення яка базується на полегшеній VNA.

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

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

# 1 СУЧАСНИЙ СТАН РОЗРОБОК ДАТЧИКІВ ВОЛОГОСТІ

## 1.1 Основні підходи та принципи використання сенсорів вологості

Вологість є однією з найбільш часто вимірюваних фізичних величин і має велике значення в широкому спектрі комерційних і промислових застосувань, у тому числі пов'язаних з керуванням вентиляцією будівель, чистими приміщеннями в напівпровідниковій і автомобільній промисловості, екологічними камерами для тестування електроніки, промислове сушіння та моніторинг процесів у хімічній, електроніці, харчовій промисловості/напоях, фармацевтиці, косметичці та біомедичному аналізі [1].

Вологість визначається як міра водяної пари, присутньої в газі. Два загальні параметри, пов'язані з вимірюванням вологості, це абсолютна вологість і відносна вологість. Абсолютна вологість – це міра маси водяної пари в одиниці об'єму. Подібним чином відносна вологість визначається як відношення наявного тиску водяної пари до тиску водяної пари, необхідного для насичення при даній температурі. Відносна вологість пов'язана з температурою навколишнього середовища. Водяна пара є природним компонентом повітря, а відносна вологість (RH) суміші водяної пари та повітря визначається як відношення маси водяної пари в одиниці об'єму до маси водяної пари, яку цей об'єм може умістити. якщо пара, де  $P_w$  і  $P_s$  – тиск пари та тиск насичення відповідно [2].

Іншим загальноприйнятим параметром, пов'язаним з відносною вологістю, є точка роси,  $T_d$  (°C), яка визначає температуру, нижче якої відбувається конденсація води. Вирази та визначення температур за вологим термометром і точки роси наведено на рисунку 1. Вимірявши значення  $P_w$  і  $P_s$ , стає зрозуміло, що відповідне значення відносної вологості можна визначити за рівнянням 1.1 [3].

$$RH = \frac{P_w}{P_s} \times 100\% \quad (1.1)$$

Вимірювання вологості, як правило, проводиться за допомогою психрометра. На рисунку 1.2 представлено схематичну ілюстрацію психрометра (IMAG-DLO,  $I_{Max}$ ), що складається з двох термометрів, які вимірюють температуру за сухим і вологим термометрами відповідно. Тиск пари,  $P_w$ , можна розрахувати за формулою

$$P_w = P_s - P_t A (T_{wet} - T_{air}) \quad (1.2)$$

де  $P_s$  — тиск насиченої пари за  $T_{air}$  (температура сухого термометра),  $P_t$  — загальний тиск середовища,  $T_{wet}$  — виміряна температура за вологим термометром, а  $A$  — константа психрометра, яка є функцією геометрії психрометра та повітря. швидкість потоку.

Можна показати, що апроксимована константа термодинамічного психрометра ( $A$ ) має значення 5,68 при 0 °C, 6,44 6,46 при 20 °C, 6,28 6,45 при 40 °C і 5,63 6,43 при 60 °C. Ця константа залежить від температури і змінюється більше при відносній вологості при високій температурі природних умов. Термодинамічні властивості розраховуються з використанням співвідношення ідеального газу для вологого повітря. Хоча психрометри мають той недолік, що вимагають регулярного обслуговування, принцип їх роботи простий і унікальний. Отже, їх використання є безцінним під час калібрування інших датчиків вологості повітря [4].

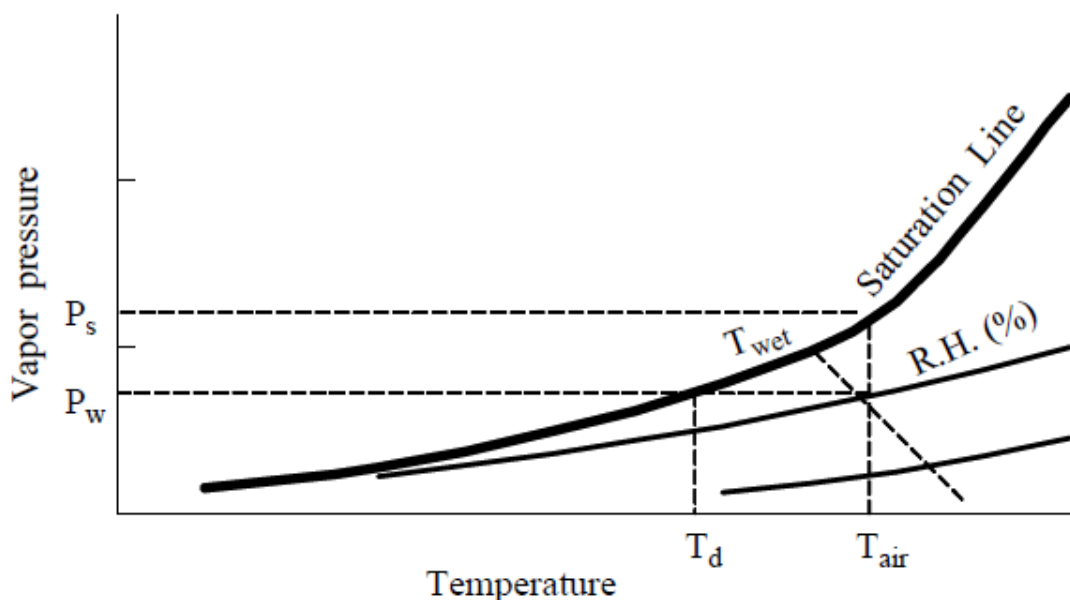


Рисунок 1.1 – Психрометрична діаграма, де  $T_{повітря}$  це температура навколишнього повітря. Якщо температура падає нижче точки роси,  $T_d(^{\circ}C)$ , відбувається конденсація води

У цьому розділі розглядаються методи трансдукції різноманітних найсучасніших датчиків вологості, включаючи (1) оптичні, (2) гравіметричний, (3) ємнісний, (4) резистивний, (5) п'єзорезистивний та (6) магнітопружний датчики.

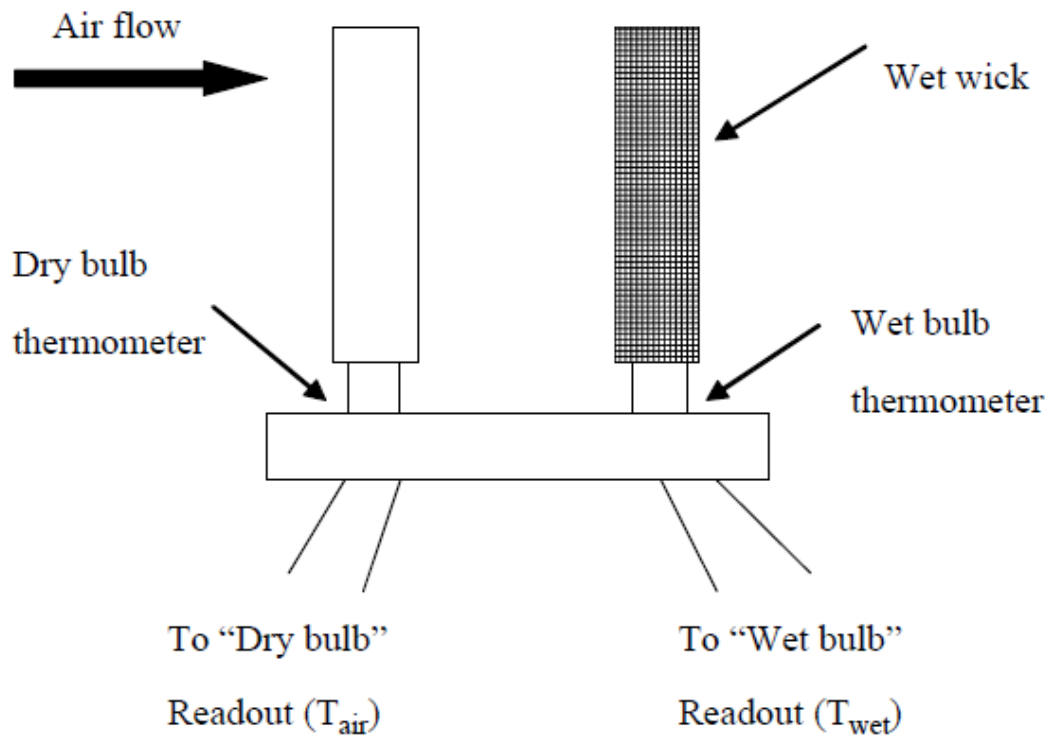


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення психрометра. Вологий термометр підтримується вологим ватним гнотом, поміщеним у резервуар для води, і використовується для вимірювання  $T_{wet}$ . Сухий термометр вимірює температуру навколишнього повітря

## 1.2 Оптичні датчики вологості

Волоконно-оптичні датчики вологості засновані на колориметричній взаємодії матеріалів, іммобілізованих на поверхні серцевини волокна або його оболонки в секції вимірювання вологості. Механізм чутливості ґрунтується на зміні показника заломлення матеріалів, спричиненій вологістю, що спричиняє зміну оптичної інтенсивності, що передається через чутливу секцію, залежно від відносної вологості.

Kharaz і Jones [4] представили оптико-волоконну систему вимірювання вологості, засновану на колориметричній взаємодії хлориду кобальту з молекулами води. Як схематично показано на рисунку 1.3, оболонку волокна довжиною 50 мм було видалено та замінено тонкою плівкою з хлориду кобальту та желатину.

При підтримці постійної температури 36 °C було показано, що варіації відносної вологості відображаються як зміни спектрального поглинання сенсора в діапазоні довжин хвиль 600–740 нм.

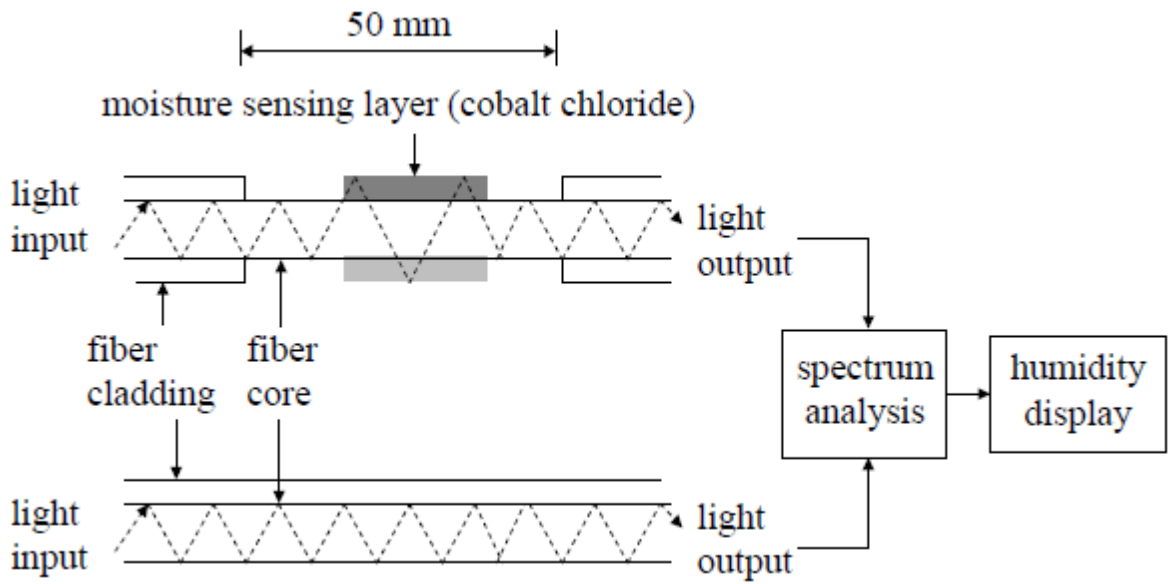


Рисунок 1.3 – Будова та робота оптичного датчика вологості. 50-міліметрову оболонку волокна видаляють і замінюють тонкою плівкою з хлориду кобальту та желатину. При підтримці температури 36 °С зміна відносної вологості впливає на спектральне поглинання сенсора в області довжин хвиль 600–740 нм. Тим часом друга довжина хвилі за межами цієї області забезпечує еталон інтенсивності. Відносна інтенсивність сигналів виходить шляхом ділення інтенсивності світла при 670 нм на інтенсивність світла при 850 нм. Середня чутливість до вологості становить 0,001~0,007 au/%RH у різних робочих регіонах

Відносна інтенсивність сигналів була отримана шляхом ділення інтенсивності світла при довжині хвилі 670 нм на інтенсивність світла при довжині хвилі 850 нм. Було встановлено, що середня чутливість до вологості становить 0,001 0,007 au/%RH.

В альтернативному підході гідрофільний гель (агарозу) наносили на тоншу зону біконічного конічного одномодового оптичного волокна. Використовуючи цю схему, було отримано 6,5 дБ ослаблення, коли відносна вологість була змінена з 30% до 80%. Однак також спостерігався очевидний гістерезис 0,5 дБ.

Оптичні методи також використовують довжину хвилі поглинання води. Коли світло проходить через газ, поглинання певних довжин хвиль викликає значну зміну поляризації та амплітуди падаючого оптичного сигналу. Наприклад, Ширмер та ін.6 представили волоконно-зв'язаний діодний лазерний спектрометр поглинання з модуляцією 7,50 0,01 ГГц для виявлення вологості

на різних частотах. Після віднімання фонових шумів було визначено, що сигнали поглинання були пропорційні об'ємним часткам вологості з чутливістю 0,01105 В/ppm. Плівки PVA (полівініловий спирт)/H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, що містять барвники (CV кристалічний фіолетовий/MB метиленовий синій), були застосовані для оптичного вимірювання вологості Сомані та ін.7 Спостерігався очевидний зсув спектру, коли відносна вологість була підвищена з 9% RH до 100. % відносної вологості.

Ха та ін. [5] представив механічно-оптоелектронний датчик вологості, що складається зі світлодіода (світловіпромінювального пристрою), фотодіода та механічної системи. У цьому пристрої один кінець пучка волосся закріплений, а інший –

До «Сухого термометра»

Зчитування (Т<sub>повітря</sub>)

До «мокрого термометра»

Зчитування (Т<sub>мокрый</sub>)

приєднаний до тонкого металевого листа, який містить вікно та з'єднаний зі спіральною пружиною. Зміна вологості спричиняє звуження або розширення волосся, яке потім тягне металевий лист вгору або вниз. Рух листа відносно нерухомої металевої мішені змінює площу вікна, що, у свою чергу, спричиняє зміну інтенсивності світлодіодного світла, виявленого фотодіодом, і відповідну зміну вихідного фотоструму. Порівняно з ємнісними або резистивними датчиками вологості, механічно-оптоелектронний датчик вологості демонструє покращену тривалу стабільність і меншу температурну залежність.

Гупта та Ратнанджалі [9] повідомили про волоконно-оптичний датчик вологості, заснований на залежному від вологи поглинанні світла за допомогою поліметилметакрилатної (PMMA) плівки, легової феноловим червоним, на невеликій частині серцевини волокна з кремнезему (PCS), покритого пластиком. нижчий показник заломлення. Геніальний U-подібний зонд був розроблений, щоб зменшити кут падіння променя на межі серцевина-плівка в зігнутій області і, отже, збільшити передачу світла від серцевини до датчика. Час відгуку цього датчика становить близько 5 секунд при роботі від 20 до 80% відносної вологості, що продемонструвало швидку реакцію для оптичних датчиків вологості. Шукла та ін.[10] повідомили про наноструктуровані плівки оксиду магнію за допомогою золь-гель методів для визначення вологи навколо подібного U-подібного зонда. У їхньому дослідженні оптичні волокна використовувалися для визначення адсорбції вологи на нанорозмірних плівках MgO, нанесених на U-подібні скляні стрижні, тоді як світловод отримував

вихідну оптичну потужність на одному кінці та передавав вихідну оптичну потужність на іншому кінці. Показано, що зміна вихідної оптичної потужності сильно пов'язана з вологістю. Крім того, оптодні мембрани на полімерній основі, леговані флуоресценцією, також використовувалися для вимірювання відносної вологості та продемонстрували високу роздільну здатність виявлення до 0,56%.

Сорлі та ін.[12] розробили оптичні датчики вологості на основі за принципом охолодженого дзеркала з використанням методів оптичної детекції. Датчики склалися з відбивного датчика та модуля Пельтьє, який контролював температуру для досягнення точки роси та випаровування конденсату. Для вимірювання крапель води використовували світлодіод і фотодетектор. Вміст води в діапазоні від 80 до 95% було виміряно з високою точністю. Дрю та ін.[11] продемонстрували датчик вологості з використанням паролюмінесцентних подвійних солей платини (II). Спектри люмінесценції для матеріалів подвійної солі платини (II) показали, що інтенсивність і максимум довжини хвилі відповідають концентрації водяної пари, що оточує матеріали. Світло збудження генерувалося шляхом встановлення синього світлодіода на кінці одного з роздвоєних волокон, а збиральний кінець роздвоєного волокна був підключений до спектрофотометра для аналізу спектру люмінесцентних подвійних солей платини (II). Таким чином, за допомогою цього підходу можна успішно виявити водяну пару.

Таблиця 1.1 – Огляд методів трансдукції для оптичних датчиків вологості.

Year	Authors	Design	Materials	Output	Remarks
1995	Kharaz and Jones	Fiber-optic	CoCl <sub>2</sub>	Intensity of light	Surface-plasma-based device
2000	Barián et al.	Fiber-optic	Agarose gel	Optical power	Sol-gel deposition
	Schirmer et al.	Spectrometer	—	Spectrometer	Frequency modulation
	Ha et al.	Movable window	Black hair	Voltage	Photodiode for conversion
2001	Choi and Shuang	Fluorescent	Optode membrane	Transmission	Fluorescent optosensor
	Somani et al.	UV-VIS spectra	Complex-forming dyes	Absorbance	Charge transfer complex-forming dyes
	Gupta and Ratnanjali	Fiber-optic	PMMA	Transmission	U-shaped probe
2002	Bedoya et al.	Fluorescent	Optode membrane	Transmission	Fluorescent optosensor
	Sorli et al.	Optical reflection	Peltier device	Voltage	Dew point sensing
2003	Bozóki et al.	Fabry-Pérot interferometer	Photoacoustic cell	Wavenumber	Photoacoustic
2004	Shukla et al.	Fiber-optic	Nano-like MgO	Transmission	U-shaped probe
	Drew et al.	Luminescence spectra	Pt(II) double salt materials	Wavelength	Vaporluminescent

Також були розроблені фотоакустичні (РА) системи вимірювання вологості з використанням лазерних діодів. Через залежність фотоакустичних сигналів від різних фізичних і хімічних властивостей вимірюваних зразків газу



мінімальна концентрація водяної пари, яку можна визначити, до суб Рівень - ppm можна досягти за допомогою розроблених систем виявлення водяної пари PA на основі діодного лазера (DPWDS).

Хоча оптичні датчики вологості мають високу чутливість, кілька недоліків перешкоджають їх практичному застосуванню, включаючи гістерезис, який зазвичай змінюється від 0,5% до 1% відносної вологості, їх громіздкий характер, вимога частої дезактивації дзеркал, їх нестабільність при безперервному використанні, відносно високе енергоспоживання, необхідність певної форми механізму температурної компенсації для отримання точних вимірювань вологості, і, нарешті, їх відносно висока вартість. Незважаючи на ці обмеження, здатність оптичних датчиків вологості відстежувати низький рівень вологості є кращою, ніж у аналогів, і, отже, ці пристрої зазвичай використовуються в лабораторних умовах. У таблиці 1.1 підсумовано конструкцію та матеріали, що використовуються для різних оптичних систем вимірювання вологості.

### 1.3 Гравіметричні датчики вологості

Пристрої з поверхневими акустичними хвилями (ПАВ) широко використовуються для вимірювання вологості. Wohltjen представив датчик SAW з можливістю вимірювання пари.

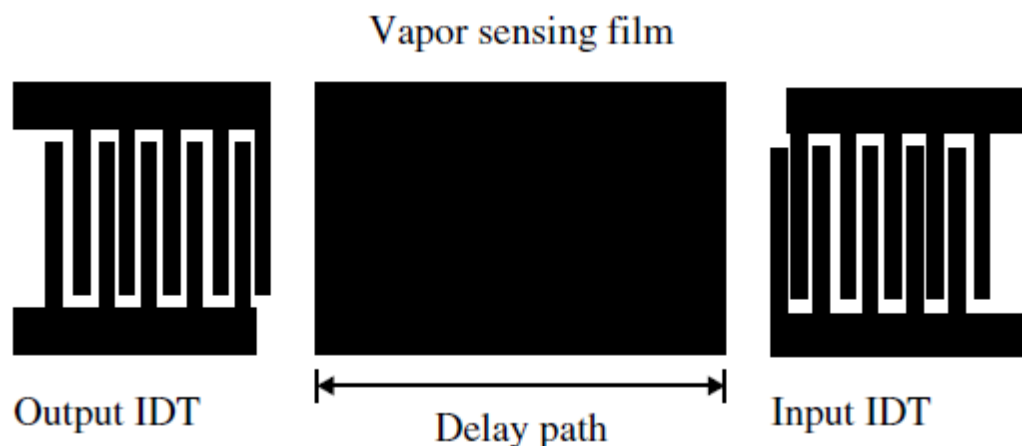


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення датчика SAW. Датчик створює серію SAW, які рухаються по сенсорній плівці до вихідного IDT, де вони перетворюються назад в електричний сигнал

У датчику SAW поверхневі акустичні хвилі запускаються вздовж шляху затримки датчика SAW (рис. 1.4) через зворотний п'єзоелектричний ефект,

коли радіочастотний сигнал подається в центрі частоти до вхідного міжпальцевого перетворювача (IDT). Це створює серію SAW, які рухаються через парову чутливу плівку до вихідного IDT, де потім перетворюються назад в електричний сигнал. Отже, відносна зміна ( $\Delta v$ ) фазової швидкості SAW ( $v_0$ ), спричинена зміни щільності маси, спричинені поглинанням пари, можна приблизно представити як: де  $M$  — маса кварцової п'єзоелектричної підкладки. Тонкі (0,12 мкм) шари фулерену наносяться з обох боків QCM, щоб служити адсорбційними шарами для молекул води. Маса молекул води, поглинена шаром фулерену, викликає зменшення резонансної частоти. Кількість поглинених молекул води залежить від їх концентрації в навколишньому середовищі (тобто відносної вологості). Ці датчики також демонструють швидку реакцію (1,0 с) на циклічні зміни вологості повітря.

Глюк та ін. [15] запропонував резонатор кантилеверного типу, що використовує стратифіковану структуру з п'єзоелектричним полімерним шаром (полівінілдифлуорен, PVDF).<sup>26</sup> Вібрація кантилевера викликається розширенням або звуженням, яке відбувається, коли електричний сигнал подається на електроди, розміщені на будь-який бік PVDF. Адсорбція водяної пари призводить до зміни маси  $\Delta m$ , що викликає зсув резонансної частоти променя. У діапазоні 0–90%

$$\frac{\Delta v}{v_0} = -\frac{\pi h v_0^2}{2\lambda} \Delta \rho (A_x^2 + A_y^2 + A_z^2) \quad (1.3)$$

де  $h$  — товщина плівки,  $\Delta \rho$  — зміна щільності маси,  $\lambda$  — довжина акустичної хвилі,  $A_i$  ( $i$ х,  $y$  або  $z$ ) — нормовані амплітуди зміщення SAW.

Отже, відносну вологість можна визначити, вимірявши відносну зміну фазової швидкості. Відносні зміни фазової швидкості та частоти пов'язані виразом, поданим у формулі (1.3). RH, зсув частоти на 30 Гц спостерігався при резонансній частоті 1,39 кГц.

Загалом гравіметричні датчики вологості забезпечують високу чутливість, швидкий час відгуку та просту експериментальну установку. Однак вони зазвичай потребують дорогої електроніки керування та виявлення. У таблиці II підсумовано конструкцію та матеріали, що використовуються для різних гравіметричних систем вимірювання вологості.

$$\frac{\Delta v}{v_0} = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (1.4)$$

Радева та ін. [14] представив альтернативний тип гравіметричного датчика вологості. У його дослідженні чутлива здатність виявлення ( $10^{-8}$ – $10^{-11}$  г) кварцових кристалічних мікровоаг (QCM) була використана для визначення характеристик парів. Робота цього датчика заснована на зміщенні резонансної частоти ( $\Delta f$ ) від резонансної частоти ( $f_r$ ), коли додаткова маса ( $\Delta m$ ) осідає на сенсорній плівці. Цю залежність можна виразити так:

$$\frac{\Delta f}{f_r} = -\frac{\Delta m}{M} \quad (1.5)$$

де  $\Delta f$  – частотний зсув, викликаний поглинанням пари, а  $f_0$  – частота SAW.

#### 1.4 Ємнісні датчики вологості

Типовий датчик вологості SAW працює за допомогою радіочастотних підсилювачів із з'єднувачем. Частота коливань контролюється за допомогою лічильника частоти. Хоча ці датчики є відносно чутливими, нестабільність осцилятора може створити проблеми в практичних застосуваннях. Як правило, співвідношення  $\Delta f/f_0$  датчика вологості SAW збільшується від 0 до 22 ppm, коли відносна вологість змінюється від 0% RH до 85% RH, коли використовується чутлива мембрана з поліетинілфлуоренолу (PEFL). Зрозуміло, що ця чутлива мембрана забезпечує високу чутливість до вологості. Відзначено, що також повідомлялося про плівки з ацетату целюлози,<sup>20</sup> плівки з гексаметилдисилоксану (HMDSO) і полімер-подібного гідрогенізованого аморфного вуглецю (aC:H),<sup>21</sup> тонку плівку кераміки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,<sup>22</sup> плівку з полівінілового спирту (PVA)<sup>23</sup> та інші полімерні плівки<sup>24</sup>. як чутливі мембрани.

Приблизно 75% датчиків вологості на сьогоднішньому ринку базуються на ємнісній техніці. Ємнісні датчики вологості мають ряд переваг, зокрема дуже низьке енергоспоживання та високі вихідні сигнали. За допомогою цих датчиків рівень відносної вологості навколишнього середовища вимірюється шляхом виявлення спричинених вологістю змін діелектричної проникності гігроскопічного шару. Як правило, ємнісні датчики вологості складаються з двох електродів, вкритих діелектричним шаром, чутливим до змін вологості (рис. 1.5) (та наведено в додатку А рис.2). Виміряні значення ємності демонструють нелінійну залежність від відносної вологості. Story et al. [17] використовували поліімідну плівку (DuPont 5878) як чутливий до вологи шар. Хоча тонка поліімідна плівка (2 мкм) забезпечує вищу чутливість (27 fF/%RH),

серйозний гістерезис виникає при високих значеннях RH. Гістерезис є загальною проблемою для практично всіх типів ємнісних датчиків вологості через повільніший час дифузії чутливих до вологи плівок під час осушення.

Інші матеріали, такі як PMMA пориста кераміка, [30–32] пористий кремній, [33–36] пористий карбід кремнію та гігроскопічні полімери [27,38] також використовувалися як матеріали, чутливі до вологи. Nahar et al. [30,31] представили високочутливі датчики вологості з використанням пористих тонких плівок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Laville і Pellet [38] запропонували міжпальцеві датчики вологості, що містять поліімідний чутливий шар із плазмовим травленням. Тонкі поліімідні плівки демонструють низьку чутливість до вологості (4 pF/%RH) при 0% < RH < 70% і високу чутливість (75 pF/%RH) при 70% < RH < 90%. Повідомлялося, що плівки з тонким чутливим шаром підвищують чутливість датчиків вологості.

Таблиця 1.2 – Огляд методів трансдукції для гравіметричних датчиків вологості

Year	Authors	Design	Materials	Output	Remarks
1984	Wholtjen	SAW	Piezoelectric materials	Frequency	Piezoelectric effect
1994	Glück et al.	Cantilever	PVDF	Frequency	Resonant sensor
1996	Vetelino et al.	SAW, IDE	Al, ST-quartz	Frequency	Dew point detection
1997	Caliendo et al.	SAW, IDE	CIMs	Frequency	Study of materials
	Galipeau et al.	SAW, IDE	Polyimide, ST-quartz	Frequency	SAW sensors
	Radeva et al.	QCM, thick film	Fullerene	Frequency	Study of materials
1999	Braga et al.	SAW, IDE	Cellulose acetate film	Frequency	Thick-film technology
2000	Jain et al.	Magnetoacoustic, IDE	Ferromagnetics	Frequency	Remote sensing
	Penza and Cassano	QCM, IDE	Polymers (PVA)	SAW-phase	Hybrid PLL electronics
2004	Bruno et al.	STW resonator, IDE	HMDSO, a-C:H films	Frequency	Surface transverse acoustic wave

Щоб зменшити серйозні проблеми гістерезису, Fürjes et al. [36] інтегрували внутрішній нагрівач поверх чутливого до вологи шару. Проте явище гістерезису все ще залишається проблематичним. Повідомлялося про використання пористого кремнію як мініатюрного матеріалу для датчика вологості. Наприклад, Björkqvist та ін. [35] розробили ємнісний датчик вологості з використанням термічно карбонізованого пористого кремнію (TC-PS) при кімнатній температурі. У їх дослідженні довготривала стабільність пористого кремнію була покращена термічним окисленням, оскільки утворилася стабільна поверхня термічно карбонізованого PS. Незважаючи на хорошу чутливість у широкому діапазоні відносної вологості та чудову повторюваність, гістерезис вище 60% відносної вологості все ще спостерігався. Пористий SiC також використовувався для вимірювання вологості в суворих умовах хімічних середовищ.

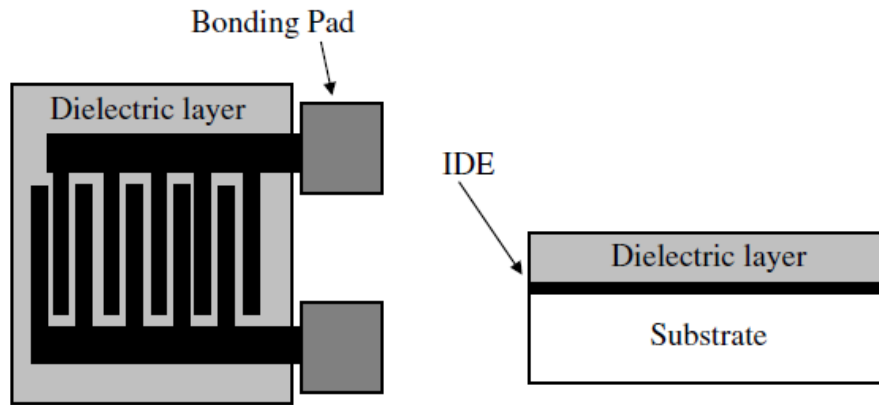


Рисунок 1.5 – Ємнісні датчики вологості з міжштифтовими електродами. Як правило, ємнісні датчики вологості складаються з двох міжштифтових електродів (IDE), покритих шаром діелектрика, який чутливий до зміни вологості

Наприклад, Конноллі та ін. [37] використовували SiC-мембрану та електроди з алюмінію замість Au, який зазвичай використовувався у звичайних датчиках вологості, тому виготовлення було більш зручним для чистих приміщень і сумісним із процесом CMOS. Полімерні матеріали також використовували для вимірювання вологості. Наприклад, Matsuguchi та ін. [29] розробили ємнісний датчик вологості на основі полі(метилметакрилату) (PMMA), зшитого дивінілбензолом (DVB). Завдяки жорстким поперечно-зшитим структурам у полімері було попереджено необоротне збільшення об'єму чутливих шарів, спричинене набуханням, що покращило довготривалу стабільність ємнісних датчиків вологості.

Як правило, кераміка має такі переваги, як висока механічна міцність і здатність правильно функціонувати при високих температурах. Кераміка, яка використовується для вимірювання вологості, включає  $MgCr_2O_4$ ,  $TiO_2$  та  $Al_2O_3$ . Порівняно з керамікою, полімери легше застосовувати для сенсорних пристроїв і вони більш сумісні зі стандартною технологією виробництва ІС. Типові гігроскопічні полімери включають ацетат целюлози, поліметилметакрилат, поліімід, [39–41] плазмополімеризований гексаметилдисилазан (HMDSN)<sup>42</sup> і полієфірсульфен. Наприклад, Гу та ін. [31] повідомили про ємнісний датчик вологості, інтегрований з полікремнієвим нагрівачем за допомогою процесу CMOS. Матеріал датчика вологості, поліімід, був нанесений на етапі постобробки після виготовлення стандартної CMOS. Показано, що вбудований нагрівач здатний підвищити швидкість десорбції вологи та усунути летючі домішки. У їх дослідженні спостерігався швидкий час відгуку (10 с).

Систематичні дослідження показали, що вологість навколишнього середовища має значний вплив як на електричні, так і на механічні властивості полііміду. При використанні масової поліімідної плівки як сенсорного матеріалу вологість зазвичай визначається за допомогою вимірювань ємності, і між вихідного сигналу та відносної вологості. Повідомляється про зміну нормалізованої ємності на 25–28%, коли значення відносної вологості збільшується від 0–100%.<sup>46</sup> Деякі модифіковані поліімідні плівки використовують тривимірні мікроструктури для збільшення також повідомлялося про покращення чутливості вимірювання.

В останні роки були розроблені інші конструкції ємнісних датчиків вологості. Наприклад, Чакраборті та ін. [29] запропонували чутливий до вологи польовий транзистор (FET) із використанням затворних структур SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Харпстер та ін. [40] розробили пасивний бездротовий датчик вологості, що складається з гальванічної мідної котушки для бездротової роботи та поліімідної плівки для вимірювання вологості. Тонку плівку дивінілсилоксанбензоциклобутену (BCB) використовували як чутливий до вологи шар із чутливістю 0,1 pF/%RH та швидким часом відгуку 650 мс. Датчики вологості на основі наноструктурованих вуглецевих плівок, створених надзвукним кластером також було представлено осадження променя. Повідомлялося про чутливість 0,1–0,5 pF/%RH в діапазоні відносної вологості 10–70%. Наноструктуровані вуглецеві плівки були отримані з використанням чистого гелію як буферного газу в імпульсному мікроплазмовому кластерному джерелі (PMCS).

Останнім часом нова технологія MEMS (мікроелектромеханічні системи) і методи мікрообробки мали значний вплив на мініатюризацію датчиків. Ці методи сприяли розробці нових вимірювальних приладів мікромасштабу, здатних отримувати доступ до інформації швидким і точним способом. Важливо, що функціональність і надійність цих мікродатчиків можна підвищити за рахунок їх інтеграції з розвиненими логічними ІС (інтегральними схемами) пристроями та іншими датчиками. У багатьох попередніх дослідженнях повідомлялося про розробку та застосування технологій MEMS для виготовлення датчиків вологості мікророзміру. Наприклад, Lee та ін. розробили новий процес виготовлення детекторів температури (RTD) на платинових резисторах і мікрокантилеверів, покритих водопоглинаючим поліімідним шаром. Потім ці пристрої були включені у вбудований датчик вологості як мікродатчик температури та мікроємнісний датчик вологості відповідно (рис. 1.6).

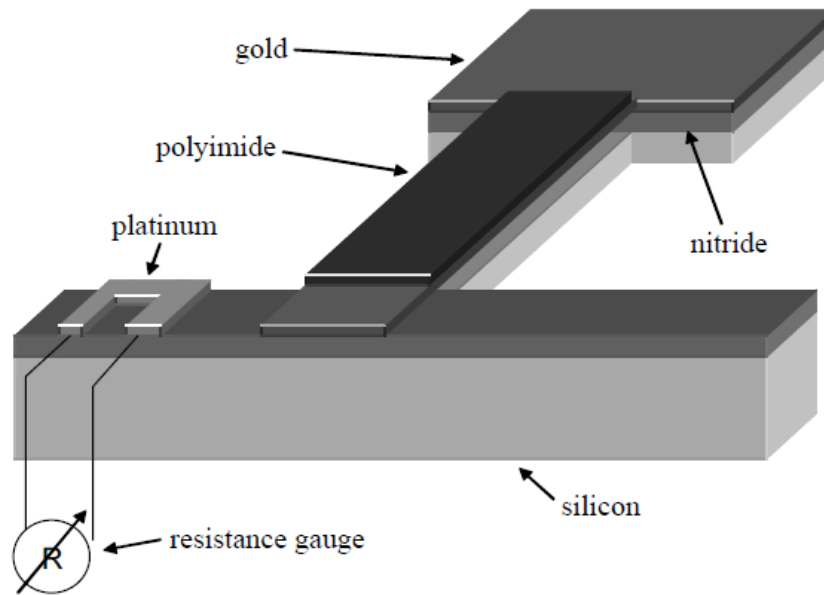


Рисунок 1.6 – Схематичне зображення інтегрованого датчика вологості та датчика температури. Поглинання молекул води спричиняє розширення верхнього шару кантилевера, отже, викликаючи поверхневу напругу розтягування. У результаті кантилевер згинається вгору, викликаючи помітну зміну ємності

Вбудовані мікросенсори вологості забезпечують вимірювання ємності, необхідної для миттєвого визначення вологості. Між тим, інтегровані мікродатчики температури дозволяють температурну компенсацію вимірювання вологості, надаючи сигнали температури на датчики вологості. Після компенсації дрейфу температури значення вологості можна точно визначити за вимірними сигналами опору та ємності. Експериментальні дані свідчать про високу стабільність ( $< 0,8\%$ ), малий гістерезис ( $1,9\%$  RH) при високій вологості, високу чутливість ( $2,0 \text{ nF}/\% \text{RH}$ ) і швидкий час відгуку ( $1,10 \text{ c}$ ).

У інтегрованому датчику вологості ємнісного типу рухомий електрод виготовляється шляхом покриття мікроконсольного елемента матеріалом, який поглинає воду під впливом вологості (рис. 1.7). При цьому другий електрод конденсатора закріплюється на скляній підкладці. Шар золота випарюється електронним променем безпосередньо як на рухомій консольній частині датчика, так і на нерухомій скляній підкладці. Поглинання молекул води змушує верхній шар кантилевера розширюватися, а отже, викликає поверхневу напругу розтягування. Це викликає згинання підвішеної конструкції вгору від скляної підкладки, що змінює ємність між двома структурами.

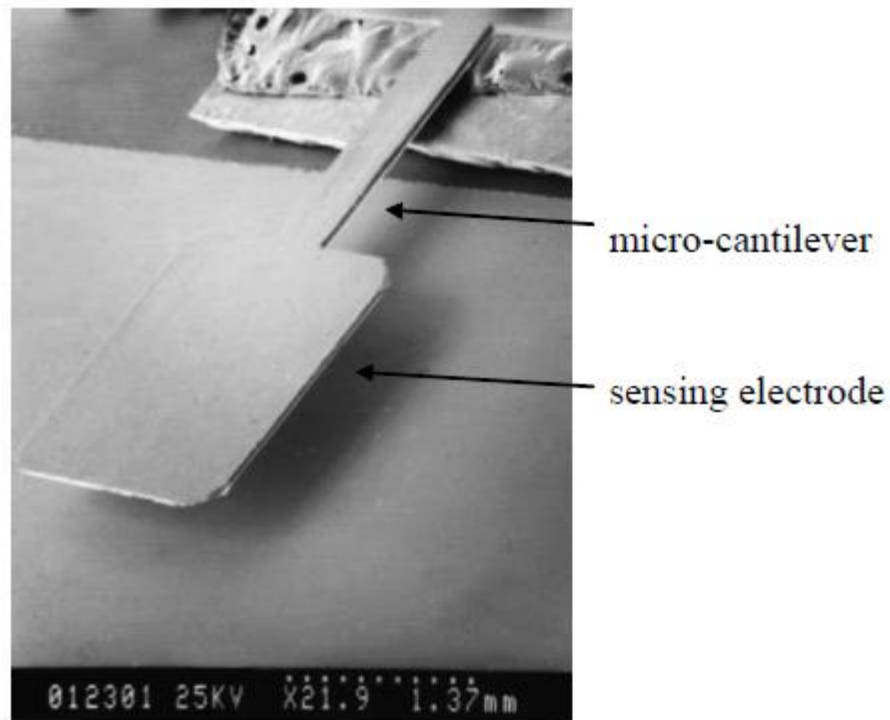


Рисунок 1.7 – SEM фотографічне зображення кантилевера, виготовленого для вбудованого датчика вологості

У попередніх дослідженнях було зазначено, що датчики ємнісного типу з полімерним чутливим шаром можуть виявляти проблеми гістерезису вологості. В ідеалі, датчик повинен слідувати тому самому шляху ємності, коли вологість збільшується або зменшується. Однак на практиці для більшості датчиків вологості спостерігається невеликий ступінь вимірювання опору гістер-платини на основі нітриду кремнію, тобто шляхи ємності для збільшення та зменшення вологості певною мірою відрізняються. У дослідженні Лі температуру підтримували на рівні 25 °C, а вологість підвищували з 45% RH до 95% RH протягом 30 хвилин, а потім осушували до 45% RH з тією ж швидкістю. Результати показали, що датчик вологості має гістерезис 1,9% RH при високій відносній вологості (>65%RH) і значення 0,9% RH при низькій відносній вологості (<65%RH). Слід зазначити, що ці значення менші, ніж ті, про які повідомлялося в попередніх дослідженнях.<sup>27,80</sup> Загалом, ємнісні датчики вологості є найбільш поширеними комерційно доступними датчиками вологості. Незважаючи на такі властиві їм недоліки, як гістерезис, повільний час відгуку, низькі вихідні сигнали (пФ) і залежність від температури, вони продовжують бути предметом інтенсивних зусиль у розробці через їхню високу чутливість і низьку вартість виготовлення. У таблиці 1.3І підсумовано конструкцію та матеріали, що використовуються для різних ємнісних систем



вимірювання вологості.

Таблиця 1.3 – Огляд методів трансдукції для ємнісних датчиків вологості

Year	Authors	Design	Materials	Output	Remarks
2000	Narhar	Al-porous Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Au	Porous alumina	Capacitance	Pore-widening model incorporation
	Kang and Wise	Integrated Poly-Si heaters	Polyimide film	Capacitance	Easy to be reset during self-tests
2001	Dokmeci and Najafi	Polyimide sensing layer	Polyimide film	Capacitance	Good linearity
2002	Laville and Pellet	Etched sensing layer	Polyimide film	Capacitance	Investigation of materials and thicknesses
	Yang et al.	Au-polyimide-Au	Polyimide film	Capacitance	Humidity admittance square holes in sensing films
	Harpster et al.	Remote antenna	Polyimide film	Capacitance	Wireless operation
	Harrey et al.	Parallel-plate electrodes	Polyimide and PES films	Capacitance	Offset lithographic printing process
2003	Das et al.	IDE, signal compensation	Porous silicon	Capacitance	Good linearity at high RH range
	Fürjes et al.	IDE, internal heaters	Porous silicon	Capacitance	Refreshing thermal cycles
	Laconte et al.	3-layer patterned sensing film	Polyimide film	Capacitance	High sensitivity output
	Tételin et al.	Parallel-plate electrodes	BCB thin film	Capacitance	Rapid time response
	Kraus et al.	Plasmapolymerization	HMDSN	Capacitance	Application of HMDSN
	Lee and Lee	Movable electrodes	Polyimide	Capacitance	Temperature sensors for signal drift compensation
2004	Björkqvist et al.	Thermally carbonized PS	Porous silicon	Capacitance	Good long-term stability
	Connolly et al.	Al electrodes	Porous SiC	Capacitance	Suitable for harsh environments
	Gu et al.	Post-processed polyimide	Polyimide film	Capacitance	CMOS fabrication process
	Dabhade et al.	IDE	PMMA	Capacitance	Plasma-treated polymer
	Matsuguchi et al.	Cross-linked structure	PMMA	Capacitance	Improvement of long-term stability
	Bruzzi et al.	Nano-structured carbon films	ns-C films	Capacitance	Supersonic cluster beam deposition

### 1.5 Резистивні датчики вологості

Механізм трансдукції резистивних датчиків вологості передбачає зміни провідності, спричинені адсорбцією водяної пари. Як правило, датчики цього типу використовують три основні категорії матеріалів:

- (1) кераміку,
- (2) полімери
- (3) електроліти.

Базова конфігурація цих датчиків нагадує конфігурацію ємнісних датчиків вологості, за винятком того, що шари діелектрика замінені шарами, чутливими до провідності.

У багатьох попередніх дослідженнях використовувалися оксиди металів зі структурою губнериту та шпінелі, такі як

WO<sub>3</sub>, PbWO<sub>4</sub>, MoO<sub>3</sub>, ZrTiO<sub>3</sub>, LaFeO<sub>3</sub>, ZnWO<sub>4</sub>,

композит WO<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

композит ZnO-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, легований K<sub>2</sub>O Ba<sub>0,5</sub>Sr<sub>0,5</sub>TiO<sub>3</sub>, Sm<sub>1-x</sub> Sr<sub>x</sub> CrO<sub>3</sub>

(0 < x < 1), La<sub>1-x</sub> Sr<sub>x</sub> FeO<sub>3</sub> (0,1 < x < 0,4),

MMoO<sub>4</sub> (M Ni, Cu, Pb), Mg<sub>0,5</sub>Cu<sub>0,5</sub>Fe<sub>2-x</sub> M<sub>x</sub> O<sub>4</sub> (x 0 або 0,2, M La або

Ga), Li-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnWO<sub>4</sub>, NiWO<sub>4</sub>,

CoWO<sub>4</sub>, ZnCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, MgCrO<sub>4</sub>, TiO<sub>2</sub>, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, гематит, ZnO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> тощо.

Наприклад, Qu і Meyer представили товстоплівковий пористий керамічний шар MnWO<sub>4</sub>, затиснутий міжпальцевими металевими плівками. Сундарам і Нагараджа використовували композити PbWO<sub>4</sub> і WO<sub>3</sub> для вимірювання вологості. У їх дослідженні спостерігалася висока чутливість і швидка реакція. Композити MMoO<sub>4</sub> (M Ni, Cu, Pb) і MoO<sub>3</sub> також повідомляли про свої хороші характеристики визначення вологості. Керамічний товстоплівковий датчик вологості з хорошою чутливістю до вологості був продемонстрований з використанням емульсії порошоків титану на низькій швидкості. Техніка спін-покриття. Незважаючи на те, що ці датчики залежать від вологості, опір цих датчиків зазвичай зменшується з температурою навколишнього середовища. Вплив температури може спричинити дрейф сигналу, що є серйозною проблемою для цього типу датчика вологості.

Ying et al. [41] представили датчик вологості на основі керамічних тонких плівок TiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O-LiZnVO<sub>4</sub>, виготовлених за допомогою золь-гель техніки. Чудові властивості чутливості до вологості були досягнуті в діапазоні 10–90% відносної вологості. Золь-гель BaTiO<sub>3</sub>, золь-гель плівки кремнезему, синтезовані блок-сополімерами, золь-гель легований стронцієм титанат свинцю-цирконію (PS<sub>x</sub> Z<sub>0,3</sub>T<sub>0,7</sub>O<sub>3</sub>, x = 0,1–0,5) та золь-гель оксид титанату хрому (Cr<sub>2-x</sub> Ti<sub>x</sub> O<sub>3</sub>, x 0,05–0,4) також використовувалися як чутливі до вологи шари. Було встановлено, що контроль розмірів, форми та розподілу пор у цих матеріалах був вирішальним для виготовлення мезоструктурованих тонкопліткових датчиків вологості. Використовуючи ді-блок, три-блок або зірчастий блок, були сформовані 2-вимірні гексагональні мезопористі фази в кремнеземі та продемонстровані хороші показники визначення вологості. Нері та ін. [45] повідомили про низькотемпературний золь-гель синтез хрому. оксид титанату (СТО) для чутливого матеріалу резистивних датчиків вологості. Було також досліджено вплив рівня легування основного матеріалу на продуктивність вимірювання вологості. Використовуючи золь-гель техніку з алкаоксидів, Ansari et al. підготували наночастинки PS<sub>x</sub> Z<sub>0.3</sub>T<sub>0.7</sub>O<sub>3</sub> (x 0.1–0.5), прожарені при різних температурах від 500 до 700 °C. Підвищуючи рівень легування Sr (0.1 M–0.5 M), ширина забороненої зони вольт-амперної (IV) характеристики була зменшена.

Таблиця 1.4 – Огляд методів трансдукції для резистивних датчиків вологості

Year	Authors	Design	Materials	Output	Remarks
2000	Qu et al.	Thin-film technology	MnWO <sub>4</sub>	Resistance	Fast time response
	Ying et al.	Ceramic application	TiO <sub>2</sub> -K <sub>2</sub> O-LiZnVO <sub>4</sub>	Impedance	Sol-gel processed
	Sakai et al.	Cross-linking and quaternization	PCMS	Impedance	Study of materials
2001	Su et al.	Thick-film technology	Poly-AMPS modified with TEOS	Impedance	Low hysteresis and high linearity
2002	Lee et al.	Epoxy resin formation	GTMAC	Impedance	Study of materials
	Raj et al.	Composite materials	ZnMoO <sub>4</sub> and ZnO	Resistance	Study of materials
	Arshak et al.	Composite materials	MnO, ZnO and Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Resistance	High reliability
	Wang et al.	Composite materials	Nanocrystal BaTiO <sub>3</sub> -RMX	Resistance	Study of materials
	Li and Yang	Salt doping	Poly(2-propyn-2-furoate)	Impedance	Study of materials
	Gong et al.	Cross-linked poly-electrolyte	Mutually reactive copolymers	Impedance	Study of materials
	Gong et al.	Electrolyte application	Cross-linked copolymers	Resistance	Study of materials
	Son et al.	Phosphonium salt-containing	VTBPC	Resistance	Study of materials
	Li and Yang	Bilayer thin film	Polymers	Impedance	Study of materials
	Suri et al.	Nano-composite materials	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -polypyrrole	Impedance	Study of materials
Yang et al.	IDE	Polymer electrolytes	Impedance	Study of materials	
Park et al.	Mutually reactive copolymers	Gel polyelectrolyte	Impedance	Study of materials	
Varghese et al.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Pt	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> thin film	Impedance	Investigation of pore size and uniformity of sensing layers	
2003	Pokhrel et al.	Metal oxide application	WO <sub>3</sub> and MoO <sub>3</sub>	Resistance	Non-linear relationship at high RH range
	Cosentino et al.	Ceramic application	ZrTiO <sub>3</sub>	Impedance	Non-linear relationship at high RH range
	Neri et al.	Metal doping	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> doped Li or Au	Resistance	Investigations of metal dopings
2004	Sundaram et al.	Metal oxide application	WO <sub>3</sub> and PbWO <sub>4</sub>	Resistance	Non-linear relationship at high RH range
	Sundaram et al.	Composite materials	WO <sub>3</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> composite	Resistance	Solid state electrical conductivity measurement
	Sundaram et al.	Ceramic application	MMoO <sub>4</sub> (M = Ni, Cu, Pb)	Resistance	Solid state electrical conductivity measurement
	Sundaram et al.	Ceramic application	Sm <sub>1-x</sub> Sr <sub>x</sub> CrO <sub>3</sub> (0 ≤ x ≤ 1)	Impedance	Microwave assisted synthesis

Було встановлено, що концентрація легуючої речовини 0,5 M Sr є оптимальною умовою, придатною для вимірювання відносної вологості в діапазоні 20–100% RH, що забезпечує високу чутливість і низьку висоту бар'єру. Однак проблема дрейфу температури все ще була очевидною. Arshak та ін. розробили товстоплівковий резистивний датчик вологості, використовуючи комбінацію MnO, ZnO та Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Було показано, що цей датчик має високу лінійність, менший гістерезис (0,35% RH) і швидкий час відгуку (11–28 с). Varghese та ін. повідомили про вплив розміру пор і однорідності на продуктивність чутливості для нанопористих плівок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Повідомлялося, що реакція матеріалу на вологість була сильною функцією розміру пор і робочої частоти. Для нанопористих плівок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> із середнім розміром пор 13,6 нм повідомлялося про правильну зміну імпедансу більш ніж на три порядки величини від 20% до 90% RH. Завдяки простоті виготовлення, низькій вартості та регульованим властивостям полімерні матеріали мають

значний потенціал для застосування в датчиках вологості. Баркаускас розробив резистивний датчик вологості, використовуючи чутливу плівку, виготовлену з PVA (полівінілового спирту) та графітизованого автомобіля - дисперсна фаза bon black. Експериментальні дані показали чутливість 8 Ом/%ВВ при кімнатній температурі та 5 Ом/%ВВ при 100 °С. Однак час відгуку цього датчика становить 45 секунд, що повільніше, ніж у датчика керамічного типу. Wang et al. продемонстрували датчик вологості з використанням нафіону в різних іонних формах (H<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup> та Na<sup>+</sup>), виготовлених за допомогою техніки лиття. Було показано, що вміст катіону в нафіоні має значний вплив на чутливі властивості плівки. Su та ін. представили резистивний датчик вологості, виготовлений за допомогою технології товстої плівки з використанням полі (2-акриламідо-2-метилпропансульфонат) (poly-AMPS), модифікованого тетраетилортосилікатом (TEOS) як сенсорний матеріал. Цей датчик був простим у виготовленні та демонстрував знижений ступінь гістерезису (<2%), хорошу лінійність (R<sup>2</sup> 0,9989) при рівнях вологості в діапазоні 30–90% відносної вологості, тривалу стабільність і задовільну стійкість до атмосфери з високою вологістю. (наприклад, 95% RH). Fratoddi та ін. [90] досліджували датчики вологості резистивного типу на основі двох полі(монозаміщених) ацетиленів, а саме полі(N,N-диметилпропаргіламін) (Pd-PDMPA) і полі(пропаргілалкоголь) (PPOH). Ці датчики показали реакцію, яку можна виявити, на відносну вологість лише 2% і варіацію на п'ять порядків величини в діапазоні відносної вологості 0–90%.

Керамічні/полімерні композитні тонкі плівки також використовувалися для оптимізації роботи резистивних датчиків вологості. Наприклад, Feng та ін. підготували композитні тонкі плівки SiO<sub>2</sub>/Nafion за допомогою лиття та занурення. способи покриття. Продуктивність плівкових датчиків Nafion визначається міграцією іонів водню через плівку. При високій відносній вологості загальний імпеданс включає внесок фарадичного імпедансу на межі електрод-плівка. Використання композитної плівки SiO<sub>2</sub>/Nafion дозволяє суттєво зменшити фарадичний імпеданс, отже, забезпечуючи покращену лінійність відгуку датчика. Чоу та ін. [45] досліджували датчик вологості з пористою керамікою, виготовленою з керамічного волокна, каоліну та натрієвої солі карбоксиметилцелюлози (СМС). Показано, що провідність змінюється на 4–5 порядків величини, коли RH змінюється від 10 до 90%. Крім того, повідомлялося, що час відповіді становить 5–8 хв для значень RH від 10 до 90%. Wang та ін. повідомили про композиційний матеріал із датчиком вологості, що складається з нанокристалічного BaTiO<sub>3</sub> і полімерного

полістиролсульфонового натрію (PSS). Датчики вологості BaTiO<sub>3</sub>/PSS мають хороші характеристики чутливості та лінійності в діапазонах відносної вологості 33–98%, а максимальний гістерезис вологості становить 8% відносної вологості. Крім того, час відгуку та час відновлення цих датчиків становить 50 та 120 секунд відповідно. Очевидно, що ця продуктивність є значним покращенням порівняно з попередніми полімерними сенсорними матеріалами. Su і Tsai використовували композитний матеріал із нанорозмірного SiO<sub>2</sub> і полі(2-акриламідо-2-метилпропансульфонат) (poly(AMPS)), щоб виготовити резистивний датчик вологості. Датчик показав незначний гістерезис і швидку реакцію на зволоження та осушення. Застосування нанорозмірних матеріалів значно покращило гістерезис.

У міру збільшення вологості залежна від вологості зміна об'єму поліімідного шару викликає деформацію біморфу підкладки з поліімідним містком і, отже, призводить до вигину пластини, який потім перетворюється на вихідну напругу інтегрованим п'єзрезистивним мостом. Sakai та ін. [53–56] розробили датчики вологості резистивного типу, використовуючи чутливі до вологи та водостійкі поліметричні матеріали, такі як кватернізований вінілпіридин та сополімери стиролу, частково кватернізований полівінілпіридин, політетрафторетилен, щеплений кватернізованим полівінілпіридином, полівінілпіридин зшитий з дибромбутаном, полі(2-гідрокси-3-метакрилоксипропіл-триметиламоній хлорид), зшитий гексаметилендіізоціанатом, одночасно зшитий і кватернізований поліхлорметилстирол (PCMS). Ці сенсори продемонстрували відмінну водостійкість і високу чутливість до вологості. Gong et al. запропонували датчики вологості з використанням зшитого поліелектроліту, виготовленого з взаємно реакційноздатних співполімерів, що містять сіль фосфонію. Ці датчики показали середній опір 725, 43 і 3,1 кОм при 30, 60 і 90% RH відповідно.

Також було виявлено, що вони порівняно стійкі до води. Lee et al. запропонували два типи резистивних датчиків вологості з використанням епоксидної смоли, що містить солі четвертинного амонію та поліелектроліти на основі взаємно зшиваючих кополімерів нового типу. Імпеданс останнього типу змінюється від 755 до 2,52 кОм в діапазоні вологості від 30% до 90% RH. Методи зшивання забезпечують ефективний засіб покращення стійкості до води та забезпечення довготривалої стабільності (300 днів).

Крім того, ці пристрої мають швидкий час відгуку, зазвичай менше 75 секунд, коли вологість різко змінюється з 33 до 94% RH. Використовуючи синтезовані на місці неорганічні/органічні наноккомпозити полістирол-

несульфонату натрію (NaPSS) і ZnO, Лі та ін. розробили тонкоплівкові датчики вологості з чутливістю чотирьох порядків понад 11–97% RH, малим гістерезисом (менше 2 % RH) і швидким часом відгуку (абсорбція: 2 с, десорбція: 2 с). Також було повідомлено про кондуктометричний датчик вологості на основі протонопровідного оксиду перовскіту ( $\text{Ba}_3\text{Ca}_{1.18}\text{Nb}_{1.82}\text{O}_9\text{-BCN18}$ ). Щільні та пористі зразки оксиду перовскіту з дефіцитом кисню були виготовлені шляхом спікання порошкових компактів із кальцинованих порошоків. Було виявлено, що пористий матеріал мав у 5–6 разів більш швидкий часовий відгук, ніж щільний матеріал. Відносно швидка реакція пористого матеріалу свідчить про перспективний кондуктометричний датчик вологості на основі пористого BCN18 як хороший чутливий матеріал. Структури метал-ізолятор-напівпровідник (MIS) на основі пористого кремнію (PS) використовувалися як матеріали для визначення вологи. Було вивчено механізм вимірювання вологості. Вольт-амперні (IV) характеристики цих матеріалів можна використовувати для вимірювання вологості.

Як правило, резистивні датчики вологості пропонують переваги простих електричних схем, високої чутливості та гарної лінійності. Однак гістерезис вологості є проблемою, коли ці датчики використовуються на періодичній, а не безперервній основі. Крім того, чутливі матеріали мають відносно повільну реакцію, і довготривала стабільність пристрою може бути гарантована лише безперервною роботою та ретельним обслуговуванням. Хоча матеріали, чутливі до вологості, все ще знаходяться на стадії розробки, комерційно доступні резистивні датчики вологості, як правило, виготовляються з полімеру або пористої кераміки. Технологія товстої плівки є бажаною для масового виробництва резистивних датчиків вологості через її економічну ефективність, міцність і гнучкість конструкції пристрою. Таблиця 1.4 підсумовує конструкцію та матеріали, що використовуються для різних систем резистивного датчика вологості.

### 1.6 П'єзорезистивні датчики вологості

П'єзорезистивні матеріали знайшли широке застосування в сенсорах, виготовлених людиною. У наш час трансдукція від вологості повітря через механічну область є зрілим методом вимірювання. Як правило, у п'єзорезистивних датчиках вологості використовується підвісна структура, покрита водопоглинаючим шаром (рис. 8) (та наведено в додатку А рис.3). Плівки на основі полімерів мають водопоглинання 2–6%, що забезпечує

коефіцієнт об'ємного розширення приблизно  $5,5 \cdot 10^{-5} / \%RH$ . П'єзорезистори використовуються для виявлення вигину цієї структури, спричиненого змінами вологості.

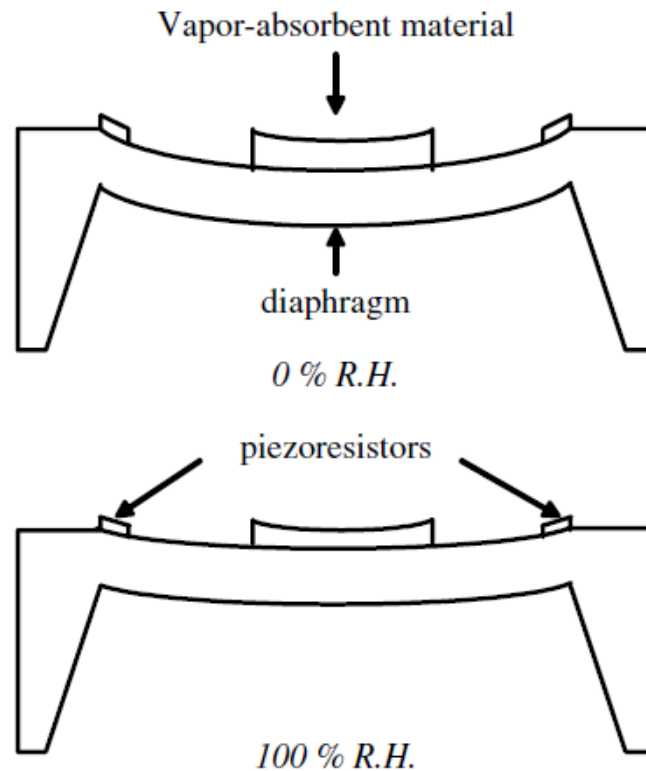


Рисунок 1.8 – Загальні схеми п'єзорезистивних датчиків вологості. У пристрої мембранного типу використовуються п'єзорезистори, розміщені на верхній частині діафрагми

Buchhold et al. застосували п'єзорезистори, розташовані на верхній частині діафрагми, покритої шаром полііміду. Зі збільшенням вологості залежна від вологості зміна об'єму поліімідного шару викликала деформацію біморфу підкладки з поліімідним містком і, отже, викликала вигин пластини, який потім перетворювався на вихідну напругу інтегрованим п'єзорезистивний міст. Показано, що чутливість п'єзорезистивних датчиків вологості з резисторами, розташованими по периферії діафрагми, суттєво не залежить від форми діафрагми. Отже, специфікація форми діафрагми може ґрунтуватися виключно на технологічних міркуваннях.

Sager та ін. досліджували залежність від вологості. Основна складність у розробці п'єзорезистивних датчиків вологості полягає в забезпеченні адекватного теплового зв'язку для забезпечення точного контролю температури. Крім того, як і в інших типах датчиків, температурний дрейф є значною проблемою для п'єзорезистивних датчиків вологості. У таблиці 1.5 підсумовано конструкцію та матеріали для різних п'єзорезистивних датчиків

вологості.

Таблиця 1.5 – Огляд методів трансдукції для п'єзорезистивних датчиків вологості

Year	Authors	Design	Materials	Output	Remarks
1994	Sager et al.	Enlargement of sensing surface	Polyimide	Voltage	Experiments and modeling
1995	Schroth et al.	Resonant polyimide-based	Polyimide	Voltage	Volume expansion caused by water absorption
1996	Sager et al.	Piezoresistive sensors	Polyimide	Voltage	Investigation of failure source
	Sager et al.	Humidity-dependent mechanical properties	Polyimide	Voltage	Piezoresistive humidity sensors
1998	Buchhold et al.	Thin-film technology	Polyimide	Voltage	Dependent of diaphragm shapes

### 1.7 Магнітопружні датчики вологості

Зміну частоти магнітопружного резонансу можна використовувати для моніторингу параметрів навколишнього середовища для програм дистанційного запиту. Його також можна використовувати для вимірювання відносної вологості. Механізм трансдукції магнітопружних датчиків вологості заснований на резонансному зсуві частоти магнітного потоку, випромінюваного датчиками, у відповідь на поле величини, що змінюється в часі. Наприклад, Граймс і Кузудіс повідомили про дистанційний датчик вологості, виготовлений шляхом покриття магнітопружної товстої плівки тонким шаром золь-гель нанесеного  $Al_2O_3$ . Крім вологості, інші параметри навколишнього середовища, включаючи температуру, магнітне поле постійного струму, поверхнева напруга, натяг, щільність і в'язкість рідини, переміщення, атмосферний тиск, модуль пружності тонкої плівки, рівень рідин, масове навантаження і швидкість потоку рідини можна контролювати за допомогою магнітопружного датчика. Дистанційне вимірювання хімічних речовин також може бути досягнуто за допомогою типу магнітопружних датчиків, включаючи глюкозу,  $NH_3$ ,  $CO_2$ , і рН.

Механічні властивості поліімідних плівок та їх застосування в п'єзорезистивних датчиках вологості. Показано, що коефіцієнт розширення вологості (CNE) становить приблизно від 60 до 80 ppm/%RH при різних температурах затвердіння поліімиду. Розширення можна використовувати для створення п'єзорезистивних датчиків вологості, які працюють подібно до біметалічних елементів, на які впливає температура навколишнього середовища.

Принцип дії магнітопружних датчиків вологості можна описати



наступним чином. Резонансна частота магнітопружного датчика змінюється у відповідь на масове навантаження в шарах, що сприймають вологість, у той час як змінюється відносна вологість. Зміна маси призводить до резонансного зсуву частоти, який можна представити такою формулою

$$\Delta f = -\frac{f}{2} \frac{\Delta m}{M} \quad (1.6)$$

Таким чином, невеликі зміни маси можна виявити шляхом моніторингу зміщення резонансної частоти магнітопружного датчика. Магнітопружні датчики з шаром вологопоглинаючого та десорбуючого матеріалу можуть бути використані для дистанційного запитального вимірювання вологості. Чутливі до вологи тонкі плівки, включаючи  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , пористий  $\text{TiO}_2$ , та  $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}$  повідомлялося в попередніх дослідженнях.

Мікроелектромеханічна система MEMS (MEMS) — це таблиця 1.6, узагальнена конструкція та матеріали для різних магнітопружних датчиків вологості.

Таблиця 1.6 – Огляд методів трансдукції для магнітопружних датчиків вологості

Year	Authors	Design	Materials	Output	Remarks
2000	Grimes et al.	Remote query	$\text{TiO}_2$ thin film	Resonant frequency	Nanoporous sensing layer
	Barandiaran et al.	Remote query	$\text{Al}_2\text{O}_3$ thin film	Resonant frequency	Sensing of pressure, fluid-flow velocity and humidity
2001	Schmidt et al.	Thermal evaporation of Al and Ag	Al, Ag thin film	Resonant frequency	Investigation of thin-film elastic moduli

## 1.8 Висновки до розділу

Датчики вологості широко застосовуються в моніторингу навколишнього середовища, електроніці, сільському господарстві та біомедичній галузі. Для багатьох застосувань важливим фактором є не тільки вологість, але й температура. Тому існує великий попит на просто виготовлені вбудовані датчики вологості та температури в багатьох галузях.

Технологія мініатюризації сприяла розробці мікросенсорів вологості, які, як правило, використовують паропоглинаючі плівки як свої сенсорні матеріали. Електричні/механічні властивості цих плівок змінюються зі зміною відносної

вологості та ці зміни дозволяють визначити точне значення відносної вологості. Однак розробка датчика, який забезпечує повний набір сприятливих характеристик, все ще залишається складною, наприклад, гарна лінійність, висока чутливість, низький гістерезис і швидкий час відгуку.

У цьому розділі коротко представлено оптичні, гравіметричні, ємнісні, резистивні, п'єзрезистивні та інтегровані датчики вологості. Нові процеси виробництва знаходяться в стадії постійного розвитку в комерційній та дослідницькій сферах. На сучасному ринку зростає потреба в недорогих високонадійних функціональних датчиках вологості. Інтегрований датчик, який обговорюється в цьому оглядовому документі, є відповідним вибором для задоволення цього попиту.

## **2 БЕЗЧИПОВІ ДАТЧИКИ RFID ДЛЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ТА МОЖЛИВІСТЬ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СЕНСОРІВ ВОЛОГОСТІ**

### **2.1 Датчики радіочастотної ідентифікації (RFID)**

Датчики радіочастотної ідентифікації (RFID) є одним із фундаментальних компонентів Інтернету речей, метою якого є підключення кожного фізичного об'єкта до хмари для обміну інформацією. У цій структурі безчипові RFID є проривною технологією, оскільки вони знімають вартість, пов'язану з чіпом, водночас придатні для друку, пасивні, малопотужні та придатні для суворих умов. Після важливих результатів, досягнутих за допомогою багатобітових безчипових міток, є чітка мотивація та зацікавленість розширити функціональні можливості безчипового зондування на фізичні, хімічні, структурні параметри та параметри середовища. Ці можливості викликали сильний інтерес у науковому та промисловому співтоваристві до такого типу застосування. Датчики температури та вологості, а також прототипи локалізації, близькості та структурного стану здоров'я вже були продемонстровані, і незабаром очікується багато інших сенсорних застосувань. У цьому огляді узагальнено як різні архітектурні підходи, доступні для цієї технології, так і вимоги, пов'язані з матеріалами, що використовуються для зондування. Потім повідомляється та обговорюється сучасний стан категорій датчиків та їх застосування. Нарешті, наведено аналіз поточних обмежень і можливих стратегій вирішення цієї технології, а також огляд очікуваних майбутніх розробок.

За останні кілька років ми спостерігаємо різке поширення бездротових технологій. Якщо говорити точніше, технологічний прогрес останніх років проклав шлях для поширення та все більшого поширення технологій бездротових датчиків у рамках Інтернету речей (IoT). IoT — це система, що складається з різномірних пристроїв і організована як мережа. Кожному пристрою (речі) надається унікальний ідентифікатор (UID) і можливість обмінюватися інформацією або передавати дані через бездротову або дротову мережу без участі людини. Повсякденні об'єкти, такі як лампа чи пральна машина, а також тварини та люди, можуть бути частиною мережі IoT, якщо вони мають унікальний ідентифікатор і можуть передавати дані через мережу завдяки радіочастотному інтерфейсу. Річ є одиничним елементом системи IoT і здатна збирати дані зі своїх датчиків, а потім обробляти та обмінюватися даними в бездротовому каналі. Щоб покращити поширеність системи IoT,

терміново потрібні пристрої з високим ступенем мініатюризації, низькою потужністю та низькою вартістю. У такому сценарії використання радіочастотної ідентифікації (RFID) є дуже цікавим і поширеним рішенням для впровадження систем IoT або мереж розподілених датчиків. RFID є досить дешевими, забезпечені унікальними ідентифікаторами та можуть бути оснащені різноманітними сенсорними можливостями. Завдяки цим характеристикам RFID були успішно використані в багатьох практичних застосуваннях, таких як відстеження товарів і продуктів харчування в супермаркетах і магазинах, відстеження книг у бібліотеках, датчики навколишнього середовища [51] і для багатьох застосувань у загальній сфері IoT.

У той час як RFID-чіпи є добре консолідованою технологією з величезним і зростаючим ринком, поточні дослідження зосереджені на пошуку рішень, які забезпечують перевагу з точки зору вартості та компактності [52]. Найкращим варіантом зниження вартості RFID є підхід, який усуває використання чіпа, створюючи пристрій, який тому називається «безчиповим RFID» [53, 54]. Такий пристрій може бути оснащений сенсорними можливостями, залишаючись надзвичайно дешевим, придатним для друку та придатним для масового виробництва та суворих умов [55]. Крім того, його можна зробити одноразовим або біорозкладаним [56], використовуючи відповідні матеріали для його виготовлення.

З усіх цих причин в останні кілька років наукова література приділяла велику увагу цим типам датчиків.

На рис.2.1 (та наведено в додатку А рис.4) показано кількість записів у Google Scholar, що відповідають ключовим словам «безчиповий RFID» і «безчиповий RFID-датчик», зазначений станом на лютий 2020 року. Як видно, у науковому співтоваристві постійно зростає інтерес як до безчипові структури RFID і безчипові датчики на основі RFID. Більш конкретно, інтерес до використання цих пристроїв як датчиків став найцікавішою сферою застосування безчипових технологій RFID.

Безчипові методи RFID можна розділити на дві групи на основі механізмів кодування: у часовій області (TD) [57] або в частотній області (FD) [58]. Безчипові RFID-мітки TD призначені для кодування інформації в області часу. Зазвичай мітки TD реалізуються з використанням структури поширення, такої як мікросмужка, та імпульсного опитувального сигналу, який проходить уздовж структури поширення. Інформація кодується за допомогою розривів у визначених позиціях: наявність розриву кодує значення біта 1, його відсутність є значенням 0. Щоб ідентифікувати положення біта, необхідно враховувати затримку сигналу. Коли електромагнітний імпульс поширюється через підкладку, частина його відбивається в місцях, де є розрив. Такі відображення

перетворюються назад в електромагнітну енергію та повторно передаються на зчитувач.

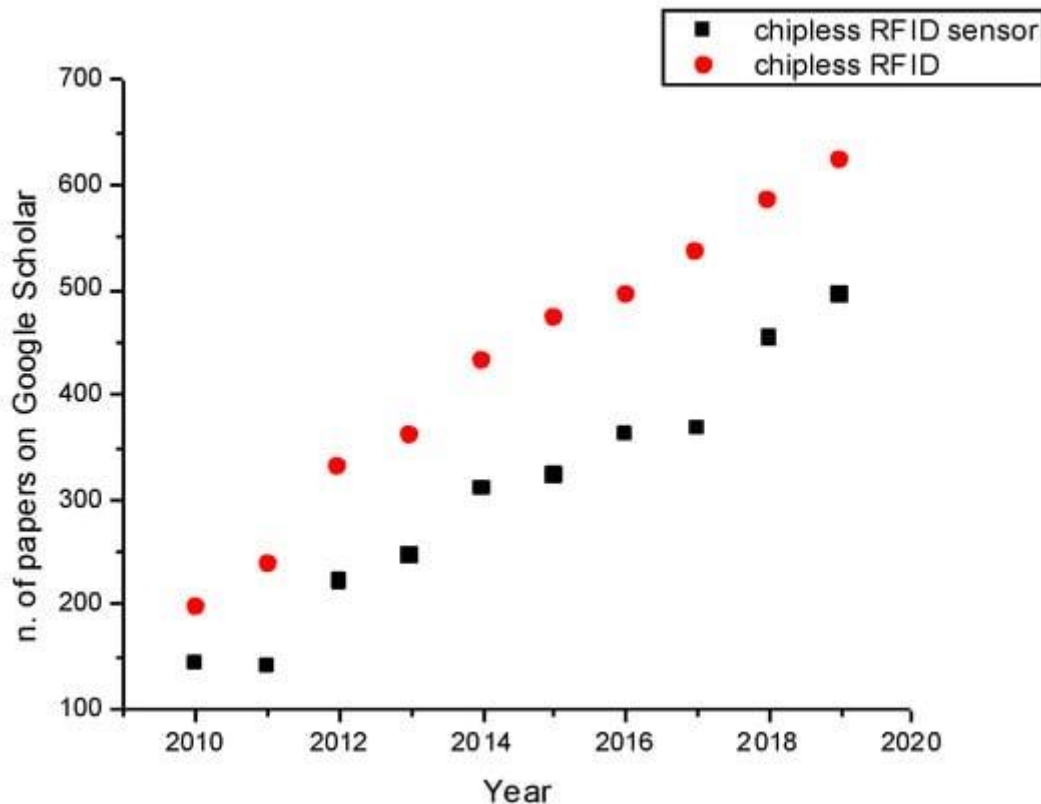


Рисунок 2.1 – Кількість записів за рік у Google Scholar із використанням ключових слів «безчіпова RFID» (радіочастотна ідентифікація) і «безчіпові датчики RFID»

Цей принцип роботи називається рефлектометриєю у часовій області (TDR), а ідентифікатор ідентифікаційного коду представлений луною, створюваною рефлекторами. Існують різні способи впровадження тегів RFID без мікросхем у часовій області. Компактне рішення передбачає використання резонаторів поверхневих акустичних хвиль (SAW), які можуть надавати мітки з великою кількістю бітів (до 256 [59]). Однак вони надто дорогі, щоб бути конкурентоспроможними з іншими рішеннями RFID, оскільки для них потрібні п'єзоелектричні матеріали. Більш дешеве і широко використовуване рішення використовує використання розривів (або відбивачів), розташованих вздовж основної лінії затримки, такої як мікросмужкова лінія. Рефлектори можуть бути реалізовані шляхом введення вигинів, заглушок або зосереджених комплексних опорів, розміщених у визначених положеннях. Зчитувач посилає імпульс, який поширюється через лінію затримки та відбивається в точках, де розташовані розриви. Ідентифікаційний код мітки складається з набору відображень або відлунь, створених розривами мітки.

Проблема з мітками такого типу полягає в тому, що електромагнітні хвилі поширюються вздовж лінії затримки зі швидкістю світла. Щоб створити вимірні затримки між ехо-сигналами, потрібно використовувати дуже короткий імпульс або дуже довгу мітку, щоб уникнути накладання між різними ехо-сигналами. Дуже короткі імпульси досить важко отримати на практиці, а генератор таких імпульсів досить дорогий. Альтернативним рішенням є довга лінія передачі, але результуючі теги є досить великими, тому можливості бітового кодування дуже обмежені для тегів на основі часової області.

Безчиповий тег FD зазвичай реалізується за допомогою кількох резонаторів, налаштованих на різні частоти. Різні частоти, пов'язані з резонаторами, розподіляються в межах заданого діапазону частот. Отже, запитувальний сигнал повинен мати смугу пропускання, яка охоплює всі частоти резонаторів. Ефект резонатора полягає в створенні сингулярностей в амплітуді та/або фазі частотної характеристики мітки. У найпростішому методі кодування кожен біт інформації представлений резонатором. Наявність резонатора кодує біт 1, тоді як його відсутність представляє біт 0. Також були запропоновані більш складні системи кодування [52].

У цьому розділі ми зосередимося лише на безчипових мітках FD. Взаємодія між запитуючою електромагнітною хвилею та міткою вимагає передавальної та приймальної антен, як правило, у крос-поляризованій конфігурації для покращення можливостей бездротового зв'язку мітки, як повідомляється в [58]. Цей тип тегів FD називається тегами на основі ретрансляції [53]. Іншим класом тегів у частотній області є так звані безчипові RFID-мітки з зворотним розсіюванням, де резонансні елементи надають інформацію через спектральну сигнатуру, введена у відгук поперечного перерізу радара (RCS) [52]. Конструкція такого роду міток не вимагає наявності антени, тому розмір мітки сильно зменшений, оскільки містить лише резонатори. Приклад дуже простої зворотно розсіяної мітки складається з кількох диполів зі змінною ємністю, реалізованих на діелектричній підкладці [54]. Метою цієї методики є створення кількох резонансів у смузі пропускання мітки. Подібну поведінку можна отримати не тільки за допомогою диполів зі змінною довжиною, але також і круглих кільцевих резонаторів або інших плоских структур. Основними обмеженнями тегів FD є як пропускна здатність, необхідна для кодування великої кількості бітів, так і кількість резонансних елементів, які необхідно збільшити, щоб збільшити інформацію. Отже, потрібні спеціальні зчитувачі, і компактність мітки втрачається, коли зберігається достатньо інформації. Щоб зменшити або уникнути таких обмежень, кілька дослідників запропонували фрактальні мітки [60] або певні геометрії [61],

здатні зосереджувати велику кількість резонаторів і, в той же час, підтримувати високий коефіцієнт якості.

Обмеження кількості бітів є дуже важливим у програмах відстеження, де безчипові мітки RFID конкурують із технологією штрих-кодів для маркування комерційних продуктів. Міжнародний стандарт вимагає мінімальної кількості бітів, якій ще не відповідають теги FD, і зараз докладаються великі зусилля для досягнення цієї мети.

У сенсорних програмах кількість інформації, що зберігається в тегу, не є критичним параметром. Хоча це правда, що в рамках IoT було б бажано ідентифікувати сенсорну мітку за допомогою UID, це має бути зроблено в закритих мережах і вимагає набагато менше інформації, ніж використовується для відстеження товарів. Крім того, ідентифікацію та зондування можна здійснити за допомогою подібних резонуючих структур на одній мітці. З цих причин безчипові технології RFID у сфері датчиків постійно зростають у кількості та різноманітності.

## 2.2 Безчиповий RFID для поширення Інтернету речей: архітектура системи

У цьому підрозділі наводиться опис двох типів безчипових систем RFID у частотній області. Представлено дві різні структури зчитувачів, а також структуру різних тегів, обладнаних різними резонаторами та структурами зв'язку. Переваги та можливі обмеження різних схем аналізуються та обговорюються, а також потенційні застосування.

### *Структура читача*

На рис.2.2а (та наведено в додатку А рис.5) показано схему класичного бістатичного зчитувача. Складається з передавальної і приймальної секцій. Зчитувач оснащений двома антенами, одна використовується як передавач, а інша як приймач. Передавальна секція складається з синусоїдального генератора безперервної хвилі, як правило, прямого цифрового синтезатора (DDS), щоб гарантувати стабільний частотний сигнал. Сигнал, який надає DDS, розділяється за допомогою нерівного дільника потужності, і майже вся потужність надсилається до підсилювача з високим коефіцієнтом посилення, а потім до передавальної антени для генерації електромагнітної хвилі запиту. Приймач складається з приймальної антени, призначеної для збору відбитої хвилі, повторно переданої міткою. Сигнал передається в базовій смузі через змішувач, щоб отримати модуляцію, введenu тегом. Опорний гетеродин змішувача забезпечується дільником потужності. Після цього сигнал фільтрується за допомогою фільтра низьких частот, посилюється та

обробляється [41] за допомогою пристрою обробки, як правило, мікроконтролера або комп'ютера. Змішувач, фільтр низьких частот і опорна частота являють собою гомодинний детектор [42], здатний отримувати інформацію про амплітуду та фазу. Деякі конфігурації зчитувача не потребують гомодинного приймача, але він є обов'язковим, якщо тег вводить дуже низькочастотну модуляцію. Коли мітка оснащена набором резонаторів з частотами, близькими до частоти запитуючої електромагнітної хвилі, гомодинний приймач можна не використовувати. В останньому випадку сигнал приймається, посилюється та негайно візуалізується або обробляється. Єдиним недоліком таких систем є те, що для них потрібні широкосмугові антени, а генератор повинен бути генератором розгортки, здатним охоплювати всі частоти, охоплені резонаторами. Такі широкосмугові антени та генератори досить дорогі. Іншим недоліком є те, що кількість бітів може бути обмежена розмірами резонаторів. Реальний приклад бістатичного зчитувача, розробленого для роботи в діапазоні X (8–12 ГГц), наведено на рис.2.2б, де система використовує програмований DDS і широкосмуговий приймач (пристрої від компанії Signal Hund, Battle Ground WA, США). Дві антени є двома пірамідальними рупорами з посиленням 17 дБі, реалізованим власними силами.

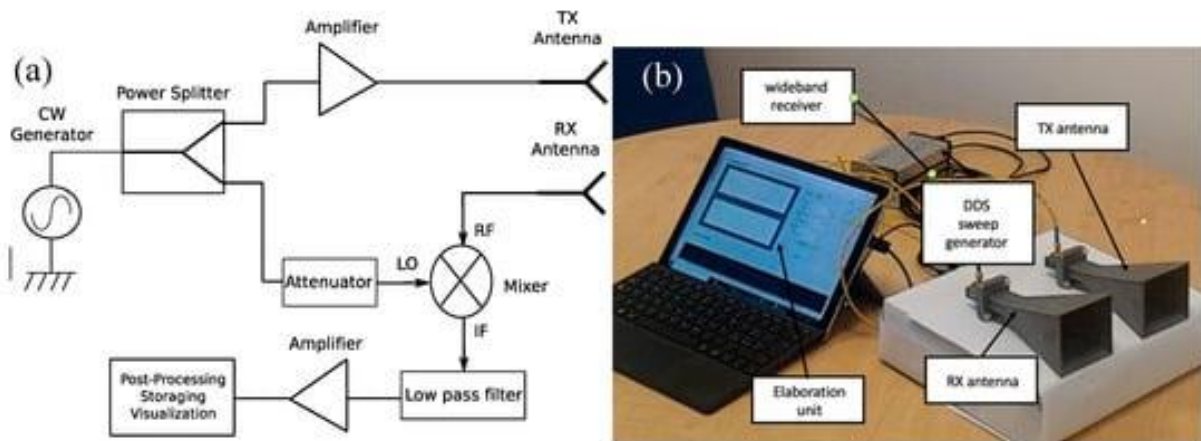


Рисунок 2.2 – ( а ) Схема бістатичного зчитувача. ( б ) Фото прототипу бістатичного зчитувача

Другий вид архітектури зчитувачів показано на рис.2.3а, (та наведено в додатку А рис б), який представляє типову моностатичну схему системи. Зокрема, зчитувач складається з генератора сигналу розгортки, дільника потужності, циркулятора, змішувача, фільтра низьких частот і аналого-цифрового перетворювача. Усі компоненти подібні до компонентів бістатичної схеми, за винятком лише циркулятора. Цей останній компонент є



мікрохвильовим пристроєм із трьома портами, який дозволяє використовувати лише одну антену як у режимі передачі, так і в режимі прийому. Циркуляційний насос дешевший порівняно з іншою антеною.

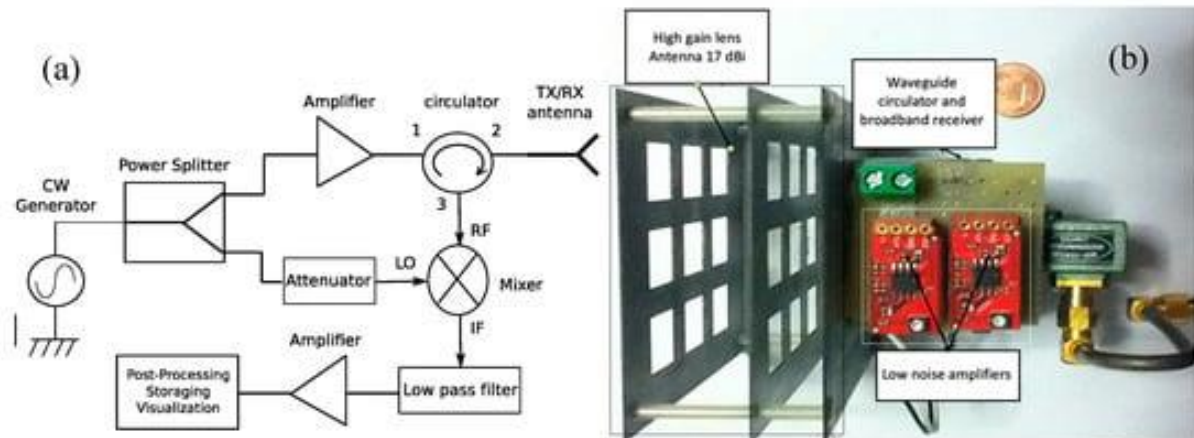


Рисунок 2.3 – ( а ) Схема моностатичного зчитувача. ( б ) Фото моностатичного зчитувача з хвилевідним феритовим циркулятором

Моностатичний зчитувач працює наступним чином: нерівний дільник розділяє потужність, вироблену генератором розгортки, а менша потужність використовується як еталонна для змішувача. Частина розгалужувача, яка обробляє майже всю потужність, вироблену генератором, посилюється та надсилається до порту 1 циркуляційного насоса та негайно доставляється до порту 2, підключеного до антени (розглядається в режимі передачі). Потім сигнал відбивається міткою і збирається антеною, яка тепер працює в режимі прийому. Сигнал досягає порту 2 циркуляційного насоса і доставляється до порту 3, підключеного до змішувача. Як і в бістатичній структурі, змішувач передає виявлений РЧ-сигнал в базову смугу, а фільтр низьких частот видаляє високочастотні компоненти. Змішувач плюс, фільтр низьких частот, є класичним гомодинним детектором, необхідним для правильного прийому сигналу, оскільки інформація про фазу є фундаментальною для отримання інформації, яку надає тег. Після фільтра низьких частот сигнал спочатку посилюється, а потім постоброблюється та візуалізується. Як видно з рис.2.2 та рис.2.3, єдиною відмінністю між моностатичним і бістатичним зчитувачем є наявність однієї або двох антен. Моностатичні системи дешевші, оскільки вони використовують лише одну антену, але вони трохи шумні через наявність циркулятора.

### *Структура тегів*

Безчіпові сенсорні мітки з зворотним розсіюванням мають просту структуру, оскільки вони включають лише сенсорний і кодуєчий резонатори без лінії живлення та антен. Схема мітки без мікросхем із зворотним

розсіюванням представлена на рис.2.4а, (та наведено в додатку А рис.7), тоді як приклади реальних структур із зворотним розсіюванням без мікросхем наведено на малюнках у наступному підрозділі.

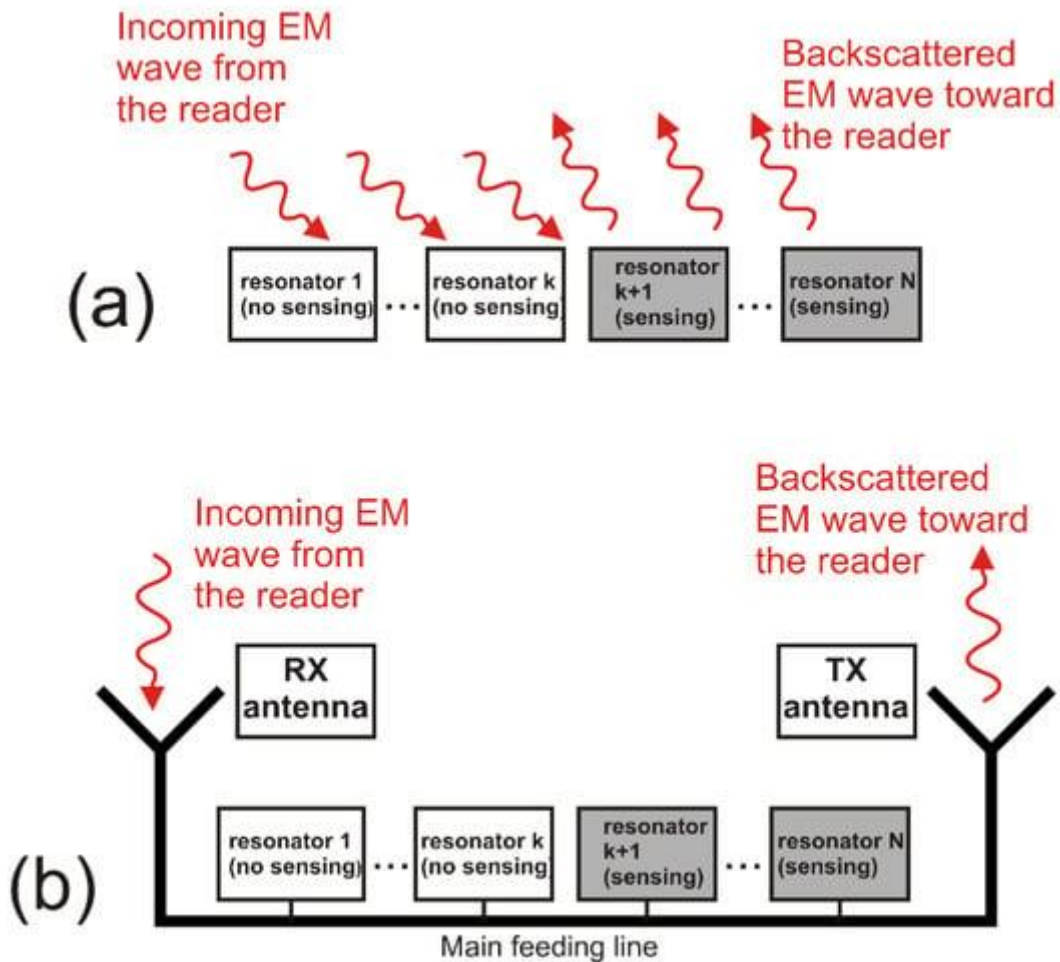


Рисунок 2.4 – Структура мітки датчика RFID без мікросхем, включаючи резонатори чутливості та кодування. ( а ) Розсіяна мітка без стружки. ( б ) Безчиповий тег на основі ретрансляції

Найпростіший RFID-датчик із зворотним розсіюванням без чіпа складається лише з резонатора, який відбиває назад до зчитувача частину електромагнітної хвилі. Коли опитувальна електромагнітна хвиля, створена зчитувальним пристроєм, потрапляє на мітку, вона взаємодіє з резонатором, генеруючи індукційні струми, які відбивають частину радіочастотного сигналу назад до зчитувального пристрою. Кількість зворотно розсіяної енергії залежить від ефективності резонатора.

Зазвичай такі RFID-мітки без мікросхем включають набір резонаторів, а електромагнітна хвиля, що запитує, є не однотональною безперервною хвилею, а широкосмуговим сигналом. Резонатори створюють негативні піки на певних частотах спектру, кодуючи дані. Чутливі резонатори відрізняються від кодуючих резонаторів, оскільки положення піку залежить від певної змінної

середовища. Головним недоліком таких пристроїв є обмежений радіус дії, який зводиться до кількох сантиметрів. Загальна структура безчипових датчиків FD на основі ретрансляції показана на рис.2.4б і зазвичай включає набір резонаторів у формі каскаду, головну лінію зв'язку та дві антени.

Коли радіочастотний сигнал потрапляє на приймальну антену (Rx), він перетворюється на радіочастотні струми та поширюється далі до резонансного контуру. Серія резонаторів спрямована на створення стрибків фази на певних частотах спектру. Резонатори кодують біт даних або інформацію датчиків і з'єднані з основною лінією живлення за допомогою ємнісного зв'язку. Потім, коли сигнал пройде через усі резонатори, унікальна спектральна сигнатура мітки, що кодує інформацію, передається назад до зчитувача за допомогою антени передавача мітки (Tx).

Прототип безчипової мітки на основі однобітової повторної передачі показаний на рис.2.5 (та наведено в додатку А рис.8). Як можна помітити, основна лінія - це мікросмузка, а біт закодований спіральним резонатором. На рис.2.6 (та наведено в додатку А рис.9) показано кілька безчипових міток, оснащених різною кількістю резонаторів. Для прийому та ретрансляції електромагнітної хвилі тег зазвичай підключають до двох антен, як показано на рис.2.7, де однобітовий тег, показаний на рис.2.5, з'єднується з двома антенами з круговою поляризацією за допомогою субмініатюрних коаксіальних роз'ємів типу А (SMA). Кругова поляризація була отримана шляхом зрізання кутів двох прямокутних антен, налаштованих на частоту 2,45 ГГц.

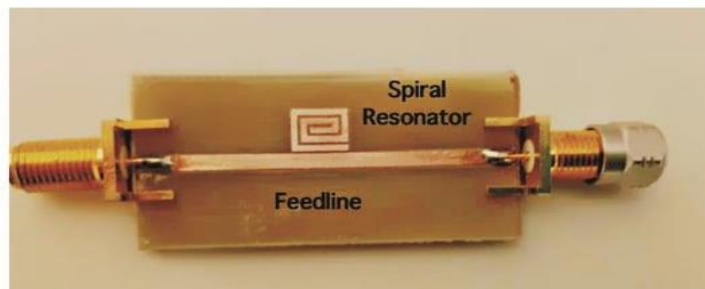


Рисунок 2.5 – Фото однобітної структури тегу

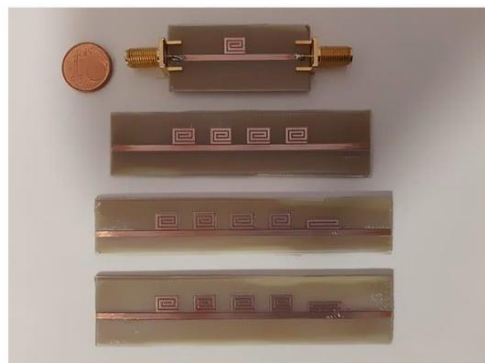


Рисунок 2.6 – Фото безчипових міток, оснащених різною кількістю спіральних резонаторів

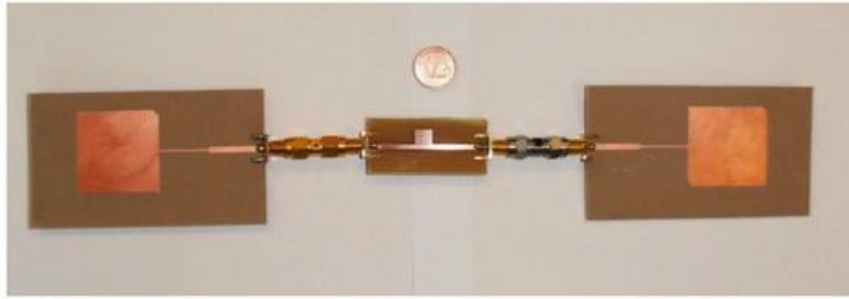


Рисунок 2.7 – Фото однієї мітки без мікросхем, оснащеної двома патч-антенами зі зміненими кутами

Як зазначено вище, щоб зробити мітки без чипів нечутливими до положення, використовуються антени з круговою поляризацією замість лінійних поляризованих антен, як показано на рис.2.8 (та наведено в додатку А рис.10). На рис.2.9 показано фотографію мітки без мікросхем, здатної кодувати п'ять бітів і оснащеної двома ширококутовими антенами з круговою поляризацією .

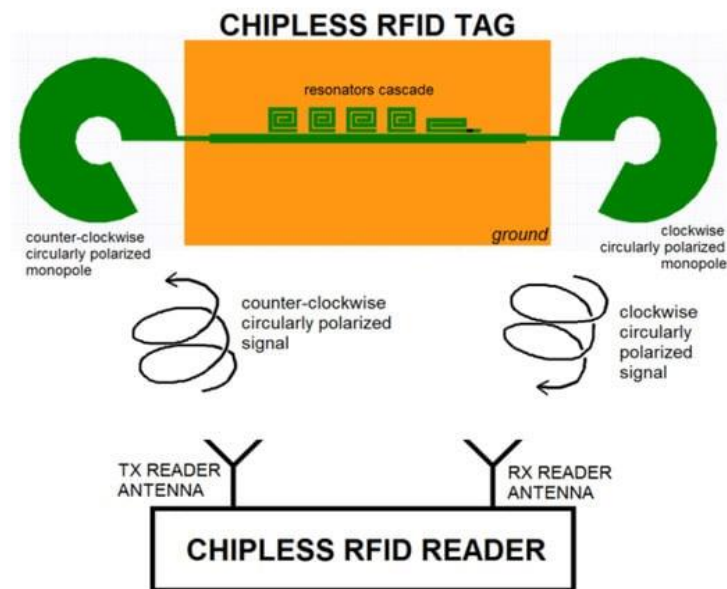


Рисунок 2.8 – Схема безчипової системи міток, що працює в круговій поляризації



Рисунок 2.9 – Фотографія п'ятибітної мітки без мікросхем, оснащеної двома ширококутовими антенами з круговою поляризацією

Здатність сприймати параметри навколишнього середовища можна отримати, покривши один із резонаторів відповідним чутливим матеріалом, як буде розглянуто більш детально в наступному підрозділі. Цю останню стратегію легше реалізувати у випадку сенсорних міток без чіпів, розсіяних назад, які менші, мають простішу структуру та їх легше інтегрувати на неплоскі поверхні.

Безчіпову мітку також можна використовувати як датчик, додавши такі елементи, як термістор або змінний конденсатор, здатні вимірювати параметри навколишнього середовища, такі як температура або вологість. Додаткові елементи можна безпосередньо з'єднати з резонатором, як показано на рис.2.10а, де чутливий елемент встановлено на останньому спіральному резонаторі.

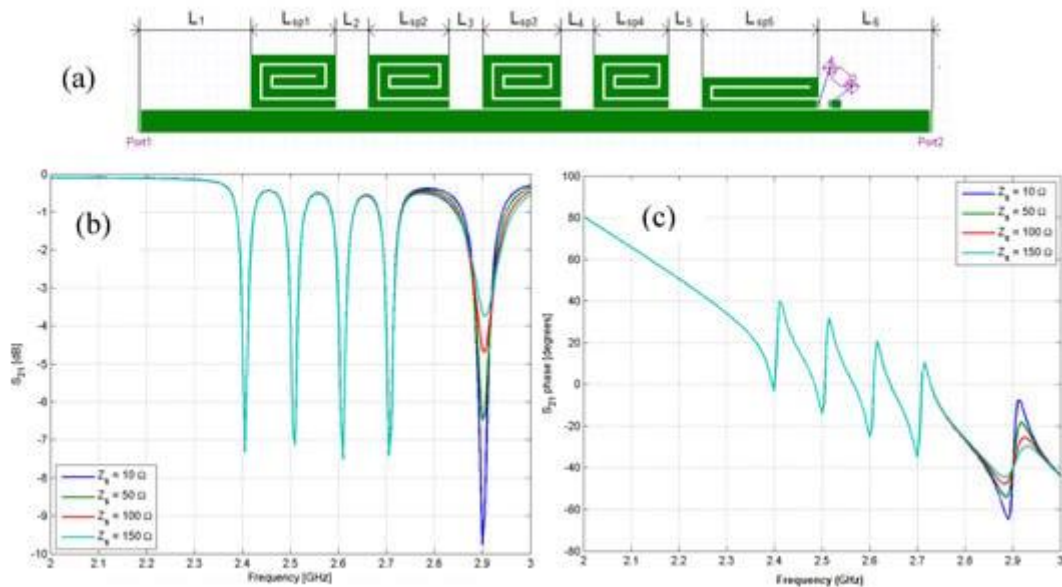


Рисунок 2.10. ( а ) Схема п'ятирозрядної мітки без мікросхем, оснащеної чутливим елементом, розміщеним на п'ятому резонаторі, і імітованої п'ятибітної мітки без мікросхем, оснащеної різними резисторами, розміщеними на п'ятому резонаторі. ( б )  $|S_{21}|$  та ( с ) фазова характеристика.

На рис.2.10 показано змодельований відгук  $S_{21}$  у залежності від частоти за величиною (рис.2.10b) і фазою (рис.2.10c). Піки через наявність резонаторів чітко видно, а зміна опору, підключеного до останнього резонатора, справляє очевидний вплив на резонанс п'ятого резонатора.

На рис.2.11а (та наведено в додатку А рис.11) зображено фотографію прототипу, на якому на останньому резонаторі встановлено термістор, щоб отримати безчіповий датчик температури. Вимірjana відповідь прототипу представлена на рис.2.11б. Як можна помітити, зміна опору викликає не лише зміну пікової амплітуди, але й зсув частоти, який, ймовірно, пов'язаний з паразитною індуктивністю та ємністю чутливого елемента.

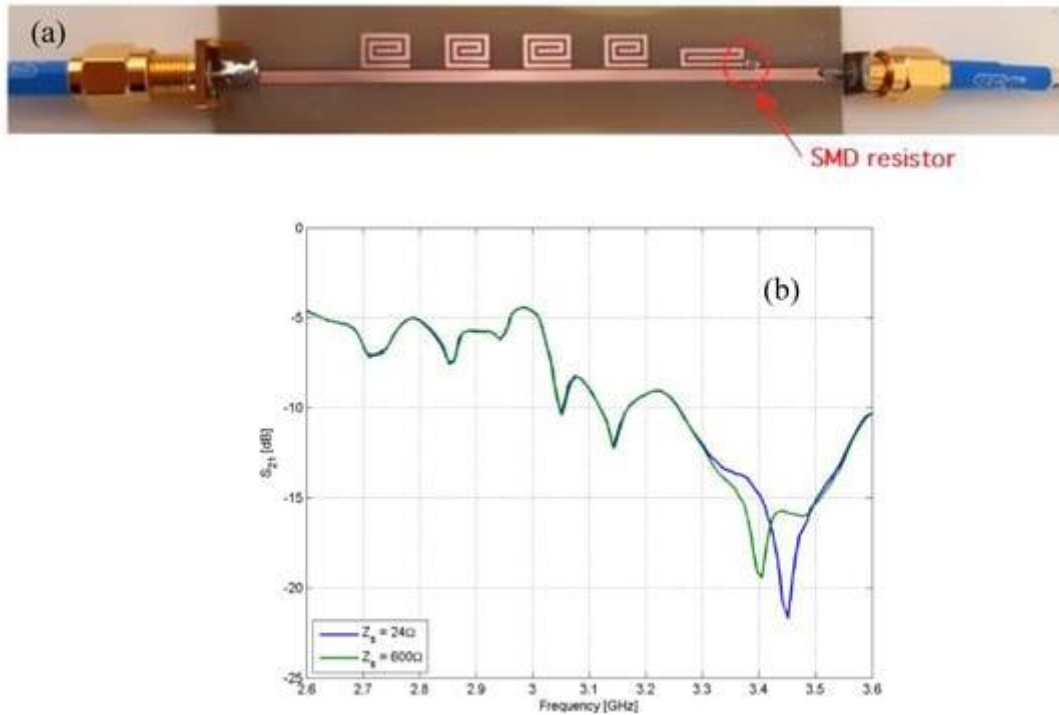


Рисунок 2.11 – ( а ) Фотографія п'ятибітної мітки без мікросхеми, оснащеної термістором і ( б ) вимірної  $|S_{21}|$  відповідь п'ятибітної мітки без чипа, оснащеної термістором

Поширеною проблемою, пов'язаною з датчиком RFID без чипа, є діапазон зчитування, який зазвичай обмежений порівняно з традиційними технологіями RFID. Це особливо вірно для міток із зворотним розсіюванням без мікросхем, де електромагнітний шум навколишнього середовища сильно обмежує максимальну відстань зчитування.

Цікавий спосіб розробки безчипової RFID-мітки із збільшеним діапазоном зчитування передбачає використання масиву Ван Атта [38]. Решітка Ван Атта — це антена, яка відтворює ефекти кутового рефлектора через плоску конфігурацію та зазвичай використовується як радарні рефлектори [39]. Така поведінка досягається через особливе розташування його випромінюючих елементів. Мета решітки Ван Атта — зібрати енергію плоскої хвилі, що набігає, і повторно передати її в тому ж напрямку прибуття (DoA). Оскільки ми маємо справу з концепціями, пов'язаними з плоскими хвилями, які використовують принципи дальнього поля у своїх комунікаціях, це означає, що можна розробити безчипові RFID великої дії. Конструкція однорозрядного RFID без мікросхем на основі чотирьохелементного масиву Ван Атта представлена на рис.2.12а. Він складається з чотирьох вставлених прямокутних антен, налаштованих на центральну смугу мікрохвильових частот (10 ГГц) і розташованих лінійно, з відстанню між елементами, що дорівнює чверті довжини хвилі на 10 ГГц. Вставки антени були розроблені відповідно до опору

антени при 50 Ом. Пари елементів антени з'єднані мікросмужковими лініями з хвильовим опором 50 Ом. Довжина ліній затримки, що з'єднують протилежні елементи, сильно впливає на правильний напрямок зворотного випромінювання. Лінійні масиви Ван Атта можуть отримувати планарне збудження від будь-якого DoA в кутовому діапазоні ( $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ) і вони здатні ретранслювати його в потрібному напрямку. Більш детально про дизайн решітки Ван Атта можна знайти в посиланнях. Для кодування бітів інформації один або кілька резонаторів можна розмістити між лініями з'єднання мікросмужкових. На рис.2.12 єдиний резонатор С-подібної форми розміщено між сполучними мікросмужковими лініями чотириелементного масиву Ван Атта та представляє біт інформації. Змодельована відповідь, виміряна на зчитувальному пристрої, представлена на рис.2.12б. Резонатор налаштований на центральну частоту діапазону X, і його присутність очевидна в змодельованій хвилі зворотного розсіювання.

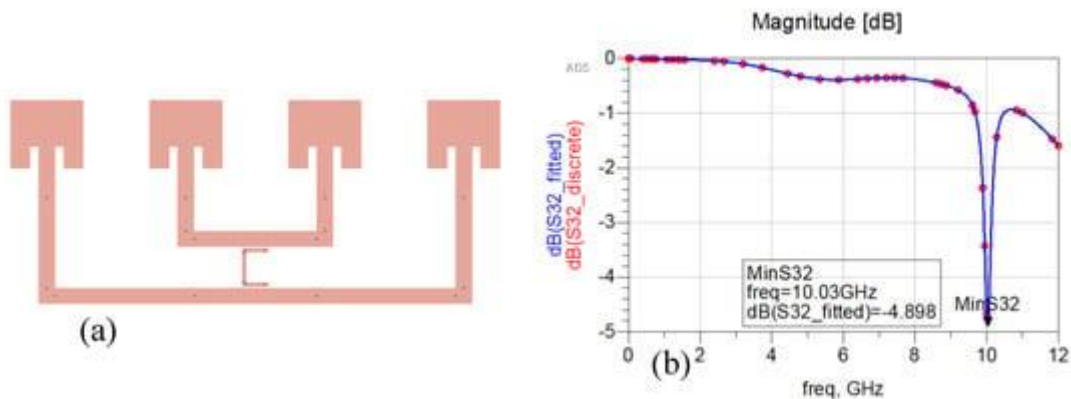


Рисунок 2.12 – ( а ) Однорозрядна лінійна решітка Ван Атта без мікросхем, що складається з чотирьох елементів з одним С-резонатором. ( б ) Змодельований відгук зворотного розсіювання в діапазоні X (8 ГГц–12 ГГц)

### 2.3 Матеріали для RFID датчиків

У попередньому розділі обговорення було зосереджено на структурі безчіпної мітки та її загальній придатності як датчика для потреб і вимог IoT. У цьому розділі ми зосередимося на більш специфічній частині датчика, яка має бути адаптована до однієї змінної, що підлягає вимірюванню, і, зрештою, визначає вибірковість і чутливість самого датчика. Ця важлива частина є матеріалом, який використовується для виявлення конкретної змінної навколишнього середовища, і вона повинна мати деякі унікальні особливості [44].

Слід зазначити, що датчики без мікросхем без спеціального чутливого матеріалу були широко описані в літературі [45]. Ці датчики використовують

інші характеристики, властиві безчиповій структурі, такі як зміна фізичної чи електричної довжини резонатора або зміна радіочастотного зв'язку між резонатором і мікроструктурою. Вони мають перевагу простоти конструкції, але досить обмежені у своїх застосуваннях. Серед них можна назвати датчики наближення, обертання або руху, а також датчики моніторингу здоров'я конструкції та напруги.

У більш загальному розумінні та для розширення кількості застосувань сенсорний матеріал має першочергове значення для якісного датчика. Хоча було опубліковано величезну кількість літератури про безчипові структурні можливості RFID з точки зору архітектури, телеметрії та потенціалу зберігання, лише обмежена частина літератури зосереджена на властивостях та функціональності сенсорного матеріалу.

Причина такого дисбалансу не унікальна. Безчипові датчики є відносно новою галуззю, де телекомунікаційна інженерія має зустрітися з матеріалознавством, об'єднуючи різні знання, для належного поєднання яких може знадобитися деякий час. Крім того, у датчиках RFID без мікросхем діелектричні властивості матеріалів на мікрохвильових частотах є ключем до відповідного вибору, але ці властивості рідко враховуються в технологіях зондування, які зазвичай використовують інші параметри, такі як зміна опору, ємності або оптоелектронних властивостей.

Хороший чутливий матеріал для датчика без мікросхем – це матеріал, який змінює свої діелектричні властивості під впливом певної фізичної або хімічної змінної, яку потрібно чутливо відчувати. У цьому відношенні безчиповий датчик має важливу перевагу, оскільки діелектричні параметри, які можуть змінюватись, є як дійсною, так і уявною частиною діелектричної функції, тобто як частотою, так і добротністю резонансної структури. Зв'язок між частотою та добротністю резонатора та діелектричною функцією середовища, що його оточує, не є ні лінійним, ні таким, що його легко обчислити. Це залежить від кількох змінних, включаючи резонансну геометрію та провідність металу, робочу частоту, матеріал підкладки та, звичайно, характеристики матеріалу сенсора, включаючи його товщину та геометрію. Хороший прогноз потребує комп'ютерного моделювання, а отже, вимагає не лише відповідних інструментів моделювання, але й знання геометричних характеристик і характеристик матеріалу.

Однак можна використовувати більш емпіричний підхід, калібруючи датчик за різними значеннями контрольованої змінної, як це зазвичай робиться з датчиками інших типів. Щоб перевірити придатність існуючих матеріалів або, як альтернативу, виготовити матеріал, призначений для виявлення певної



змінної, необхідно зрозуміти, які фактори впливають на діелектричні характеристики матеріалу та їх зміни.

Діелектричні властивості матеріалів характеризуються комплексною діелектричною проникністю  $\epsilon^*$ , яка має дійсний і уявний компоненти  $\epsilon$  і  $\epsilon'$ , а також тангенсом втрати або коефіцієнтом дисипації, який визначається як  $\tan(\delta) = \epsilon''/\epsilon'$ . Діелектричні властивості контролюються їхньою хімічною структурою та можуть бути широко передбачені. Особливо для пластикових матеріалів, їхню полярну чи неполярну природу можна пояснити хімічним складом, і це істотно визначає електричні характеристики матеріалу.

Певні молекули та групи демонструють вищу поляризованість, ніж інші. Ароматичні кільця, сірка, йод і бром сильно поляризуються, і присутність цих груп збільшує діелектричну проникність. І навпаки, фтор, який має малий атомний радіус і зосереджений негативний заряд, має низьку поляризованість і зменшує діелектричну проникність матеріалу, що його містить.

Більшість мікрохвильових матеріалів розроблено для низької дисперсії та мінімальної зміни  $\tan(\delta)$  із частотою, температурою чи параметрами навколишнього середовища, але хороший чутливий матеріал повинен мати зовсім інші характеристики.

Ця значна варіація властивостей у мікрохвильовій області зазвичай вважається незручністю при проектуванні мікрохвильових компонентів, але може надати нові великі можливості в сенсорній технології. У цій спектральній області невелика зміна складу матеріалу внаслідок зміни навколишнього середовища може бути перетворена у високу варіацію діелектричних властивостей, прокладаючи шлях для датчиків із високою чутливістю та вибірковістю, які використовують цей діапазон частот.

Нарешті, більшість сенсорних матеріалів не є ідеальними діелектриками і тому можуть демонструвати обмежену, але не незначну провідність. Це має важливі наслідки, оскільки навіть низькі значення провідності можуть значно збільшити втрати в матеріалі та коефіцієнт дисипації. Практично кажучи, це означає, що резонатор, оточений матеріалом із слабкою провідністю, демонструватиме низький коефіцієнт добротності, але, з іншого боку, зміни провідності через змінні навколишнього середовища можна виявити за допомогою вимірювання добротності резонатора без мікросхем. Багато добре відомих сенсорних матеріалів використовують зміни провідності (вуглецеві нанотрубки, оксиди металів, кремнієві нанодропи, органічні напівпровідники), і цей зв'язок відкриває шлях до їх використання в безчиповому датчику RFID.

На жаль, оскільки безчипове зондування є новою галуззю дослідження, інформація про діелектричні властивості сенсорних матеріалів на мікрохвильових частотах та їх зміну в залежності від змінних навколишнього

середовища є досить малою в літературі, і дуже ймовірно, що базові знання в цій галузі будуть збільшуватися швидко в майбутньому. Кілька прикладів сенсорних матеріалів та їхні діелектричні властивості наведено в таб.2.1.

Таблиця 2.1 – Діелектричні властивості типових чутливих матеріалів

Material	Dielectric Constant	Loss Factor	Sensed Parameter
Kapton HN	3.15–3.4	0.0015–0.0035	Humidity
Polyvinyl alcol	≈4	Variable <sup>1</sup>	Humidity
Carbon nanotubes	≈–6	Very variable <sup>1</sup>	Ammonia CO <sub>2</sub>
Paper	2.4–3.4	0.08–0.3	Humidity
Silicon nanowires	2–12	Variable <sup>1</sup>	Humidity
Water	78	0.01–0.4	Oil

#### 2.4 Методи виготовлення датчиків

Безчипові RFID-мітки можна виготовити за допомогою простіших і дешевших процесів, ніж ті, що використовуються для звичайних RFID-міток. Ця фундаментальна відмінність пов'язана з відсутністю кремнієвого чіпа, і тому немає потреби у виробничому процесі, придатному для мікроелектроніки. Крім того, також немає необхідності підключати антену до мікросхеми [32]. Практично кажучи, це означає, що тег без мікросхем може бути надійнішим і набагато дешевшим, ніж бирка з чипом. Проте здатність чутливості може трохи ускладнити виготовлення мітки залежно від матеріалів, які використовуються для чутливості, якщо такі є, і від її геометрії чутливості. Зрозуміло, що з огляду на широке використання в IoT, безчипові структури тегів необхідно виробляти за допомогою надзвичайно дешевих виробничих процесів, і, завдяки нещодавньому та швидкому розвитку друкованої електроніки, ця можливість тепер є реальністю.

Обговорюючи найважливіші методи виготовлення сенсорів, важливо розрізнити виготовлення резонансної структури та виробництво конкретного сенсорного матеріалу. Дві частини датчиків зазвичай виготовляються за різними технологіями, і їх інтеграція може потребувати особливої уваги при проектуванні всього процесу виготовлення. Крім того, тип застосування та методологія вимірювання можуть використовувати нестандартні мікрохвильові матеріали з пов'язаними нестандартними методами виробництва. Наприклад, гнучкі та відповідні мітки повинні бути виготовлені на підкладці з полімерного матеріалу, але провідний і чутливий матеріал повинні мати однакову гнучкість. Пластикові підкладки часто мають низьку температуру

розм'якшення та обмежену хімічну стійкість, і це може перешкодити використанню спеціальних методів осадження для чутливої частини. Крім того, провідна резонансна структура повинна бути реалізована на металі або в дуже провідному чорнилі відповідної товщини, що обмежує вибір доступних матеріалів. На закінчення слід сказати, що основні обмеження виготовлення необхідно розглядати та долати в кожному конкретному випадку, а доступні рішення слід шукати з урахуванням як матеріалів, так і обмежень конструкції.

У таб.2.2 наведено стислий перелік найбільш релевантних методів, які використовуються для виготовлення безчипових датчиків RFID. Технології виготовлення більш детально розглядаються в наступній частині цього розділу.

Таблиця 2.2 – Порівняння різних методів, що використовуються для виготовлення безчипових датчиків

Fabrication Technique	Typical Resolution	Suitable for Flexible Substrates	Suitable for Mass Production	Used for Sensing Material
Microolithography	>1 $\mu\text{m}$	Partially	Yes	Yes
Inkjet printing	20–50 $\mu\text{m}$	Yes	Limited	Yes
Aerosol printing	5–10 $\mu\text{m}$	Yes	No	Yes
Screen printing	50 $\mu\text{m}$	Yes	Yes	Yes
CNC Milling	>20 $\mu\text{m}$ <sup>1</sup>	No	Limited	No
Embroidery	>0.5 mm	Yes	Limited	No
Drop casting	-	Partially	Yes	Yes
Thermocompressive bonding	>20 $\mu\text{m}$ <sup>1</sup>	Partially	Limited	Yes

### *Мікро та нанолітографія*

Мікролітографія є традиційною технікою, яка використовується для виготовлення мікро- та нанопристроїв, включаючи електронну промисловість та схеми друкованих плат. Вона включає в себе кілька окремих технік, але в основному базується на повторенні триетапного процесу: осадження, літографія та травлення.

У той час як електронна промисловість зазвичай використовує кремнієві пластини як підкладки, виробники друкованих плат можуть надати пластини підкладки з ламінованими та скріпченими шарами міді з одного або двох сторін. Інші підкладки, такі як пластик або тканина, можна використовувати як підкладки, за умови, що вони зручно металізовані або покриті шаром провідного матеріалу. Цей процес металізації необхідний для створення резонаторів, антен і мікросмужкових ліній, які мають бути реалізовані у високопровідному матеріалі. Після цього виконується процес фотолітографії, покриваючи поверхню мітки світлочутливою смолою, а потім здійснюється перенесення візерунка під впливом ультрафіолетового світла мітки через маску, яка містить геометричні візерунки. Коли непотрібні частини шару резисту

видалено, виконується травлення для визначення металу. Подібний процес можна використовувати для нанесення чутливого матеріалу поверх резонаторів.

На відміну від традиційного мікровиробництва, яке зазвичай виконується на шарах субмікронної товщини, підкладки типу РСВ мають товщину металу в кілька мікрон (зазвичай 17 або 35 мкм), що відповідно обмежує досягну роздільну здатність. Навіть у випадку металевих конструкцій, виготовлених методом напилення, електроосадження або інших методів металізації, де товщина може бути налаштована відповідно до потреб кінцевого пристрою, мікрохвильові резонатори повинні мати мінімальну товщину близько 1–2 мкм, залежно від їх частотного діапазону та металу. провідність. Комерційні антени для мікросхем RFID в діапазоні надвисоких частот зазвичай виготовляються з алюмінію методом літографії, навіть на гнучких підкладках. У цьому випадку обмеження роздільної здатності не є проблемою через розміри пристрою, а виготовлення є відносно дешевим, особливо у величезних кількостях, типових для масового виробництва. Приклади резонаторних структур, реалізованих за допомогою мікролітографії, представлені на рис.2.13.

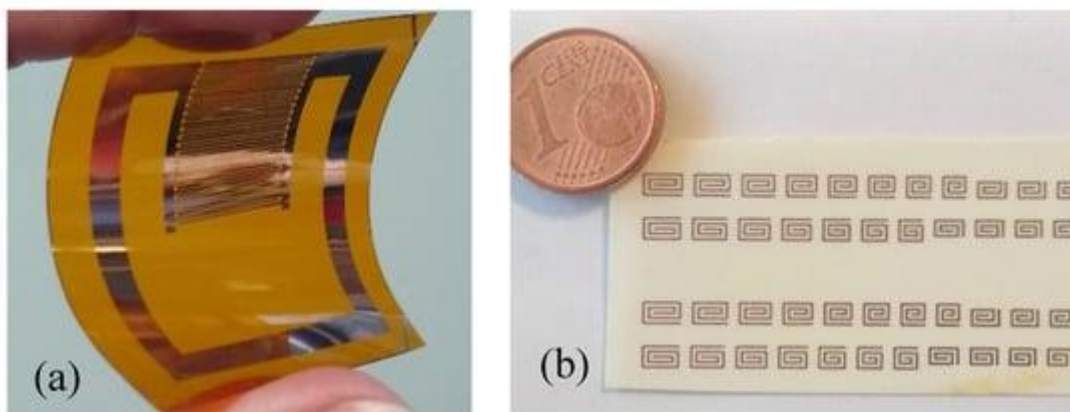


Рисунок 2.13 – Теги, реалізовані за допомогою літографії. ( а ) Гнучка структура чутливого резонатора (мідь на Каптоні). ( б ) Спіральні масиви резонаторів (мідь на Rogers 4350В товщиною 168 мкм)

Застосування сенсорного матеріалу можна отримати за допомогою подібного процесу фотолітографії, хоча існує багато інших можливих методів. Необхідна роздільна здатність для чутливого матеріалу досить низька, і для нанесення матеріалів підходять менш точні методи, такі як краплинне лиття або термостискне з'єднання.

#### *Графаретний і струменевий друк*

Графаретний друк є найпоширенішою промисловою технікою нанесення струмопровідного матеріалу на гнучкі підкладки. Ця техніка передбачає нанесення електропровідних полімерних плівок на пластик або тканину за

допомогою трафаретної техніки для визначення бажаного малюнка. Чорнило натискається на підкладку через сито з лезом, тоді як трафаретна маска захищає ділянки, де чорнило не повинно осідати. Товщину провідної плівки можна збільшити за допомогою кількох циклів друку. Цю техніку можна поєднати з технікою «рулон-на-рулон», що забезпечує дуже високу пропускну здатність і тому дуже підходить для масового виробництва міток.

Трафаретний друк використовувався в технології RFID для друку як антен для носіїв, так і сенсорних міток без мікросхем, з хорошими результатами. Однак мінімальний розмір елемента обмежений від 50 до 100 мкм підходом трафарету та неоднорідністю тканинної основи. Це обмеження стає важливим, оскільки бездротові з'єднання рухаються до більш високих діапазонів частот, як це передбачається в майбутньому, вимагаючи менших антен і компонентів.

Струменевий друк є більш універсальною технікою, яка досі використовується переважно для невеликих виробництв або дослідницьких цілей. Це вважається одним із нових методів адитивного виробництва, і його можна використовувати для нанесення візерункових шарів великої різноманітності чорнила на кілька типів різних підкладок, включаючи папір, пластик, спеціальні полімери та тканину, з мінімальним розміром елемента, який може досягати 20 мкм або навіть менше з новими пов'язаними підходами до друку, такими як аерозольний друк. У технології RFID струменевий друк використовувався для реалізації радіочастотних компонентів на широкому діапазоні підкладок з використанням провідних чорнил. У галузі RFID без чіпів використання цієї техніки має важливе значення для виробництва міток із високою продуктивністю та якістю, необхідною для повної інтеграції IoT.

Порівняно з іншими друкованими електронними компонентами безчипові RFID мають суворіші вимоги до характеристик чорнила. Чорнила з найвищою провідністю створені на основі наночастинок срібла та можуть мати провідність до  $10^7$  См/м, що лише на один порядок менше, ніж у міді. Ці характеристики є достатніми для застосувань у мікрохвильовому діапазоні, але інші провідні матеріали, які широко використовуються в друкованій та органічній електроніці, як-от чорнило на основі графену або органічні провідні полімери, не відповідають мінімальним вимогам до провідності для цього застосування. З іншого боку, універсальність струминного друку дозволяє наносити як струмопровідний, так і чутливий матеріал за допомогою двох різних чорнил на одну підкладку, уникаючи проблем вирівнювання між різними шарами, типових для мікролітографії та більшості методів інтеграції. Приклад масивів резонаторів, реалізованих за допомогою струменевого друку, наведено на рис.2.14.

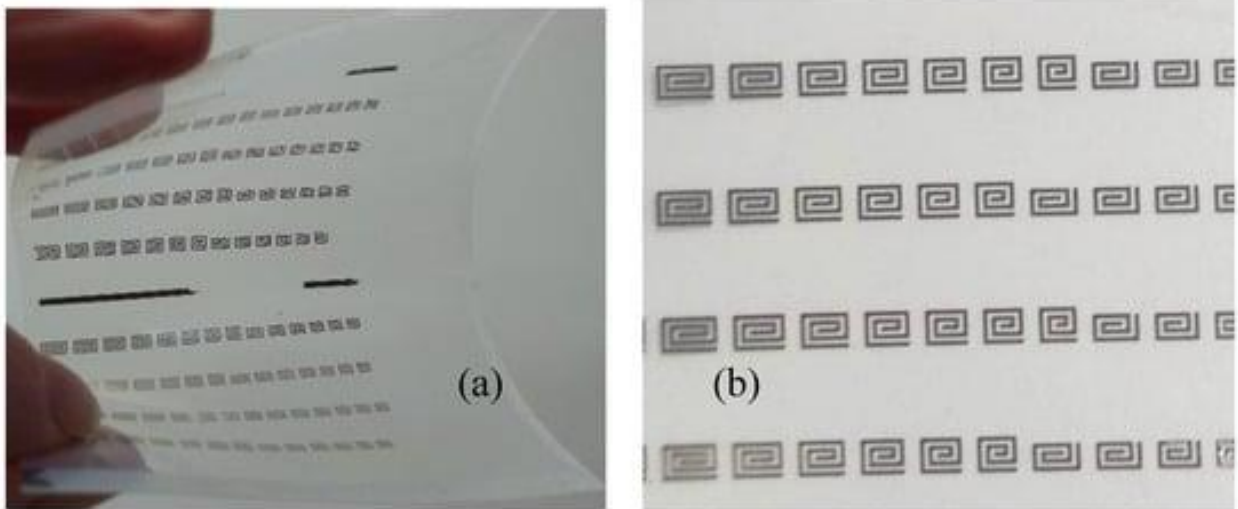


Рисунок 2.14 – ( а ) Масиви резонаторів, надруковані струминним способом на підкладці з поліетилентерефталату, виготовлені за допомогою високопровідних чорнил із наночастинок Ag. ( б ) Деталь того самого зразка

#### *Інші технології виготовлення*

Великі резонатори на жорстких конструкціях можна реалізувати за допомогою звичайних методів фрезерування. Цей підхід досить повільний і має обмежену роздільну здатність, але він корисний для створення прототипів. Крім того, його можна поєднати зі спеціальними методами осадження для інтелектуальних сенсорних матеріалів, коли це необхідно. Чутливий матеріал може бути нанесений поверх резонаторів за допомогою крапельного лиття, нанесення покриття центрифугуванням або, завдяки жорсткості підкладки резонатора, навіть шляхом термокомпресійного з'єднання.

Спеціальні програми можуть вимагати незвичайних технологій виготовлення. Носимі пристрої, вбудовані в одяг, є одними з них, і, враховуючи великі розміри деяких носимих радіочастотних компонентів, повідомлялося про такі методи, як вишивка на основі електронної нитки, як для виготовлення антени, так і безчипової RFID -мітки. Електронні нитки виготовляються з полімерних ниток з металевим покриттям, які пришиваються до тканинної підкладки вручну або автоматично, що дозволяє створювати провідні сліди. Ця методика може бути застосована до різних підкладок, але, як це легко зрозуміти, має дуже обмежену роздільну здатність і тому може використовуватися лише для великих низькочастотних антен. Повідомлялося про інші прості та недорогі методи, такі як техніка заповнення до повного, яка також може бути використана для шаблонів низької роздільної здатності.

## 2.5 Датчики фізичних величин

Було запропоновано декілька підходів для реалізації RFID-мітки без мікросхеми з інтегрованим датчиком [45], і вибір серед різних варіантів залежить головним чином від конкретного параметра, який потрібно відчувати. Фізичні параметри, такі як температура та вологість, були одними з перших прикладів, про які повідомлялося в літературі.

Фактично, датчики, здатні дистанційно вимірювати високі температури в суворих умовах, потрібні для різноманітних застосувань. Наприклад, вони дуже корисні для запобігання руйнуванню конструкції через високі температури або для високотемпературного моніторингу термостійких матеріалів, або знову ж таки для високотемпературних випробувань двигунів або кваліфікаційних випробувань дискових гальм. Безчипові датчики, які не мають електроніки в мітці, мають потенціал для вирішення більшості цих проблем [58]. Датчики температури також потрібні для моніторингу навколишнього середовища, а бездротові недорогі повсюдні датчики температури вкрай необхідні для майбутнього IoT. Температурні безчипові датчики добре представлені в літературі [59-63]. Також повідомлялося про дуже чутливі рішення, але ціною втрати можливості друку та впровадження структурованого багаточарового виготовлення [64-67].

Вологість є одним із найважливіших фізичних параметрів для оцінки якості повітря всередині приміщень і на відкритому повітрі, для оптимізації сільського господарства, для моніторингу збереження продуктів харчування та для оцінки шкоди, завданої водою в будівлях. Для міток датчика вологості без стружки було виявлено декілька розумних матеріалів, від Kapton HN [58] до полівінілового спирту (PVA) [59], силікагелю [60] та кремнієвих нанодротів [57]. Також були запропоновані мітки, які дозволяють відстежувати як вологість, так і температуру [61], а також рішення, які поєднують ідентифікаційні теги з датчиками [63]. Також повідомляється про нетрадиційні схеми виявлення з використанням метаматеріальних підходів [61].

Безстружкові датчики тиску також присутні в літературі, як на основі SAW, так і на основі частоти. Більш складні та дорогі схеми виготовлення можуть зробити рішення на основі частоти придатними для дуже високих температур.

### *Хімічні сенсори*

Хімічні датчики складніше реалізувати в сенсорній структурі без мікросхем, і, крім того, вони стикаються зі спільною проблемою, типовою для всіх типів хімічних датчиків, а саме селективністю щодо певного аналіту порівняно з іншими. Тим не менш, безчипові мітки для хімічного зондування

газу мають комерційний інтерес і, як повідомляється, в основному використовують вуглецеві нанотрубки як розумний матеріал. Було продемонстровано, що ці мітки, виготовлені за допомогою струминного друку, можуть контролювати як аміак, так і гази NO<sub>x</sub> для моніторингу навколишнього середовища, а також CO<sub>2</sub> і температуру. Про простий у виготовленні датчик для виявлення газу етанолу повідомляється в [62]. Повідомлялося про інші, більш складні схеми пасивних датчиків для моніторингу етилену [63], спрямовані на виявлення дозрівання плодів [64].

Аналіз хімічного складу рідин із використанням безстружкових резонуючих структур добре представлений у літературі [57-64], часто в поєднанні з мікрофлюїдними структурами [65-67]. Фактично, усі підходи, описані для аналізу рідких розчинів, використовують різницю в діелектричній проникності, спричинену іншим складом розчину, що виявляється через зміщення резонансного піку. Оскільки вода має найвищу діелектричну проникність і найвищий коефіцієнт втрат порівняно з іншими звичайними рідинами, її зазвичай використовують як один із компонентів. У цьому відношенні передбачені цікаві застосування у виявленні поверхні розділу вода-нафта при обробці нафтових пісків.

#### *Розумна упаковка*

Технології RFID знайшли багато застосувань для автоматичного відстеження та ідентифікації об'єктів і харчових продуктів. Незважаючи на те, що рішення на основі чіпів забезпечують високу ємність кодування та можуть легко відповідати міжнародним стандартам кодування продукції, їх вартість робить їх дорогими порівняно з більш поширеними штрих-кодами, тому було докладено багато зусиль, щоб створити безчіпові мітки з високою ємністю кодування. Однак інтелектуальний пакет може мати більше функцій, ніж просто відстеження предметів, оскільки можна додати можливості вимірювання, включаючи параметри, які можуть надати інформацію про середовище зберігання предмета, вік або автентичність.

Властивості швидкопсувних та харчових продуктів можуть змінюватися після пакування, що може призвести до втрати якості. Залежно від вмісту упаковки відбуваються біологічні, хімічні або фізичні процеси, які в кінцевому підсумку призводять до дегенерації продукту, але ці зміни в більшості випадків важко оцінити споживачам.

Розумне та інтелектуальне пакування вимагає рішень, що використовують прості технології виробництва з використанням недорогих і високопродуктивних технологій друку. Ясно, що безчіпові мітки є чудовою можливістю для цього комерційного сектору через низьку вартість виробництва та можливість друку.



Упаковки зазвичай виготовляються з деякої паперової підкладки, і паперові підкладки вважаються недорогою та екологічно чистою альтернативою пластиковим підкладкам для друкованої електроніки. Порівняно з фотопапером комерційний пакувальний папір є значно дешевшим і міцнішим у суворих умовах, і тому безпосереднє використання пакувального паперу як підкладки для друку може зменшити як етапи виробництва, так і вартість. Крім того, пакувальний папір, як він є або належним чином функціоналізований, також може бути використаний як сенсорний матеріал, легко поєднуючи процес виготовлення сенсорної мітки зі звичайним потоком виробництва упаковки.

Пакувальний папір має два важливі недоліки для друку тегів без сколів порівняно з традиційними підкладками або пластиком: висока шорсткість і великі втрати підкладки. Шорсткість сильно впливає на провідність чорнила, але її можна зменшити шляхом накладення з хорошими результатами, особливо на низьких частотах. З іншого боку, втрати також мають більш важливий вплив, оскільки частота збільшується, і це, ймовірно, причина, чому більшість безчипових міток, про які в літературі повідомляється для розумної упаковки, працюють на низьких частотах. Безчипові датчики на упаковці, надруковані безпосередньо на папері струмопровідним чорнилом, зазвичай є датчиками вологості, часто в поєднанні з ідентифікаційними бирками на одній упаковці. Це пояснюється тим, що діелектричні властивості паперу та картону залежать від вологості, що робить їх придатним матеріалом як для підкладки для міток, так і для сенсорного матеріалу. Для моніторингу інших параметрів, таких як рН або температура, додаткові матеріали повинні бути включені в датчик, який буде вбудовано в упаковку, принаймні для ізоляції ідентифікаційних резонаторів від сенсорних або для диференціації резонатори в багатопараметричному зондуванні.

Очікується, що в найближчому майбутньому інтелектуальні програми для упаковки значно розширяться, щоб покращити як відстеження, так і якість товарів, що зберігаються та транспортуються в рамках IoT, а також для збереження якості харчових продуктів, що транспортуються. Безчипові RFID є дуже багатообіцяючою технологією для цих застосувань, і продемонстровані наразі прототипи прокладають шлях для більш складних, витончених і неочікуваних застосувань. Як приклад, було запропоновано застосування для відстеження фармацевтичних продуктів, де безчипову мітку включено в таблетки для вирішення серйозної проблеми підробки ліків, яка іноді може бути фатальною. Також були запропоновані дуже специфічні сенсори для харчових патогенів у поєднанні з мікрофлюїдною структурою.

### *Структурне здоров'я*

Високі витрати, пов'язані з можливими несправностями, зробили моніторинг здоров'я конструкцій терміновим і необхідним заходом безпеки для забезпечення безпеки експлуатації великомасштабних конструкцій і машин, таких як залізниці, трубопроводи, мости та будівлі. Реалізовані стратегії щодо безпеки людей і товарів у таких структурах використовують все більше бездротових технологій зондування. Усуваючи електричну проводку, бездротові сенсорні мережі можуть розподіляти датчики на великій площі та з високою щільністю, вирішуючи багато ускладнень, пов'язаних зі структурним моніторингом. Однак у поточних програмах бездротового зондування зазвичай використовуються датчики з живленням від батареї, які є досить дорогими та мають обмежений термін служби батареї.

Було запропоновано декілька підходів із використанням менш дорогих пасивних мереж RFID, але безчипові мітки RFID можуть значно знизити вартість технології RFID, будучи повністю придатними для друку та потенційно масово виготовленими з використанням недорогих провідних матеріалів. Крім того, вони здатні працювати в суворих умовах, де електронні пристрої не можуть вижити. Таким чином, сенсорні безчипові структури можуть бути встановлені або вбудовані в критичні структури як смарт-скін.

Інформація про дефект може бути пов'язана зі зсувом резонансної частоти або з варіаціями інших електричних параметрів. Можуть бути виявлені механічні дефекти, а також тріщини та явища корозії. При застосуванні до будівель або великих споруд ці підходи вимагають великого діапазону читання, що може бути важливим обмеженням у їх практичному застосуванні, і потрібні спеціальні рішення.

Однак багато із запропонованих підходів до зондування не вимагають розумного матеріалу, а лише спеціально розробленої антени. Деформація та деформація змінюють електричну довжину і, отже, резонансну частоту антени. Тріщини виявляються подібним чином, тоді як адекватний дизайн і опрацювання даних можуть розрізнити орієнтацію тріщини. Напрругу також можна відстежувати за допомогою патч-антен, оснащених шлейфами з відкритим контуром. Цей підхід може також визначити напрямок деформації. Щоб досягти адекватного дозволу деформації у високому динамічному діапазоні, необхідний адекватний матеріал антени з великими структурними змінами у відповідь на малу прикладену деформацію, і це є критичним моментом цієї простої технології.

Безчипові датчики RFID також можуть контролювати корозію металевих конструкцій. Під час початкової фази явища корозії на поверхні металу

з'являється тонкий шар оксиду, що спричиняє зміни провідності та діелектричної проникності металу. Ці зміни залежать від типу металу, і їх можна контролювати за зміною імпедансу антен-міток. Крім того, корозію можна запобігти до того, як вона відбудеться, виявивши проникнення повітря або води, використовуючи зсув частоти резонатора, викликаний зміною локальної діелектричної проникності. Також повідомляється про багатопараметричні підходи до корозії.

#### *Датчики положення, переміщення та дотику*

Точна локалізація в приміщенні нещодавно викликала великий інтерес для різноманітних майбутніх послуг на основі визначення місця розташування, і пасивні технології RFID є найбільш очевидним вибором для цієї мети. Насправді розумна та гнучка локалізація з використанням бездротових технологій є одним із стовпів майбутнього розвитку та зростання IoT.

Технологія RFID без мікросхем, без батареї та чіпа, є надзвичайно недорогим рішенням і застосовна для масового розгортання в різноманітних програмах локалізації. З цієї причини локалізація за допомогою тегів без мікросхем широко досліджується в літературі.

Більшість робіт на цю тему зосереджені на алгоритмах розробки та методах вимірювань і менше стурбовані структурою тегів. Для цих додатків увага зосереджена більше на стратегії читання, ніж на архітектурі та матеріалі тегів, які обмежуються вибором найбільш прийнятної резонансної структури, яка буде поєднана з відповідною схемою ідентифікації.

Багато підходів до локалізації тегів без мікросхем використовують методи визначення часу, типові для широко розповсюджених технологій RFID з мікросхемами, такі як час польоту в обидві сторони або отримання фази. Також існують підходи з частотним кодуванням, навіть незважаючи на те, що виявлення та локалізація безчипових міток може бути складною справою, оскільки середовище розповсюдження сигналу в приміщенні є складним, а зворотне розсіювання сигналу від мітки є слабким. Щоб подолати ці обмеження, були розроблені відповідні радіолокаційні методи.

Сенсорні датчики RFID без мікросхем особливо привабливі, тому що їх можна надрукувати на папері, що робить їх дешевими та одноразовими, або для носимих пристроїв, де їх можна бездоганно інтегрувати в текстиль чи одяг. Принцип роботи безчипових тачпадів полягає в зсуві або зникненні резонансного піку при торканні резонатора пальцем. Однак, порівняно з традиційними сенсорними панелями, основним обмеженням цього підходу є площа поверхні, необхідної для резонаторів і антени, яка швидко збільшується зі збільшенням кількості точок дотику. Поки що шість є максимальною

кількістю подій одним дотиком у різних місцях, про які повідомляється в літературі.

#### *Носимі речі та імплантати*

У випадку безчипових RFID-пристроїв, які можна носити або імплантувати, мітка повинна діяти в безпосередній близькості від людського тіла або всередині людського тіла. У цих особливих випадках необхідно враховувати кілька додаткових питань, включаючи обмеження робочої частоти та мініатюризації, а також діелектричний вплив людського тіла та проблеми безпеки. Крім того, слід застосовувати спеціальні технології виготовлення, щоб виготовити пристрій, який є відповідним, гнучким, біосумісним, міцним і стійким до зносу.

Усі різні тканини людського тіла мають залежні від частоти діелектричну проникність і тангенс втрат, які значно перевищують значення вільного простору. Це має дуже важливі наслідки для дизайну безчипової мітки, яка повинна мати можливість працювати в присутності біологічних тканин, де зазвичай домінують втрати. Це, у свою чергу, означає, що має бути доступна відповідна діелектрична модель людського тіла, і неминуче стикається з проблемою, що властивості тканини можуть змінюватися не лише серед індивідуумів, але також залежно від умов навколишнього середовища або віку. Тим не менш, ця галузь є дуже перспективною для майбутніх застосувань, оскільки передбачувані переваги безчипової технології, застосованої до носіїв або імплантатів, потенційно величезні та мають великий вплив на здоров'я та благополуччя людини. Порівняно з традиційною RFID, безчипові мітки не потрібно інтегрувати в об'єкт, який можна носити, але їх можна пришивати або друкувати безпосередньо на одязі та речах, уникаючи проблем підключення або жорсткості, пов'язаних із чіпами.

Імплантовані безчипові мітки є більш складними з технічної та нормативної точки зору. Незважаючи на те, що в літературі було запропоновано кілька імплантованих RFID, звіти про безчипові пристрої поки що є досить рідкісними. Незважаючи на те, що переваги усунення черезшкірних проводів і батарей, які можуть бути забезпечені цією технологією, очевидні, складність системи через бездротову роботу призводить до інших недоліків, які збільшують загальний розмір імплантату. Розмір антени залежить від робочої частоти, тому слід віддавати перевагу високим частотам. На жаль, у біологічних тканинах втрати РЧ нижчі на низьких робочих частотах. Це вимагає компромісу щодо проектною робочою частотою, яка залежатиме від конкретного імплантату та його функції. Однак зрозуміло, що з наявною технологією далека телеметрія не може бути й мови, а діапазон зчитування для вбудованих пристроїв обмежений кількома сантиметрами. Це

останнє обмеження є наслідком двох технічних обмежень, обидва пов'язані з мікрохвильовою енергією, необхідною для виявлення сигналу. Великі діапазони зчитування вимагають більше енергії, особливо в середовищі з втратами, як тіло людини, і це означає, що нагрівання частини тіла, що оточує імплантат, буде неминучим. Це не тільки небезпечно, але й може змінити результат вимірювання. Крім того, поглинання енергії обмежується максимально допустимим питомим поглинанням (SAR), визначеним стандартами для заданих діапазонів частот (наприклад, у діапазоні 100 кГц–10 ГГц SAR для всього тіла не має перевищувати 0,4 Вт/кг), і це дозволяє лише обмежені діапазони читання.

## 2.6 Висновки до розділу

Безчіпові датчики RFID викликають все більший науковий і комерційний інтерес у кількох сферах застосування, пов'язаних з IoT. Причина такого інтересу полягає в їх надзвичайно низькій вартості та простих методах виробництва. У той час як для додатків у сфері відстеження мітки без мікросхем повинні подолати значне обмеження великого обсягу необхідної інформації, у реалізації датчиків це обмеження є набагато менш суворим або неважливим.

Однак багато проблем ще потрібно вирішити, перш ніж безчіпові датчики RFID зможуть досягти дифузії, порівнянної зі звичайними системами RFID. У хімічному та фізичному зондуванні необхідно покращити чутливість і вибірковість за допомогою додаткових досліджень у галузі розумних матеріалів для зондування. Для зондування структур і навколишнього середовища обмежена відстань зчитування все ще є важливою проблемою. Нарешті, для носимих і особливо для імплантованих датчиків багато обмежень і обмежень, пов'язаних з особливостями застосування, все ще перешкоджають практичному використанню технології RFID без мікросхем. З іншого боку, за останні кілька років було досягнуто значного прогресу, і для багатьох недорогих застосувань безчіпові RFID вже є життєздатною альтернативою. Крім того, вони особливо підходять для середовищ, де традиційні технології на основі ІС непридатні для використання, або для майбутніх екологічних і біорозкладаних технологій, які, як очікується, значно зростуть у наступні роки.

## 3 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДАТЧИКА ВОЛОГОСТІ НА ОСНОВІ NAFION 117 БЕЗ МІКРОСХЕМ RFID

### 3.1 Проектування та моделювання датчиків вологості

Технології радіочастотної ідентифікації (RFID) уже знайшли застосування в багатьох промислових контекстах, таких як відстеження, обробка та транспортування товарів. Додавання однієї або кількох сенсорних функцій до тегів RFID дозволить використовувати різноманітні нові програми, і, отже, все більше уваги приділяється цій галузі як у промисловості, так і в наукових колах. Підходи датчиків RFID можна розділити на дві категорії: чіпові та безчіпові технології. Перша типологія об'єднує чіп RFID із зовнішнім датчиком. Це можна зробити шляхом модулювання зворотно розсіяної потужності від пасивної мітки RFID шляхом додавання чутливого матеріалу або у верхній частині антени, або в області сполучення між антеною та чіпом RFID. Цей тип датчика RFID може забезпечити високу здатність кодування та сумісний зі стандартами електронного коду продукту (EPC). Однак його застосування обмежене в багатьох програмах, де вартість мітки є основним параметром вибору. Щоб подолати це обмеження, протягом останніх кількох років були докладені значні зусилля для розробки набагато дешевших безчіпових RFID-міток, де чіп не потрібен. Крім того, безчіпові мітки легко виготовляти за допомогою недорогих технологій друку, вони мають довший термін зберігання, пасивні, міцні та підходять для суворих умов. Незважаючи на величезну різноманітність нових можливостей для реалізації недорогих датчиків, безчіпові датчики ще не широко поширені в практичних застосуваннях через їх обмежену чутливість і вибірковість у порівнянні з більш зрілими технологіями вимірювання, такими як електрохімічні датчики. У цьому контексті пошук відповідного матеріалу для виконання сенсорної функції часто зосереджувався на найпоширеніших матеріалах, що використовуються в підходах до електрохімічного зондування, але мало було зроблено, щоб прямо пов'язати характеристики безчіпових або мікрохвильових пристроїв датчиків до характеристик матеріалів, які використовуються для їх виготовлення.

У цьому розділі ми зосереджуємось на ролі підкладки та характеристик сенсорного матеріалу для визначення їхнього впливу на сигнал датчика з точки зору інтенсивності та чутливості. Для цього ми розглянемо одну з найпоширеніших мікрохвильових сенсорних структур, якою є резонатор із зв'язком електричного поля (ELC), який широко використовується в датчиках RFID без мікросхем, а також в інших нових застосуваннях, таких як акустичні та мікрохвильові матеріали. Ми досліджуватимемо конкретний випадок

резонатора ELC, який використовується як осередок для вимірювання вологості, хоча ми очікуємо, що висновки, зроблені для цього випадку, залишатимуться дійсними для визначення інших типів навколишнього середовища, фізичні або хімічні параметри. Кінцевою метою цього дослідження є співвіднесення конструкції датчика та характеристик матеріалу, щоб визначити оптимальні результати, які можна отримати з точки зору чутливості датчика, враховуючи структуру резонатора, характеристики матеріалу чутливості та діапазон варіації параметрів, який бажано визначити.

Загалом, розробник безчипових датчиків RFID може працювати з трьома основними ступенями свободи (DoF), щоб покращити сигнал мітки: резонансна структура, чутливий матеріал і підкладка. Як ми побачимо з формул у наступних розділах, усі вони впливають на резонансну частоту датчика. Більшість досліджень безчипових міток зосереджено на максимізації відгуку сигналу, впливаючи безпосередньо на вибір резонатора, з подальшим інтересом до таких характеристик міток, як просторова ефективність, спектральний ефективність та ефективність кодування тегу. Інші дослідження досліджують найкращі чутливі матеріали з кінцевою метою максимізації варіації внутрішнього параметра датчика, яким для безчипових датчиків з частотним кодуванням (FC) може бути частотний зсув, добротність  $Q$  або фаза [22]. Таблиця 3.1 пропонує погляд на деякі нещодавно запропоновані в літературі безчипові датчики вологості, які використовують зсув частоти як внутрішню властивість датчика. Як видно з таблиці, Kapton HN, полівініловий спирт (PVA) і папір є найпоширенішими чутливими матеріалами, які використовуються в датчиках вологості без стружки. Полівініловий спирт (PVA) і папір виявляють більшу чутливість порівняно з Kapton HN, але мають тривалий час відновлення після стану гідратації, що часто вирішується шляхом застосування альтернативних рішень, таких як підвищення температури. Тут використаний чутливий матеріал Nafion 117, полімер, який добре відомий у контексті паливних елементів з протонообмінною мембраною (PEM) завдяки гідрофільній природі його іонних груп, які притягують молекули води [25]. Вперше Nafion 117 було продемонстровано для датчиків вологості без стружки в наших попередніх дослідженнях [25, 26, 27]. Він досягає рівня чутливості, порівнянного з PVA та папером, але з великою перевагою, що має час відповіді та відновлення майже в реальному часі [26]. У цьому дослідженні ми використовуємо Nafion 117 як чутливий матеріал, але акцент зосереджений на третьому згаданому DoF, тобто підкладці, показуючи, як, діючи на основі вибору підкладки, можна запропонувати рішення, переважні для різних варіантів зовнішні властивості.

Таблиця 3.1 – Порівняння продуктивності безчіпових датчиків вологості

Resonator	Sensitive Material	Frequency Range [GHz]	Humidity Range [%RH]	Frequency Shift [MHz/%]
SIR	Kapton HN tape	<1	65–80	0.2
SIR	Kapton HN tape	<1	80–90	0.64
ELC	Kapton HN polyamide	6–7	35–85	1.36
LC	Paper	<1	20–90	0.37
ELC	Polyvinyl-alcohol (PVA)	6–7	35–85	1.68
Artificial impedance surface	Paper	2–8	50–90	6.75
Not defined	Textile (pile)	1.9–2.7	65–95	3
ELC	Nafion 117	2–3	0–90	1.12
ELC	Nafion 117	1–3.5	0–90	1.5–3.9

### 3.2 Проектування та моделювання датчиків вологості

#### *Розробка сенсора та математична формулювання*

Чутлива структура складається з мідного ELC-резонатора товщиною 17 мкм, покритого чутливим шаром Nafion 117 товщиною 180 мкм і поєднаного з 50Ω узгоджена лінія мікросмужкової подачі, як на рис.3.1 (та наведено в додатку А рис.12). Розміри квадратної рамки резонатора  $1,2 \times 1,2 \text{ мм}^2$ .

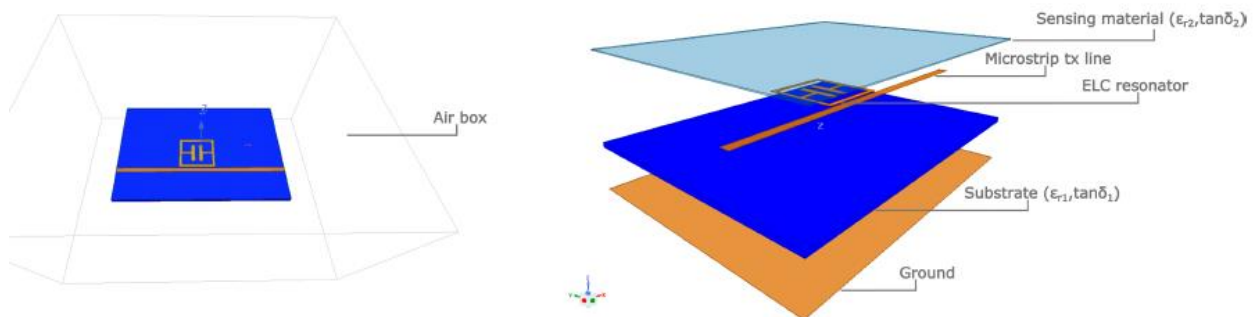


Рисунок 3.1 – Конфігурація мікросмужкового резонатора, який використовується в моделюванні. Чутливий матеріал покриває всю площу пристрою

Загалом, при використанні механізму живлення мікросмужкової лінії передачі, слід враховувати режим розповсюдження квазіТЕМ через наявність двох різних діелектриків, як на рис.3.2а: матеріал підкладки та повітря, що його оточує, які викликають поширення хвилі з різними фазовими швидкостями. Неоднорідне середовище можна описати як однорідне за допомогою змінної ефективної діелектричної проникності  $\epsilon_{\text{eff}}$ . Величина  $\epsilon_{\text{eff}}$  показана на рис.3.2а, враховує вплив обох діелектриків і тому має значення в діапазоні:



$$\epsilon_{r_{air}} = 1 < \epsilon_{eff} < \epsilon_{r_1}. \quad (3.1)$$

Ефективна діелектрична проникність є ключовим параметром у конструкції резонансних комірок без кристалів, де резонатор з'єднаний через зазор із мікросмушковим механізмом живлення, оскільки резонансна відповідь комірки обернено пропорційна йому:

$$f_{res} \approx \frac{nc}{2L_{res}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.2)$$

де  $c$  — швидкість світла та резонанс, що виникає при загальній довжині резонатора  $L_{res}$  приблизно дорівнює кратній  $n$  напівнаправленої довжини хвилі.

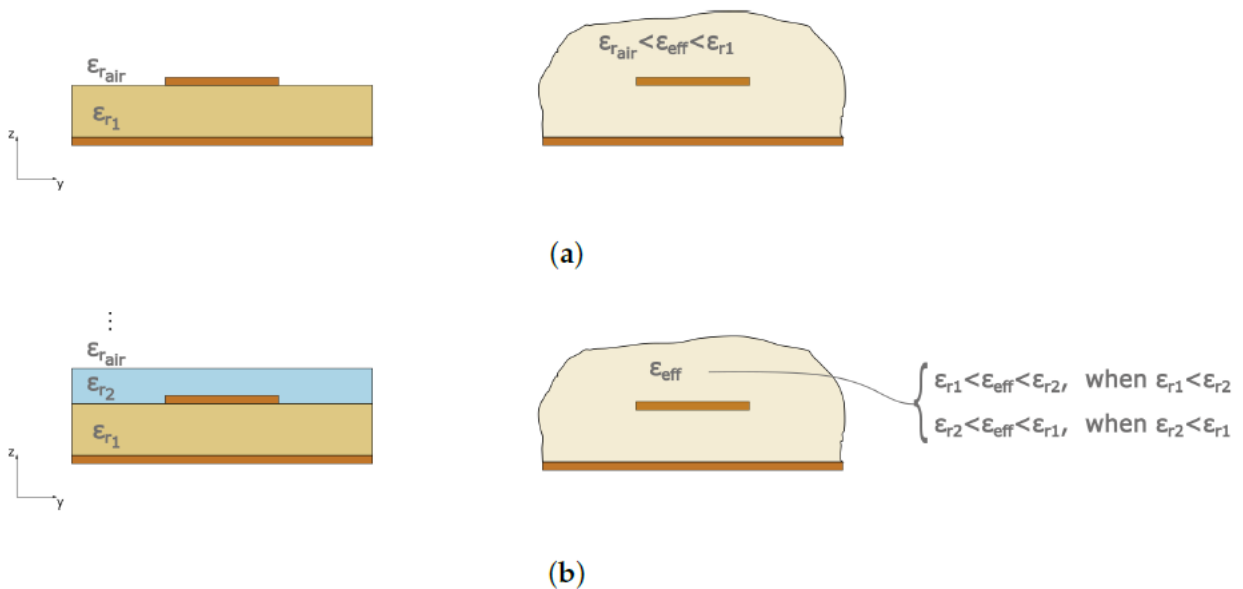


Рисунок 3.2 – Схематичне бачення концепції ефективної діелектричної проникності у випадку ( а ) класичної мікросмушкової лінії передачі та ( б ) мікросмушкової лінії передачі, вбудованої в багатошарову структуру

Коли розглядається багатошарова конфігурація, як у нашій роботі, її можна схематизувати, як на рис.3.2б. Визначення ефективної діелектричної проникності в цьому випадку стає значно складнішим [33, 34]. Однак це стратегічно для його моніторингу, щоб зрозуміти взаємний вплив підкладки та суперстратів на поведінку резонансної частоти з кінцевою метою максимізації чутливості датчика. Крім того, слід враховувати, що мікросмушкова лінія та резонатор, пов'язаний із зазором, вбудовані тут у багатошаровий матеріал, тому вплив двох діелектричних матеріалів є максимальним, і відгук датчика сильно залежить від них та від їхніх варіацій.

Вплив матеріалу підкладки аналізується шляхом зміни його діелектричної проникності, щоб відповідати значенням звичайних матеріалів підкладки, що використовуються в радіочастотних компонентах, тоді як товщина підкладки  $h=0,8$  мм є однаковою для всіх підкладок. Натомість суперстрат є чутливим матеріалом, і його діелектричні властивості змінюються відповідно до можливих умов навколишнього середовища.

### 3.3 Математичне моделювання

Структуру моделювали за допомогою Ansys High-Frequency Structure Simulator (HFSS). Нафійон 117 був обраний як чутливий до вологості матеріал через високу варіацію його діелектричних параметрів із вологістю, і розглядається як суперстрат [59]. Діелектричні параметри матеріалів і підкладок, використаних у цьому дослідженні, наведені в табл.3.2. Коефіцієнт розсіювання всіх підкладок дуже низький порівняно з коефіцієнтом розсіювального матеріалу. З цієї причини ми вирішили вважати його фіксованим у симуляції та рівним  $\tan \delta = 0,002$ . З іншого боку, як діелектричні параметри чутливого матеріалу, так і їх варіації дуже важливі для характеристики та оптимізації характеристик датчика.

Таблиця 3.2 – Діелектричні параметри, що використовуються в моделюванні для підкладок (з таблиці даних) і сенсорного матеріалу [59]

Material	Use	$\epsilon_r$	$\tan \delta$
Rogers DiClad 870	Substrate	2.33	0.0013
Rogers RO4003C	Substrate	3.38	0.0021
FR4	Substrate	4.6	0.0195
Alumina	Substrate	9.6	0.0002
Rogers RO3010	Substrate	11.2	0.0022
Nafion $\gamma = 1$ <sup>1</sup>	Sensing material	4	0.05
Nafion $\gamma = 2$ <sup>2</sup>	Sensing material	5	0.1
Nafion $\gamma = 3$ <sup>3</sup>	Sensing material	7	4

Параметри чутливого матеріалу промодельовані для трьох різних значень вологості. Приблизно відповідає 0,3% відносної вологості (RH) [59]. Приблизно відповідає 3% RH [59]. Приблизно відповідає 33% RH.

Символ  $\gamma$  наведені в таб.3.2 вказують на кількість молекул води на сульфонову групу в полімерній структурі Nafion 117. Різні значення  $\gamma$  відповідають різним значенням відносної вологості (RH). Орієнтовна відповідність значенням RH при 25°C. Оскільки сухий нафійон поглинає воду набагато легше, ніж частково зволожений нафійон, відповідність не є лінійною,

отже, датчик набагато більш чутливий при низьких значеннях вологості. Обидва відносна діелектрична проникність  $\epsilon_r$  і коефіцієнт дисипації  $\tan\delta$  сильно збільшуються як  $\gamma$  збільшується. Така поведінка характерна для всіх матеріалів, які використовуються для вимірювання вологості без стружки, наприклад Kapton HN, PVA або паперу. Така загальна поведінка зумовлена високим  $\epsilon_r$  і  $\tan\delta$  води, яка поступово адсорбується в чутливому матеріалі зі збільшенням відносної вологості. Моделювання було виконано для всіх субстратів, перелічених у таб.3.2, і для всіх трьох значень  $\gamma$  в діапазоні частот 1–4 ГГц. Аналіз було зосереджено на найнижчому частотному резонансному піку, який зазвичай використовується в датчиках [51]. Слід зазначити, що невиправлене моделювання показало високі фонові втрати при  $\gamma=3$  через внесок втрат мікросмужкової лінії, яка покрита чутливим матеріалом. Оскільки ці втрати відсутні у вимірюваннях реального пристрою, де полімер Nafion покриває лише резонатор [59], для  $\gamma=3$  змодельовані втрати через мікросмужкову лінію було віднято в звітних даних. У цьому не було необхідності  $\gamma=1$  і  $\gamma=2$ , тому що мікрополоскові втрати незначні.

*Низька вологість навколишнього середовища*

Результати моделювання, отримані для  $\gamma=1$  і  $\gamma=2$  представлені на рис.3.3 (та наведено в додатку А рис.13). Ці моделювання відповідають режиму дуже низької вологості, оціненої в діапазоні 0,3–3% відносної вологості.

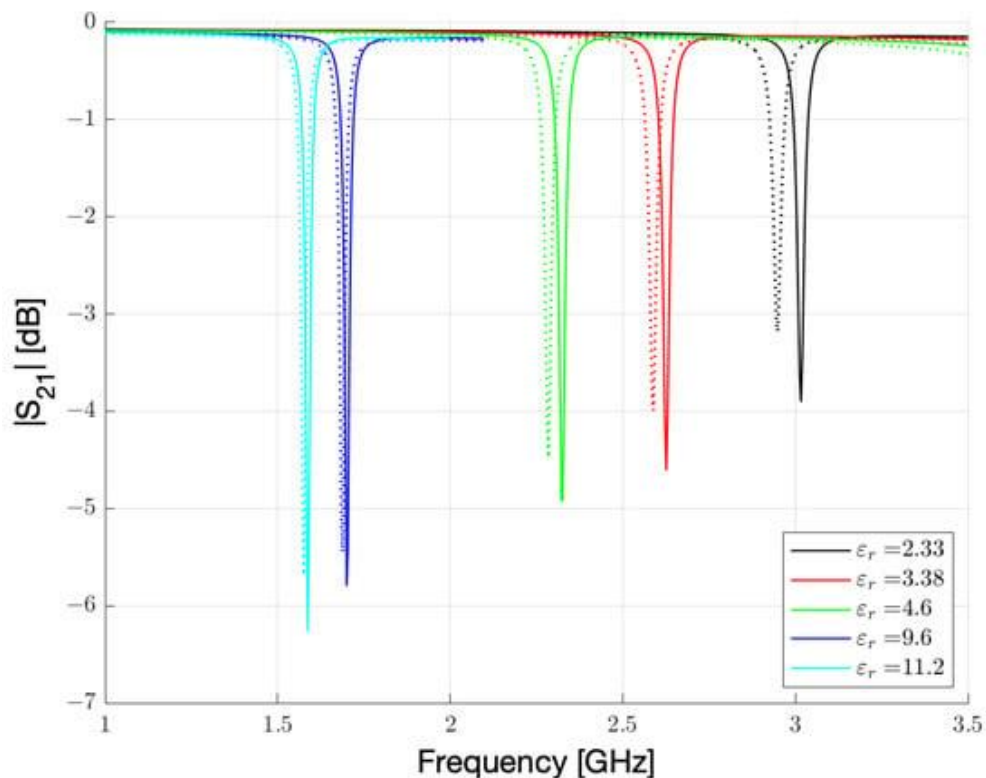


Рисунок 3.3 – Імітація  $|S_{21}|/|C_{21}|$  спектр резонатора для п'яти підкладок, наведених у таб.3.2. Безперервні лінії представляють  $\gamma=1$  результат. Пунктирні лінії представляють  $\gamma=2$  результати

На рис.3.3 чітко видно дві особливості. По-перше, на резонансну частоту та її інтенсивність сильно впливає підкладка. Це й не дивно, оскільки висока  $\epsilon_r$  підкладки часто використовуються для зниження частот або мініатюризації пристроїв. Що ще важливіше, частотний зсув від  $\gamma=1$  до  $\gamma=2$  помітно більш виражений для субстратів з низьким  $\epsilon_r$ . Ця друга функція є фундаментальною для датчика. Чутливість датчика, розрахована як відсоток зсуву початкової частоти, повідомляється як функція  $\epsilon_r$  на рис.3.4. Смуги помилок розраховуються на основі вибірки моделювання (3,75 МГц), яка вносить певну невизначеність у визначення пікової центральної частоти. Слід зазначити, що в розглянутому діапазоні низької вологості датчик з найнижчою  $\epsilon_r$  підкладки демонструє зсув на 67,5 МГц при зміні вологості на 2,7%.

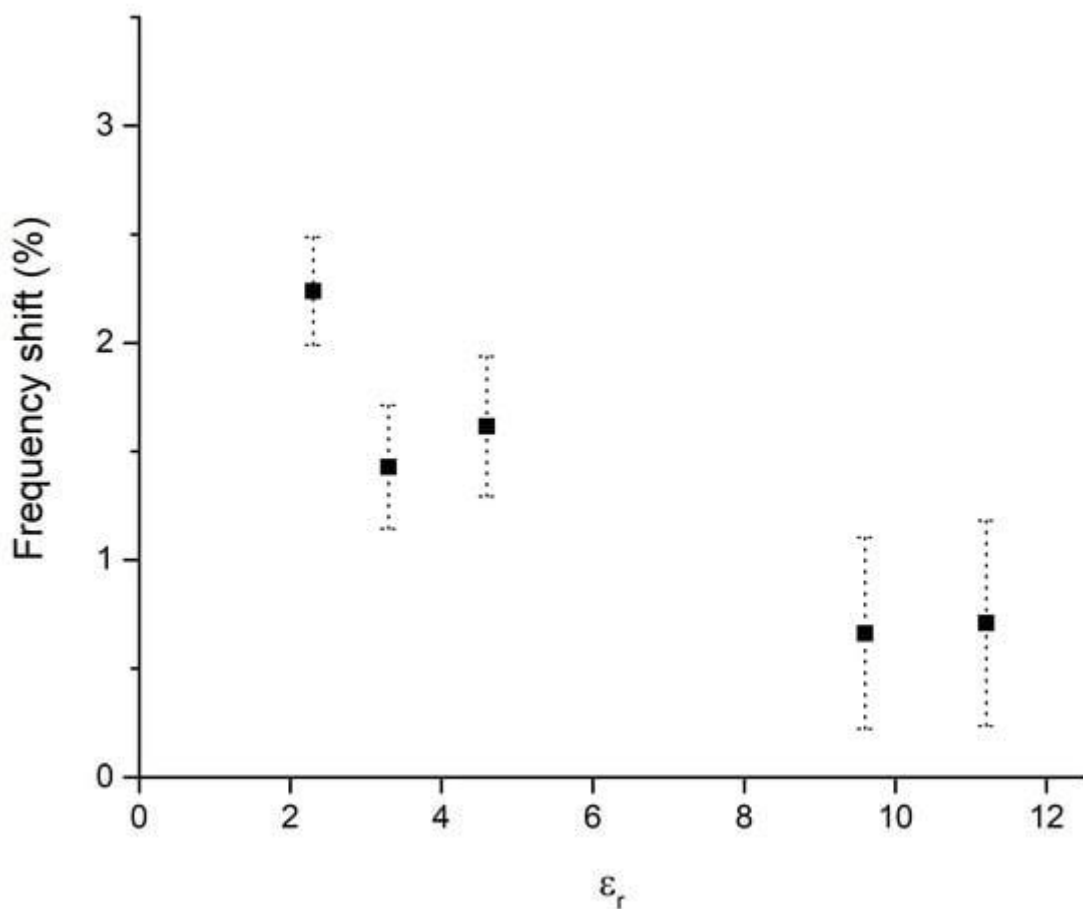


Рисунок 3.4 – Чутливість датчика, розрахована у відсотках від частотного зсуву, в діапазоні 0,3–3% відносної вологості, як функція підкладки  $\epsilon_r$ . Індикатор похибок обчислюється на основі вибірки частоти моделювання

Можна спостерігати, що для умов низької вологості резонансні піки виявляються різкими, а варіації пов'язані з  $\epsilon_r$  зміна Nafion 117, що викликає зсув резонансної частоти. Оскільки резонансні піки вузькі, можна зрозуміти, що втрати залишаються низькими. Тому для умов низької вологості субстрати з низькою  $\epsilon_r$  може збільшити чутливість в три рази більше, ніж підкладки з

високою  $\epsilon_r$ . Приріст для  $\epsilon_r=2,33$  також доцільно порівняно з найпоширенішими виборами підкладки, такими як FR4 або RO4003C, оскільки навіть у цьому випадку підвищення чутливості становить близько 40–50%. Ми можемо фізично описати цю поведінку, розглянувши, як електричне поле розподіляється між діелектриками, що вбудовують мікросмужкову лінію, і резонатором. Ефективний  $\epsilon_r$  є комбінацією значень матеріалів субстрату та суперстрату. Для високого  $\epsilon_r$  підкладки, лінії електричного поля більше притягуються підкладкою, і, отже, внесок підкладки в ефективну діелектричну проникність є високим, а внесок чутливого матеріалу низьким. В результаті чутливість датчика знижується. Для низьких  $\epsilon_r$  підкладки, внесок чутливого матеріалу в ефективну діелектричну проникність вищий, а чутливість зростає. Нарешті, для виявлення низької або дуже низької вологості субстрат з нижчою  $\epsilon_r$  слід віддати перевагу.

#### *Висока вологість навколишнього середовища*

У досліджуваному режимі високої вологості (приблизно 3–33% відносної вологості або вище) пікове ослаблення поступово стає домінуючою ознакою, а зі збільшенням вологості воно домінує над частотним зсувом. Цей перехід можна побачити на рис.3.5, де змодельований  $|S_{21}||S_{21}|$  для  $\gamma=2$  і  $\gamma=3$  для всіх досліджуваних субстратів.

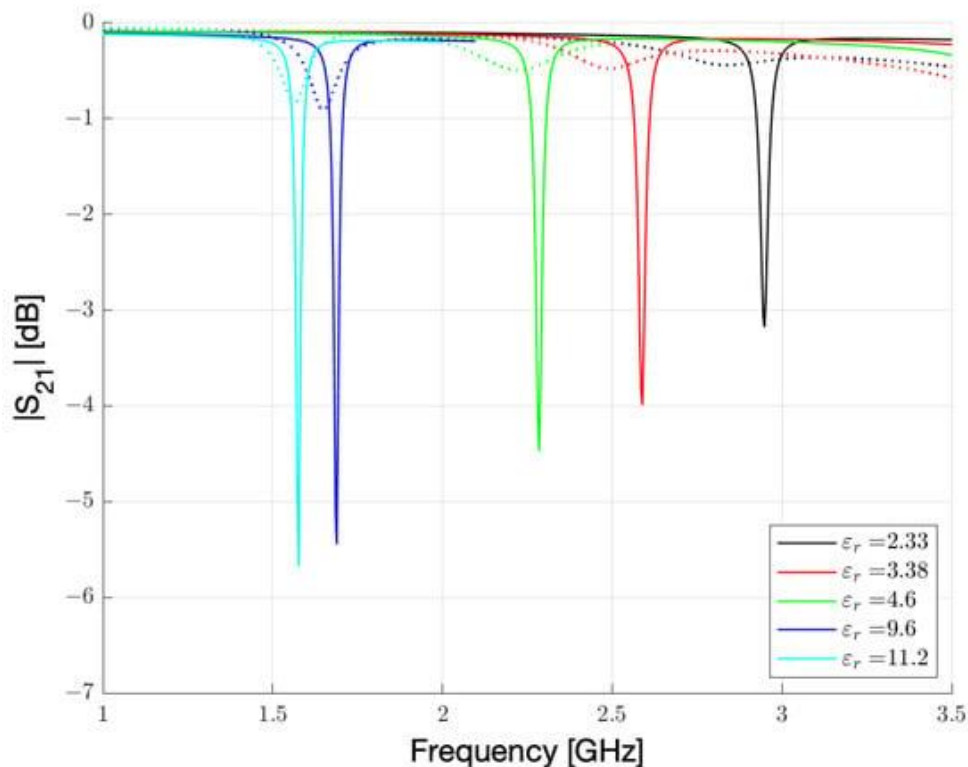


Рисунок 3.5 – Імітація  $|S_{21}||S_{21}|$  спектр резонатора для п'яти підкладок, Безперервні лінії представляють  $\gamma=1$  результат. Пунктирні лінії представляють  $\gamma=3$  результати

Ця зміна пов'язана з поступовим збільшенням Нафіонузагар  $\tan\delta$ , яка досягає значення 4 при 33% RH, і навіть більших значень при вищій RH. Пік  $\sigma\gamma=3$  ледь помітно для  $\epsilon r=2,33$  і сильно розширено для  $\epsilon r=3,38$   $\epsilon r=4,6$ . Однак це чітко помітно для двох найвищих  $\epsilon r$  значення. На  $\gamma=3$ , датчик з найменшим  $\epsilon r$  стає марним, але датчик з високою  $\epsilon r$  демонструє мінімальний зсув частоти. З іншого боку, найточнішим параметром для вимірювання зміни вологості стає зміна пікової інтенсивності. Піки резонансу датчика з двома найвищими  $\epsilon r$  субстрати демонструють найвищу інтенсивність, і цей параметр все ще чітко виявляється при вищих значеннях вологості. Крім того, зсув частоти є дуже низьким, і це означає, що інтенсивність можна контролювати на одній довжині хвилі, а саме на тій, що відповідає резонансу при нижчій вологості в досліджуваному діапазоні. Таким чином робочий діапазон датчика можна розширити до більш високих значень вологості. Тому, якщо датчик повинен працювати в широкому діапазоні вологості, найкращим вибором є підкладка з дуже високою вологістю  $\epsilon r$ . Фізичне пояснення такої поведінки знову полягає в балансі між внеском підкладки та сенсорного матеріалу в ефективну діелектричну проникність і ефективний тангенс втрат. У цьому випадку домінують збитки і роль високої  $\epsilon r$  підкладка послаблює втрати через сенсорний матеріал, роблячи пік резонансу все ще видимим при вищих значеннях вологості. Слід зазначити, що використання іншого сенсорного матеріалу або зменшення/збільшення його товщини може змістити перехідну область від низької до високої вологості, але це зміниться разом із чутливістю пристрою. Основні механізми залишаються незмінними, і в будь-якому випадку потрібно знайти компроміс між дальністю чутливості та чутливістю та, зрештою, пристосувати його до окремої програми.

### 3.4 Виготовлення сенсора та результати експерименту

Резонатори з тією ж геометрією та розмірами, що й змодельовані, були виготовлені на підкладках, що відповідають матеріалам у таб.3.2, шляхом фрезерування з ЧПУ, а потім покриті Nafion 117 лише поверх резонатора, а не на мікросмужковій лінії, як це було зроблено під час моделювання, щоб мінімізувати вплив втрат на провідність лінії передачі при підвищенні вологості. Схема установки вимірювання вологості з фотографією покритого Nafion 117 резонатора, виготовленого на RO4003C і оснащеного двома субмініатюрними коаксіальними роз'ємами версії A (SMA), представлена на рисунку 3.6.

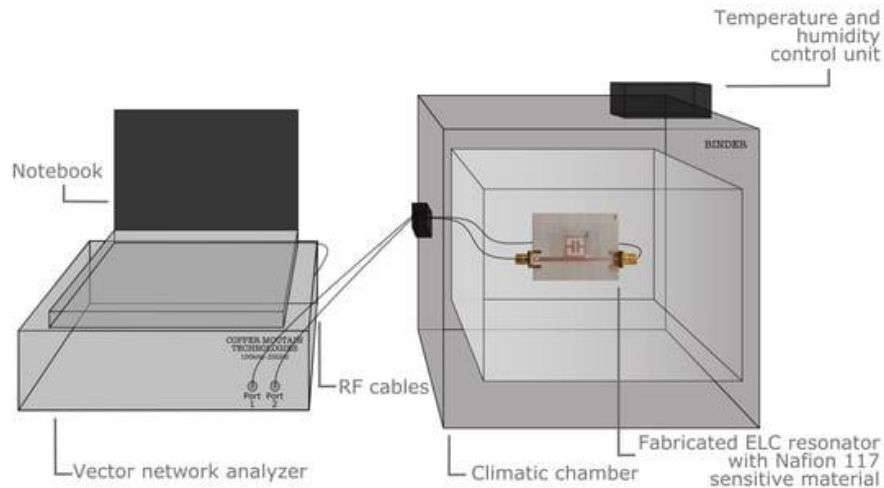


Рисунок 3.6 – Схема установки, що розглядається для випробувань вологості, із зображенням датчика вологості на основі Nafion 117, реалізованого на підкладці RO4003C. Мембрана Нафiон фіксується скотчем

Параметри  $|S_{21}||S_{21}|$  вимірювались на резонаторах, виготовлених на DiClad, RO4003C, FR4 та RO3010 товщиною 0,8 мм, використовуючи векторний мережевий аналізатор (VNA) у діапазоні 1–4 ГГц та кліматичну камеру для зміни вологості навколишнього середовища в діапазоні 3–33%. Для  $|S_{21}||S_{21}|$  вимірювання узгоджуються з моделюванням, а перший резонансний пік, а також його зміщення частоти та ослаблення зі збільшенням вологості представлені на рис.3.7. (та наведено в додатку А рис.14). Зсув частоти набагато більш виражений для підкладок з низькою відносною діелектричною проникністю, тоді як підкладки з високою діелектричною проникністю працюють краще, коли вологість підвищується, а чутливість кількісно визначається в піковому ослабленні.

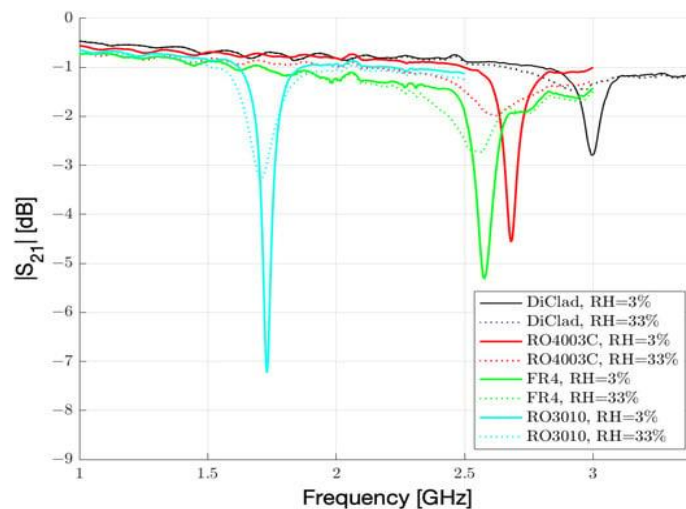


Рисунок 3.7 –  $|S_{21}||S_{21}|$  вимірюється за допомогою VNA, тоді як елемент датчика, виготовлений на різних підкладках, піддається впливу умов відносної вологості 3% і 33%

Щоб краще оцінити частотний зсув, який можна досягти з різними субстратами, було проведено додатковий тест на ширшому діапазоні вологості. На рис.3.8 резонансний пік відстежується для різних підкладок, а чутливість  $S$  розраховується як різниця між резонансною частотою в кожній точці відносної вологості та контрольною резонансною частотою  $f_{res}^{ref}$ :

$$S[\%] = |\Delta f_{res}|[\%] = \left| \frac{f_{res}^{\%RH} - f_{res}^{ref}}{f_{res}^{\%RH}} \right| \cdot 100 \quad (3.3)$$

де опорна резонансна частота  $f_{res}^{ref}$  це резонансна частота відносно точки відносної вологості 0%, розрахована для кожної підкладки за квадратичною підгонкою даних.

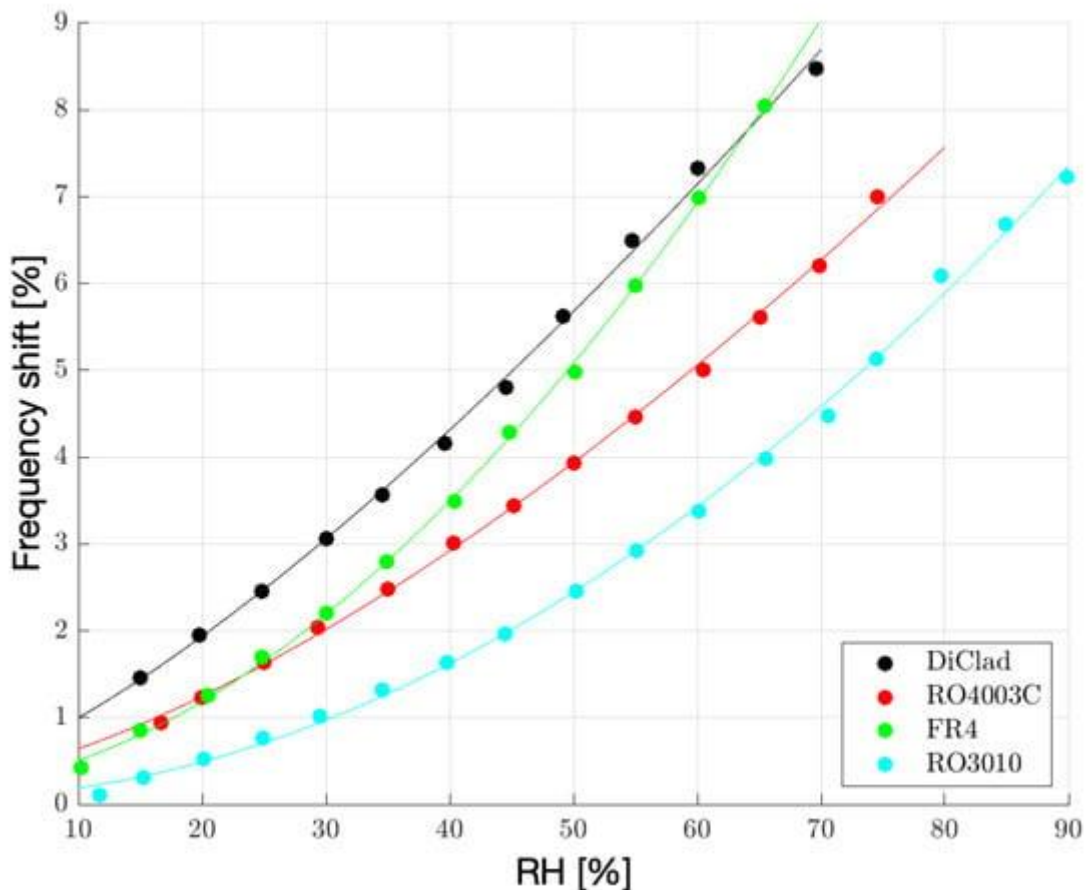


Рисунок 3.8 – Чутливість датчика, розрахована у відсотках від частотного зсуву нормалізованого резонансного піку, відстежуваного для вимірювань RH до 90%

В таб.3.3 представлено дані про зсув частоти відносно даних на рис.3.8 у вираженні МГц/%. Для повноти картини амплітудне затухання в дБ/% також наведено в таб.3.4, де підкладка RO3010 демонструє вищу варіацію амплітуди, а також глибшу пікову інтенсивність, що означає, що резонансні піки легше виявляються зі збільшенням вологості. У таб.3.3 спостереження підтвержені



для всіх субстратів, незважаючи на те, що субстрат FR4 показує більш виражений зсув частоти, коли вологість починає збільшуватися та вода входить у Nafion 117. Ненормальну поведінку можна пояснити за допомогою набору симуляцій на підкладці з матеріалу FR4. Дійсно, у попередньому підрозділі змодельовані підкладки характеризували однакове значення тангенса втрати  $\tan \delta = 0,002$ . Насправді DiClad, RO4003C і RO3010 характеризуються значеннями тангенсу втрат, які можна порівняти з тими, що використовуються в моделюванні, тоді як FR4 має в 10 разів вищий тангенс втрат, що починає впливати на ефективну діелектричну проникність комірки датчика, яка повинна справді розглядати в комплексній формі. Тому резонансна частота обернено пропорційна ефективній діелектричній проникності, яка виражається в комплексній формі наступним чином:

$$f_{res} \approx \frac{nc}{2L_{res}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.4)$$

де

$$\epsilon_{eff} = \epsilon'_{eff} - j\epsilon''_{eff} \quad (3.5)$$

і

$$\tan \delta = \epsilon''_{eff} / \epsilon'_{eff} \quad (3.6)$$

Таблиця 3.3 – Порівняння продуктивності за зсувом частоти [МГц/%] безчіпового датчика вологості, запропонованого на різних підкладках

Substrate	RH low [%]	RH High [%]	$f_{res}$ at RH Low [GHz]	$f_{res}$ at RH High [GHz]	Frequency Shift [MHz/%]
DiClad	15	70	3.023	2.808	3.909
RO4003C	15	75	2.626	2.465	2.683
FR4	10	65	2.481	2.291	3.454
RO3010	10	90	1.750	1.625	1.562

Таблиця 3.4 – Порівняння продуктивності з точки зору зміни амплітуди сигналу [дБ/%] безчіпового датчика вологості, запропонованого на різних підкладках

Substrate	RH Low [%]	RH High [%]	$ S_{21} _{min}$ at RH Low [dB]	$ S_{21} _{min}$ at RH High [dB]	$\Delta S_{21} _{min}$ [dB/%]
DiClad	15	70	-2.004	-1.296	0.012
RO4003C	15	75	-2.405	-1.308	0.018
FR4	10	65	-2.609	-1.630	0.017
RO3010	10	90	-5.528	-1.518	0.05

Як можна спостерігати під час моделювання на рис.3.9, тангенс втрат FR4 починає впливати на комплексну діелектричну проникність  $\epsilon$ , отже, на зсув

частоти резонансного піку, коли тангенс втрат Nafion 117 також збільшується через вологість.

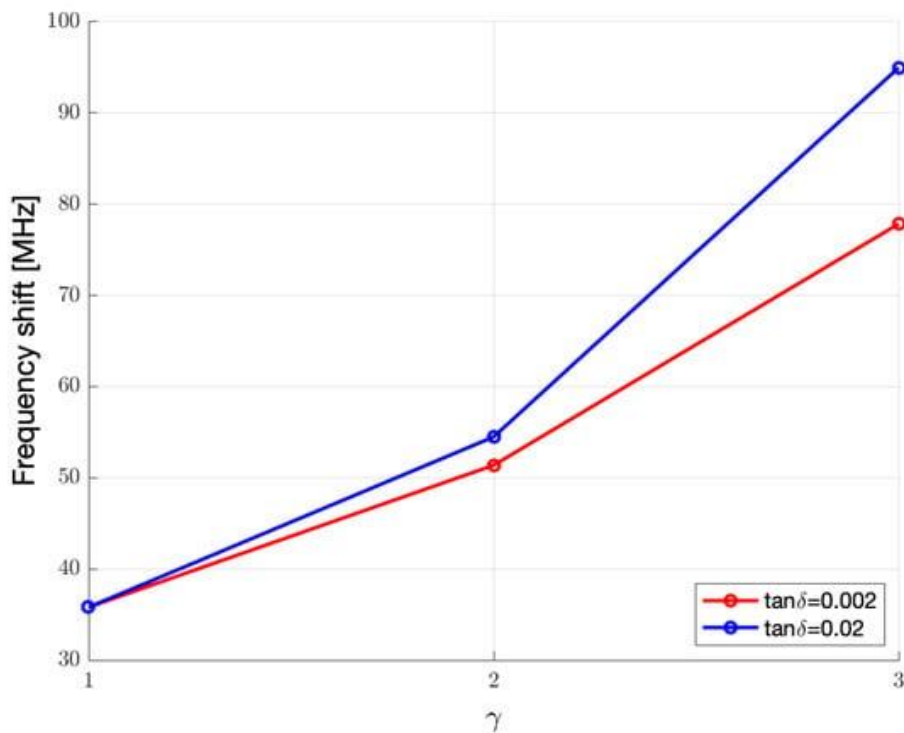
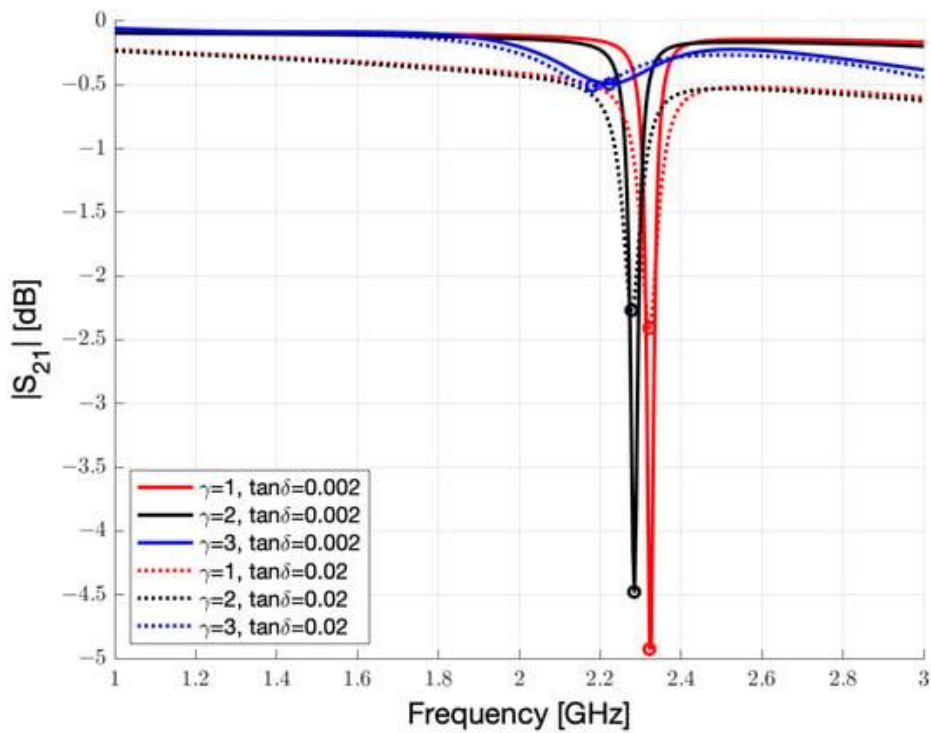


Рисунок 3.9 – Змодельована сенсорна комірка на підкладці FR4 із штучним ( $\tan \delta = 0,002$ ) і справжній ( $\tan \delta = 0,02$ ) значення тангенса втрат і вплив різних умов вологості

*Дослідження відносної вологості*

Вибір чутливих до вологи матеріалів як субстратів може певною мірою відображати зміни відносної вологості в навколишньому середовищі; однак на даний момент деякі стійкі до тиску матеріали в області моніторингу здоров'я конструкцій (SHM) мають хорошу чутливість до змін відносної вологості одночасно. У цьому експерименті мета полягає в тому, щоб вивчити багатопараметричну конструкцію датчика, яку легко інтегрувати та яка має хорошу продуктивність стиснення.

Це можливе рішення для моніторингу відносної вологості в навколишньому середовищі, впливаючи на зсув частоти резонатора шляхом прикріплення PVA покриття з чутливого до вологи матеріалу на поверхні датчика. Волога поглинається покриттям матеріалу, а потім відображається на відповідній резонансній частоті датчика. Зі зміною відносної вологості в навколишньому середовищі відносна діелектрична проникність покриття PVA також буде змінюватися, тим самим впливаючи на пікове значення резонансної частоти датчика, що призводить до певних ефектів зсуву частоти.

Щоб проаналізувати чутливість мітки до вологості, у цій роботі використовувалася колоїдна плівка PVA та переносилася в резонансний блок датчика з невеликою кількістю адгезиву, а також моделювалася зміна відносної вологості навколишнього середовища в закритому кліматичному боксі, як показано на рис.3.10а. Мітка підключена до векторного аналізатора мережі (VNA) через два радіочастотні кабелі з низькими втратами, що проходять через коробку, а регульований зволожувач поміщається в герметичну коробку. Щоб забезпечити рівномірну зміну вологості, у коробці також встановлено пластину з безводним гігроскопічним агентом  $\text{CaCl}_2$ , щоб збалансувати тенденцію до зростання вологості, а для моніторингу температури та вологості використовується високоточний електронний прилад із зондом. зміна вологості в боксі в реальному часі. На рис.3.10b показано фактичний сценарій тестування на вологість, щілину коробки було повністю закрито стрічкою (3M) і тканинами, початкова температура становить  $24,6\text{ }^\circ\text{C}$ , а початкова вологість становить 27%. Враховуючи, що відносна вологість у фактичному середовищі зазвичай коливається від 30% до 90%, тест відносної вологості починається з 30%, і підготовлена плівка PVA наклеюється на резонансні блоки ELC та CSRR відповідно.

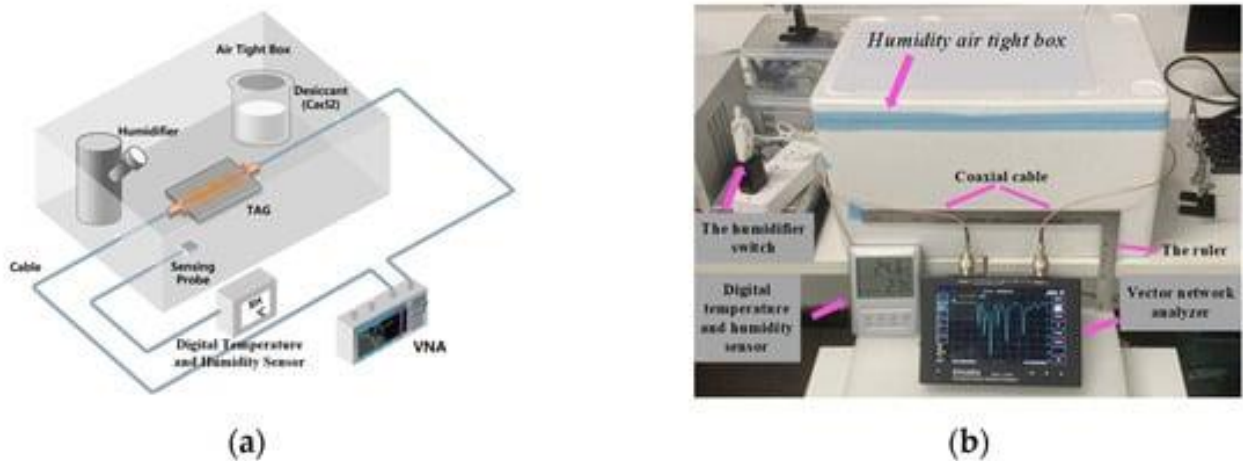


Рисунок 3.10 – Сценарії випробування вологості міток: ( а ) Симуляція сцени експерименту тривимірного моделювання; ( б ) Експериментальне тестування вологості в лабораторних умовах

На рис.3.11 показано зсув частоти резонансного блоку ELC із збільшенням відносної вологості навколишнього середовища. Резонансна частота, що відповідає резонансному блоку ELC без плівки PVA на поверхні, становить 3,96 ГГц. Коли гелева плівка ПВА покрита, початкова частота матиме певне відхилення. Оскільки важко виміряти вологість на поверхні плівки ПВА, її спочатку сушать на повітрі протягом 2 днів, а потім поміщають у герметичний ящик із відносною вологістю приблизно 30% на 2 дні для виконання певної обробки зневоднення.

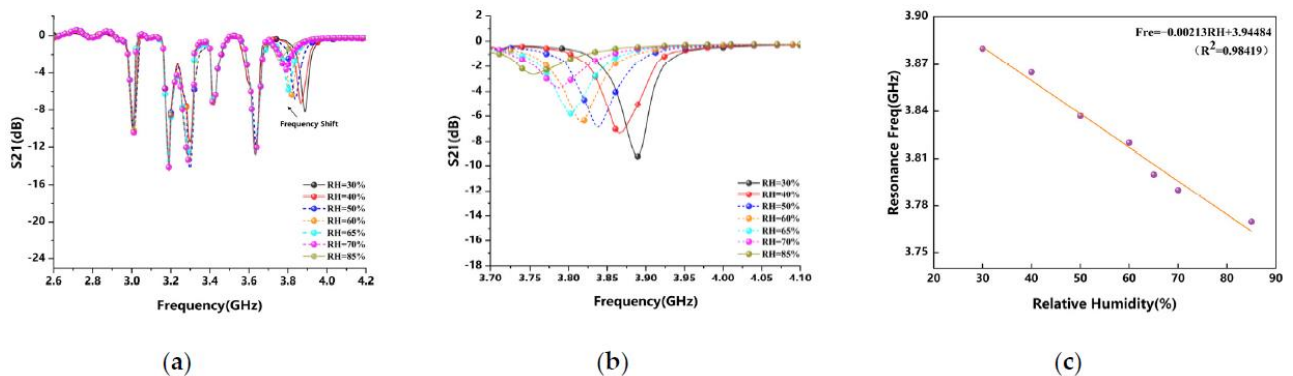


Рисунок 3.11 – Резонансний відгук блоку датчика вологості ELC: ( а ) Зміни загальної кривої резонансного відгуку S21 датчика мітки; ( б ) Зміна кривої S21 локально підсиленого резонансного елемента ELC; ( с ) Лінійна лінія відносної вологості резонансного елемента ELC

Зміщення всіх резонансних частот можна спостерігати в цілому на рис.3.11а, а зрушення резонансних блоків ELC частково збільшено на рис.3.11б, від початкових 3,8814 ГГц до 3,7714 ГГц, резонансна частота зменшена приблизно на 110 МГц, а зміна резонансної кривої більш очевидна в

діапазоні високої вологості, де відносна вологість перевищує 70%. Як показано на рис.3.11с, чутливість до вологості резонатора ELC становить приблизно 2,18 МГц/RH шляхом лінійної нормалізації характеристик вимірювання вологості резонатора ELC, і експерименти показують найкращу лінійність у діапазоні 30–60% RH, тому оптимальний діапазон резонансних частот, що відповідає чутливості до вологості, становить приблизно 3,817–3,881 ГГц.

На рис.3.12 показано зсув частоти резонансного блоку CSRR із збільшенням відносної вологості навколишнього середовища. Після розміщення гелевої плівки ПВА на поверхні резонатора CSRR її також поміщають у герметичний бокс і ставлять у статичне положення на дві доби. На рис.3.12а ми можемо спостерігати загальний зсув усіх резонансних частот. На рис.3.12б ефект зсуву резонансної частоти частково посилюється, а вибраний діапазон частот визначається кількісно як область вимірювання вологості, яка зміщується з початкових 2,69 ГГц до 2,615 ГГц, а частота зменшується на 75 МГц. Коли вологість підвищується, збільшення накопичення води на поверхні мітки матиме певний вплив на з'єднаний резонансний блок. З аналізу видно, що зрушення резонансної частоти відносно рівномірне зі збільшенням вологості, але резонансний ефект характеристики обмеження смуги в зоні високої вологості, очевидно, зменшується. Коли плівка PVA поглинає достатньо води, глибина проникнення та ефект зсуву резонансної частоти збільшаться, а глибина виїмки стане значно меншою за високої вологості, яку вже нелегко зафіксувати. Причина полягає в тому, що зі збільшенням відносної вологості навколишнього середовища відносна діелектрична проникність покриття змінюється, а ефективність перенесення збільшується. По-друге, товщина покриття певною мірою збільшується, коли воно поглинає воду у вологому середовищі, що також пов'язано з товщиною плівки.

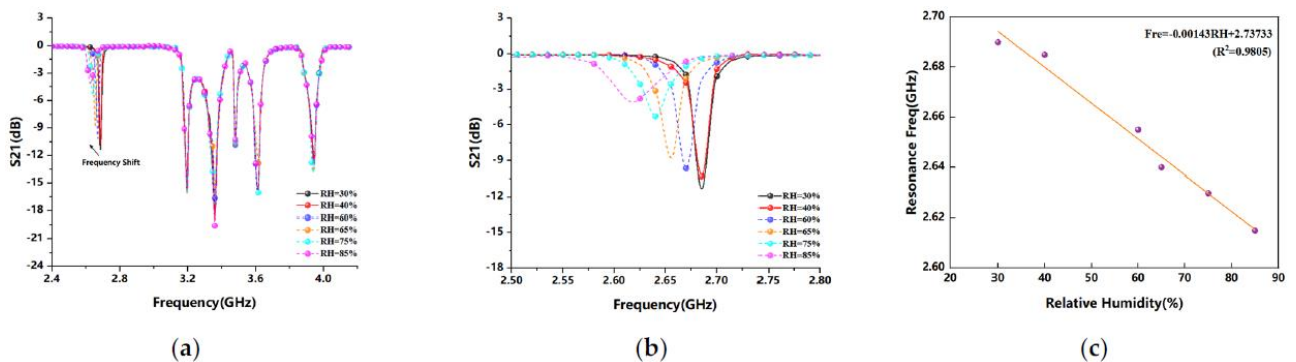


Рисунок 3.12 – Резонансний відгук блоку датчика вологості CSRR: ( а ) Зміни загальної кривої резонансного відгуку S21 датчика мітки; ( б ) Зміни кривої S21 локально посиленого резонансного елемента CSRR; ( с ) Лінійна лінія відносної вологості резонансного елемента CSRR

Варто зазначити, що хоча на результати вимірювань експерименту впливають численні фактори навколишнього середовища, загальна тенденція змін є послідовною. Відповідно до тенденції фактичного результату вимірювання, зі збільшенням вологості навколишнього середовища ефективність поглинання покриттям молекул води в повітрі зростає в зоні високої вологості. Це призводить до більш швидкого збільшення товщини покриття. Як показано на рис.3.12с, чутливість до вологості резонатора CSRR становить близько 1,43 МГц/RH шляхом лінійної нормалізації характеристик вимірювання вологості блоку резонатора CSRR. Резонатор CSRR менш чутливий до вологості, ніж резонатор ELC, тому додавання блоку резонатора ELC, чутливого до високої вологості, є можливим рішенням для покращення продуктивності датчика.

Особливістю цього датчика вологості RFID без чипа є те, що він є реверсивним. Коли вологість покриття PVA висушується на повітрі, бірку можна в основному відновити до початкового стану, а використання сушильної печі може швидко скоротити час відновлення бирки. Експерименти показали, що електричні властивості мітки є тимчасовими зі зміною вологості, і бірка не буде остаточно пошкоджена та може бути використана повторно. Слід зазначити, що на час відгуку сенсора впливає товщина плівки ПВА. Збільшення товщини сповільнить час відгуку мітки. У той же час, розширення полімерної матриці ПВА в діапазоні високої вологості також матиме певний вплив на час відгуку мітки.

#### *Температурний експеримент*

Коефіцієнт теплового розширення стійкої до тиску підкладки датчика RFID без мікросхем, який зараз використовується в полі напруги, невисокий, тому чутливість до температури навколишнього середовища низька. Коли температурний поріг буде перевищено, це спричинить незворотні зміни в електричних характеристиках датчика мітки.

Враховуючи наведені вище фактори, у цьому експерименті використовується метод розкладання чутливої до температури полімерної плівки на поверхні блоку мікросмужкового резонатора для проведення експерименту та проведення експериментального випробування за допомогою процесу, показаного на рис.3.13, (та наведено в додатку А рис.15) де рис.3.13а є тривимірне моделювання чутливого до температури експериментального тесту моделювання мітки експериментальної сцени, а на рис.3.13b показано фактичний процес експериментального випробування чутливого до температури мітки. У цьому експерименті метод нагрівання на водяній бані використовується замість традиційного високотемпературного кліматичного

боксу. Порівняно з високотемпературним кліматичним боксом метод теплопровідності методу нагрівання водяної бані є більш рівномірним, а температуру можна контролювати.

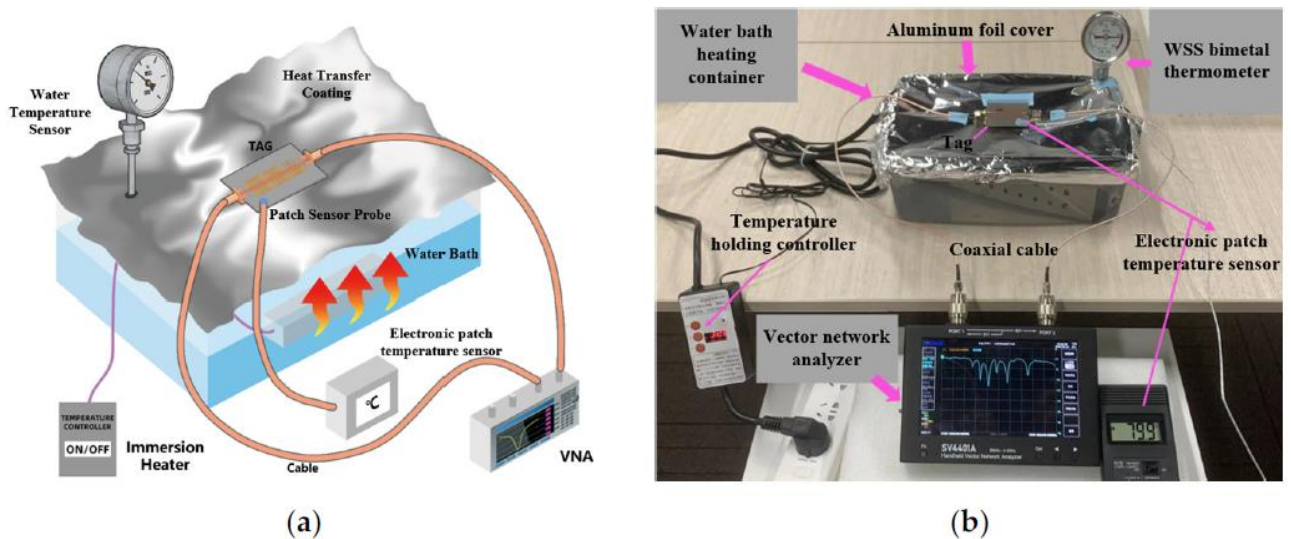


Рисунок 3.13 – Випробування характеристики вимірювання температури мітки: ( а ) Тест чутливості до температури мітки, моделювання сцени 3D імітаційного експерименту; ( б ) Випробування характеристики температурної чутливості мітки в лабораторії

Щоб точніше імітувати зміни температури в реальному середовищі, у цьому експерименті встановлюється інтрузивний нагрівач у стійкий до високих температур резервуар для води, і температуру нагріву водяної бані нагрівача можна регулювати інтелектуально. Оберніть поверхню резервуара для води шаром алюмінієвої фольги з хорошою теплопровідністю, закріпіть бірку на алюмінієвій фользі термостійкою стрічкою (компанія 3М, Сент-Пол, Міннесота, США) і повністю прилаштуйте поверхню. Товщина алюмінієвої фольги становить 9 мкм, а два порти мітки підключені для вимірювання через радіочастотний кабель, щоб зменшити зовнішні перешкоди.

Щоб зменшити вплив втрати тепла під час теплопередачі, на поверхню мітки встановлюється датчик температури, а в резервуар для води вставляється стандартний промисловий тестер температури води, щоб фіксувати зміну температури мітки в реальному часі. Експериментальне вимірювання температури може досягати приблизно 80 °C, але температура вища за 75 °C і область є нестабільною, тому діапазон вимірювання вибрано між 25 °C і 75 °C.

Розчин rGO, приготовлений методом термічного відновлення, і розчин ПВС змішували у співвідношенні 1:5 і поміщали в скляну ємність і випарювали природним шляхом при кімнатній температурі, щоб отримати шар композитної плівки rGO і ПВС, який має хорошу температурну чутливість. У діапазоні від

46,85 °C до 126,85 °C діелектрична проникність збільшується зі збільшенням температури. Метод вільного простору є одним з ефективних аналітичних методів вимірювання діелектричної проникності. Тангенс втрати композитної плівки зі змінами температури можна виразити наступним рівнянням (3.7):

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \\ \tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \end{cases} \quad (3.7)$$

де  $\varepsilon$  – відносно комплексної діелектричної проникності,  $\varepsilon'$  – відносно реальної діелектричної проникності,  $\varepsilon''$  – відносно віртуальної діелектричної проникності, а  $\tan \delta$  – тангенс втрати.

На рис.3.14 показано зв'язок між частотною характеристикою резонансного блоку S21 датчика температури CSRR і зміною температури під час нагрівання водяної бані. Композитна плівка rGO та PVA була прикріплена до поверхневого зазору резонатора CSRR за допомогою невеликої кількості адгезиву, мітка була повністю прикріплена до теплопровідної алюмінієвої фольги, а обидва кінці мітки були підключені до векторного аналізатора мережі (SYSJOINT). SV4401A). Температуру водяної бані підвищували з кімнатної температури 24,6 °C до 65 °C з кроком 10 °C і від 65 °C до 75 °C з кроком 5 °C, і температуру водяної бані підтримували при кожній температурі протягом приблизно 1–2 години з кожним збільшенням температури зарезервовано певний час, щоб мітка на алюмінієвій фользі досягла рівноваги з температурою водяної бані, і VNA записує дані. На рис.3.14а ми можемо спостерігати зсув усіх резонансних частот мітки під впливом температури. На рис.3.14б ефект зсуву частоти CSRR частково збільшений. Резонансна частота S21 становить приблизно 3,03 ГГц до того, як полімерна плівка не покрита, і 3,017 ГГц при кімнатній температурі після покриття, що зменшується на 23 МГц. З підвищенням температури резонансна частота зміщується з початкових 3,017 ГГц до 2,97 ГГц, а зсув частоти досягає 47 МГц. Аналіз показує, що зі збільшенням температури резонансна частота поступово зменшується, а зворотні втрати датчика температури S21 також постійно зменшуються. Як показано на рис.3.15, за допомогою лінійної нормалізації характеристик чутливості блоку резонатора CSRR в діапазоні температур від 24,6 °C до 75 °C, рис.3.15а показує, що чутливість резонансної частоти резонатора CSRR з температурою зміна становить приблизно 898,63 кГц/°C, а рис.3.15б показує, що чутливість амплітуди резонансної частоти резонатора CSRR зі зміною температури становить приблизно 0,10273 дБ/°C. Коли для вимірювання температури використовується резонансний блок CSRR, характеристики зсуву частоти резонансу та зміна глибини пікового



резонансу мають хорошу лінійність у вимірному діапазоні. Таким чином, зміну температури можна відобразити у двох вимірах, і експерименти показують, що вона має найкращу лінійність у діапазоні 30–45 °С, тому оптимальний діапазон резонансних частот, що відповідає температурній чутливості, становить приблизно 3,003–3,016 ГГц.

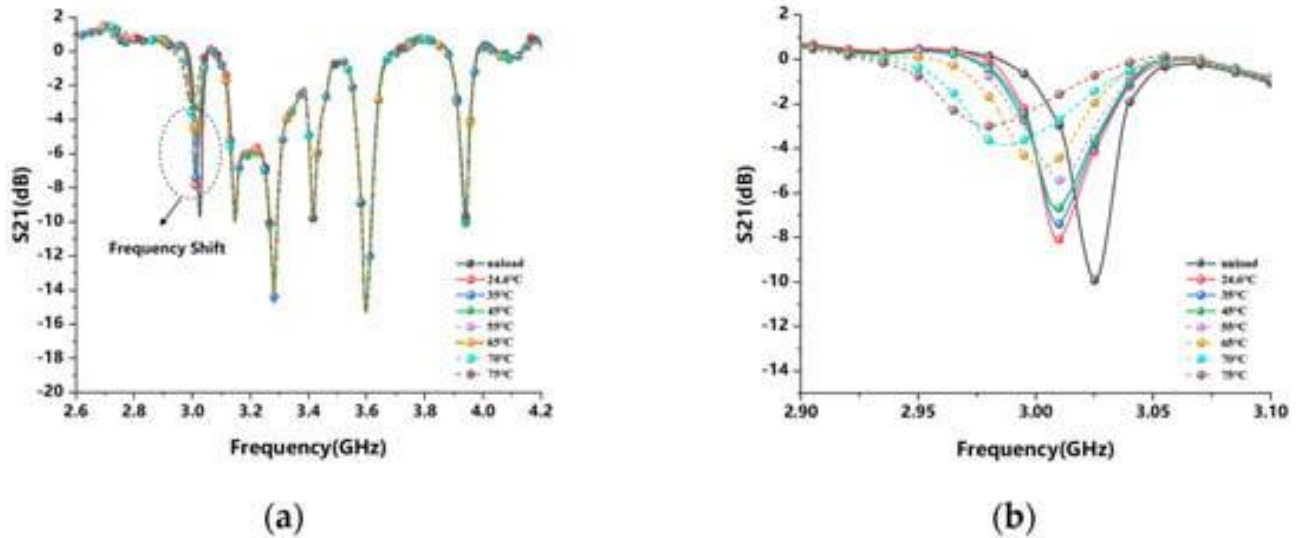


Рисунок 3.14 – Резонансна відповідь блоку вимірювання температури CSRR: ( а ) зміна резонансної кривої відповіді S21 датчика мітки; ( б ) Зміна кривої резонансного блоку S21 часткового посилення CSRR

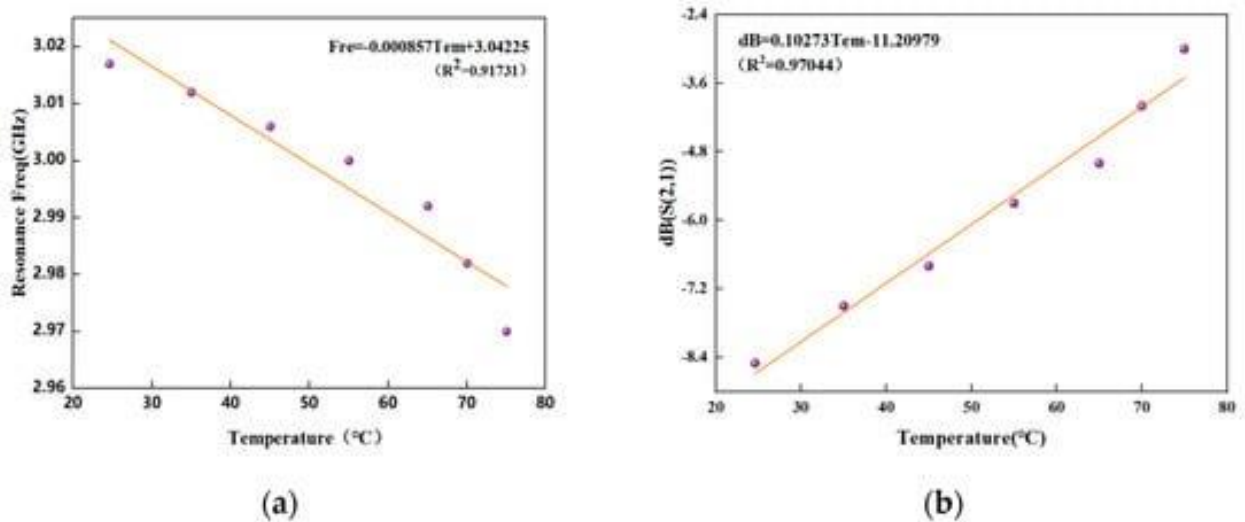


Рисунок 3.15 – Лінійна нормалізована підгонка температурної чутливості резонатора CSRR: ( а ) резонансна частота CSRR змінюється з температурою; ( б ) Глибина піку резонансної частоти CSRR змінюється залежно від температури

Для більш інтуїтивно зрозумілого порівняння в цій статті підсумовуються деякі зареєстровані дослідження багатопараметричних датчиків RFID без мікросхем за останні роки, як показано в таб.3.5. Перевага цього тегу полягає в тому, що він сприймає кілька параметрів одночасно. Поєднуючи відповідні

переваги резонаторів CSRR і ELC, він реалізує налаштування розділення різних діапазонів робочих частот сенсорної функції, покращує використання спектра та має хороші характеристики зсуву частоти в діапазоні вимірювань, що може краще контролювати зміни температури та вологості. в середовищі.

Таблиця 3.5 – Порівняння запропонованої мітки з іншими безчіповими багатопараметричними датчиками в літературі

Resonator Type	Size (mm <sup>2</sup> )	Smart Materials	Sensing Parameter	Range	Sensitivity
Split box resonator	14.38 × 156	None	Crack and moisture	NA	NA
ELC and U-shaped slots resonators	6.8 × 15	PVA and Kapton	Humidity and encoding	35–85%RH, 6-bit	NA
Etched circular slots resonator	7.4 × 7.4 × π	MWCNT and Kapton <sup>®</sup> HN substrate	Humidity and gas	40–70%RH	NA
ELC and U-shaped slots resonator	8 × 25	PVA and Phenanthrene	Humidity threshold temperature and encoding	35–85% RH, 65–95 °C, 3-bit	NA
Complementary split ring resonator (CSRR)	8 × 9	GO@PI and HTCC substrate	Humidity, temperature and pressure	20–90% RH, 25–300 °C, 10–300 kPa	389 kHz/% RH, 1.52 MHz/% RH(60–90%RH), 133 kHz/°C, 107.78 kHz/kPa
Asymmetric circular four split ring resonator (ACiSRR)	25 × 25	GO, rGO and Chitosan	Humidity, temperature and pH	NA	NA
Split ring resonator (SRR)	18.5 × 46	SWCNT	Temperature and gas	30–60 °C, 500–20,000 ppm	36.9% (RCS) for 30 °C, 12.2% (RCS) for 20,000 ppm
U-shaped resonator and L-shaped resonators	15 × 35	Rogers 6010.2LM substrate	Crack and temperature	0.1–0.5 mm, 25–65 °C	NA
Multistate-coupled line resonators	NA	Stanyl and Kapton	Humidity and temperature	35–85% RH	NA
Split ring resonator (SRR)	NA	Ag@MoS <sub>2</sub> and polyimide (PI) substrate	Humidity and gas	0–60% RH, 0–100 ppm	0.097% ppm <sup>-1</sup>
CSRR and ELC resonators	50 × 50	PVA and PVA-rGO	Humidity, temperature and encoding	30–85% RH, 24.6–75 °C, 4-bit	2.18 MHz/RH, 898.63 KHz/°C, 0.10273 dB/°C

### 3.5 Моніторинг у реальному часі та бездротова передача даних зондування

У цьому підрозділі пропонується новий метод виявлення спектру міток і вилучення даних, а також пропонується реалізація мобільного виявлення зчитувача RFID без мікросхеми на фіксованих сенсорних мітках у майбутньому з точки зору інженерного застосування. На рис.3.16 (та наведено в додатку А рис.16) показана легка архітектура динамічного виявлення спектру та

бездротової передачі даних, запропонована в цьому документі, яка в основному включає в себе легкий недорогий VNA, блок мікроконтролера (MCU) з функцією інтерфейсу універсальної послідовної шини на ходу (USB OTG), Bluetooth приймач і передавач і пасивна RFID-мітка. У прикладному сценарії для цього експерименту метод виявлення спектру міток є більш гнучким і зручним, ніж традиційний метод виявлення. Завдяки інтелектуальній взаємодії контролера MCU з векторним мережевим аналізатором модуль Bluetooth може підтримувати плавну передачу даних і інструкцій і розширювати сферу застосування датчика, що має деякі потенційні перспективи інженерного застосування. Ця система заснована на платформі розробки програмного забезпечення Keil uVision5 і використовує мову C для компіляції програм. Використовуючи мову C як мову розробки програм, він може виконувати більшість функцій мови асемблера з високою сумісністю та переносимістю.

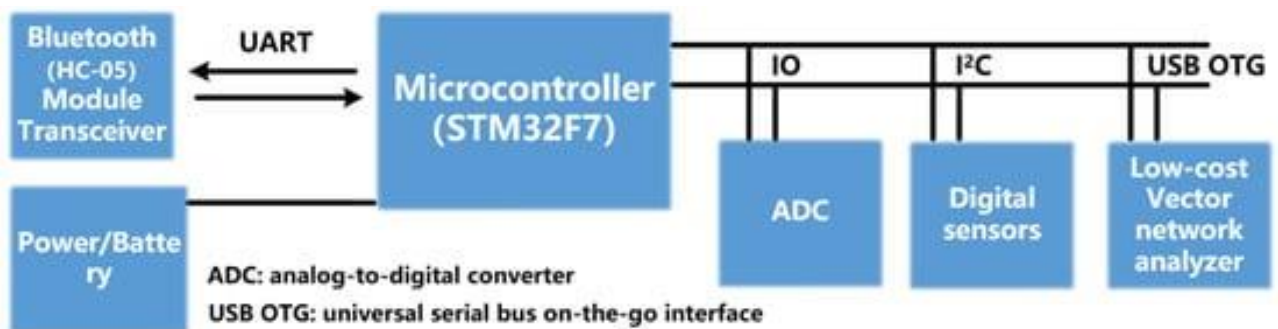


Рисунок 3.16 – Динамічне виявлення спектру та архітектура системи передачі даних

На рис.3.17 (та наведено в додатку А рис.17) налаштовано простий експериментальний сценарій виявлення спектру динамічних міток, у якому пасивні мітки RFID підключаються до VNA через радіочастотний кабель, MCU спілкується з недорогим VNA як головним контролером, а параметри розсіювання міток у VNA збираються за допомогою інструкція до персонального комп'ютера (ПК). Взаємодія між MCU і малим VNA може бути реалізована через протокол USB. У цій роботі інтерфейс USB OTG використовується для підключення головного та підлеглого пристроїв. Стандарт інтерфейсу USB OTG дозволяє пристрою працювати як хост, так і як підлеглий пристрій, що забезпечує двонаправлену передачу даних між пристроями. Коли MCU використовується як основний пристрій керування, він може здійснювати збір у реальному часі даних класу пристроїв зв'язку (CDC) VNA у формі віртуального послідовного порту та може здійснювати зчитування даних цифрового електронного датчика. через шину

міжінтегральної схеми ( $\mu\text{C}$ ). Параметри розсіювання передаються на ПК у формі множини за допомогою вбудованого модуля зв'язку Bluetooth MCU (HC-05). У той же час MCU має кілька інтерфейсів введення/виведення (IO) і може бути підключений до різноманітних цифрових датчиків. MCU на рис.3.16 підключено до високочутливого електронного датчика температури та вологості (DHT11). Електронний зонд датчика можна розгорнути в герметичній коробці для моніторингу змін температури та вологості в коробці в режимі реального часу, що зручно для порівняння з даними тестування міток. Усі дані можна надсилати на ПК для обробки даних і динамічного відображення через модуль Bluetooth, і користувачі можуть вибирати різні пристрої для збору даних, надаючи інструкції з ПК. Крім того, встановивши модуль годинника, можна регулярно збирати дані, що зменшує енергоспоживання пристроїв виявлення.

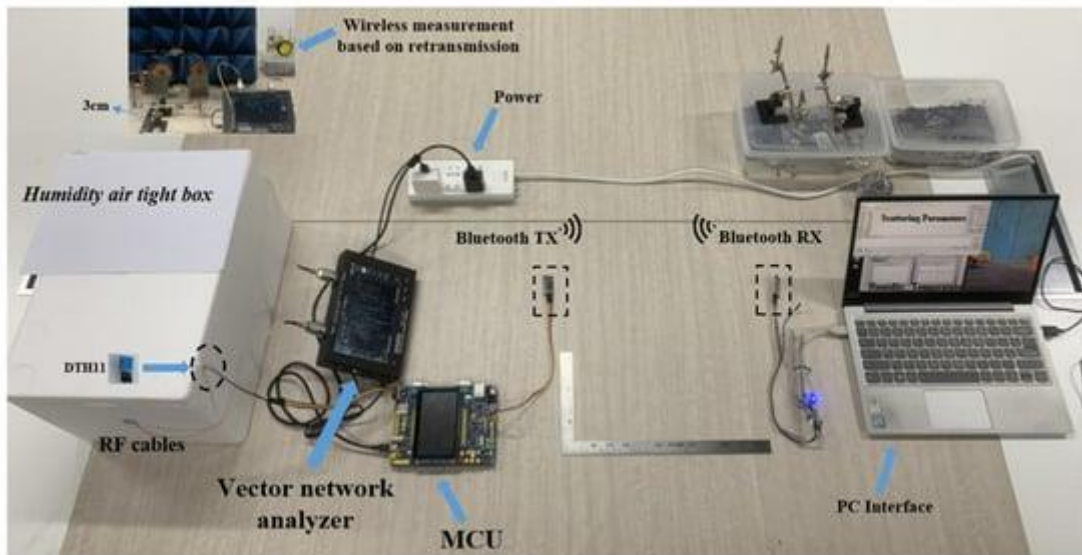


Рисунок 3.17 – Динамічний моніторинг спектру RFID-мітки та експеримент бездротової передачі даних

Амплітуда  $A$  (у дБ) і фаза (у градусах), виміряні векторним мережевим аналізатором на кожній резонансній частоті, можуть бути виражені за допомогою параметра розсіювання  $S$  у рівнянні (3.8):

$$S = 10^{A/20} e^{i\varphi\pi/180^\circ} \quad (3.8)$$

Таким чином, контролер MCU може витягти параметри розсіювання в мітці RFID і отримати інформацію про амплітуду  $S$ -параметра шляхом збору комплексної форми  $S$ -параметра. Параметр відгуку  $S_{21}$  двопортового датчика антени-мітки можна отримати за допомогою рівняння (3.9).

$$\begin{cases} S_{(2,1)} = \sqrt{\operatorname{re}^2 S_{(2,1)} + \operatorname{im}^2 S_{(2,1)}} \\ S_{(2,1)}(dB) = 20 \lg S_{(2,1)} \end{cases} \quad (3.9)$$

Як показано на рис.3.17, все ще є місце для оптимізації системи динамічного виявлення пасивного спектру RFID і системи бездротової передачі. Зіставивши відповідні прийомопередавальні антени на обох кінцях двопортової мікросмужкової антени, бездротове розташування міток і обладнання виявлення може бути реалізовано на основі повторної передачі, а відстань вимірювання бездротового виявлення на основі повторної передачі в цій роботі становить близько 3 см. Легке обладнання для виявлення тегів RFID без мікросхем інтегровано та розміщено на автоматизованих інструментах, таких як дрони та роботи, які можуть реалізувати мобільну систему виявлення RFID без мікросхем і можуть реалізувати збір даних у реальному часі та розвідку в поєднанні з програмним забезпеченням, таким як бази даних на стороні ПК. обробки, щоб сформувавши повне інтелектуальне мережеве рішення, яке можна практично застосувати.

### 3.6 Висновки до розділу

У цьому розділі змодельовано вплив матеріалу підкладки на продуктивність датчика RFID без мікросхем. Перевірено змодельовані результати за допомогою вимірювань реальних резонаторів. Діелектричні параметри матеріалу підкладки виявилися дуже важливими для максимізації продуктивності датчика по відношенню до робочого діапазону датчика і, отже, по відношенню до бажаного застосування. При низьких значеннях вологості найкращим вибором є субстрати з низькою діелектричною проникністю. Якщо датчику вологості потрібно працювати в режимі підвищеної вологості або загалом у ширшому діапазоні вологості, підкладка з високою діелектричною проникністю може бути найкращим вибором для того, щоб резонансний пік добре виявлявся.

Розроблено 6-бітний безчиповий RFID-датчик вологості на основі частотної області. Запропонований резонатор CSRR виконано у вигляді зв'язку з мікросмужковою лінією, а резонатор ELC доданий як блок вимірювання вологості. У цій роботі порівнюється та аналізується чутливість до вологи резонатора ELC і резонатора CSRR, а також аналізується чутливість до температури CSRR. Чутливість кожного сенсорного блоку, що використовується в мітці, була розрахована методом лінійної нормалізації. Усі три сенсорні функції запропонованого багатопараметричного датчика RFID

кількісно визначені у відповідних робочих частотних діапазонах, і не буде ніяких перешкод між зондуючими резонансними частотами різних розділів, тому можна використовувати гнучке виявлення частотного діапазону малого діапазону, що допомагає покращити здатність виявлення. Крім того, пропонується легка архітектура динамічного виявлення спектру тегів RFID та бездротової передачі даних, яка є більш зручною та гнучкою та сприяє розвитку експериментів та інтелектуальному збору даних. Запропонована концепція забезпечує реальну ідею для реалізації можливості безчипового обладнання для виявлення тегів RFID у мобільному виявленні.

Запропонована недорога схема мобільного виявлення яка базується на полегшеній VNA, і подальші дослідження необхідно проводити з прийомопередавальними антенами з більшим коефіцієнтом посилення. У майбутньому будуть розроблені індивідуальні безчипові зчитувачі RFID та протоколи зв'язку, і ця робота може значною мірою сприяти широкомасштабному розгортанню безчипових датчиків RFID-міток.

## 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 «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ» 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 «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

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

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

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (повному або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	0	0	56
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)	40	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>		45,3		



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	0
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	58	58
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>	58,7		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [65]

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

де  $k_{\text{нов}}$ ,  $k_{\text{теор}}$  - показники ступеня новизни та рівня теоретичного

опрацювання науково-дослідної роботи,  $k_{нов} = 45,3$ ,  $k_{теор} = 58,7$  балів;

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

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 45,3 + 0,4 \cdot 58,7 = 50,67 \text{ балів.}$$

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

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

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

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ», даний рівень становить 50,67 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 «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ», 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 [65]

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

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,  $T_p=21$  дні.

$$Z_o = 17310,00 \cdot 26 / 21 = 21431,43 \text{ (грн.)}$$

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
Науковий керівник дослідження	17310,00	824,29	26	21431,43
Старший науковий співробітник	16570,00	789,05	26	20515,24
Інженер-метролог	16040,00	763,81	5	3819,05
Всього				45765,71

### Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ» 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

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

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) [65];

$K_c$  – 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  $T_p = 21$  дн;

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (21 \cdot 8) = 59,22 \text{ (грн.)}$$

$$З_{р1} = 59,22 \cdot 7,20 = 426,41 \text{ грн.}$$

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
Встановлення допоміжного обладнання	7,20	2	1,10	59,22	426,41
Встановлення програмного забезпечення	5,30	4	1,50	80,76	428,02
Встановлення блоків реєстрації вологості	6,45	4	1,50	80,76	520,90
Монтаж блоків системи передачі даних	4,50	5	1,70	91,53	411,87

Продовження таблиці 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату

робітників

Формування бази даних результатів вимірювань	18,00	3	1,35	72,68	1308,29
Підготовка лабораторії	12,30	3	1,35	72,68	894,00
Всього					3989,49

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

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

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

$$Z_{\text{дод}} = (45765,71 + 3989,49) \cdot 11 / 100\% = 5473,07 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

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

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

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

$$Z_n = (45765,71 + 3989,49 + 5473,07) \cdot 22 / 100\% = 12150,22 \text{ (грн.)}$$

#### 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 «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ».

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.)

$$M_1 = 3,0 \cdot 210,00 \cdot 1,01 - 0 \cdot 0 = 636,30 \text{ (грн.)}$$

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
Папір	210,00	3,0	0	0	636,30
Диск оптичний	26,00	4,0	0	0	105,04
Канцелярське приладдя	180,00	4,0	0	0	727,20
Тека для паперів	125,00	3,0	0	0	378,75
Тонер Canon 12X	230,00	1,0	0	0	232,30
Флеш-пам'ять 32 Gb	134,00	1,0	0	0	135,34
Флюс ФКСН	360,00	0,010	0	0	3,64
Каніфоль	260,00	0,020	0	0	5,25

## Продовження таблиці 4.6 – Витрати на матеріали

Припій ПОС-61	560,00	0,010	0	0	5,66
Склотекстоліт фольгований односторонній	220,00	0,010	0	0	2,22
Хлорне залізо	176,00	0,150	0	0	26,66
Всього					2258,36

## 4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_e$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ», 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, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ ).

$$K_e = 1 \cdot 3079,00 \cdot 1,01 = 3109,79 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Зовнішній жорсткий диск 2.5" 2ТВ Seagate (STGD2000200)	1	3079,00	3109,79
Резистори постійного опору	5	3,54	17,88
Вологорезистор АМ2301А	1	182,00	183,82
Конденсатор керамічний	1	2,75	2,78
Транзистор біполярний BC857C	1	6,22	6,28
Транзистор польовий BF998	1	18,60	18,79
Котушка індуктивності	1	21,40	21,61
Всього			3360,95

#### 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.

$$B_{\text{спец}} = 12400,00 \cdot 1 \cdot 1,01 = 12524,00 \text{ (грн.)}$$

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 цифровий ОСЦ-2000	1	12400,00	12524,00
Пристрої передачі даних	1	5796,00	5853,96
Гігрометр автоматичний еталонний	1	3594,00	3629,94
Всього			22007,90

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

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



необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

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

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

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

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

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{npz} = 9485,00 \cdot 1 \cdot 1,01 = 9579,85 \text{ (грн.)}$$

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
Прикладне програмне забезпечення проектування PCAD 2000 Schematic	1	9485,00	9579,85
Всього			9579,85

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

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

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

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

$t_{вик}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під

час досліджень, місяців;

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

$$A_{обл} = (26799,00 \cdot 2) / (2 \cdot 12) = 2233,25 \text{ (грн.)}$$

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 дослідника	26799,00	2	2	2233,25
Робоче місце дослідника	7350,00	3	2	408,33
Пристрої передачі даних	6560,00	5	2	218,67
Офісна оргтехніка	7960,00	5	2	265,33
Приміщення лабораторії досліджень	407000,00	25	2	2713,33
Електронно-обчислювальний комплекс	45500,00	2	2	3791,67
Всього				9630,58

#### 4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

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

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

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,  $\eta_i < 1$ .

$$B_e = 0,24 \cdot 200,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 360,00 \text{ (грн.)}$$

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 дослідника	0,24	200,0	360,00
Робоче місце дослідника	0,10	200,0	150,00
Пристрої передачі даних	0,03	200,0	45,00
Офісна оргтехніка	0,65	1,5	7,07
Електронно-обчислювальний комплекс	0,40	200,0	600,00
Осцилограф цифровий ОСЦ-2000	0,20	35,0	52,50
Пристрої передачі даних	0,12	35,0	31,50
Гігрометр автоматичний еталонний	0,01	35,0	2,63
Всього			1248,69

#### 4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ» 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

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

де  $H_{cb}$  – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo  $H_{cb} = 20\%$ .

$$B_{cb} = (45765,71 + 3989,49) \cdot 20 / 100\% = 9951,04 \text{ (грн.)}$$

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», прийmemo  $H_{cn} = 30\%$ .

$$B_{cn} = (45765,71 + 3989,49) \cdot 30 / 100\% = 14926,56 \text{ (грн.)}$$

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

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

де  $H_{ig}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{ig} = 55\%$ .

$$I_g = (45765,71 + 3989,49) \cdot 55 / 100\% = 27365,36 \text{ (грн.)}$$

#### 4.2.12 Накладні (загально виробничі) витрати

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

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

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

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

$$B_{нзв} = (45765,71 + 3989,49) \cdot 105 / 100\% = 52242,97 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{одд} + Z_n + M + K_6 + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_6 + B_{нзв}. \quad (4.17)$$

$$B_{заг} = 45765,71 + 3989,49 + 5473,07 + 12150,22 + 2258,36 + 3360,95 + 22007,90 + 9579,85 + 9630,58 + 1248,69 + 9951,04 + 14926,56 + 27365,36 + 52242,97 = 219950,76 \text{ (грн.)}$$

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

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

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

$$3B = 219950,76 / 0,9 = 244389,74 \text{ (грн.)}$$

#### 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 «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ» 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  $T_C = 2$ ;

$R$  – 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  $B = 244389,74$  (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 [65].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 2 \cdot 4 / 244,4 \cdot 0,17 = 12,57.$$

Якщо  $K_p > 1$ , то науково-дослідну роботу на тему «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

#### 4.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ» складають 244389,74 (грн.). Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ» 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.

## ВИСНОВКИ

У першому розділі проведено аналіз сучасного стану розвитку сенсорів вологості. Представлено огляд оптичних, гравіметричних, ємнісних, резистивних, п'єзорезистивних датчиків вологості. Розглянуто нові процеси виробництва знаходяться в стадії постійного розвитку в комерційній та дослідницькій сферах. На сучасному ринку зростає потреба в недорогих високонадійних функціональних датчиках вологості. Інтегрований датчик вологості, який обговорюється в цьому оглядовому документі, є відповідним вибором для задоволення цього попиту. Датчики вологості широко застосовуються в моніторингу навколишнього середовища, електроніці, сільському господарстві та біомедичній галузі. Для багатьох застосувань важливим фактором є не тільки вологість, але й температура. Тому існує великий попит на просто виготовлені вбудовані датчики вологості та температури в багатьох галузях.

У другому розділі досліджені бездротові датчики RFID які викликають все більший науковий і комерційний інтерес у кількох сферах застосування, пов'язаних з IoT. Причина такого інтересу полягає в їх надзвичайно низькій вартості та простих методах виробництва. У той час як для додатків у сфері відстеження мітки без мікросхем повинні подолати значне обмеження великого обсягу необхідної інформації, у реалізації датчиків це обмеження є набагато менш суворим або неважливим.

Однак багато проблем ще потрібно вирішити, перш ніж бездротові датчики RFID зможуть досягти дифузії, порівнянної зі звичайними системами RFID. У хімічному та фізичному зондуванні необхідно покращити чутливість і вибірковість за допомогою додаткових досліджень у галузі розумних матеріалів для зондування.

Проведено моделювання впливу матеріалу підкладки на продуктивність датчика RFID без мікросхем. Перевірено змодельовані результати за допомогою вимірювань реальних резонаторів. Діелектричні параметри матеріалу підкладки виявилися дуже важливими для максимізації продуктивності датчика по відношенню до робочого діапазону датчика і, отже, по відношенню до бажаного застосування. При низьких значеннях вологості найкращим вибором є субстрати з низькою діелектричною проникністю. Якщо датчику вологості потрібно працювати в режимі підвищеної вологості або загалом у ширшому діапазоні вологості, підкладка з високою діелектричною проникністю може бути найкращим вибором для того, щоб резонансний пік добре виявлявся.



Розроблено 6-бітний безчиповий RFID-датчик вологості на основі частотної області. Запропонований резонатор CSRR виконано у вигляді зв'язку з мікросмужковою лінією, а резонатор ELC доданий як блок вимірювання вологості. У третьому розділі порівнюється та аналізується чутливість до вологи резонатора ELC і резонатора CSRR, а також аналізується чутливість до температури CSRR. Чутливість кожного сенсорного блоку, що використовується в мітці, була розрахована методом лінійної нормалізації. Усі три сенсорні функції запропонованого багатопараметричного датчика RFID кількісно визначені у відповідних робочих частотних діапазонах, і не буде ніяких перешкод між зондуючими резонансними частотами різних розділів, тому можна використовувати гнучке виявлення частотного діапазону малого діапазону, що допомагає покращити здатність виявлення. Крім того, пропонується легка архітектура динамічного виявлення спектру тегів RFID та бездротової передачі даних, яка є більш зручною та гнучкою та сприяє розвитку експериментів та інтелектуальному збору даних. Запропонована концепція забезпечує реальну ідею для реалізації можливості безчипового обладнання для виявлення тегів RFID у мобільному виявленні.

Запропонована недорога схема мобільного виявлення яка базується на полегшеній VNA, і подальші дослідження необхідно проводити з прийомопередавальними антенами з більшим коефіцієнтом посилення. У майбутньому будуть розроблені індивідуальні безчипові зчитувачі RFID та протоколи зв'язку, і ця робота може значною мірою сприяти широкомасштабному розгортанню безчипових датчиків RFID-міток.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Z.M.Rittersma, *Sens. Actuators A* 96, 196 (2002).
2. A.Kharaz and B.E.Jones, *Sens. Actuators A* 46, 491 (2012).
3. C.Bariain, I.R.Matias, F.J.Arre gui, and M.Lopez-Amo, *Sens.Actuators B* 69, 127 (2000).
4. B.Schirmer , H.V enzke, A.Melling, C.S.Edw ards, G.P .Barw ood, P.Gill, M.Ste vens, R.Ben yon, and P.Mackrodt, *Meas. Sci. Technol.*11, 382 (2015).
5. P.R.Somani, A.K.V iswanath, R.C.Aiyer , and S.Radhakrishnan, *Sens. Actuators B* 80, 141 (2001).
6. N.T. Ha, D.K.An, P.V .Phong, P.T .M.Hoa, and L.H.Mai, *Sens. Actuators B* 66, 200 (2000).
7. B.D.Gupta and Ratnanjali, *Sens. Actuators B* 80, 132 (2017).
8. S.K.Shukla, G.K.P arashar, A.P .Mishra, Puneet Misra, B.C. Yadav, R.K.Shukla, L.M.Bali, and G.C.Dube y, *Sens. Actuators B* 98, 5 (2004).
9. M.Bedo ya, G.Orellana, and M.C.Moreno-Bondi, *Helvetica Cheimica Acta* 84, 2628 (2001).
10. M.M.Choi and S.Shuang, *The Analyst* 125, 301 (2019).
11. B.Sorli, F.P ascal-Delannoy, A.Giani, A.F oucaran, and A.Bo yer, *Sens. Actuators A* 100, 24 (2002).
12. S.M.Dre w, J.E.Mann, B.J.Marquardt, and K.R.Mann, *Sens.Actuators B* 97, 307 (2014).
13. A.Bozoki, M.Szakall, A.Mohacsi, G.Szabo, and Z.Bor , *Sens.Actuators B* 91, 219 (2003).
14. H.W ohlthjen, *Sens. Actuators* 5, 307 (2008).
15. K.A.V .etelino, P.R.Story , R.D.Mileham, and D.W .Galipeau, *Sens. Actuators B* 35, 91 (1996).
16. C.Caliendo, E.V. erona, and V.I.Anisimkin, *Smart Mater. Struct.* 6, 707 (2007).
17. D.W.Galipeau, P.R.Story , K.A.V etelino, and R.D.Mileham,
18. *Smart Mater. Struct.* 6, 658 (2017).
19. E.R.Braga, A.Y .Nakano, and M.P .Cunha, *Proc. SBMO/IEEE MTT-S IMOC '99* 342 (1999).
20. P.Bruno, G.Cicala, F.Corsi, A.Dragone, and A.M.Losacco, *Sens.Actuators B* 100, 126 (2014).
21. M.K.Jain, S.Schmidt, K.G.Ong, C.Mungle, and C.A.Grimes, *Smart Mater. Struct.* 9, 502 (2020).
22. M.Penza and G.Cassano, *Sens. Actuators B* 68, 300 (2020).

23. J.Reibel, U.Stahl, T.W essa, and M.Rapp, *Sens. Actuators B* 65, 173 (2000).
24. E.Rade va, V.Geor giev, L.Spasso v, N.K oprinarov, and St.Kane v, *Sens. Actuators B* 42, 11 (2017).
25. A.Gluck, W.Halder , G.Lindner , H.Muller , and P.W eindler, *Sens.Actuators B* 19, 554 (2014).
26. P.R.Story , D.W .Galipeau, and R.D.Mileham, *Sens. Actuators B* 24, 681 (2005).
27. H. Anam, A. Habib, S. I. Jafri, Y. Amin, and H. Tenhunen, “Directly printable frequency signed chipless RFID tag for IoT applications,” *Radioengineering*, vol. 26, no. 1, pp. 139–146, 2017.
28. H. Anam, A. Habib, S. I. Jafri, Y. Amin, and H. Tenhunen, “Directly printable frequency signed chipless RFID tag for IoT applications,” *Radioengineering*, vol. 26, no. 1, pp. 139–146, 2017.
- A. Habib, R. Asif, M. Fawwad, Y. Amin, J. Loo, and H. Tenhunen, “Directly printable compact chipless RFID tag for humidity sensing,” *IEICE Electronics Express*, pp. 14– 20170169, 2017.
29. F. Deng, Y. He, B. Li, Y. Song, and X. Wu, “Design of a slotted chipless RFID humidity sensor tag,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 264, pp. 255–262, 2018.
30. D. Dominic, S. Krafft, N. Safdari, and S. Bhadra, “Multiresonator-based printable chipless RFID for relative humidity sensing,” *Proceedings*, vol. 1, p. 367, 08 2017.
31. E. M. Amin and N. C. Karmakar, “Development of low-cost printable humidity sensor for chipless RFID technology,” in *2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA)*, pp. 165–170, IEEE, 2012.
32. Karmakar, N.; Amin, E.; Saha, J. *Chipless RFID Sensors*; Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2016.
33. Mulloni, V.; Donelli, M. *Chipless RFID Sensors for the Internet of Things: Challenges and Opportunities. Sensors* 2020, 20, 2135.
34. Singh, R.; Singh, E.; Nalwa, H.S. Inkjet printer nanomaterial based flexible radio frequency identification (RFID) tag sensors for the internet of nano things. *RSC Adv.* 2017, 7, 48597–48630.
35. Jiang, T.Y.; Lai, F.P.; Chen, Y.S. Investigation of the bandwidth of resonators for frequency-coded chipless radio-frequency identification tags. In *Proceedings of the 2018 27th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC)*, Hualien, Taiwan, 30 April–1 May 2018; pp. 1–4.
36. Huang, N.; Chen, J.; Ma, Z. High-Q Slot Resonator Used in Chipless Tag

Design. Electronics 2021, 10, 1119.

37. Martinez, M.; van derWeide, D. Compact slot-based chipless RFID tag. In Proceedings of the 2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA), Tampere, Finland, 8–9 September 2014; pp. 233–236.
38. Martinez-Iranzo, U.; Moradi, B.; Garcia-Garcia, J. Open ring resonator structure for compact chipless RFID tags. In Proceedings of the 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Phoenix, AZ, USA, 17–22 May 2015; pp. 1–3.
39. Bhuiyan, M.S.; Karmakar, N. A spectrally efficient chipless RFID tag based on split-wheel resonator. In Proceedings of the 2014 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Novel EM Structures and Materials, and Applications (iWAT), Sydney, Australia, 4–6 March 2014; pp. 1–4.
40. Babaeian, F.; Feng, J.; Karmakar, N. Realisation of a High Spectral Efficient Chipless RFID Tag using Hairpin Resonators. In Proceedings of the 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Singapore, 10–13 December 2019; pp. 114–116.
41. Helmy, A.M.; El-Khobby, H.A.; Hussein, A.H.; Nasr, M.E. A New Design of High Capacity Chipless RFID Tag Using Size Scaled Arrays of Hairpin Resonators. In Proceedings of the 2022 International Telecommunications Conference (ITC-Egypt), Alexandria, Egypt, 26–28 July 2022; pp. 1–4.
42. Liu, L.; Chen, L. Characteristic Analysis of a Chipless RFID Sensor Based on Multi-Parameter Sensing and an Intelligent Detection Method. *Sensors* 2022, 22, 6027.
43. Marchi, G.; Mulloni, V.; Hammad Ali, O.; Lorenzelli, L.; Donelli, M. Improving the Sensitivity of Chipless RFID Sensors: The Case of a Low-Humidity Sensor. *Electronics* 2021, 10, 2861.
44. Zanazzi, E.; Marchi, G.; Mulloni, V.; Donelli, M.; Lorenzelli, L. Optimizing the number of printed layers in a PET inkjet-printed chipless RFID sensor. In Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS), Vienna, Austria, 10–13 July 2022; pp. 1–4.
45. Dey, S.; Bhattacharyya, R.; Sarma, S.E.; Karmakar, N.C. A Novel “Smart Skin” Sensor for Chipless RFID-Based Structural Health Monitoring Applications. *IEEE Internet Things J.* 2021, 8, 3955–3971.
46. Wan, G.C.; Li, M.M.; Yang, Y.L.; Xie, L.; Chen, L. Patch-Antenna-Based Structural Strain Measurement Using Optimized Energy Detection Algorithm Applied on USRP. *IEEE Internet Things J.* 2020, 8, 7476–7484.
47. Wan, G.; Li, M.; Zhang, M.; Kang, L.; Xie, L. A Novel Information Fusion Method of RFID Strain Sensor Based on Microstrip Notch Circuit. *IEEE Trans.*

Instrum. Meas. 2022, 71, 1–10.

48. Yeo, J.; Lee, J.-I.; Kwon, Y. Humidity-Sensing Chipless RFID Tag with Enhanced Sensitivity Using an Interdigital Capacitor Structure. *Sensors* 2021, 21, 6550.

49. V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, L. V. Krylik, O. O. Seletska. Microelectronic humidity–frequency transducer with humidity-sensitive capacitive elements // *Moldavian Journal of the Physical Sciences*. Ghitu Institute of Electronic Engineering and Nanotechnologies. Chisinau, Moldova. 2017. Volume 16. No. 1-2. –P.94-100.

50. <http://nano.asm.md/uploads/moldphys/2017/moldphys2017v16n12.pdf>

51. Osadchuk I.O., Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Krylik L.V. Self-oscillating parametric humidity sensor with frequency output signal // *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. IAPGOS, 1/2023, 42–49 p. <http://doi.org/10.35784/iapgos.3476>

52. Осадчук О.В., Крилик Л.В., Звягін О.С., Осадчук Я.О. Математична модель мікроелектронного частотного перетворювача вологості з вологочутливим резистивним елементом // *Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського*. Серія: Технічні науки. Том 32(71), Ч.2, №1 2021. –С.175-182

53. Osadchuk A. V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Mathematical Model of the Generator on the Basis of Transistor Structure with the Negative Differential Resistance // *Proceedings of the 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*. Lviv-Slavske, Ukraine February 20-24, 2018. ISBN (IEEE): 978-1-5386-2555-2. Paper 33.

54. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O., Semenov A.O., Martyniuk V.V., Prytula M.O. Investigation of a radio-frequency temperature transducer with a thermosensitive resistive element based on a complex compound of heterometallic  $\beta$ -diketonate // *ICEMS-BIOMED-2022 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1254 (2022) 012027. doi:10.1088/1757-899X/1254/1/012027

55. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S. Frequency Transducers of Gas Concentration Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance. Chapter 12. In: Sidorenko A., Hann H. (eds) *Functional nanostructures and sensors for CBRN Defense and Environmental Safety and Security*. NATO Space and Security Issues Series C: Environment. Springer, Dordrecht. March 18, 2020, pp. 161–184.

56. Osadchuk O.V., Krylik L.V., Osadchuk I.A. Mathematical model of parametric humidity transducer with frequency output // *Applied Issues of Mathematical Modeling*. – 2020. – Vol. 3. – No. 2.1. – P.206–215.

57. Osadchuk V.S., Osadchuk A.V. Reactive properties of transistors and transistor circuits. – Vinnitsa: "Universum-Vinnitsa", 1999. – 275 p.

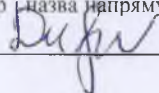
58. Nalimova S., Shomakhov Z., Bobkov A., Moshnikov V. Sacrificial Doping as an Approach to Controlling the Energy Properties of Adsorption Sites in Gas-Sensitive ZnO Nanowires // *Micro.* 2023; 3(2):591-601. <https://doi.org/10.3390/micro3020040>
59. Turkani V.S., Maddipatla D., Narakathu B.B., Saeed 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, No.1, –P.2311–2322.
60. Su P-G., Hsu C-C. Flexible Humidity Sensor Based on Au Nanoparticles/Organosilica-Containing Polyelectrolyte Composite // *Chemosensors.* 2023; 11(5):291. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11050291>
61. Liu H., Wang Q., Sheng W., Wang X., Zhang K., Du L., Zhou J. Humidity Sensors with Shielding Electrode Under Interdigitated Electrode // *Sensors.* 2019; 19(3): 659. <https://doi.org/10.3390/s19030659>
62. Tutov E.A., Bormontov E.N., Kashkarov V.M., Pavlenko M.N., Domashevskaya E.P. Influence of water vapor adsorption on the C-V characteristics of heterostructures containing porous silicon// *Technical Physics.* 2003. No.1. – P.1442-1448.
63. Osadchuk A., Osadchuk V., Seletska O., Krylik L. Microelectronic Transducer Gas Concentration based on MOSFET with Active Inductive Element // *Przegląd Elektrotechniczny, R. 95 No 4/2019.* –P. 237-241.
64. Sze S.M., Kwok K.Ng. *Physics of Semiconductor Devices.* Wiley-Interscience: Hoboken, USA, 2007. –763 p.
65. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

Додаток А  
(обов'язковий)

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**  
**ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ**  
**ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ**

Виконав: студ. 2-го курсу, групи КІВТ-22м  
спеціальності 152 Метрологія та  
інформаційно-вимірювальна техніка

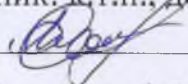
(шифр | назва напряму підготовки, спеціальності)



Минаш Д.Б.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доц. каф. ІРТС



Савицький А.Ю.

(прізвище та ініціали)

«19» 12 2023 р.

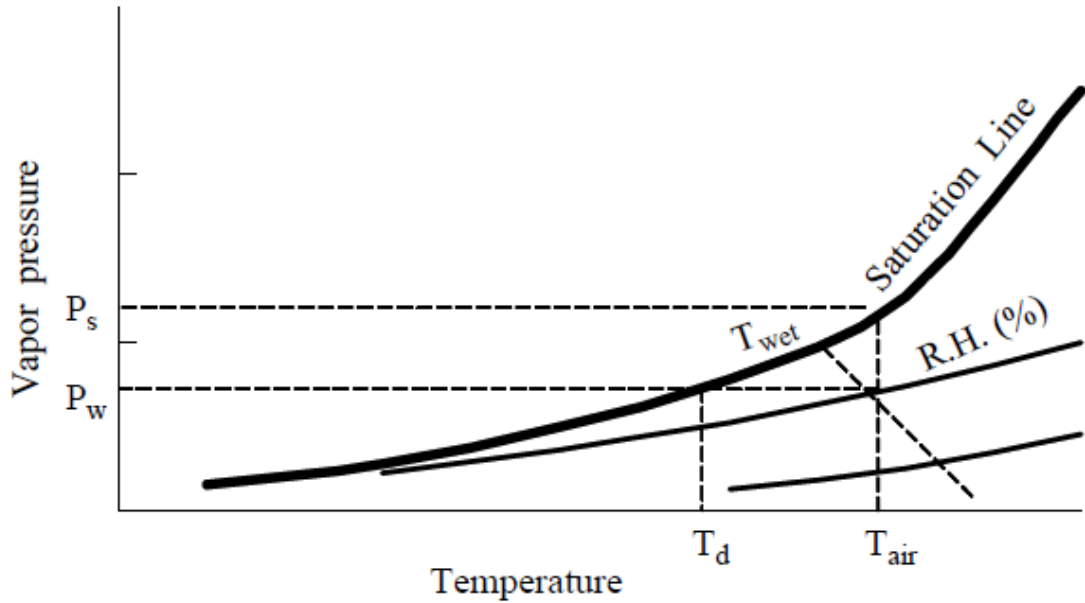


Рисунок 1 – Психрометрична діаграма, де  $T_{повітря}$  це температура навколишнього повітря. Якщо температура падає нижче точки роси,  $T_d(^{\circ}C)$ , відбувається конденсація води

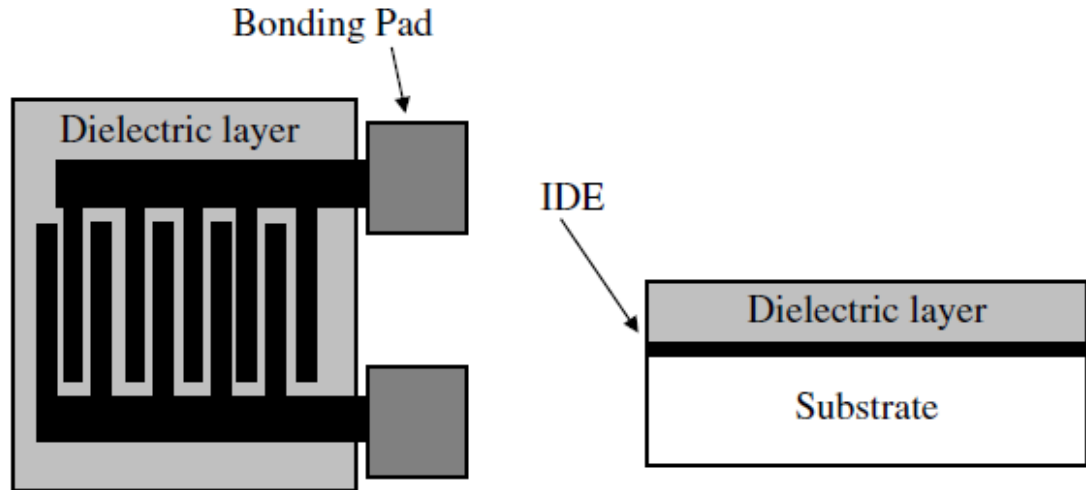


Рисунок 2 – Ємнісні датчики вологості з міжштифтовими електродами. Як правило, ємнісні датчики вологості складаються з двох міжштифтових електродів (IDE), покритих шаром діелектрика, який чутливий до зміни вологості



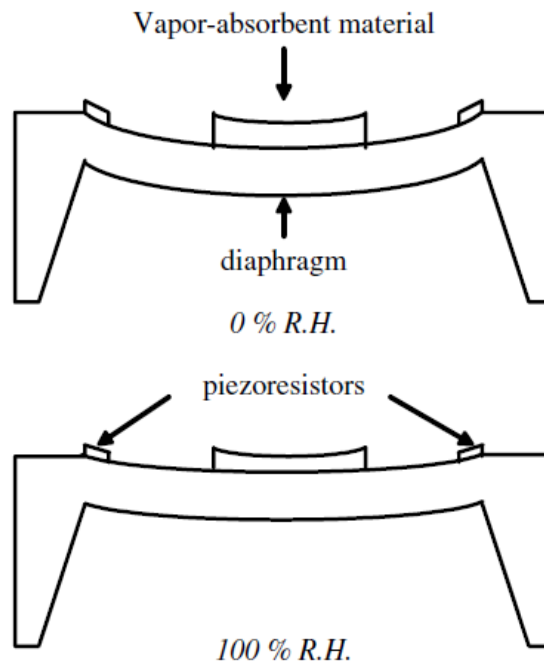


Рисунок 3 – Загальні схеми п'єзорезистивних датчиків вологості. У пристрої мембранного типу використовуються п'єзорезистори, розміщені на верхній частині діафрагми

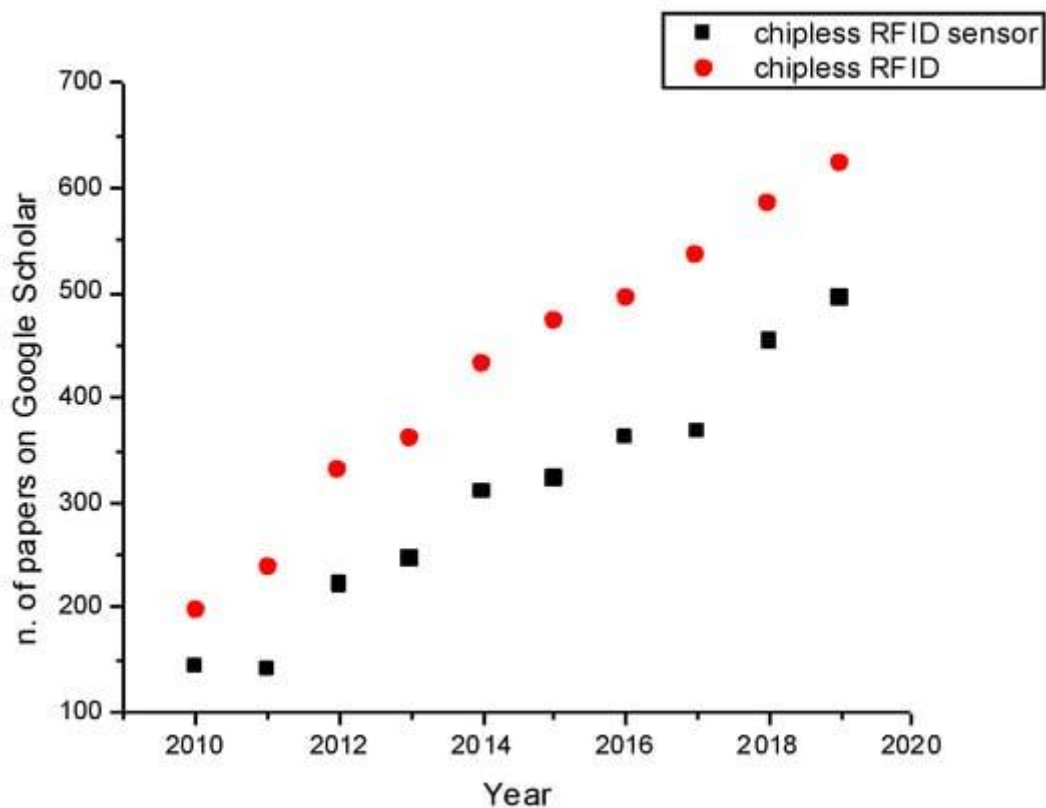


Рисунок 4 – Кількість записів за рік у Google Scholar із використанням ключових слів «безчіпова RFID» (радіочастотна ідентифікація) і «безчіпові датчики RFID»

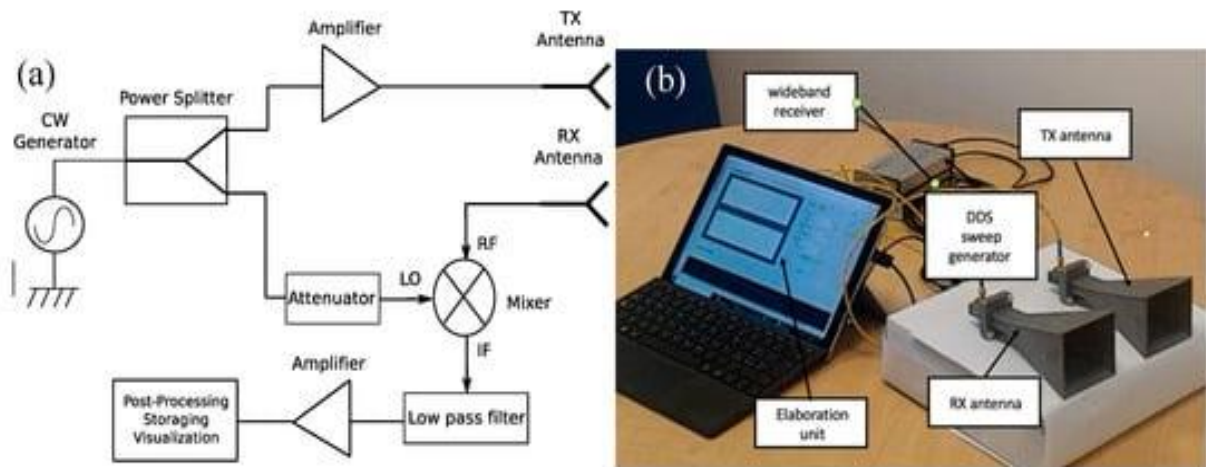


Рисунок 5 – ( а ) Схема бістатичного зчитувача. ( б ) Фото прототипу бістатичного зчитувача

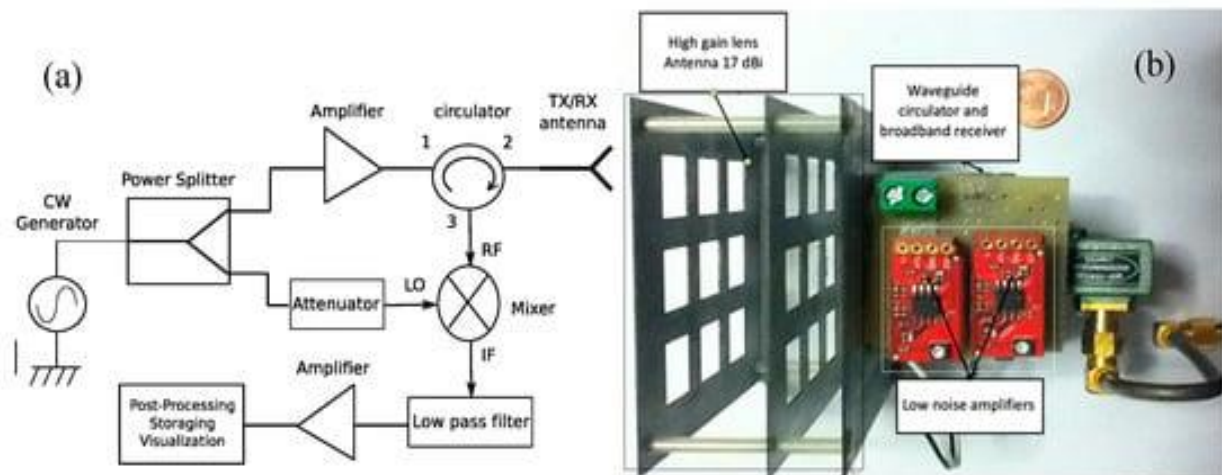


Рисунок 6 – ( а ) Схема моностатичного зчитувача. ( б ) Фото моностатичного зчитувача з хвилевідним феритовим циркулятором

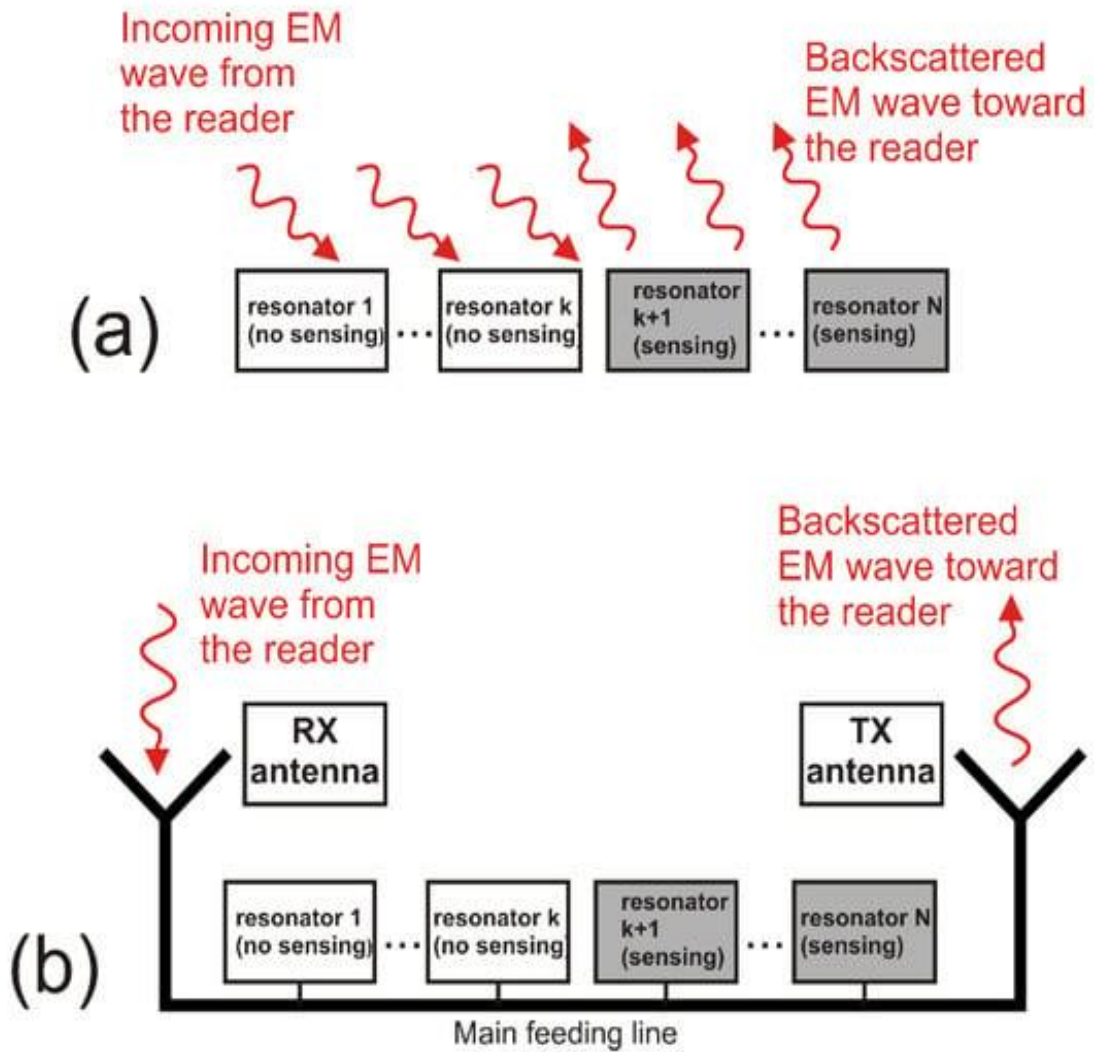


Рисунок 7 – Структура мітки датчика RFID без мікросхем, включаючи резонатори чутливості та кодування. ( а ) Розсіяна мітка без стружки. ( б ) Безчиповий тег на основі ретрансляції

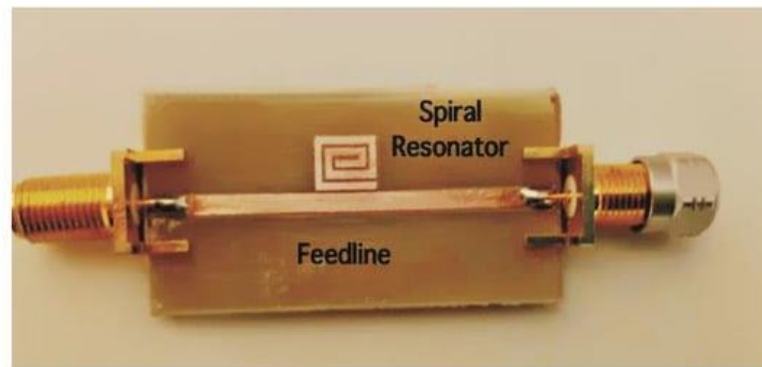


Рисунок 8 – Фото однобітної структури тегу

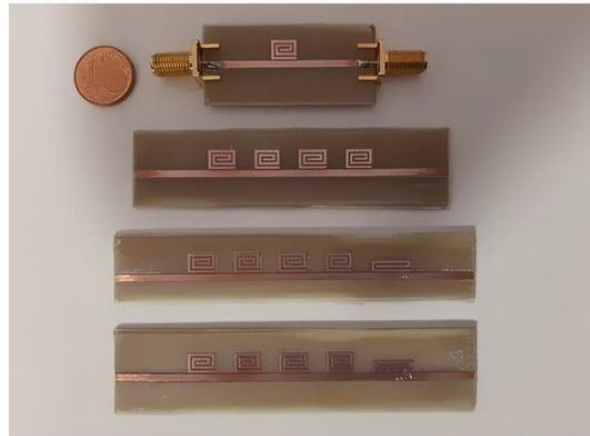


Рисунок 9 – Фото безчіпових міток, оснащених різною кількістю спіральних резонаторів

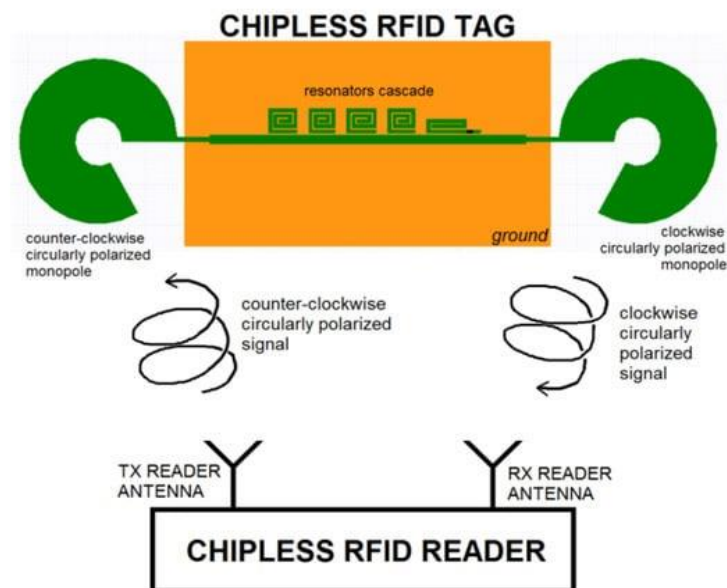


Рисунок 10 – Схема безчіпової системи міток, що працює в круговій поляризації

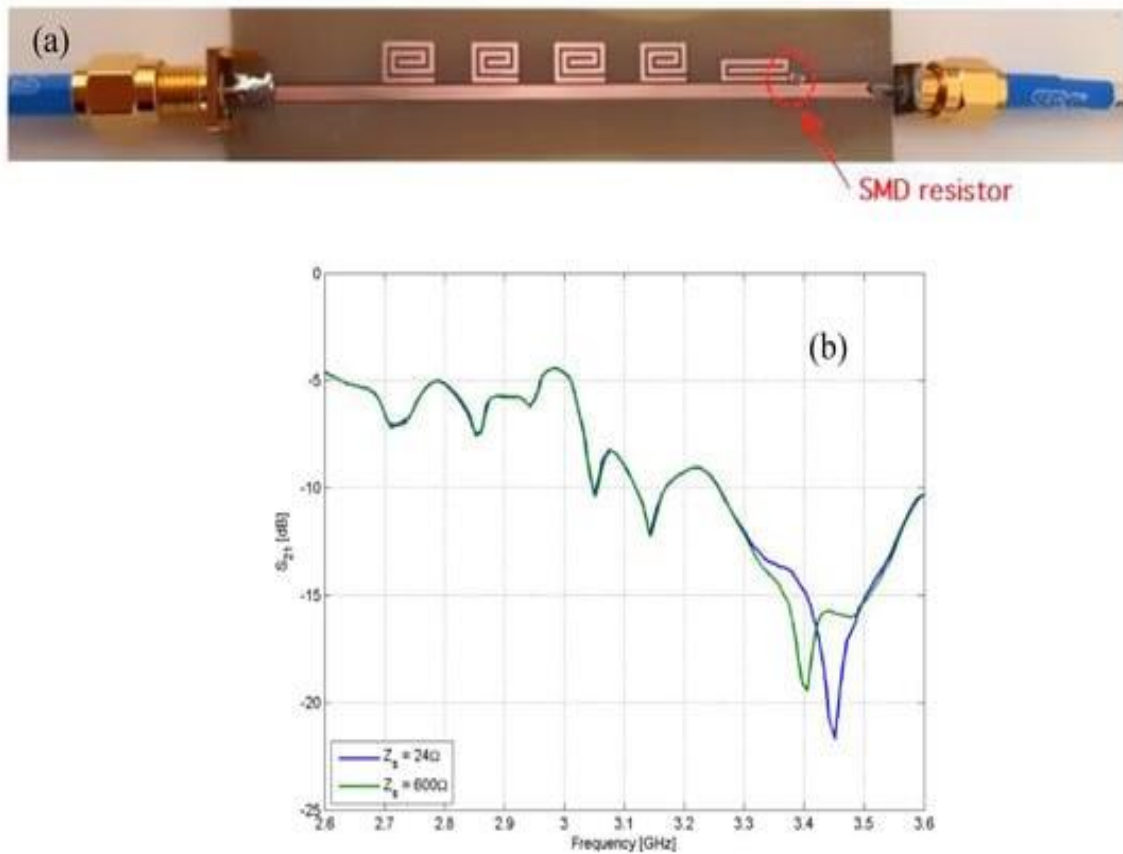


Рисунок 11 – ( а ) Фотографія п'ятибітної мітки без мікросхеми, оснащеної термістором і ( б ) вимірної  $|S_{21}|$  відповідь п'ятибітної мітки без чипа, оснащеної термістором

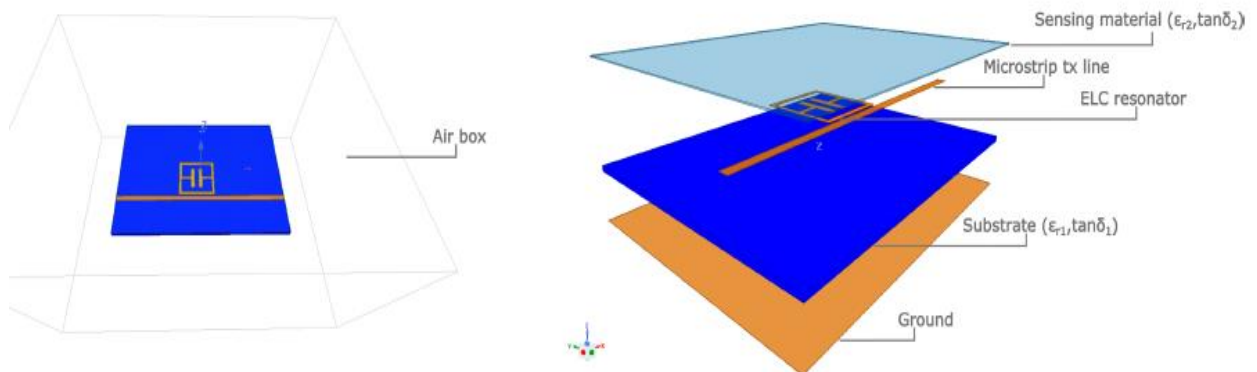


Рисунок 12 – Конфігурація мікросмужкового резонатора, який використовується в моделюванні. Чутливий матеріал покриває всю площу пристрою

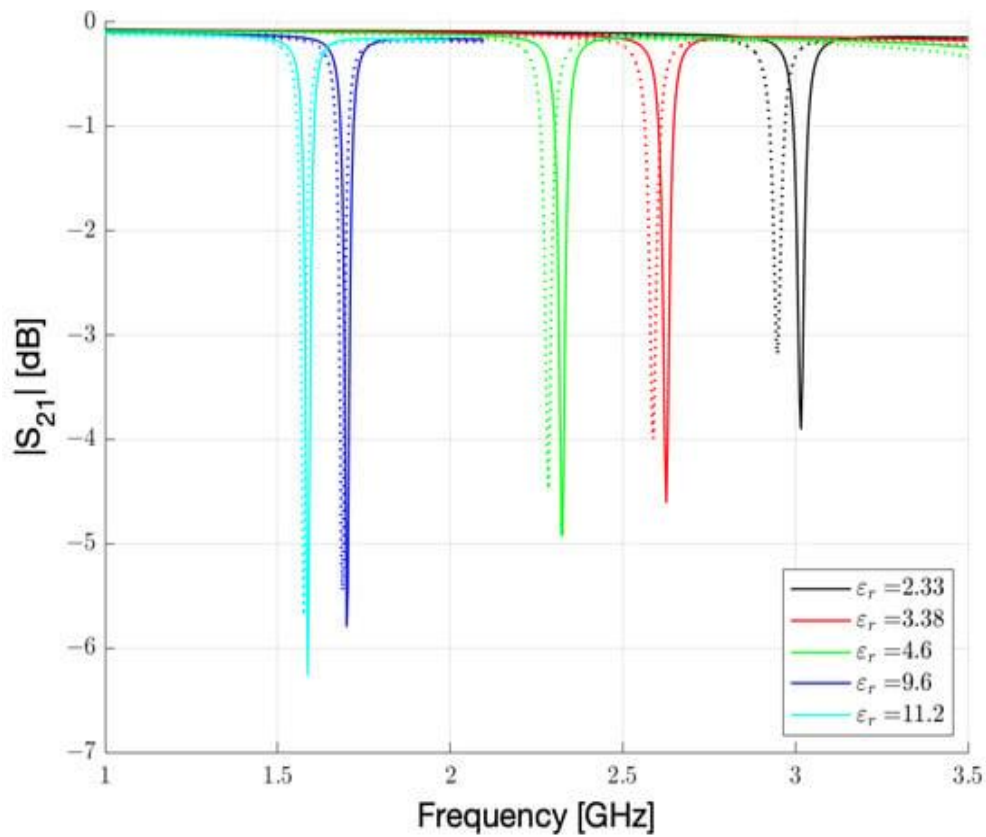


Рисунок 13 – Імітація  $|S_{21}||C_{21}|$  спектр резонатора для п'яти підкладок, наведених у таб.3.2. Безперервні лінії представляють  $\gamma=1$  результат. Пунктирні лінії представляють  $\gamma=2$  результати

Таблиця 1 – Діелектричні параметри, що використовуються в моделюванні для підкладок (з таблиці даних) і сенсорного матеріалу

Material	Use	$\epsilon_r$	$\tan \delta$
Rogers DiClad 870	Substrate	2.33	0.0013
Rogers RO4003C	Substrate	3.38	0.0021
FR4	Substrate	4.6	0.0195
Alumina	Substrate	9.6	0.0002
Rogers RO3010	Substrate	11.2	0.0022
Nafion $\gamma = 1$ <sup>1</sup>	Sensing material	4	0.05
Nafion $\gamma = 2$ <sup>2</sup>	Sensing material	5	0.1
Nafion $\gamma = 3$ <sup>3</sup>	Sensing material	7	4

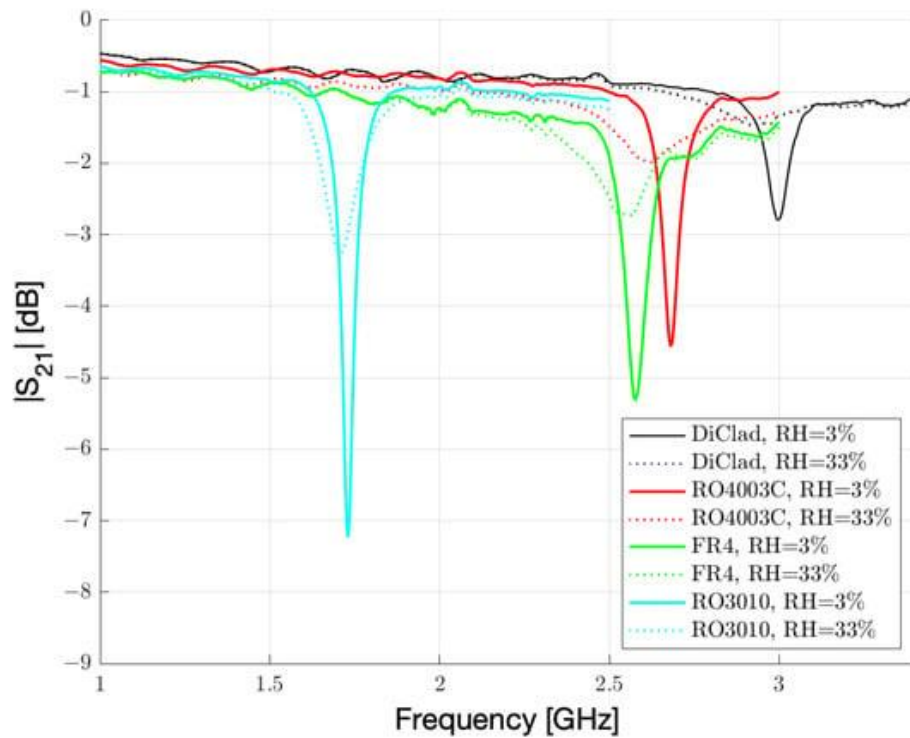


Рисунок 14 –  $|S_{21}|$  вимірюється за допомогою VNA, тоді як елемент датчика, виготовлений на різних підкладках, піддається впливу умов відносної вологості 3% і 33%

Таблиця 2 – Порівняння продуктивності за зсувом частоти [МГц/%] безчипового датчика вологості, запропонованого на різних підкладках

Substrate	RH low [%]	RH High [%]	$f_{res}$ at RH Low [GHz]	$f_{res}$ at RH High [GHz]	Frequency Shift [MHz/%]
DiClad	15	70	3.023	2.808	3.909
RO4003C	15	75	2.626	2.465	2.683
FR4	10	65	2.481	2.291	3.454
RO3010	10	90	1.750	1.625	1.562

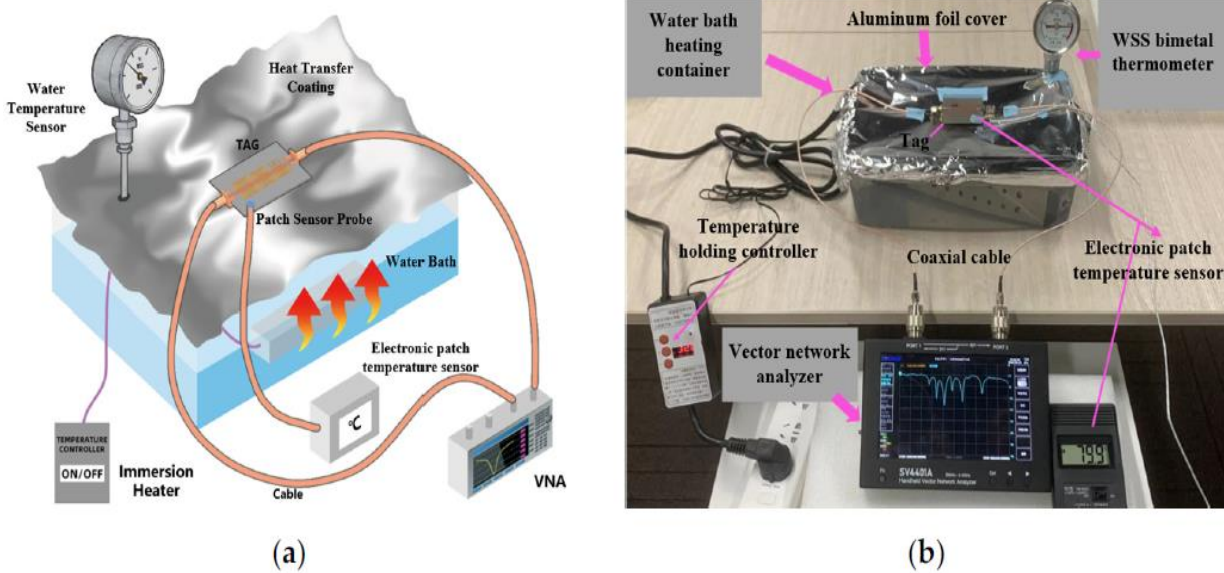


Рисунок 15 – Випробування характеристики вимірювання температури мітки: ( а ) Тест чутливості до температури мітки, моделювання сцени 3D імітаційного експерименту; ( б ) Випробування характеристики температурної чутливості мітки в лабораторії

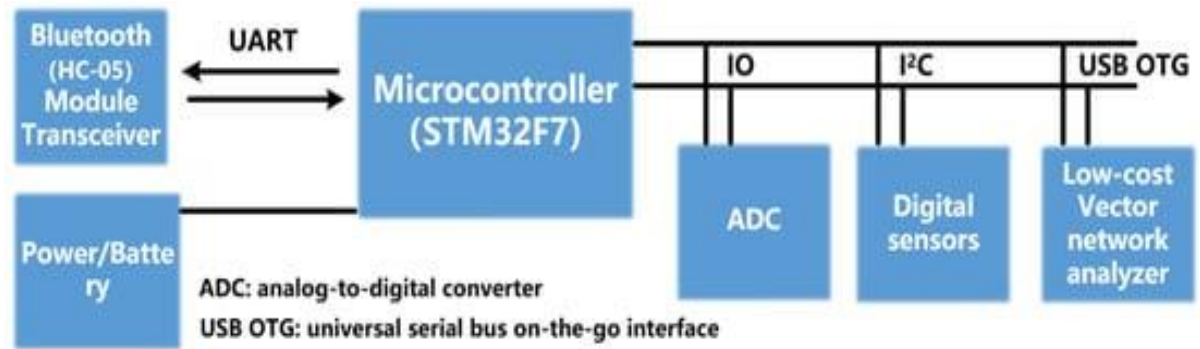


Рисунок 16 – Динамічне виявлення спектру та архітектура системи передачі даних

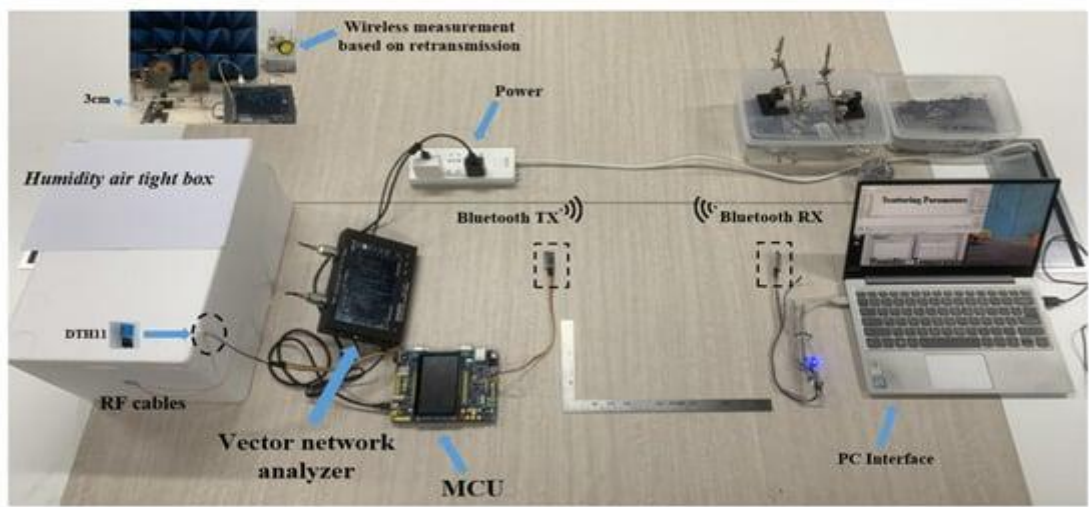


Рисунок 17 – Динамічний моніторинг спектру RFID-мітки та експеримент бездротової передачі даних



Додаток Б  
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ  
ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ГАЗОВИХ  
СЕРЕДОВИЩ**

**ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ**

Назва роботи: «Підвищення чутливості вимірювання вологості газових середовищ»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)

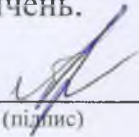
Підрозділ кафедра ІРТС  
(кафедра, факультет)

**Показники звіту подібності Unichек**

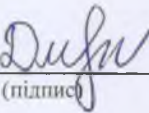
Оригінальність 99,13% Схожість 0,87%

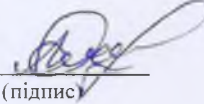
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

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 Unichек щодо роботи.

Автор роботи  Минаш Д.Б.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи  Савицький А.Ю.  
(підпис) (прізвище, ініціали)