

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:
**«МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ТЕНЗОМЕТРИЧНИЙ MEMS
ПЕРЕТВОРЮВАЧ»**

Виконав: студент 2-го курсу, групи МНТ-24м
спеціальності 176 Мікро- та наносистемна
техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Шпирко О.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., доцент, доц. каф. ІРТС

Осадчук Я.О.
(прізвище та ініціали)

« 16 » 12 2025 р.

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

Семенова О.О.
(прізвище та ініціали)

« 14 » 12 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н. проф. Осадчук О.В.

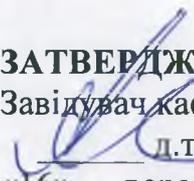
(прізвище та ініціали)

« 18 » 19 2025 р.

Факультет Інформаційних електронних систем
Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність – 176 Мікро- та наносистемна техніка
Освітньо-професійна програма – Мікро- та наносистемна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС

 д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«16» вересня 2025 року

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

Шпирку Олександр Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач»
керівник роботи д.т.н., доц., доцент кафедри ІРТС Осадчук Я.О.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від 24.09.2025 р. №313.
2. Строк подання студентом роботи 16.12.2025р.
3. Вихідні дані до роботи: кількість датчиків не менше 2, тип датчиків дротові, напруга живлення 3,6 В, передача даних із застосуванням LoRa, частота передачі даних у діапазоні 890 – 960 МГц. початковий опір – 120 Ом. метод підсилення – диференційний підсилювач. використати повний міст Уінстона.
4. Зміст текстової частини: Вступ. Аналіз сучасного стану мікроелектронних MEMS тензометричних перетворювачів. Огляд архітектури MEMS. Створення каналу за допомогою модулів LoRa. Моделювання процесу вимірювання. Економічна частина. Висновки. Список використаної літератури. Додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Структура MEMS перетворювача. Виготовлення MEMS-транзисторів. Формування послідовності сигналів у LoRa. Топологія побудованої мережі. Блок схема кодування. Принципова схема системи передачі. Моделювана схема. Результати моделювання.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 16.09.2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

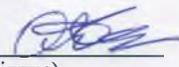
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2025-07.09.2025	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2025-16.09.2025	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка індивідуального завдання на МКР.	17.09.2025-24.09.2025	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	01.10.2025-20.10.2025	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	21.10.2025-04.11.2025	
6.	Розробка ілюстративної частини МКР.	05.11.2025-12.11.2025	
7.	Економічна частина.	13.11.2025-23.11.2025	
8.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини.	24.11.2025-28.11.2025	
9.	Нормоконтроль.	29.11.2025-03.12.2025	
10.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	04.12.2025-17.12.2025	
11.	Захист МКР ЕК.	19.12.2025-22.12.2025	

Студент


(підпис)

Шпирко О.А.

Керівник роботи


(підпис)

Осадчук Я.О.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396.

Шпирко О.А. Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 176 Мікро- та наносистемна техніка, освітня програма - Мікро- та наносистемна техніка. – Вінниця: ВНТУ, 2025. – 118 с. На українській мові. Бібліогр.: 25 назв; Табл. 15; Рис. 24 .

У даній роботі розглянуто мікроелектронні компоненти та технологію MEMS, що забезпечують мініатюрність пристрою, низьке енергоспоживання та високу надійність. Основною особливістю є застосування тензорезистивних елементів, інтегрованих у MEMS-структуру, що дозволяє з високою точністю визначати деформації, а також реалізувати цифрову обробку сигналів за допомогою мікропроцесорного модуля, та подальшу передачу даних за допомогою модуля LoRa. Пристрій складається з чутливого елемента, плати обробки сигналів, модуля передачі та блоку живлення. Розроблено функціональну та електричну принципову схеми пристрою, написано програму передавача приймача повідомлень. Проведено електричне моделювання вимірювальної схеми. Також у магістерській кваліфікаційній роботі виконані розрахунки економічної частини.

Ключові слова: Мікроелектроніка, MEMS перетворювач, механічні коливання, LoRa, передача інформації, міст Уінстона, преамбула, цифрове обробка, енергоефективність, деформація.

ABSTRACT

Shpyrko O.A. Microelectronic strain gauge MEMS transducer. Master's qualification work in specialty 176 Micro- and nanosystems engineering, educational program - Micro- and nanosystems engineering. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 118 p. In Ukrainian. Bibliography: 25 titles; Table. 15; Fig. 24 .

This paper considers microelectronic components and MEMS technology, which ensure device miniaturization, low power consumption, and high reliability. The main feature is the use of strain-resistive elements integrated into a MEMS structure, which allows for high-precision determination of deformations, as well as implementation of digital signal processing using a microprocessor module, and subsequent data transmission using a LoRa module. The device consists of a sensitive element, a signal processing board, a transmission module and a power supply. The functional and electrical schematic diagram of the device has been developed, and the program for the message transmitter and receiver has been written. Electrical modeling of the measuring circuit was carried out. Also, calculations of the economic part were performed in the master's qualification work.

Keywords: Microelectronics, MEMS transducer, mechanical vibrations, LoRa, information transmission, Winston bridge preamble, digital processing, energy efficiency, deformation.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ MEMS ТЕНЗОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	12
1.1 Загальні відомості про тензометричні перетворювачі	12
1.2 Актуальність розробки мікроелектроного MEMS тензометричного перетворювача	17
1.3 Проблематика коректного вимірювання	20
1.4 Кондуктивний механізм та п'єзорезистивний механізм тензодатчика на основі вуглецевої пасти	22
1.5 Застосування у акселерометрах	24
1.6 Застосування у витратомірі	26
1.7 Висновки до розділу	28
2 ОГЛЯД АРХІТЕКТУРИ MEMS	30
2.1 Класичні інженерні рішення	30
2.2 Енергетичні показники MEMS перетворювача	33
2.3 Інтеграція датчиків MEMS-CMOS	35
2.4 Бездротові датчики.....	39
2.5 Застосування в екології.....	42
2.6 Висновки до розділу	44
3 СТВОРЕННЯ КАНАЛУ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДУЛІВ LoRa	46
3.1 Застосування модулів LoRa для побудови мережі	46
3.2 Принцип роботи мережі	47
3.3 Вибір модуля для мережі.....	50
3.4 Підбір мікроконтролера для обробки інформації.....	52
3.5 Архітектура мережі з використанням LoRa	55
3.6 Розроблення блок схема процесу передачі.....	58
3.7 Побудова структурної схеми.....	60
3.8 Програмне забезпечення передавача.....	61
3.9 Програмне забезпечення приймача	63
3.10 Висновки до розділу	65
4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ	66

4.1 Вибір програми для моделювання.....	66
4.2 Моделювання Мосту Уїнстона із одним тензометричним датчком.....	67
4.3 Моделювання мосту Уїнстона із чотирьма тензометричним датчиками.....	71
4.4 Висновки до розділу	73
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	74
5.1 Оцінювання наукового ефекту.....	74
5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	78
5.2.1 Витрати на оплату праці.....	78
5.2.2 Відрахування на соціальні заходи	82
5.2.3 Сировина та матеріали.....	82
5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	84
5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	84
5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	85
5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень	86
5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей.....	88
5.2.9 Службові відрядження.....	89
5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	90
5.2.11 Інші витрати.....	90
5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	91
5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	92
5.4 Висновок до розділу.....	93
ВИСНОВКИ	95
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	97
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал.....	100
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (магістерської) кваліфікаційної роботи	113
Додаток В (довідниковий) Лістинг програми мікроконтролера	115

ВСТУП

Актуальність теми

Нові досягнення в галузі мікроелектромеханічних систем (Micro Electro Mechanical Systems - MEMS) значно розширили застосування цих пристроїв. Технологія MEMS також дозволила мініатюризацію пристроїв, і типовий MEMS-датчик щонайменше на порядок менший порівняно зі звичайним датчиком, який використовується для вимірювання тієї ж величини. Отже, MEMS-пристрої можна виготовляти сегментним методом, що пропонує високий потенціал для зниження вартості на одиницю. Крім того, правильна конструкція може вирішити деякі проблеми, пов'язані зі споживанням енергії, одночасно забезпечуючи покращені характеристики продуктивності, такі як точність, чутливість та роздільна здатність. Для розробки MEMS-датчиків досліджувалися різні явища сенсорного сприйняття. Ці явища включають модуляцію оптичних, ємнісних, п'єзоелектричних, властивостей зсуву частоти та п'єзорезистивних властивостей.

П'єзорезистивне перетворення виявилось кращим порівняно з іншими методами сенсорного сприйняття. Крім того, відповідні пристрої можуть подолати технічні проблеми, пов'язані з інтеграцією мікросхем. Однак, реакція п'єзорезистивних пристроїв за різних температурних умов обмежує їх застосування. Тому під час проектування та впровадження п'єзорезистивних сенсорів MEMS ці недоліки необхідно враховувати.

Загальновідомо, що збільшення концентрації легуючої домішки зменшує тепловий дрейф датчика шляхом стабілізації значень п'єзорезистивних коефіцієнтів. З іншого боку, збільшення концентрації легуючої домішки також значно знижує чутливість датчика. Ще одним обмеженням під час застосування тензодатчиків MEMS є втрата сигналу внаслідок розриву жорсткості, коли механічна деформація передається через різні структурні шари, наприклад, кремнієвий носій, сполучний шар тощо. Щоб врахувати цю зміну поля деформації, необхідно розробити багатоетапні процеси калібрування та характеристики. У цьому сенсі метод скінченних елементів (МСЕ) є надійним

інструментом для проведення необхідних параметричних досліджень з метою оптимізації роботи датчика.

Діапазон застосування датчика головним чином обмежений як електричними, так і механічними властивостями кристала кремнію. Монокристалічний кремній має кращі механічні властивості порівняно з іншими сенсорними матеріалами.

Аналіз останніх досліджень і сучасного стану

Сучасний стан досліджень характеризується активним розвитком як класичних п'єзорезистивних так і резонансних датчиків деформації. П'єзорезистивні застосовують кремнієві структури які за рахунок легуючої частин досягають компромісу між температурною стабільністю та чутливістю. Однак одним із недоліків є їх багат шарова структура що зменшує величину переданої деформації.

Резистивні датчки демонструють високу чутливість та стабільність завдяки вимірюванні зміни частоти під дією деформації, проте вони більш чутливі до зміни температури через що наявна необхідність температурної компенсації. Останні дослідження показують ефективне використання резонаторів у H-подібних та SOI-структурах.

Новітні підходи відкривають перспективи використання карбїду кремнію (3C-SiC) для створення тензочутливих плівок із високим коефіцієнтом гейджа. Це дозволяє підвищити чутливість і забезпечити роботу у екстримальних умовах.

Мета дослідження

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження мікроелектронного тензометричного MEMS перетворювача, що забезпечує автономність, високу точність вимірювання та передачу даних за допомогою модулів бездротового зв'язку LoRa.

Методи дослідження

У роботі були використані елементи теорії інтегральної схемотехніки, теорію твердотілих активних напівпровідникових приладів.

Задачі дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз роботи тензометричного датчика.
2. Дослідити роботу MEMS систем та методи їх виготовлення
3. Проаналізувати методи застосування тензометричного перетворювача у різних галузях.
4. Розробити схему для передачі вимірних даних за допомогою бездротового зв'язку та забезпечити стабільність отриманих даних.
5. Провести моделювання тензометричного перетворювача із одним та чотирьома датчиками.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач, що призначений для конвертування механічних напружень у електричний сигнал шляхом деформації чутливого елемента.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач, принцип роботи, методи виготовлення та вимірювання деформації.

Новизна отриманих результатів

У роботі отримано такі нові науково-практичні результати:

- розглянуто застосування тензометричного перетворювача для вимірювання рівня витраченої рідини за допомогою виміри сили Кориоліса;
- запропоновано систему об'єднання MEMS системи із CMOS структурою;
- промодельовано вимірювання тензометричного перетворювача у програмах LTspice та Proteus;
- реалізовано програмно апаратний комплекс на основі ESP32 та LoRa.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення одержаних результатів полягає у дослідженні мікроелектронного тензометричного MEMS перетворювача, придатного до впровадження у реальні умови експлуатації.

Досліджувана система поєднує мікроелектроніку, обробку сенсорної інформації та радіотехнічні засоби зв'язку, що дозволяє:

- підвищити точність вимірювання механічних змін;
- забезпечити автономну передачі вимірів у режимі реального часу;
- інтегрувати перетворювач у систему ESP32, що спростить подальше використання та здешивить виробництво та експлуатацію системи;
- застосувати отримані підходи у суміжних областях – будівництво, вагові системи, промисловість, авіація, медицина.

Особистий внесок здобувача. Усі теоретичні, програмні, аналітичні та експериментальні результати магістерської кваліфікаційної роботи виконані автором самостійно.

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

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ MEMS ТЕНЗОМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

1.1 Загальні відомості про тензометричні перетворювачі

Оскільки опір провідника визначається співвідношенням

$$R = l/S \quad (1.1)$$

де R — питомий опір матеріалу;

l — довжина;

S — площа поперечного перерізу, то опір може змінюватися при будь-якому коливанні вимірюваного значення, що впливає на один або декілька аргументів, що входять до цього виразу

Це співвідношення використовується в тензодатчиках, які є перетворювачами, що перетворюють зміну прикладеної сили на зміну опору. Як правило, такий перетворювач використовується разом з мостом Уїтстона, де одне, два або навіть усі чотири плеча є тензодатчиками, а вихідна напруга змінюється у відповідь на зміну вимірюваного тиску.

Тензодатчики використовують, наприклад, металеві перетворювальні елементи, які, коли до них прикладається механічне навантаження, змінюють свою довжину та площу поперечного перерізу. Це, у свою чергу, призводить до зміни опору. Деякі матеріали для тензодатчиків, такі як, наприклад, напівпровідникові матеріали, демонструють п'єзоелектричний ефект, при якому навантаження, прикладене до матеріалу, викликає значну зміну його питомого опору. Тензодатчики цього типу мають на два порядки більшу чутливість, ніж раніше обговорювані металеві.

Загалом, будь-який параметр, який відстежує рух або силу, може бути використаний для створення тензодатчиків.

Дротові тензодатчики (рис. 1.1) виготовляються у вигляді провідників, жорстко з'єднаних з паперовою або плівковою основою 2. Провідник 3 являє собою зигзагоподібний тонкий дрід діаметром 0,02-0,05 мм, до кінців якого приєднуються виводи (мідні провідники 4) за допомогою пайки або зварювання. Провідники покриваються папером, плівкою або лаком 1. Після приклеювання підкладки тензодатчика до досліджуваної деформованої поверхні деформація цієї поверхні передається провідникам і призводить до зміни їх опору.

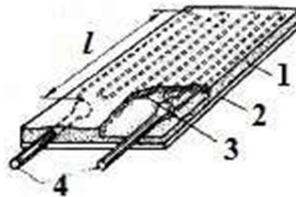


Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд дротяного тензометричного датчика

Опір R резистора, виготовленого у вигляді дроту довжиною l , визначається наведеним вище виразом (1.1). Вплив деформації характеризується вихідним сигналом, пов'язаним з відносною зміною опору резистора $\Delta R/R$. Відношення відносної зміни вихідного сигналу до відносної деформації, що її викликала, при фіксованих значеннях струму, температури тощо, називається коефіцієнтом чутливості до деформації тензодатчика

$$k = \Delta R/R \quad (1.2)$$

Відношення $\Delta R/R$ визначається (математично його можна отримати диференціюванням (1.1)) за формулою $\Delta R/R = \Delta \rho/\rho + \Delta l/l - \Delta S/S$, де R , l , S - зміни опору, питомого опору, довжини та площі поперечного опору провідника відповідно.

В галузі пружних деформацій, використовуючи теорію для твердих тіл, ми можемо отримати вираз для коефіцієнта чутливості до деформації у вигляді:

$$k = 1\mu + 2\mu + \nu \quad (1.3)$$

Для провідників компоненти μ (коефіцієнт Пуассона) та ν (коефіцієнт еласторезистентності) не сильно відрізняються за величиною. Для напівпровідників значення може бути на два порядки більшим за і залежить від температури, деформації та кристалографічного напрямку. Тому напівпровідникові тензодатчики мають значно вищу чутливість до деформації, але також більш схильні до зовнішніх впливів. Якість тензодатчиків визначається їх коефіцієнтами чутливості до деформації k та значенням температурного коефіцієнта опору (TCR) - $\Delta R/R\Delta T$. Чим вищий коефіцієнт чутливості до деформації k і чим нижчий температурний коефіцієнт опору (TCR) матеріалу, з якого виготовлений тензодатчик, тим вища його якість.

Наприклад, для дротяних тензодатчиків, виготовлених зі сплавів константану та манганіну $k \approx 2$, TCR = $30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ та $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ відповідно. Для напівпровідникових тензодатчиків k досягає значення 100 і більше (наприклад, кремнієвих). У фольгованих тензодатчиках чутливий елемент виготовлений з фольги товщиною 3-6 мікрон. Основними перевагами фольгованих тензодатчиків є можливість формування тензодатчиків будь-якої форми та ефективно відведення тепла під час вимірювань, що дозволяє отримати вищий вихідний сигнал. Фольговані тензодатчики нечутливі до поперечних деформацій і можуть виготовлятися розмірами від 0,3 мм.

Одними з основних метрологічних характеристик тензодатчиків є тензочутливість, дрейф, механічний гістерезис, температурна нестабільність. Тензочутливість визначається головним чином тензорезистивними властивостями матеріалу чутливого елемента. Тензочутливість є основним параметром, за яким визначається значення виміряної деформації:

$$\varepsilon = \Delta R/Rk \quad (1.4)$$

Дрейф проявляється як зміна вихідного сигналу при заданому та незмінному значенні. Дрейф в основному спричинена пружними недосконалостями підкладки та клею.

Механічний гістерезис, як і повзучість, спричинений пружною недосконалістю підкладки та клею та чисельно визначається через різницю значень вихідного опору для одного й того ж значення деформації, за умови, що задане значення деформації досягається при її плавному збільшенні та плавному зменшенні.

Температурна нестабільність полягає у зміні опору тензодатчика через його ТКО, а також через появу додаткових механічних напружень через різницю температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалу тензодатчика та досліджуваної деталі.

Важливим параметром тензодатчиків є допустима потужність, яка може розсіюватися в тензодатчику, за умови, що його перегрів не перевищує допустимого значення. Допустима потужність тензодатчика залежить від його геометричних розмірів.

Товщина фольгованих тензодатчиків менша, ніж у дротяних, і становить 30...50 мікрон. Основними перевагами фольгованих тензодатчиків є можливість формування тензодатчиків будь-якої форми та ефективне відведення тепла під час вимірювань, що дозволяє отримати вищий вихідний сигнал при однакових деформаціях. Фольговані тензодатчики нечутливі до поперечних деформацій і дозволяють створювати конструкції з малою базою, починаючи від 0,3 мм і вище.

Фольговані тензодатчики зазвичай виготовляються з константану. Електромеханічні властивості фольги менш постійні в межах однієї партії порівняно з константанієвим дротом для тензодатчиків. Її термічна обробка менш ефективна, тому робочий діапазон фольгованих тензодатчиків не перевищує $\pm(3-5)10^{-3}$ відносних деформацій ($\pm 3000-5000$ URD, де $1\text{URD} = 1\text{млн}^{-1} = 10^{-6}$ - одиниця відносної деформації)), а діапазон температур становить 75-575 К. Технологія виготовлення фольгованих тензодатчиків, як правило,

базується на використанні фотохімічних процесів. Технологія найбільш адаптована для масового виробництва. Залежно від форми тензорних решіток, фольговані тензодатчики поділяються на такі типові модифікації (рис. 1.2):

- одноелементні прямокутні для лінійних вимірювань;
- дво- або триелементні прямокутні або розеткові тензодатчики для вимірювань в областях з плоским напруженим станом;
- спеціальні, що використовуються як тензодатчики в мембранних чутливих елементах;

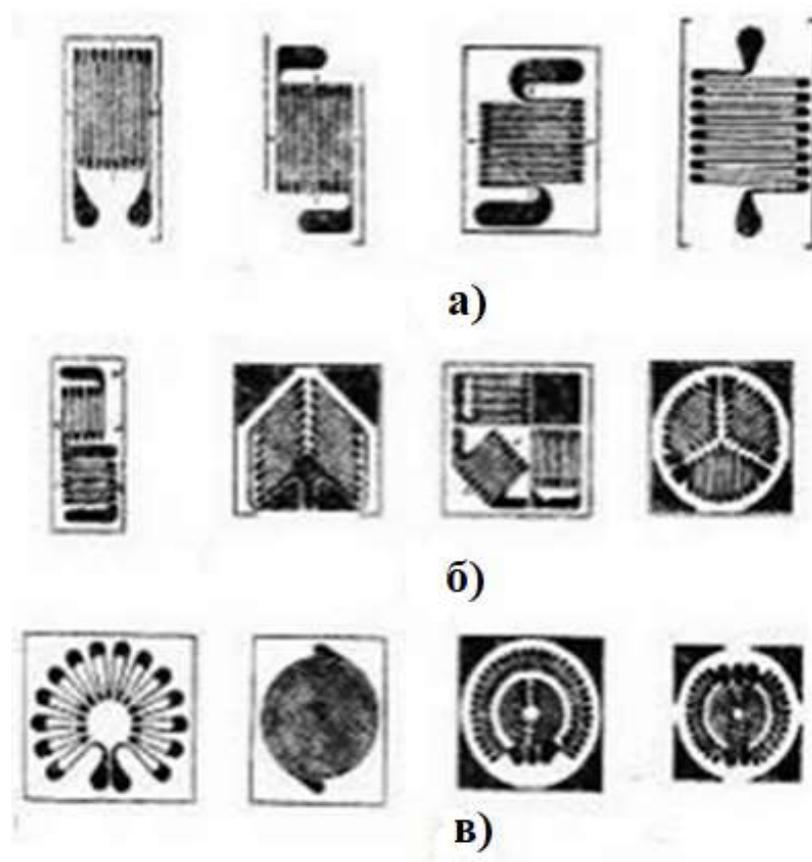


Рисунок 1.2 – Форми тензодатчиків. а)одноелементні квадратні б) багатоелементні квадратні або круглі с) мембрані

Наразі найбільш широко для вимірювання механічних деформацій використовуються фольговані (матеріал фольги – метал) тензодатчики, а для вирішення певних задач –напівпровідникові тензодатчики. Переваги та недоліки обох типів тензодатчиків добре представлені в літературі. Основною перевагою напівпровідникових тензодатчиків є їхня вища (до 100 разів) тензочутливість, але водночас вони більш крихкі, жорсткі, з вищою

температурною залежністю параметрів. Висока тензочутливість напівпровідникових тензодатчиків пояснюється змінами зонної структури напівпровідникового матеріалу під впливом механічних напружень і, відповідно, сильною залежністю провідності (опору) від деформації. У той час як у металевих тензодатчиках тензочутливість забезпечується зміною розміру чутливого елемента (фольги).

Фольговані тензодатчики розрізняються за призначенням – для вимірювання одноосьових деформацій, розподілених деформацій, для різних температурних діапазонів, за розміром та формою ґратки (формою електропровідної фольги), за значеннями електричного опору, а також деякими іншими параметрами.[1]

1.2 Актуальність розробки мікроелектронного MEMS тензометричного перетворювача

Сучасний розвиток мікроелектроніки та мікромеханічних систем (MEMS) зумовлює необхідність створення високочутливих, надійних і мініатюрних сенсорних елементів для вимірювання фізичних величин, зокрема деформацій, тиску та механічних навантажень. Тензометричні перетворювачі, що ґрунтуються на принципі зміни електричного опору під дією механічної напруги, є ключовими елементами у багатьох вимірювальних системах — від промислових та автомобільних сенсорів до медичних і робототехнічних застосувань.

Інтеграція тензорезисторних елементів у MEMS-структури відкриває нові можливості для створення високопродуктивних мікросенсорів з низьким енергоспоживанням, високою стабільністю та здатністю до масового виробництва за технологіями мікроелектроніки. Завдяки використанню кремнієвих або композитних матеріалів (наприклад, кремній-на-ізоляторі, кремній-карбід, ПДМС тощо) можна досягти значного підвищення чутливості, температурної стабільності та механічної міцності таких пристроїв.[2]

Розробка мікроелектронного MEMS тензометричного перетворювача є актуальною також у контексті переходу до «розумних» сенсорних систем і кіберфізичних пристроїв, де важливо забезпечити поєднання вимірювальних функцій із цифровою обробкою сигналів безпосередньо на кристалі. Такі рішення сприяють зменшенню габаритів, маси й вартості пристроїв, а також підвищенню точності та швидкодії вимірювань.

Крім того, створення вітчизняних мікроелектронних MEMS тензометричних перетворювачів має стратегічне значення для забезпечення технологічної незалежності у галузях приладобудування, авіаційної та космічної техніки, медичної діагностики та енергетики. Тому дослідження, спрямовані на розробку та вдосконалення таких перетворювачів, є актуальними як з наукової, так і з практичної точки зору.

Попри значні досягнення у галузі сенсорної мікроелектроніки, залишається низка проблем, пов'язаних із підвищенням точності та довготривалої стабільності MEMS-тензоперетворювачів. Зокрема, істотний вплив мають температурні зміни, залишкові напруги після мікрофабрикації, а також вплив зовнішніх електромагнітних полів. Тому актуальним напрямом досліджень є оптимізація конструкції чутливих елементів, вибір матеріалів із високим коефіцієнтом тензочутливості та мінімальною температурною залежністю, а також удосконалення технології виготовлення з метою зменшення паразитних впливів.

Використання сучасних мікроелектромеханічних технологій дає змогу реалізувати тензометричні перетворювачі на базі кремнієвих мікроструктур або еластомерних композитів, таких як ПДМС (полідиметилсилоксан), що забезпечує високу гнучкість і стійкість до механічних навантажень. Такі матеріали дозволяють створювати сенсори нового покоління — м'які, прозорі та біосумісні, що є надзвичайно перспективним для застосування у біомедичних системах, робототехніці та носимій електроніці.

Крім того, інтеграція мікроелектронного тензометричного перетворювача з підсилювальними та обчислювальними схемами на одному кристалі створює

передумови для побудови інтелектуальних сенсорних модулів, здатних до автономного функціонування та передачі даних у цифровій формі. Це повністю відповідає сучасним тенденціям розвитку технологій «Інтернету речей» (IoT), де необхідні мініатюрні, енергоефективні та надійні вимірювальні вузли.

Одним із ключових чинників, що визначають ефективність MEMS тензометричних перетворювачів, є геометрія чутливого елемента та розташування тензорезисторів у місцях максимальних механічних напружень. Оптимізація цих параметрів дає змогу підвищити чутливість перетворювача без збільшення його габаритів чи споживаної потужності. Для цього застосовуються методи математичного моделювання та чисельного аналізу напружено-деформованого стану за допомогою сучасних програмних пакетів, таких як COMSOL Multiphysics або ANSYS.

Ще одним напрямом удосконалення є використання гібридних матеріалів і багат шарових структур, у яких поєднуються властивості напівпровідникових і полімерних компонентів. Зокрема, використання ПДМС як еластичної підкладки дозволяє формувати високочутливі тензорезисторні елементи на гнучких платформах, що забезпечує розширення діапазону допустимих деформацій і підвищення механічної надійності сенсора. Такі структури здатні функціонувати у широкому діапазоні температур та умов експлуатації, включно з вібраційними і динамічними навантаженнями.[3]

Важливим аспектом є також інтеграція мікроелектронного тензометричного перетворювача з електронними схемами підсилення та аналого-цифрового перетворення. Це дозволяє мінімізувати вплив шумів, покращити співвідношення сигнал/шум та забезпечити пряму цифрову обробку даних. Такий підхід створює передумови для реалізації повністю інтегрованих сенсорних систем, які можуть бути використані у складних технічних комплексах, зокрема в авіаційній, автомобільній та медичній техніці.

Крім того, значна увага приділяється питанням калібрування і температурної компенсації. Застосування схем термостабілізації або використання матеріалів з низьким температурним коефіцієнтом опору

дозволяє суттєво зменшити похибку вимірювань і підвищити довготривалу стабільність сенсорів.

Розвиток таких технологій сприяє створенню нового покоління тензометричних перетворювачів, що поєднують у собі мікророзміри, високу чутливість, механічну гнучкість і можливість інтеграції у багатофункціональні мікросистеми. Це відкриває широкі перспективи їх застосування не лише у промислових і наукових вимірювальних комплексах, але й у портативних та біосумісних пристроях майбутнього.

1.3 Проблематика коректного вимірювання

Тензодатчики є критично важливими компонентами в багатьох інженерних та наукових застосуваннях. Вони використовуються для вимірювання напруження або деформації матеріалів під тиском, надаючи важливі дані для оцінки працездатності та безпеки конструкцій та механічних систем. Однак, як і будь-який інший датчик або вимірювальний пристрій, тензодатчики не застраховані від поломок. Розуміння поширених режимів відмов та способів їх запобігання може значно підвищити надійність та точність вимірювань деформації.

Однією з основних причин відмови тензодатчиків є механічне пошкодження. Це може статися через неправильне встановлення або надмірне механічне навантаження на сам датчик. Механічні пошкодження часто характеризуються фізичними пошкодженнями, такими як розриви або розриви в сітці датчика.

Щоб запобігти механічному пошкодженню, важливо дотримуватися належних процедур встановлення. Переконайтеся, що поверхня, на яку наноситься тензодатчик, чиста, гладка та належним чином підготовлена, щоб уникнути будь-якої концентрації напружень. Крім того, використання відповідного клею та достатній час для затвердіння є важливими кроками для забезпечення міцного з'єднання. Використання захисних покриттів або кришок також може захистити датчик від фізичних пошкоджень.

Через невідповідність механічних властивостей між кремнієм та адгезивним матеріалом (M-Bond 200) між різними структурними шарами виникає напружень що приводить до розриву. Цей розрив може призвести до втрат сигналу, яку необхідно кількісно визначити. Втрату сигналу можна оцінити або експериментально, або за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ).

Температурні коефіцієнти опору (ТКО) при виготовлені п'езорезисторів можуть бути оцінені шляхом піддавання виготовлених мікросхем різним температурам від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ у вільному стані. Повідомлялося, що в діапазоні температур від $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при рівні легування близько 2×10^{18} атомів/см³) вимірний опір був високим при низькій температурі. Після цього високого опору спостерігалось монотонне зменшення, поки опір не досяг мінімального значення приблизно при $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Потім опір починає зростати зі збільшенням температури.

Ще один поширений вид несправностей пов'язаний з електричними проблемами, такими як погані з'єднання або електричний шум. Це може призвести до нестабільних показників або повної втрати сигналу. Забезпечення належних електричних з'єднань є життєво важливим для запобігання таким несправностям. Використовуйте високоякісні методи паяння та матеріали для надійного закріплення з'єднань. Щоб мінімізувати електричний шум, використовуйте належні методи екранування та заземлення. Зменшення перешкод також може допомогти зробити проводку якомога коротшою та використовувати виту пару. Регулярне калібрування тензодатчиків може додатково гарантувати їх правильне функціонування.

У випадку низького рівня легування, при низькій температурі, більшість носіїв заряду мають тенденцію до замерзання донорів та акцепторів, що призводить до збільшення опору при низьких температурах. Зі збільшенням температури ефект замерзання зменшується, доки опір не досягне мінімального значення. Мінімальне значення становить приблизно $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ для концентрації легування приблизно 2×10^{18} атомів/см³. За цією температурою поглинена

теплова енергія збільшує випадкове розсіювання носіїв заряду, і, отже, електричний опір зростає при низьких концентраціях легування.

У випадку середніх та відносно високих концентрацій легування, доступна кількість носіїв заряду може врівноважити випадкове розсіювання. Отже, значення опору зменшується або залишається майже постійним. При надзвичайно високих концентраціях легування випадкове розсіювання долається, і п'єзорезистивний елемент може діяти як лінійний резистор з омичними властивостями. Під час операції зондування, застосування електричного поля змушує носіїв заряду рухатися у напрямку протікання струму, що зменшує ефект випадкового розсіювання.

Введення геометричні елементи (поверхневі канавки) забезпечують два цінні ефекти. По-перше, завдяки ефекту концентрації напружень/деформацій, вони діють як підйомники напружень/деформацій, що збільшує диференціальне напруження поблизу п'єзорезистивних чутливих елементів. Це збільшення покращує вихідну силу сигналу і, отже, чутливість. По-друге, поверхневі канавки зменшують перехресну чутливість датчика. Ці дві функції були підтвержені за допомогою моделювання методом скінченних елементів (МСЕ) сенсорного чіпа.

Успішне застосування п'єзорезистивних датчиків вимагає правильно розроблених сенсорних мікросхем та усвідомлення потенційних джерел помилок під час застосування датчика. Зокрема, помилка обертального вирівнювання під час виготовлення та встановлення може вважатися одним з найважливіших джерел помилок.

1.4 Кондуктивний механізм та п'єзорезистивний механізм тензодатчика на основі вуглецевої пасти

Однією із сучасних технологій є виготовлення тензодатчиків з вуглецевої пасти. Ця вуглецева паста в основному складається з сажі як наповнювача, ненасиченої полієфірною смолою як полімерної матриці, органічного

розчинника та ізоціанатного затверджувача. Під час нагрівання органічний розчинник випаровується, і UPR твердне під дією ізоціанатного затверджувача. Зрештою, утворюється стабільний полімерно-матричний композит на основі вуглецевої пасти. Отже, для пояснення провідних та п'езорезистивних властивостей цього типу тензодатчика на основі вуглецевої пасти можна застосувати обидва провідні механізми.

Як показано на рисунку 1.3, коли частинки сажі (чорні кола) контактують одна з одною, провідність між ними можна виявити за допомогою перколяції. Коли частинки сажі не торкаються одна одної, але відстань між ними відносно мала (в діапазоні нм) і знаходяться в межах тунельної смуги (сіре кругле кільце навколо чорного кола), електрони можуть проникати крізь смолу в проміжному просторі, тому провідність між частинками сажі можна виявити за допомогою тунелювання. Коли частинки сажі не торкаються одна одної, але відстань між ними відносно велика, а тунельний струм між частинками сажі важко генерувати, утворюються зони неперколяції. Перколяція та тунелювання всередині тензодатчика на основі вуглецевої пасти створюють провідні шляхи, тому тензодатчик на основі вуглецевої пасти є електропровідним. Під час процесу тиску на датчик виникає деформація, і тензодатчик розтягується. Використовуючи мікроскоп можна побачити що це збільшує відстані між внутрішніми частинками сажі.

Отже, це призведе до того, що частинки, які раніше були провідними, перестануть бути провідними через більшу відстань (як показано червоним пунктирним колом на рисунку 1.3), і призведе до зменшення струму між частинками, де раніше спостерігався тунельний ефект, через більші відстані (як показано синім пунктирним колом на рисунку 3). Крім того, частинки сажі, які спочатку контактували одна з одною та просочувалися, переходять до тунелювання, оскільки більші відстані не дозволяють їм контактувати одна з одною (як показано зеленими пунктирними колами на рисунку 1.3). Усі ці фактори зменшують кількість провідних шляхів або збільшують опір

початкових провідних шляхів всередині тензодатчика на основі вуглецевої пасти. Отже, на макрорівні опір тензодатчика стає більшим.

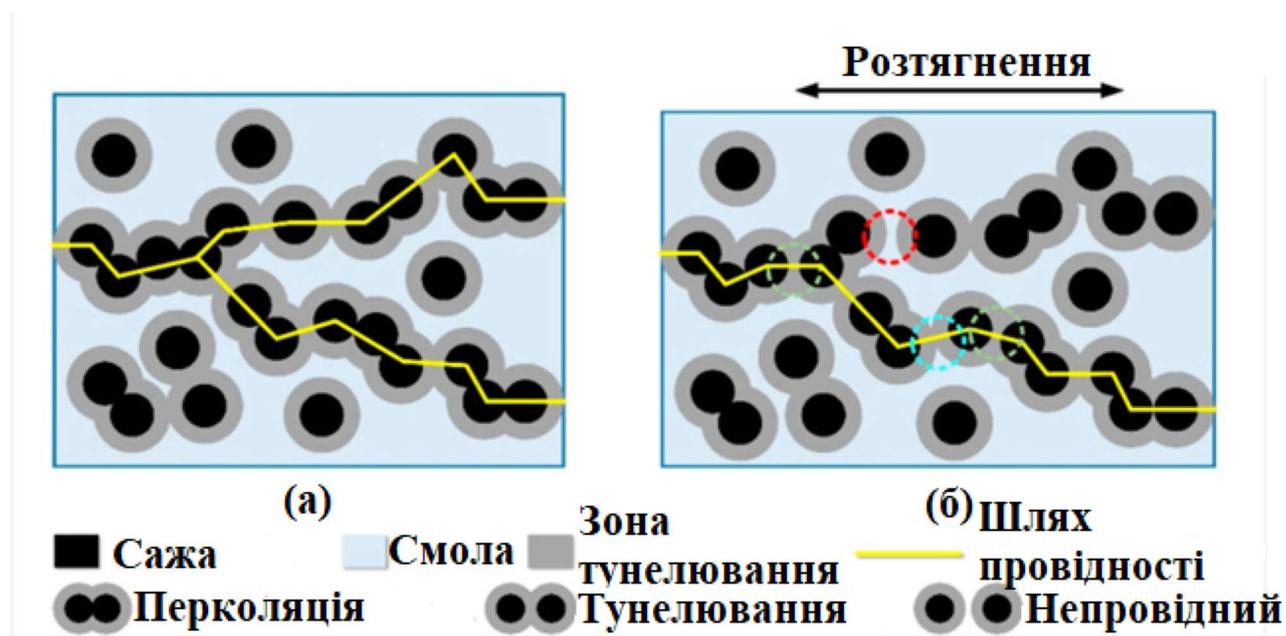


Рисунок 1.3 – Механізм провідності та п'єзорезистивний механізм тензодатчика на основі вуглецевої пасти з мікроперспективи: а) Без навантаження б) під час розтягування

1.5 Застосування у акселерометрах

Тензометричний акселерометр – це тип датчика, який вимірює сили прискорення шляхом перетворення механічної деформації на електричний сигнал. Ці пристрої стають дедалі важливішими в різних галузях промисловості, оскільки вони здатні виявляти навіть найменші зміни в русі, що робить їх корисними для таких застосувань, як моніторинг стану конструкцій, автомобільні випробування та аерокосмічна техніка.

Серцем тензометричного акселерометра є тензометричний датчик, тонкий гнучкий електричний провідник, що змінює свій електричний опір при деформації. Ця властивість робить його придатним для вимірювання механічної деформації, викликані прикладеною силою, такою як прискорення. Основний принцип роботи тензометричного акселерометра полягає в перетворенні сил

прискорення в механічну деформацію, яка потім перетворюється на електричний сигнал через тензометричний датчик.[4]

Зазвичай тензометричний датчик прикріплений до твердої, пружної маси, яку часто називають сейсмічної масою або стійкою масою. Коли акселерометр відчуває прискорення, маса відхиляється через дію інерційної сили. Це відхилення викликає механічну деформацію тензометричного датчика, змінюючи його електричний опір. Вимірюючи цю зміну опору, можна визначити прискорення, яке відчуває акселерометр.

Тензометричні акселерометри часто використовують конфігурацію мосту Уінстона, яка складається з чотирьох резистивних елементів, розташованих у формі ромба. Таке розташування дозволяє мосту Уінстона компенсувати зміни опору, викликані температурою, забезпечуючи точні вимірювання прискорення в широкому діапазоні температур.[5]

Чіп датчика прискорення, що використовує унікальну поперечну структуру, проілюстровано на рисунку 1.4. Ця конструкція поєднує високу чутливість балкової структури з високою ударостійкістю мембранної структури. Примітно, що вся балка підтримує рівномірну товщину без додавання ударостійкої маси, що підвищує власну частоту датчика та ударостійкість. Крім того, для підвищення чутливості датчика розмір опорних кінців балок менший, ніж середня область на перетині фокусуєчого напруження в балці. Зі збільшенням напруження чутливість також покращується.

Характеристики напруження-деформації та власна частота датчика під впливом ударного прискорення залежать від довжини та товщини сенсорної структури чіпа, а також від обраного матеріалу виготовлення та самого значення прискорення. Збільшення довжини структури сенсорної площі призведе до зростання максимального напруження та зниження власної частоти. І навпаки, збільшення товщини підкладки призведе до зниження максимального напруження та підвищення власної частоти. Оскільки максимальне напруження на сенсорну площі безпосередньо впливає на чутливість датчика, власна частота та чутливість

датчика є невід'ємними. Тому конструкція сенсорної структури повинна знаходити баланс, щоб відповідати необхідним проектним рекомендаціям.[6]

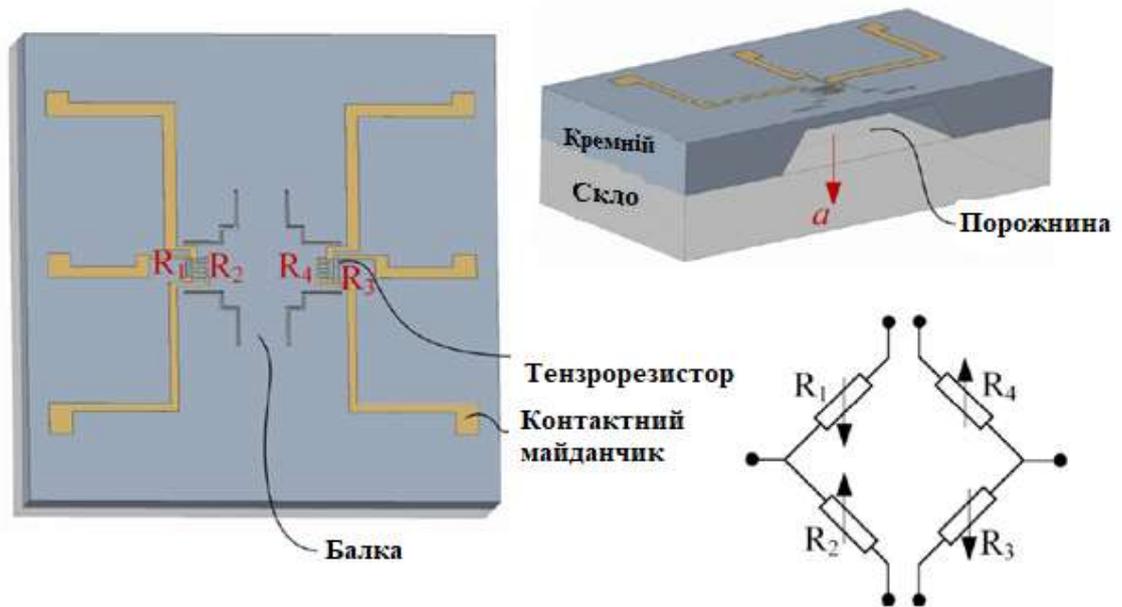


Рисунок 1.4 – Структура акселерометра побудованого на тензодатчиках

Для запобігання нерівномірному напруженню, спричиненому надмірно довгими резисторами, встановлюють багатозгинний резистор товщиною 10 мкм з певною відстанню між кожним провідником. Щоб мінімізувати неточності, спричинені зворотним п'єзореzистивним ефектом на з'єднаннях, між кожною парою складок резистора використовують сильно леговані кремнієві омичні контакти.[7]

1. 6 Застосування у витратомірі

При протіканні рідини всередині мікротрубки, що здійснює гармонічні коливання, під дією сил Коріоліса з'являється додаткова деформація конструкції, яка реєструється системою детектування. Ці коливання можна вимірювати різними способами, наприклад, оптичним, ємнісним або резистивним (тензодатчики). Оптичний метод детектування вимагає або зовнішнього джерела світла, або вбудованих хвилеводних структур, які

зазвичай використовуються для пристроїв з вібрацією в площині та складні для інтеграції в процес виготовлення μ -коріолісового датчика масової витрати. Резистивний метод, що базується на тензодатчиках які розміщуються на мікроканалі, не має вищезгаданих обмежень.

На рисунку 1.5 можна побачити типову будову витратоміра який складається з прямокутної петлі мікроканалу та двох датчиків що міцно закріплені на входній та вихідній ділянках каналу. Петля каналу приводиться в резонанс силами Лоренца. Ці сили генеруються магнітним полем та змінним струмом i , що протікає через металеву доріжку зверху мікроканалу.

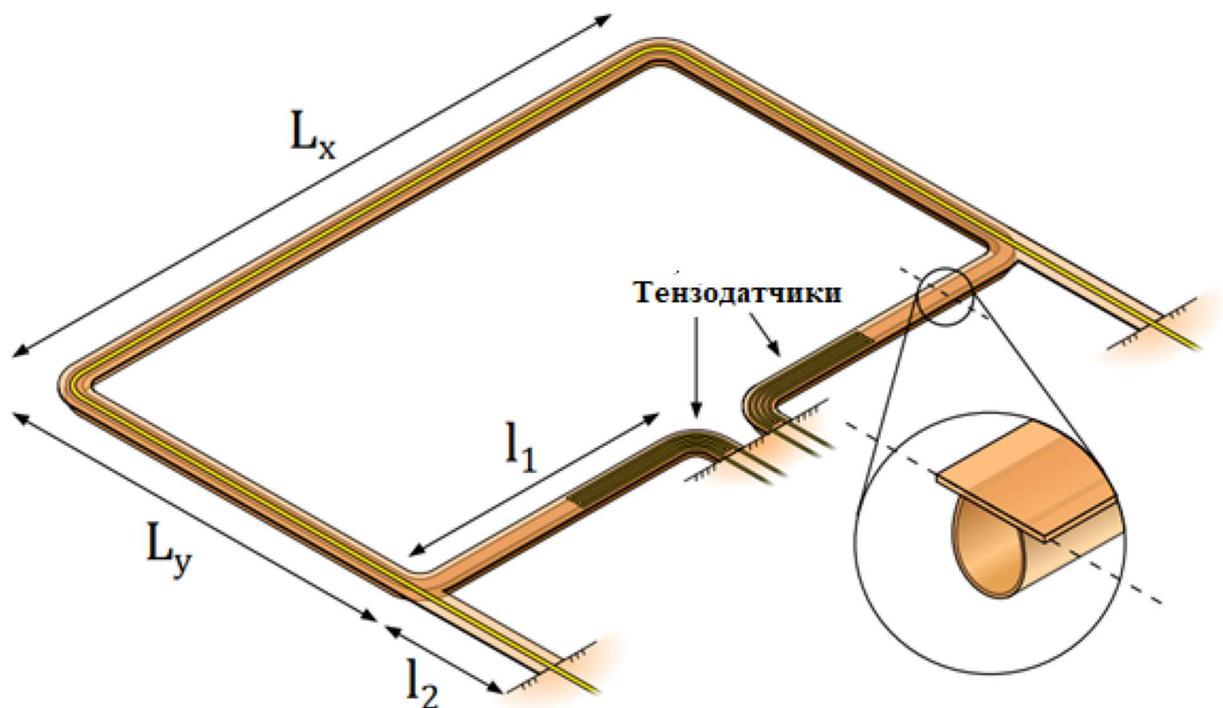


Рисунок 1.5 – будова мікроканалу із розміщеними тензодатчиками

На рисунку 1.6 показано конфігурацію тензодатчиків, коли датчик не спрацьовує. Коли датчик спрацьовує (рисунок 1.6 б), тензодатчики одночасно видовжуються та стискаються. Таким чином, опори двох тензодатчиків з часом знаходяться в синфазі.

Коли через канал протікає потік, утворюються сили Коріоліса що викликають вібрацію в режимі скручування; див. рисунок 1.6 в. Ця вібрація зміщена по фазі на 90 градусів відносно спрацьовування. Один тензодатчик

видовжується, а інший стискається. Таким чином, опори тензодатчиків з часом знаходяться в протилежній фазі та на 90 градусів. При поєднанні спрацьовування та коливань Коріоліса, опори тензодатчиків матимуть різницю фаз, яка залежить від масової витрати через канал.

Цей метод зчитування є вигідним, оскільки він не залежить від амплітуд резистивних сигналів, а лише від фази. Залежність амплітуд сигналу від температури може бути більш значною для ємнісного зчитування. Однак, для уникнення похибок рекомендується одночасне використання і ємнісного і резистивного датчика для кореляції температурної залежності.[8]

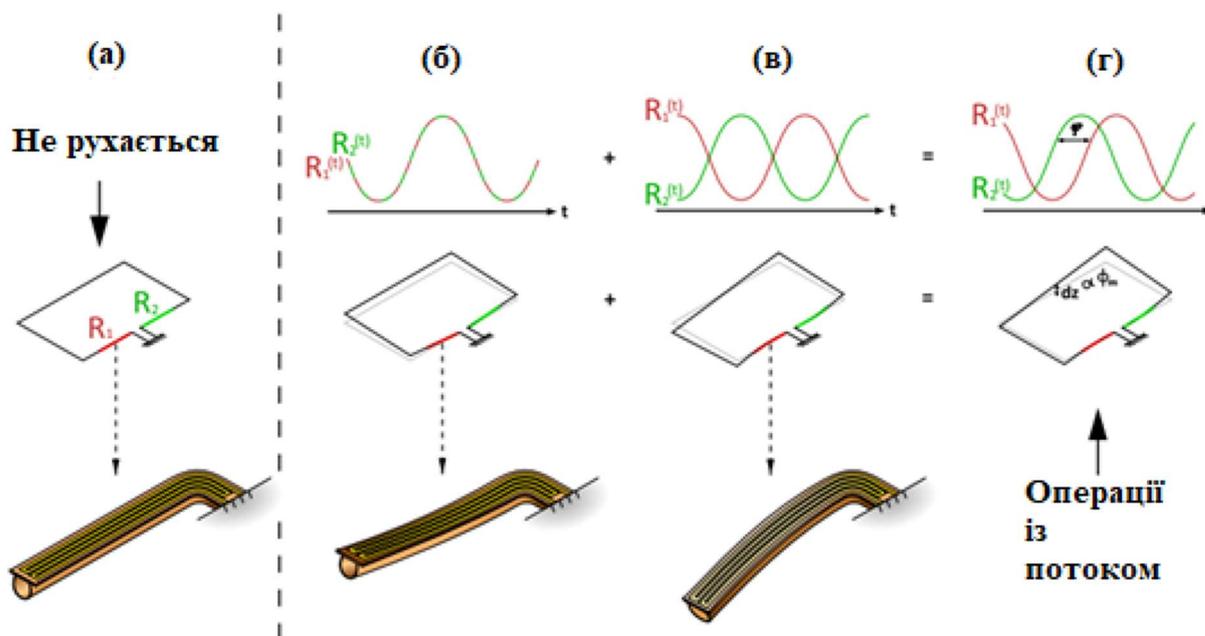


Рисунок 1.6 – Вихідні сигнали тензOMETричних датчиків при різних протіканнях рідини

1.7 Висновки до розділу

Мікроелектронні MEMS тензOMETричні перетворювачі є важливими елементами сучасних сенсорних систем, що виконують функцію перетворення механічних деформацій у електричний сигнал із високою точністю та стабільністю. Залежно від конструкції, матеріалів і принципів дії, такі перетворювачі можуть бути класифіковані за типом чутливого елемента, способом формування тензорезисторів, діапазоном вимірюваних навантажень

та сферою застосування. Основними критеріями класифікації є принцип перетворення, тип підкладки, технологія виготовлення, чутливість, лінійність і температурна стабільність.

Розроблення мікроелектронного MEMS тензометричного перетворювача, який відповідає сучасним вимогам до мініатюрності, точності та енергоефективності. Дослідження спрямовані на створення універсального сенсорного елемента, здатного забезпечити надійне вимірювання механічних параметрів у широкому діапазоні умов експлуатації. Перетворювач може бути використаний у системах технічної діагностики, робототехніці, медичних приладах, авіаційних і промислових комплексах, де необхідні високоточні вимірювання та стабільність характеристик у часі.

2 ОСНОВИ АРХІТЕКТУРИ MEMS

2.1 Класичні інженерні рішення

Протягом останніх кількох років спостерігається швидке впровадження технології інерційних датчиків у багато споживчих електронних продуктів, включаючи смартфони, планшети, ігрові системи, пульти дистанційного керування телевізорами, іграшки та, навіть, нещодавно, електроінструменти. Рушійною силою цього провадження стало різке зниження вартості на виготовлення датчиків, що стало можливим завдяки високоінтегрованим технологіям кремнієвих мікроелектромеханічних систем (MEMS)/комплементарних металоксидно-напівпровідникових (CMOS) транзисторів у поєднанні з розширенням усвідомлення переваг застосування можливостей відстеження руху для покращення взаємодії користувача з різними пристроями. Завдяки інтеграції кремнієвих MEMS/CMOS, багатоосьові датчики різних типів тепер співіснують на одній кремнієвій підкладці в невеликому недорогому пластиковому корпусі. Відстеження деформацій на основі MEMS тепер стоїть поруч із сенсорним екраном та розпізнаванням голосу як один із основних засобів взаємодії з пристроями.

Інші застосування, що стимулюють впровадження технології відстеження руху, включають ОСЗ(оптичної стабілізації зображення) та LBS. У минулому цифрові фотокамери використовували переважно п'єзоелектричні гіроскопи, виготовлені з кварцу або п'єзокераміки, але кремнієві гіроскопи на основі MEMS витісняють цю старішу технологію, забезпечуючи чудову продуктивність у значно меншому форм-факторі з багатоосьовою інтеграцією. Зменшення форм-фактора є ключовим чинником впровадження ОСЗ в мобільні телефони, оскільки кількість мегапікселів та оптичного зуму, доступних зараз в камерах мобільних телефонів, досягла точки, коли стабілізація зображення стає необхідною для придушення розмиття через тремтіння рук.

Фундаментальну концепцію електромеханічного датчика можна зрозуміти, звернувшись до канонічної системи, показаної на рис. 2.1. У цій системі контрольна маса m підвішена на механічній рамі за допомогою пружини k_m та реагує на вхідну силу F , що представляє величину, що вимірюється. Вхідна сила викликає зміщення x маси, і це зміщення вимірюється для вимірювання сили. Наприклад, вхідна сила може виникати внаслідок прискорення маси, як це було б у випадку акселерометра. Або сила може бути пов'язана з прискоренням Коріоліса, що виникає внаслідок кутового обертання маси, як це було б у випадку вібраційного гіроскопа. Різні датчики використовують різні методи перетворення для перетворення величини, що нас цікавить, у силу, що діє на контрольну масу. Високоякісний датчик, як правило, має високий коефіцієнт посилення перетворення, відкидаючи при цьому вплив паразитних сил на масу, які можуть погіршити точність датчика.

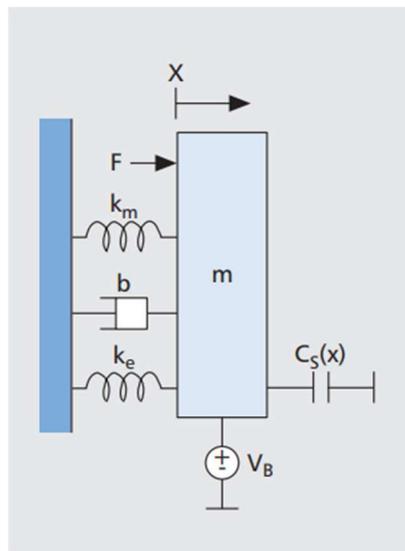


Рисунок 2.1 – Типова схема MEMS датчика

Додаткові сили, що діють на масу-вимірювач, стосуються електромеханічного перетворення, необхідного для забезпечення працездатності датчика. У цьому посібнику ми зосереджуємося на електростатичному перетворенні, хоча можливі й інші методи (наприклад, п'єзоелектричне перетворення). Усі датчики вимагають вимірювання зміщення маси-вимірювача, але деякі датчики додатково вимагають, щоб маса була

приведена в рух для створення необхідної вхідної сили. Наприклад, у вібраційних гіроскопах сила Коріоліса, що виникає внаслідок кутового обертання, пропорційна швидкості маси-вимірювача. Таким чином, маса-вимірювач повинна рухатися з відомою швидкістю для заданої швидкості обертання, щоб проявити себе як відома сила, що діє на масою.

Для вимірювання зміщення маси-вимірювання електростатичним способом використовується конденсатор $CS(x)$, один вивід якого розташований на масі, а інший – на нерухомій рамі. При фіксованій напрузі зміщення V_B зміна заряду DQ на конденсаторі створюється зміною положення Dx , відповідно до формули:

$$\Delta Q(\Delta x) = \frac{\partial C_S(x)}{\partial x} V_B \Delta x \quad (2.1)$$

Варто звернути увагу, що перша похідна відносно положення $CS(x)$ визначає чутливість до заряду разом із напругою зміщення. Чутливість до заряду можна додатково виразити через геометричні параметри конденсатора та діелектричну проникність вільного простору. Ключовим спостереженням є те, що чутливість до заряду зазвичай збільшується для більшої напруги зміщення V_B та меншого початкового розміру проміжку g_0 .

Окрім забезпечення перетворення заряду, конденсатори можуть бути використані для застосування електростатичних сил до конденсаторної маси. Електростатична сила пов'язана з градієнтом потенційної енергії заряду, що зберігається на конденсаторі. При фіксованому зміщенні V_B та за умови роботи з малим сигналом зміна сили DF пов'язана зі зміною напруги на виводах конденсатора Dv наступним чином:

$$\Delta F(\Delta v) = \frac{\partial C_S(x)}{\partial x} V_B \Delta v \quad (2.2)$$

Хоча вона не використовується явно для перетворення сили, ємність вимірювання $CS(x)$ тим не менш пов'язана з електростатичною силою, яка — для конденсаторів з паралельними пластинами — змінюється залежно від

положення контрольної маси. Для малих переміщень вплив цієї електростатичної сили на динаміку системи можна змоделювати за допомогою еквівалентної постійної пружності.

Однак, оскільки електростатичні сили мають притягальну природу, електростатична пружина насправді негативна, що призводить до явища, відомого як електростатичне розм'якшення пружності, при якому електростатичні сили зменшують ефективну пружність пружності системи. Таке розм'якшення пружності може призвести до прямої механічної нестабільності, відомої як втягування, якщо величина електростатичної постійної пружності k_E дозволити перевищувати величину механічної постійної пружності k_M .

2.2 Енергетичні показники MEMS перетворювача

Усім датчикам MEMS потрібна спеціальна схема аналогового сигналу для обробки та оцифрування виходу датчика. Серед багатьох функцій, що надаються інтерфейсом датчика, є подача стабільної напруги зміщення на пристрій MEMS, посилення потоку сигнального заряду до вимірюваного рівня з максимізацією співвідношення сигнал/шум, забезпечення необхідної обробки сигналу для фільтрації та вилучення потрібного сигналу, а також стабілізація роботи датчика за температури.

Корисний показник добротності, що базується на енергії, визначається шляхом визначення співвідношення пікового співвідношення сигнал/шум (вираженого як коефіцієнт потужності) до енергії на перетворення. Вищий показник добротності вказує на більш енергоефективний датчик, який працює з меншим споживанням енергії за заданих шумових характеристик або, як варіант, має менший рівень шуму за того ж споживання енергії.

Наприклад, розглянемо спрощені конфігурації інтерфейсу датчика, показані на рис. 2.2. Перша конфігурація використовує безперервне зондування, де фіксована напруга зміщення V_B прикладається до маси MEMS, і

рух цієї маси індукує потік заряду, який потім посилюється трансконденсаційним підсилювачем перед аналого-цифровим (АЦП) перетворенням. Система має смугу дії, обмежену наступним цифровим фільтром для забезпечення бажаного вихідного сигналу.

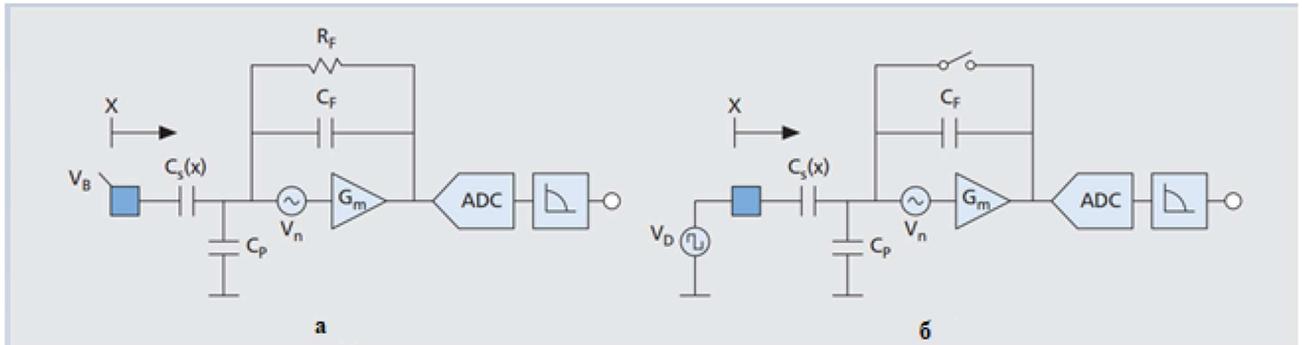


Рисунок 2.2 – Схема конфігурації датчика а – безперервне зондування, б – дискретне зондування

Друга конфігурація використовує дискретне зондування, де маса, що керується ступенем напруги V_D , після скидання трансконденсаційного підсилювача, а результуюча напруга потім оцифровується та фільтрується для відтворення вихідного сигналу. В обох системах тепловий шум вноситься підсилювачем відносно його крутизни G_m . Вища крутизна підсилювача призведе до зниженої еквівалентної вхідної шумової напруги.[9]

Аналіз передбачає, що шумові характеристики обмежені електронікою переднього кінця, а не броунівським шумом пристрою MEMS. Розглядаючи кожен пункт, можна визначити деякі фундаментальні цілі проектування датчиків для оптимізації продуктивності:

- максимізація механічного розмаху на повній шкалі (Dx/g_0): MEMS-пристрій, що працює на повній шкалі розмаху, повинен забезпечувати максимальне механічне зміщення як частку зазору, g_0 . Практичні зміщення обмежені нелінійністю через залежність чутливого конденсатора від проміжку;

- максимізація напруги зміщення або напруги керування ($V_B(D)/V_{DD}$): Більша напруга зміщення (системи безперервного часу) або напруга керування (дискретні системи) у відсотках ввід напруги живлення буде

забезпечують більший вихідний сигнал та покращене співвідношення сигнал/шум. З цієї причини зазвичай використовуються високі напруги зміщення/керування, що перевищують VDD;

- мінімізація паразитних впливів ($CS/(CP + CS)$): Наявність додаткової паразитної ємності, CP, створює додатковий шумовий заряд шляхом перетворення шумової напруги підсилювача. Таким чином, збільшені паразитні впливи погіршують співвідношення сигнал/шум.

Вплив ємнісних паразитних властивостей заслуговує на особливу увагу. Багато технологій MEMS спираються на інтеграцію «система в корпусі» (SiP), де механічний пристрій та електроніка інтерфейсу датчика розташовані на різних кристалах, які повинні бути з'єднані за допомогою сполучних проводів. Паразитні властивості сполучних проводів можуть бути досить великими, і будь-який зсув паразитних властивостей може спричинити відносно великий зсув. З'єднання сполучних проводів також не дозволяють екранувати вихідні лінії чутливого датчика. Для порівняння, технологія MEMS, що пропонує інтеграцію в один чіп, усуває необхідність у сполучних дротах та забезпечує високощільне, екрановане, стабільне з'єднання між механічним корпусом та електронікою інтерфейсу датчика.

2.3 Інтеграція датчиків MEMS-CMOS

Розглянувши основні характеристики найпоширеніших електромеханічних інерційних датчиків, ми можемо перерахувати різні властивості, які були б бажаними в кремнієвій MEMS-технології, для реалізації високоякісних недорогих інерційних датчиків масового ринку:

- інтеграція MEMS/CMOS: інтеграція компонентів MEMS та CMOS в єдину монолітну структуру масштабу пластини бажаний для малих форм-факторів та найнижчих витрат на виробництво та тестування.

- гнучке та стабільне з'єднання: підключення пристроїв MEMS до активної електроніки вимагає схеми з'єднання, що забезпечує високу щільність

для обслуговування кількох електродів, мінімальні паразитні впливи для підтримки співвідношення сигнал/шум, екранування чутливих з'єднань з пристроєм MEMS та стабільність при перепаді температури, щоб уникнути дрейфу паразитних ємностей, що призводять до зміщень зарядових доменів.

- герметичність: герметичне середовище для роботи датчика захищає рухомі компоненти від вологи та пилу, а також підтримує фіксований тиск у резонаторі;

- низька вартість упаковки: вартість мінімізується завдяки використанню пластикових корпусів, тому герметичність слід забезпечувати засобами, сумісними з їх використанням;

- вакуумне герметизування: для датчиків, які потребують механічних коливань (наприклад, гіроскопів), важливо досягти та підтримувати низький тиск у резонаторі, щоб мінімізувати затухання та отримати високий коефіцієнт якості резонатора;

- стабільність проміжку: менші розміри проміжку сприяють збільшенню електромеханічної трансдукції, що зрештою покращує SNR та споживання енергії. Найважливіше, що проміжок має бути дуже стабільним за температури через залежність електромеханічного перетворення від розміру зазору високого порядку;

- велика маса: для мініатюризації датчиків корисно отримати високу масу на одиницю площі кремнію. Це мотивує використання товстих шарів кремнію для формування механічних компонентів.[10]

Цих цілей досягає технологія CMOS-MEMS, показана на рис. 2.3. У цій власній технології InvenSense, пластина MEMS виготовляється за допомогою 5-маскового процесу. Спочатку на пластину наноситься малюнок, щоб забезпечити мітки вирівнювання для інтеграції пластини з пластиною CMOS та верхньою порожниною для роботи пристрою MEMS у середовищі низького тиску. Потім пластина зварюється з другою кремнієвою пластиною пристрою для формування інженерної пластини кремній на ізоляторі.

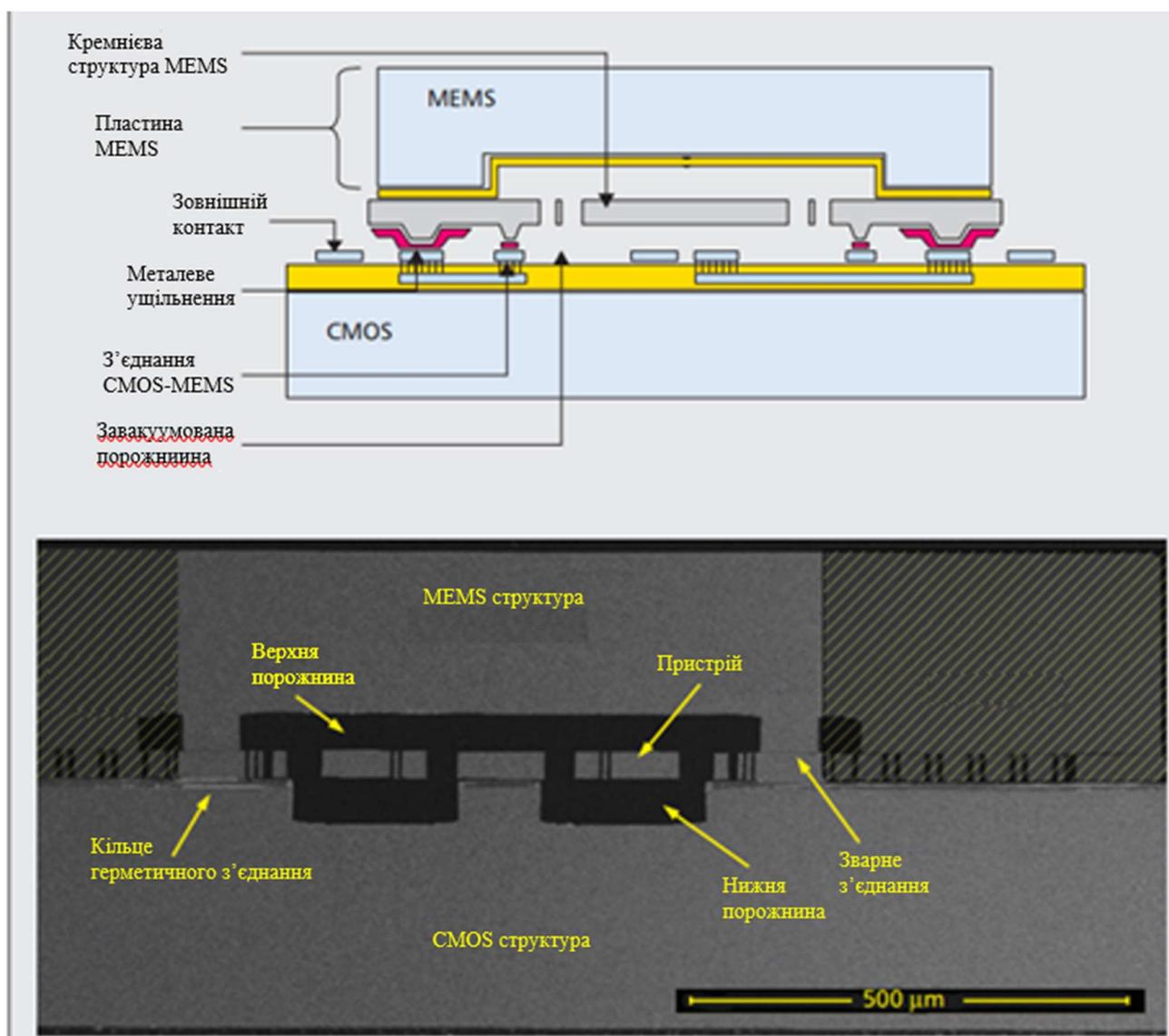


Рисунок 2.3 – Технологія виготовлення кремнієвих MEMS/CMOS-транзисторів:
а) структура; б) поперечний переріз пристрою

Шар кремнієвого пристрою стоншується до бажаної товщини для механічних елементів. Після стоншення шар пристрою додатково формується для забезпечення герметичного кільця ущільнення, з'єднань та дистанційних структур, що визначають вертикальний зазор; германієве (Ge) покриття для електричного контакту та герметичного ущільнення; і, нарешті, механічні елементи, визначені глибоким реактивним іонним травленням (DRIE). Завершена MEMS-пластина потім з'єднується з відповідною CMOS-пластиною, що містить електроніку датчика, за допомогою евтектичного зв'язку алюміній-германій (Al-Ge). Евтектичний зв'язок формується під низьким тиском, щоб

забезпечити герметичну порожнину, герметичну у вакуумі. CMOS-пластина обробляється перед з'єднанням Al-Ge для планаризації поверхні та, за потреби, для створення нижньої порожнини, що забезпечує додатковий зазор для рухомих механічних елементів, за допомогою шостого етапу маскування. Після склеювання Al-Ge, готова пластина CMOS-MEMS частково розпилюється, щоб видалити кремнієві виступи з пластини MEMS та оголити контактні площадки CMOS, що знаходяться під нею. Потім пластини можна дослідити, щоб що лише відомі та якісні кристали збираються в недорогі пластикові корпуси для остаточного тестування. Тестування на рівні пластини також дозволяє ефективно обрізати кристали та пропонує покращення якості з повною відстежуваністю окремих кристалів. Поперечний переріз готового пристрою, виготовленого за допомогою цієї технології, також показано на рис. 2.3 б.[10]

Інтеграція на рівні пластини, що забезпечується цією технологією, дозволяє створити недороге та надійне рішення для виробництва великих обсягів, сумісне з недорогим пластиковим корпусом. З'єднання елементів MEMS один з одним та з електронікою датчика здійснюється за допомогою металевих шарів трасування, доступних на CMOS-підкладці. Порівняно з підходами «система в корпусі» (SiP), де з'єднання між MEMS та CMOS базується на використанні сполучних проводів, ця технологія забезпечує високу щільність з'єднань, екрановане трасування, термостабільність та зменшену паразитну ємність.

Ця технологія також дозволяє інтегрувати кілька датчиків, що мають спільну герметичну порожнину, в один монолітний пристрій, тим самим значно знижуючи додаткову вартість кожного датчика. Під час інтеграції кількох датчиків важливо забезпечити механічну та електричну ізоляцію, щоб уникнути міжосьових перешкод датчика. Використання шарів трасування CMOS для з'єднання дозволяє забезпечити значне екранування термінали MEMS-пристроїв, що значною мірою запобігає електричним перехресним перешкодам. Інтеграція також вигідна для показників ефективності на основі енергії для

кожної осі, оскільки фіксоване споживання енергії для зміщення та регулювання живлення розподіляється між кількома датчиками.

2.4 Бездротові датчики

Бездротові інтегровані датчики зазвичай розробляються для суворих умов. Бездротовий інтегрований датчик температури-тиску-вологості, являє собою мультирезонансну структуру з трьома окремими резонансними частотами.

Схема, структура та експериментальні результати показано на рис. 2.4. Ця конструкція забезпечила одночасне вимірювання температури, тиску та вологості шляхом розміщення чутливих елементів у відповідних комплементарних структурах з розрізним кільцевим резонатором. Датчик ТРН може стабільно працювати в суворих середовищах при температурі 25–300 °С, тиску 10–300 кПа та відносної вологості 20–90%.

Поєднання MEMS та IoT дозволяє створювати інтелектуальні сенсорні мережі, у яких дані з численних мікросенсорів обробляються локально або передаються на віддалені сервери чи хмарні платформи. Це відкриває широкі можливості для автоматизації технічних систем, моніторингу стану об'єктів, прогнозування несправностей та реалізації концепції «розумних» виробництв і кіберфізичних систем.

Інтеграція MEMS-перетворювачів з мікроконтролерами, бездротовими модулями (Wi-Fi, LoRaWAN, BLE) та низькопотужними протоколами зв'язку дозволяє створювати автономні сенсорні вузли з мінімальним енергоспоживанням. Такі сенсорні модулі можуть працювати тривалий час від автономного джерела живлення, що робить їх ідеальними для розподілених мереж моніторингу.

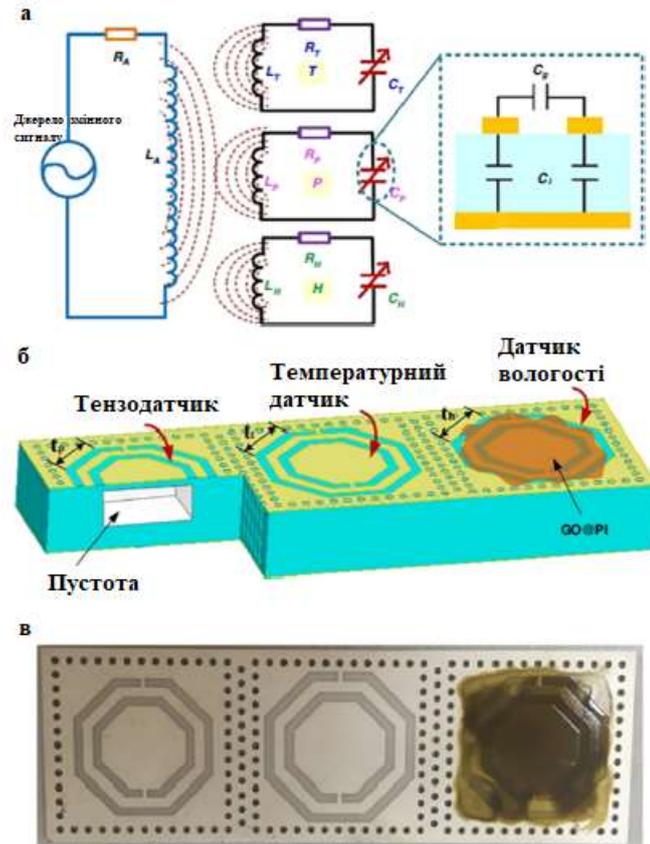


Рисунок 2.4 – Бездротовий мультипараметричний сенсор а) схема електрична-принципова б) структура сенсора в) фото готового виробу

Інтернет речей (IoT) може використовувати кілька основних функцій та переваг MEMS. Пристрої MEMS можуть ефективно відповідати вимогам багатьох застосувань IoT:

- низьке енергоспоживання датчики та шлюзи Інтернету речей часто повинні бути бездротовими та живитися від батареї. Через низьку вартість одиниці зазвичай дешевше замінити весь пристрій, ніж перевстановлювати його з новою батареєю. Таким чином, будь-яке зниження енергоспоживання подовжує термін служби пристроїв. Деякі MEMS стикаються з тими ж вимогами до живлення, що й їхні більші аналоги.

- малий форм-фактор користувачі зазвичай хочуть, щоб пристрої Інтернету речей були невеликими та непомітними в офісних та домашніх умовах. MEMS за визначенням є непомітними. Але, окрім потреб користувачів, у деяких застосуваннях Інтернету речей пристрій може знадобитися додати до

існуючої машини, наприклад, автомобіля, яка має обмежений простір для додаткового обладнання. В інших випадках, таких як носимні пристрої та біомедичні застосування, малий розмір є критично важливою вимогою, яку необхідно виконати. Завдяки своїй компактності, MEMS відповідають і перевершують ці вимоги.

- економічно ефективність під час розгортання рішення Інтернету речей масштаб зазвичай є головною проблемою. Наприклад, під час встановлення датчиків для моніторингу погоди та рівня вологості на сільськогосподарському полі, на кожному акрі потрібно буде висіяти багато пристроїв. Або розглядається рішення для відстеження змінних, в якому може бути надзвичайно велика (і змінна) кількість даниї, які потрібно відстежувати. В інших застосуваннях, таких як судноплавство, пристрій може бути одноразовим.

- висока чутливість і точність вимірювання. У багатьох застосуваннях IoT потрібне не лише виявлення фізичних величин, але й їхнє точне вимірювання для подальшого аналізу та прийняття рішень. MEMS-пристрої забезпечують високу чутливість до механічних, тискових, вібраційних і температурних змін завдяки використанню тензорезистивних, ємнісних чи п'єзоелектричних структур. Зокрема, MEMS тензометричні перетворювачі здатні реєструвати деформації на рівні мікрона і навіть нанометра, що є критично важливим у системах технічного діагностування, медичної діагностики та точного машинобудування.

- можливість інтеграції з електронікою та цифровими інтерфейсами. Однією з ключових переваг MEMS є можливість їх інтеграції з мікроконтролерами, підсилювальними схемами та інтерфейсами передачі даних безпосередньо на одному чипі. Це дозволяє створювати компактні сенсорні модулі, які передають дані по інтерфейсах I2C, SPI, UART або бездротових технологіях (BLE, LoRaWAN, ZigBee, Wi-Fi). Така інтеграція спрощує використання MEMS-перетворювачів у розподілених IoT-системах та підвищує їхню функціональність.

- надійність і довговічність. Для IoT-рішень, що працюють у складних умовах (промисловість, авіація, будівництво, агросектор), важливою є стійкість вимірювальних пристроїв до температурних перепадів, вібрацій і механічних навантажень. MEMS-пристрої виготовляються з використанням кремнієвих або композитних матеріалів, які мають високу механічну міцність і стабільність параметрів у часі. Завдяки цьому такі сенсори можуть працювати без обслуговування протягом багатьох років.[10]

2.5 Застосування в екології

Розвиток виробництва мікросистем йде в напрямку зменшення витрат на матеріали та обладнання, кількості технологічних операцій, а також покращення їх функціональних властивостей (точність, робочий діапазон, чутливість тощо) при одночасному підвищенні надійності. Зі збільшенням складності мікросистем етап автоматизованого проектування відіграватиме дедалі важливішу роль у процесі виробництва. На рисунку 2.5 показано зростання MEMS у галузі у 2006 році та значення, які, за прогнозами, були досягнуті у 2011 році.

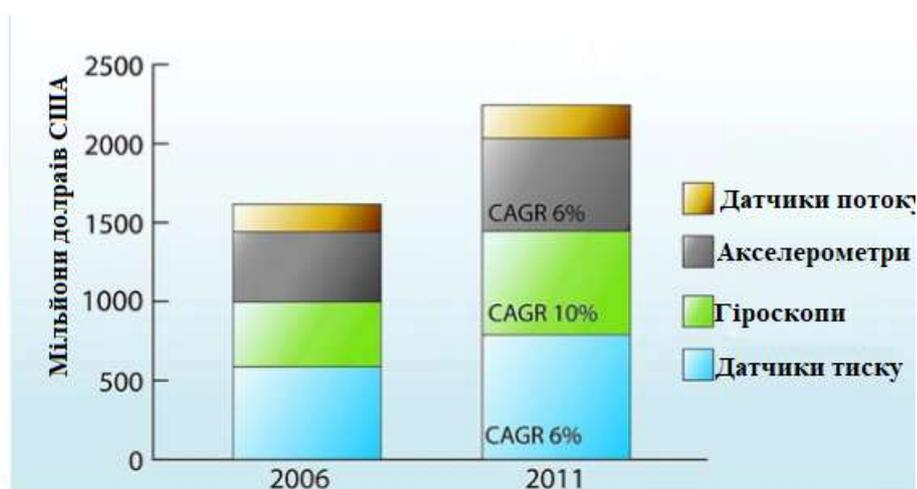


Рисунок 2.5 – Застосування MEMS датчиків у 2006 та 2011 році

Тензометричні (SG) датчики широко поширені, оскільки вони також використовуються як складова частина багатьох інших датчиків механічних

величин. Коли до твердого тіла прикладається сила F , його геометричні розміри змінюються – при стисканні тіло скорочується (стискальна деформація) з Dl , але при розтягуванні воно видовжується (розтягувальна деформація). Зміни розмірів також відбуваються при крученні та згинанні тіла. Кожному з цих чотирьох основних типів деформацій відповідає певна група датчиків щодо їх вимірювання. Найбільше застосування мають MEMS або SG-датчики для деформацій, які використовують зміну опору деяких матеріалів при деформаціях. Вперше це явище спостерігав Кельвін у 1856 році щодо металевго провідника, але його практичне використання почалося з 30-х років минулого століття. Специфічними параметрами кожного SG-датчика є опір без механічної сили R , який становить кілька сотень Вт, та коефіцієнт калібрування $GF=(DR/R)/\epsilon$, де DR – зміна опору внаслідок деформації.[11]

Залежно від використовуваного матеріалу, існують два типи SG-датчиків. Металеві датчики деформації складаються з тонкого спірального складеного провідника, оскільки вони вимірюють деформації вздовж його довжини, що називається віссю датчика. У датчиків деформації металева фольга або фольга з константану, хромонікелю, платини або залізонікелевого сплаву накладається на пластикову стрічку, яка зазвичай приклеюється до вимірюваного об'єкта епоксидною смолою. Враховувані метали використовуються через їх великий опір, значні допустимі значення Dl та великий показник втомі – передумову для тривалого терміну служби SG-датчиків. Напівпровідникові датчики деформації мають аналогічну структуру, але вони використовують п'єзоелектричний ефект, що представляє собою зміну опору тонкого напівпровідникового шару при деформації.

Сучасний розвиток MEMS призводить до багатостороннього впровадження мініатюрних систем для аналізу в екології. У цій галузі мікросистеми розробляються переважно для аналізу води та газів. Як приклад буде наведено датчик сигаретного диму, який може розпізнавати вибрані та певні типи диму під час горіння. Умови впровадження, особливо в промислових середовищах, таких як, наприклад, вугільні теплоелектростанції,

вимагають захисту від пилу (золи) та корозії, зовнішньої вологи та змін температури, ударів та вібрацій, електромагнітних полів, а також газів, що порушують його роботу (наприклад, від розчинників, зварювальних робіт, природного куріння матеріалів). Дослідницька група разом з професором Х. Балтесом з Лабораторії фізичної електроніки ETN-Zurich розробила сенсорну мікросистему, що являє собою тривимірний кремнієвий чіп для виявлення шкідливих газів у повітрі. У ній інтегровано три типи сенсорних елементів для вимірювання та аналізу трьох різних фізичних величин, причому з точністю до 1 мільярдної частини грама. Масочутливі, ємнісні та калориметричні сенсори реалізовані в рамках єдиного чіпа разом з обробною та керуючою електронікою. Він запровадив мембрани з чутливими шарами в багатьох хімічних сенсорах, які одночасно служать захисним шаром між вимірюваним середовищем та електронікою. Наприклад, датчик, розроблений фірмою Siemens, для залишкових викидів водню під час контролю запалювання циліндрів в автомобілях.

2.6 Висновки до розділу

У даному розділі було здійснено аналіз архітектури мікроелектромеханічних систем (MEMS) та досліджено ключові аспекти їх побудови й функціонування. Розглянуті класичні інженерні рішення показали, що традиційні макромеханічні сенсорні системи поступаються MEMS-перетворювачам за габаритами, енергоефективністю, швидкістю та можливістю інтеграції з електронікою. Саме завдяки використанню мікромасштабних конструкцій досягається висока чутливість при мінімальних енергетичних витратах і низькій вартості виготовлення.

Аналіз енергетичних показників MEMS-перетворювачів довів, що сучасні сенсорні структури можуть працювати при наднизькому енергоспоживанні, що робить їх придатними для автономних і портативних застосувань. Особливу увагу приділено принципам оптимізації енергоспоживання за рахунок

вдосконалення конструкції чутливого елемента, застосування енергоефективних режимів вимірювання та використання інтелектуальних алгоритмів обробки даних.

Інтеграція MEMS з технологією CMOS підтвердила важливість поєднання механічних сенсорних структур з електронними схемами обробки сигналів на одному кристалі. Такий підхід забезпечує зменшення шумів, зниження втрат сигналу, підвищення точності вимірювань та створює передумови для реалізації повністю інтегрованих мікросистем.

Бездротові MEMS-датчики, які є важливою складовою сучасних IoT-рішень. Вони забезпечують дистанційний моніторинг фізичних параметрів у реальному часі, що розширює можливості їх застосування в умовах, де дротові системи є недоцільними або неможливими.

Застосування MEMS у екологічному моніторингу, де такі сенсори використовуються для вимірювання тиску, вологості, вібрацій, концентрації газів і частинок у повітрі. Завдяки своїм характеристикам MEMS-технології сприяють реалізації компактних мобільних екологічних систем, що підвищує ефективність контролю стану довкілля.

Проведений огляд дозволяє зробити висновок, що архітектура MEMS є високотехнологічною та перспективною платформою для створення датчиків нового покоління. Її гнучкість, масштабованість та сумісність із сучасними мікроелектронними технологіями роблять MEMS оптимальним рішенням для систем контролю та діагностики в широкому спектрі галузей. Це визначає наукову й практичну актуальність подальших досліджень у напрямі розробки мікроелектронних MEMS тензометричних перетворювачів.

3 СТВОРЕННЯ КАНАЛУ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДУЛІВ LORA

3.1 Застосування модулів LoRa для побудови мережі

З активним використанням Інтернету речей з'являється все більша потреба в енергоефективних мережах. Багато програм Інтернету речей вимагають, щоб дані збиралися і відправлялися на великі відстані, причому датчики іноді знаходяться на відстані кількох кілометрів один від одного. Крім того, для розгортання Інтернету речей, можуть знадобитися пристрої для періодичної передачі невеликих пакетів інформації протягом багатьох років або навіть десятиліть на одному заряді батареї. Для забезпечення таких мереж з'явилася технологія LPWAN – енергоефективна мережа далекого радіусу дії. Передбачається, що глобальні мережі з низьким енергоспоживанням (LPWAN) будуть підтримувати більшу частину мільярдів пристроїв, що прогноуються для Інтернету речей (IoT) . LoRa є наступним ступенем розвитку LPWAN рішення, яке було розроблено та запатентовано корпорацією Semtech. Суть технології зводиться до варіації лінійної модуляції частотної (Chirp Spread Spectrum, CSS).

LoRa - це фізичний рівень чи бездротова модуляція, що використовується створення каналу зв'язку великі відстані. Багато застарілих бездротових систем використовують модуляцію з частотною маніпуляцією як фізичний рівень, тому що це дуже ефективна модуляція для досягнення низької потужності. LoRa заснований на модуляції з розширеним спектром ЛЧМ, яка підтримує самі характеристики низької потужності, що і модуляція FSK, але значно збільшує дальність зв'язку. Розширений спектр ЛЧМ-сигналу використовувався у військовій та космічній зв'язку протягом десятиліть через великі відстані зв'язку, які можуть бути досягнуті, і стійкості до перешкод, але LoRa - перша недорога реалізація для комерційного використання.

Перевага LoRa полягає у можливості великої дальності дії цієї технології. Один шлюз чи базова станція може охоплювати цілі міста чи сотні квадратних

кілометрів. Дальність дії сильно залежить від навколишнього середовища чи перешкод у цьому місці, але LoRa та LoRaWAN мають більший бюджет каналу, ніж будь-яка інша стандартизована технологія зв'язку. Бюджет лінії зв'язку, що зазвичай виражається в децибелах (дБ), є основним фактором щодо дальності дії в даному середовищі. За мінімальної кількості інфраструктури можна легко покрити цілі країни.[12]

3.2 Принцип роботи мережі

Модулі LoRa забезпечують бездротовий зв'язок на багато миль за допомогою запатентованого підходу модуляції з розширеним спектром, розробленого Semtech, під назвою LoRa. Він використовує форму модуляції з розширеним спектром, відому як Chirp Spread Spectrum (CSS), частота якої збільшується або зменшується з часом по всій пропускну здатності каналу. Це дозволяє відновити сигнал нижче рівня шуму, забезпечуючи велику дальність зв'язку з високою стійкістю. Модуляція LoRa компенсує швидкість передачі необроблених даних чутливістю, стійкістю до перешкод та дальністю.

Модулі LoRa приймають вхідні дані, кодують їх за допомогою складної модуляції та передають радіосигнал, який може поширюватися на багато миль при низьких рівнях потужності. Цей сигнал демодулюється шлюзовими пристроями LoRa, підключеними до Інтернету через стільниковий зв'язок, супутник, Wi-Fi або Ethernet. Потім шлюзи пересилають дані на централізований мережевий сервер для обробки та аналізу. Зв'язок відбувається двонаправлено – кінцеві пристрої надсилають дані висхідного каналу на сервер, коли це необхідно. Сервери також можуть надсилати повідомлення низхідного каналу на кінцеві вузли через шлюзи.

Збір та передача даних, що застосовуються до модуля LoRa, включає чотири елементи:

- Кінцеві пристрої — точки, де розміщені датчики з вбудованими модулями LoRa. Такі пристрої працюють автономно від батарей. Датчики фіксують дані, а потім передають їх на шлюз.

- Шлюз – це пристрій, який двосторонньо з'єднує кінцеві пристрої та мережевий сервер. Шлюз зв'язується з модулями за допомогою протоколу LoRaWAN та через Інтернет з мережевим сервером. Основним завданням цього елемента системи є збір даних з усіх доступних модулів та передача їх на сервер.

- Мережевий сервер — це наступний рівень збору та обробки даних, який взаємодіє з усіма шлюзами системи LoRaWAN. Мережевий сервер записує всі зібрані дані та керує мережею — встановлює оптимальний графік, адаптує швидкість передачі даних та керує зберіганням та обробкою отриманих даних.

- Сервер застосунків є кінцевою точкою збору даних. Сервер застосунків також контролює роботу кінцевих пристроїв.

Ключовими особливостями технології розширеного спектру LoRa є можливість зв'язку на великі відстані, низьке енергоспоживання та високий рівень захисту від перешкод. Розширюючи сигнал у частотній області, технологія LoRa може досягти відстані зв'язку понад 10 кілометрів на відкритому повітрі, а також може покривати кілька кілометрів у міському середовищі.

Низьке енергоспоживання технології розширеного спектра LoRa робить її ідеальною для застосувань із тривалим часом роботи та живленням від батареї. Низькошвидкісна передача та малопотужна передача сигналу з розширеним спектром ефективно зменшують енергоспоживання пристрою та подовжують термін служби батареї. Крім того, технологія LoRa використовує метод модуляції CSS, який має відмінні антиінтерференційні властивості. Завдяки модуляції CSS пристрої LoRa є більш стійкими до вузькосмугових джерел завад і можуть підтримувати стабільне з'єднання під час передачі даних.[13]

Кожен чирп може кодувати 2^{SF} значень символів. Для цього технологія LoRa зсуває частотний зсув відповідно до значення символу. Приймач здатний виявити різкий перепад у траєкторії миттєвої частоти. Значення символу відповідає зсуву частоти на початку символ, яке також є пропорційне часу між початком символу та моментом появи різкого перепаду частоти.

Щоб декодувати значення символу, приймач повинен знати межі цього символу. Тому в технології LoRa вводиться преамбула, яка складається з кількох символів (зазвичай — восьми). У висхідному каналі зв'язку преамбула складається з висхідних чирпів, а дані передаються за допомогою низхідних чирпів. У низхідному каналі навпаки — преамбула складається з низхідних чирпів, а дані — з висхідних. Приклад преамбули показаний на рисунку 3.1.

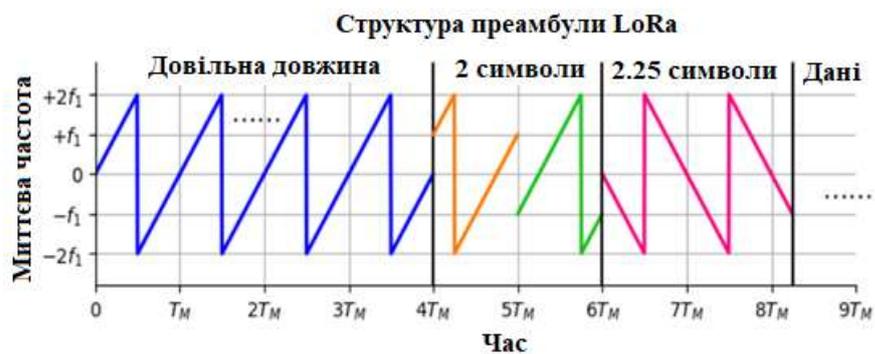


Рисунок 3.1 – Формування послідовності сигналів у модулях LoRa

Накладання кількох преамбул призводить до накладання висхідних чирп-символів, за винятком кінця останньої преамбули. Унаслідок цього приймач виявляє два різкі перепади частоти для більшості символів преамбули[14]. Кожен із цих різких перепадів дозволяє приймачу визначити межу символу кожного передавача. Однак початок першого символу даних першого вузла неможливо декодувати, оскільки він відповідає накладанню низхідного чирпа із висхідним чирпом що належить кінцю преамбули другого вузла.

Починаючи з першого символу даних другого вузла, накладаються лише низхідні чирпи, тому можна виявити всі різкі перепади частоти. Основна складність полягає у співставленні частот із відповідними символами кожного вузла.

Для цього застосовується процедура кореляції використовується така властивість: різкі перепади частоти можуть виникати лише у трьох випадках — на початку символу, під час зміни символу, або один раз у межах символу. Якщо різкий перепад з'являється всередині символу, його положення можна спрогнозувати, за умови, що значення символу відоме.[15]

3.3 Вибір модуля для мережі

Вибираючи правильний модуль LoRa для свого проекту, слід враховувати різні фактори. Деякі з важливих факторів включають:

- Відстань передачі даних
- Область застосування
- Застосування в приміщенні чи на відкритому середовищі – температурні межі, захист від вологи, пилу, частота обслуговування, корізії, вітру, вимоги до надійності і тд. У нашому випадку передбачається застосування пристрою на відкритому середовищі.
- Безпека – наявність шифрування каналу, аутентифікації, перевірка парності бітів,
- Бюджет
- Робоча частота – можливий вплив законодавчих органів які мають відповідати місцевим вимогами, вплив на радіус передачі та проникаючу здатність сигналу, сумісність із іншим обладнанням у середині мережі. Для наших цілей необхідний діапазон у 900 МГц.
- Швидкість передачі даних.
- Потужність передавача та чутливість приймача- збільшення теоретичної дальності передачі сигналу – проте вимагає більшого енергоспоживання, також може створювати спотворення вхідної інформації при одночасному прийомі декількох пристроїв.
- Інтерфейс підключення до мікроконтролера

- Енергоспоживання – швидкий розряд батареї при частих передачах, потреба узгодити частоту передачі для забезпечення стабільного часу роботи.
- Тип мікроконтролера що використовується
- Наявність додаткових функцій – шифрування повідомлень, підтримка аутентифікації, ключі передачі, перевірка каналу перед передачею, збереження параметрів перед вимиканням і тд. [16]

При аналізі ринку із використанням параметрів що описані вище стає зрозуміло що доцільним є використання модуля LoRa на чипі - SX1276 який може працювати в діапазоні частот від 803 до 930, завдяки чому за відсутності прямої видимості між передавачем і приймачем модуль забезпечує більш стабільний зв'язок ніж 2.4ГГц передавачі.[17] Також до модулів із таким діапазоном частот простіше підібрати або виготовити спрямовану антену. Основна сфера застосування модулів на таких чипах- системи, в яких потрібна підвищена дальність радіозв'язку та стабільність роботи: автономні датчики, робототехніка, керування радіомоделями. Деталі параметри наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні параметри чипу SX1276

Дальність передачі	до 10 км
Діапазон робочих частот	803...930 МГц
Типи модуляції, що підтримуються	FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRaTM та OOK
Робоча напруга	1.7-3.8В
Споживаний струм	до 120 мА
Швидкість передачі даних	до 300 кбіт/с
Інтерфейс керування модулем	SPI
Робоча температура	-40...+85 °С
Розмір плати	16x17 мм
Споживання струму при передачі	105 мА
Споживання струму при прийомі	12.15 мА
Споживання струму при очікуванні	1.5 мА
Чутливість приймача	-139дБм
Вхідна напруга логічної 1	0.8 В
Вхідна напруга логічного 0	0.2 В
Вихідна напруга логічної 1	0.9 В
Вихідна напруга логічного 0	0.1 В

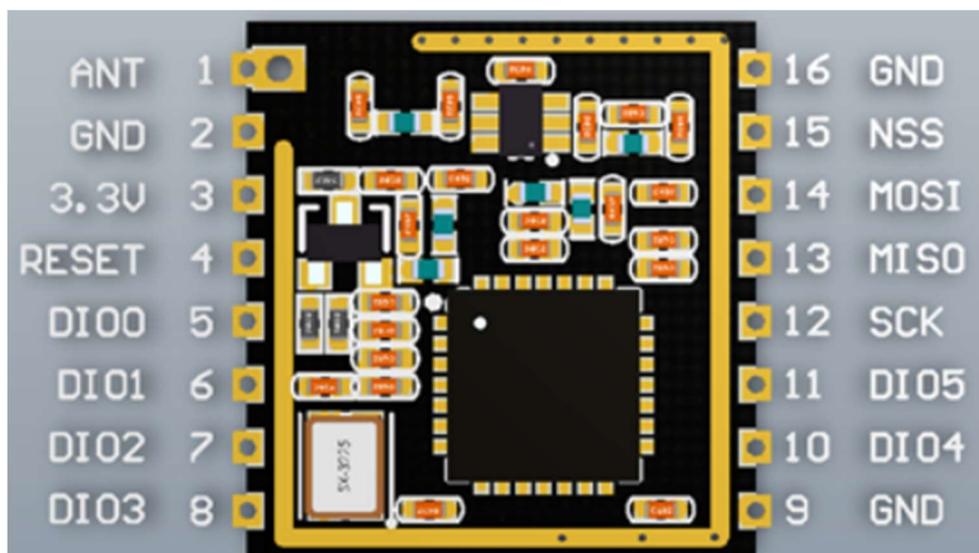


Рисунок 3.2 – Розпіновка модуля LoRa із чипом SX1276

Таблиця 3.2 – призначення портів обраного модуля LoRa

№	Назва	Призначення
1	ANT	Антенний вивід
2	GND	Земля
3	3.3V	Живлення 3.3 В (VDD)
4	RESET	Скидання
5	DIO0	Програмована цифрова лінія 0
6	DIO1	Програмована цифрова лінія 1
7	DIO2	Програмована цифрова лінія 2
8	DIO3	Програмована цифрова лінія 3
9	GND	Земля
10	DIO4	Програмована цифрова лінія 4
11	DIO5	Програмована цифрова лінія 5
12	SCK	Вхід такту SPI
13	MISO	Вихід даних SPI
14	MOSI	Вхід даних SPI
15	NSS	Вибір SPI
16	GND	Земля

3.4 Підбір мікроконтролера для обробки інформації

ESP32 — це універсальний та потужний мікроконтролер, який революціонізував світ Інтернету речей (IoT) завдяки своїм розширеним комунікаційним можливостям та широкому спектру інтегрованих функцій.

Однією з особливостей, яка робить ESP32 таким популярним серед любителів, виробників та інженерів, є його здатність підтримувати численні протоколи зв'язку. Ці протоколи дозволяють ESP32 взаємодіяти з різноманітними пристроями та датчиками, що робить його ідеальним вибором для широкого кола проєктів, від простих систем моніторингу до складних систем автоматизації.

Завдяки низьким витратам на розробку виробництва та високоефективному процесору, ви можете використовувати ESP32 у різних проєктах Інтернету речей та контролерів. Деякі ключові особливості мікроконтролера ESP32 включають Wi-Fi, Bluetooth та малий форм-фактор.

Мікроконтролер ESP32 оснащений можливістю динамічного видалення зовнішніх інтерфейсів схем. Ця функція забезпечує його надійну роботу навіть у промислових умовах. Робочий діапазон температур ESP32 становить від -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Мікроконтролер може живитися від напруги живлення $+3,3\text{ В}$, що дозволяє розробляти бездротові програми дистанційного зондування та контролерів.

Мікроконтролер був розроблений для портативних пристроїв, носимої електроніки, інтелектуальних контролерів та програм Інтернету речей. Використовуючи різноманітні власні програмні пакети, мікроконтролер досягає наднизького енергоспоживання. Крім того, має різні режими живлення, динамічне масштабування потужності та функції керування тактовою частотою.

Високий рівень інтеграції SoC дозволяє включати різні електронні схеми до ESP32. Високорівнева інтеграція SoC включає наступні вбудовані електронні схеми:

- Вбудовані антенні перемикачі
- Підсилювач потужності
- Малошумний підсилювач приймача
- Модулі керування живленням

Мікроконтролер ESP32 містить 39 програмованих GPIO-выводів, кожен з яких може виконувати кілька альтернативних функцій. Більшість ліній підтримують цифровий ввід/вивід, апаратні інтерфейси та режими з низьким енергоспоживанням.[18]

Основні групи виводів:

- GPIO0–GPIO5 – універсальні цифрові порти з підтримкою переривань, PWM-модуляції, функцій керування периферією. Частина виводів має обмеження на використання як вихід (наприклад, GPIO34–GPIO39 – лише вхід).
- ADC1 та ADC2 – аналогові входи розділені на два перетворювачі; доступні на вибраних GPIO. Канали ADC2 недоступні при активному Wi-Fi через спільне використання апаратних ресурсів.
- DAC1, DAC2 – два 8-бітні ЦАП, інтегровані на GPIO25 та GPIO26.
- Інтерфейси зв'язку:
 - UART0/1/2 – апаратні послідовні порти з переназначенням на будь-які GPIO.
 - SPI – до трьох інтерфейсів, включаючи HSPI та VSPI, з перенесенням ліній SCK/MOSI/MISO/CS.
 - I²C – два контролери, SDA та SCL можуть бути призначені на будь-які вільні GPIO.
 - I²S – підтримка аудіоінтерфейсу на вибраних виводах.
- Живлення та службові лінії:
 - 3V3 – основна шина живлення.
 - EN – вхід увімкнення; низький рівень переводить мікросхему у режим глибокого сну.
 - VP/VN (GPIO36/39) – канали аналогового диференційного входу.
 - SENSOR_VP, SENSOR_VN – входи сенсорного модуля.
 - GPIO0, GPIO2, GPIO15 – завантажувальні виводи, що визначають режим старту (звичайний запуск або завантаження прошивки).

Деякі виводи мають обмеження при старті та повинні залишатися у визначених станах (наприклад, GPIO0 для режиму flash-завантаження). Виводи, підключені до внутрішньої Flash-пам'яті (GPIO6–GPIO11), не рекомендується використовувати у зовнішніх схемах.

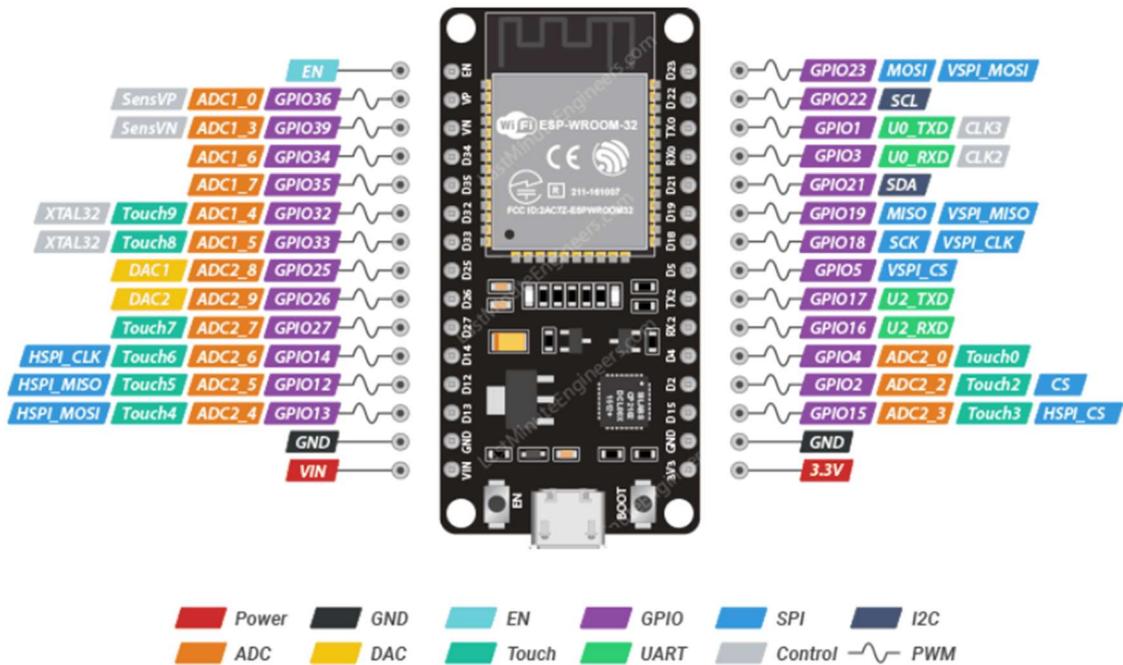


Рисунок 3.3 – Розпіновка мікроконтролера ESP32

3.5 Архітектура мережі з використанням LoRa

Для реалізації сенсорної мережі було використано два типи бездротових мереж на основі технології Wi-Fi. Топологія спроектованої мережі показана на рисунку 3.4, де окремі сенсорні вузли зв'язуються з головним центральним вузлом за допомогою протоколу ESP-NOW. Пристрої Інтернету речей здебільшого працюють від батарейок, і їх необхідно проектувати таким чином, щоб вони споживали мінімальну енергію. У випадку технології Bluetooth було розроблено протокол Bluetooth з низьким енергоспоживанням (BLE) для пристрою з низьким енергоспоживанням. Ці протоколи працюють на фізичному рівні 802.11b/g/n, але зменшують верхні п'ять рівнів до одного рівня

та вимагають меншого обслуговування. Це зменшує споживання енергії та збільшує дальність дії й надійність з'єднання між вузлами.

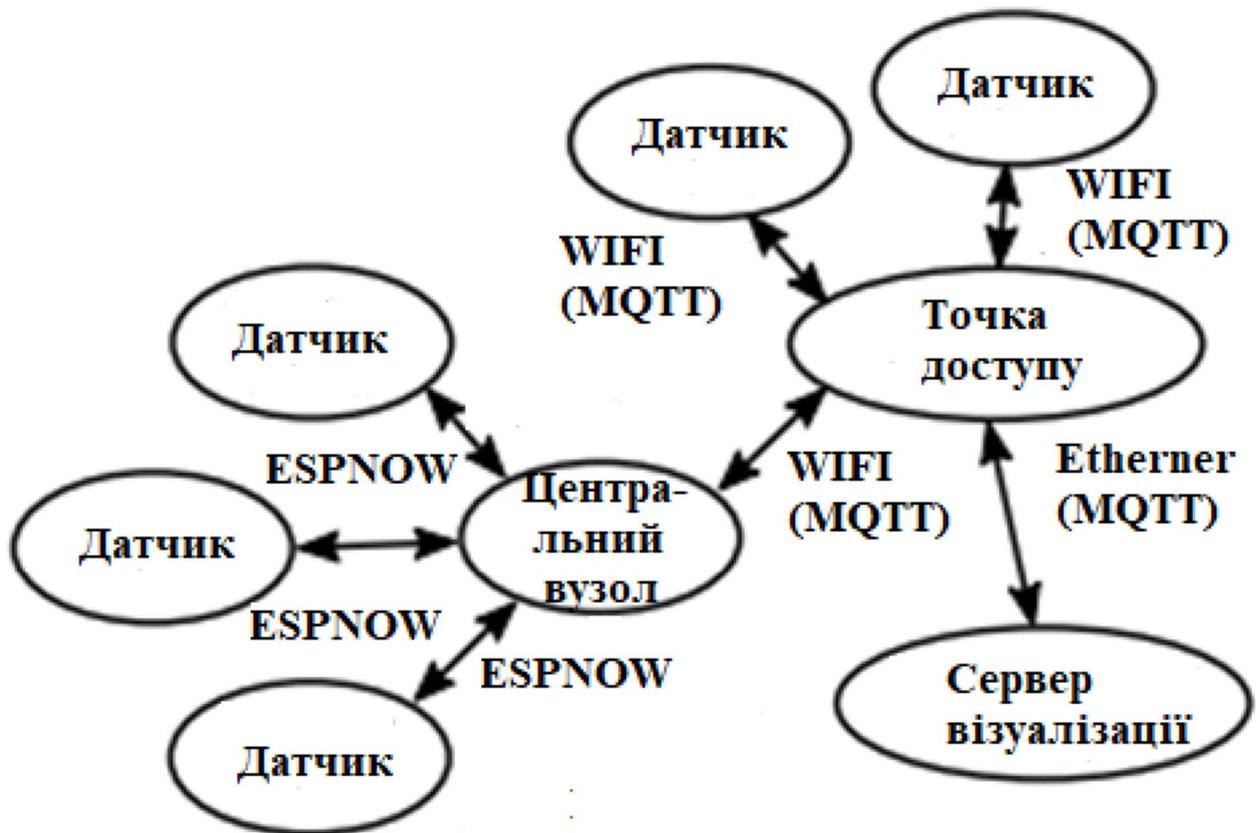


Рисунок 3.4 – Використовувана топологія мережі що будується

Недоліком мережі на основі ESP-NOW є необхідність центрального ретрансляційного вузла, який підключається за допомогою стандартного Wi-Fi та пересилає дані через точку доступу. Крім того, в мережі реалізовано сенсорні вузли, що працюють зі стандартним Wi-Fi з'єднанням.[19]

Ці сенсорні вузли надсилають виміряні дані безпосередньо на сервер через локальну мережу Wi-Fi. Виміряні дані надсилаються на сервер візуалізації через протокол Message Queuing Telemetry Transport (MQTT).

Протокол MQTT — це спеціалізований протокол, розроблений безпосередньо для середовища Інтернету речей. Він складається з клієнта MQTT, який є вузлом, та брокера MQTT, встановленого на сервері візуалізації.

MQTT — це простий протокол обміну повідомленнями «публікація-підписка». Виміряні дані надсилаються на сервер моніторингу та візуалізації, який використовує вільно доступний сервіс Home Assistant. Цей сервіс інтегрує різні плагіни, такі як брокер MQTT для отримання та надсилання даних, багато баз даних для зберігання даних, інструменти візуалізації для графічного відображення даних та багато інших. Також можливо встановити багато додатків та сервісів для Інтернету речей, домашньої автоматизації та розумних пристроїв від різних постачальників. Розроблена бездротова сенсорна мережа у вигляді реалізації всіх її функціональних частин на локальних пристроях, де користувач має повний контроль над мережею та її конфігурацією, таким чином не потрібні зовнішні сторонні рішення та хмарні ресурси.

Під час початкового запуску мережі нам потрібно запустити та налаштувати сервер Home Assistant. Необхідно встановити брокерський зв'язок MQTT та базу даних для зберігання даних. Усі сенсорні вузли та центральні вузли мають реалізовані інтерфейси для початкового налаштування. Спрощена блок-схема процедури налаштування показана на рисунку 3.5. Усі вузли виконують один і той самий алгоритм: під час запуску вузол перевіряє кількість примусових перезавантажень. Якщо користувач тричі натисне кнопку скидання, конфігурація, що зберігається в енергонезалежній пам'яті (NVS), буде стерта.[20]

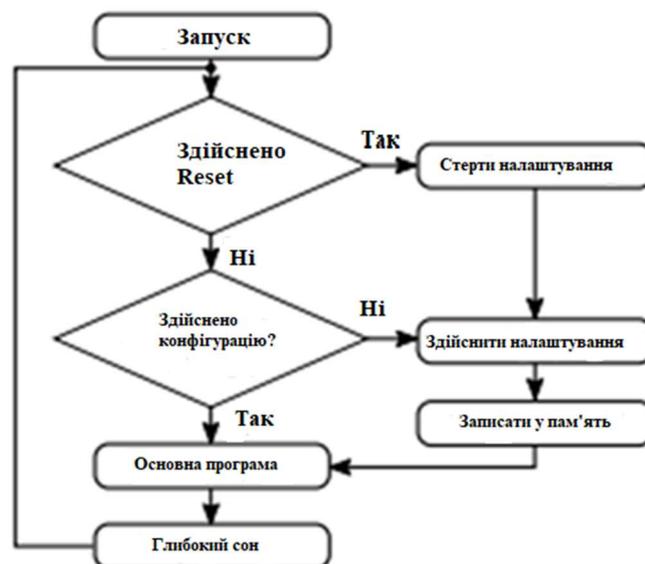


Рисунок 3.5 – Алгоритм ініціалізації, підключення та конфігурації

3.6 Розроблення блок схеми процесу передачі

Як згадувалось раніше згенерований кадр складається з трьох частин: преамбули, заголовка та корисного навантаження. Корисне навантаження та заголовок кодується для захисту інформації, яку вони містять, тоді як преамбула – ні.

Преамбула являє собою доповнені символи, які не відповідають жодній інформації, але використовуються для синхронізації. Зауважмо, що синхронізація між передавачем і приймачем необхідна для точного дечирпування та демодуляції сигналу.

Корисне навантаження – це місце, де кодується повідомлення, і може мати довжину до 255 байт. Після корисного навантаження виконується циклічна перевірка надлишковості висхідного каналу, яка доступна лише у кадрі висхідного каналу та має довжину до 2 байтів.

Заголовок використовується для включення інформації про довжину корисного навантаження в байтах N_b , швидкість кодування корисного навантаження, існує перевірка циклічної надмірності корисного навантаження, та перевірка циклічної надмірності заголовка. Заголовок завжди має довжину 3 байти та існує, коли передача відбувається в явному режимі. Загальна кількість символів, закодованих у заголовку та корисному навантаженні разом, залежить від швидкості кодування, прапора циклічної перевірки, прапора неявного заголовка та керування оптимізацією, де CR – параметр швидкості кодування корисного навантаження LoRa, CRC – прапорець циклічного коду швидкості; і дорівнює 1, коли використовується циклічний код, тоді як 0, якщо ні. $H = \{0, 1\}$ – прапорець неявного заголовка, де він дорівнює 0, коли заголовок включено в кадр, і 1, коли його немає. Нарешті, $OP = \{0, 1\}$ – прапорець режиму оптимізації, де він дорівнює 1, коли адаптивна швидкість активна, і 0, коли вона вимкнена. Заголовок і корисне навантаження кодуються перед модуляцією.

Процес кодування виконується в такі чотири основні кроки:

1) Кодування Хеммінга: LoRa використовує код Хеммінга $4/(4+CR)$, де довжина слова даних дорівнює 4 і перетворюється в довжину кодового слова $4 + CR$. Швидкість кодування в LoRa, таким чином, обмежена $CR = \{1,2,3,4\}$, де довжина кодового слова 5 та 6 включає один біт для виявлення лише помилок, тоді як довжина кодового слова 7 або 8 включає один біт для виявлення помилок та ще один біт для виправлення помилок. Корисне навантаження може бути закодовано за допомогою будь-якої з вищезгаданих комбінацій кодів Хеммінга, тоді як заголовок завжди кодується за допомогою коду Хеммінга. Це забезпечує як виявлення помилок, так і виправлення заголовка, який містить важливу інформацію про корисне навантаження. Більше того, фіксована швидкість кодування гарантує, що приймач завжди може декодувати заголовок без необхідності попередньої інформації про його швидкість кодування. Після декодування заголовка параметр швидкості кодування корисного навантаження (CR) витягується з другого байта заголовка.

2) Коригування: LoRa використовує коригування для зменшення кореляції надлишкових бітів, доданих кодером каналу. Відбілювання в LoRa досягається шляхом додавання відомої послідовності лише до корисного навантаження, а послідовність залежить від параметра корисного навантаження CR. Скремблювання не застосовується до заголовка.

3) Перемежування: LoRa реалізує перемежувач $(k \times r)$, який накладає транспозицію та зсув розрядів на символи. Це означає, що кожні k кодових слів транспонуються, а їхні розряди зсуваються вліво на $r \bmod SF$ розрядів, де r – номер рядка. Заголовок перемежується на $(SF - 2 \times 8)$, а корисне навантаження – на $(SF \times 4 + CR)$.

4) Посилення: LoRa реалізує кодування сірого на перемежованих символах для зменшення помилок суміжних бітів.[21]

Блок-схема Tx та Rx показана на рис. 3.6.

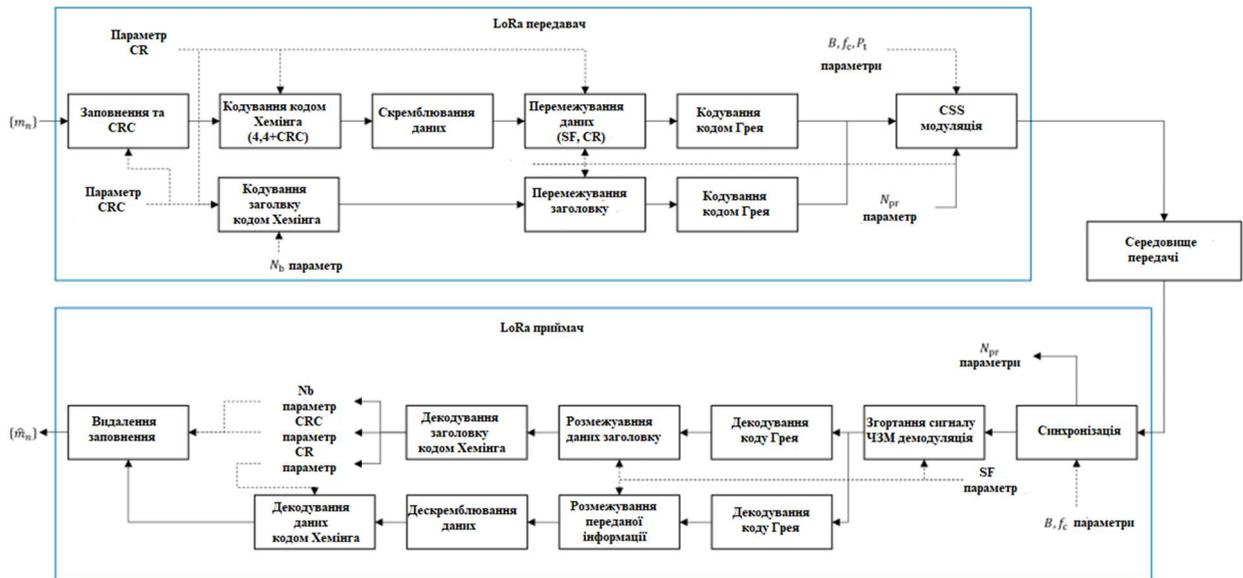


Рисунок 3.6 – Блок схема кодування та модуляції модуля LoRa для приймача та передавача

3.7 Побудова структурної схеми

На рисунку 3.7 подано електричну принципову схему передавального вузла, у якій відображено основні елементи та їхні з'єднання. Схема показує взаємне підключення мікроконтролера, радіомодуля та допоміжних компонентів, необхідних для коректної роботи пристрою. Вона дозволяє наочно представити структуру апаратної частини та зрозуміти, які компоненти формують основу кожного з вузлів.

У передавальній частині схеми відображено підключення датчика до відповідного перетворювача, а також його з'єднання з мікроконтролером. Окремо показано комунікаційні лінії між ESP32 та LoRa-модулем, що забезпечують взаємодію між ними на рівні апаратних сигналів. Також на рисунку наведені елементи живлення та загальні з'єднання, необхідні для стабільної роботи схеми.

Приймальна сторона будується за аналогічним принципом, однак без підключення вимірювального модуля. На схемі відображено лише

мікроконтролер, радіомодуль та необхідні лінії живлення й з'єднання, що забезпечують прийом сигналу.

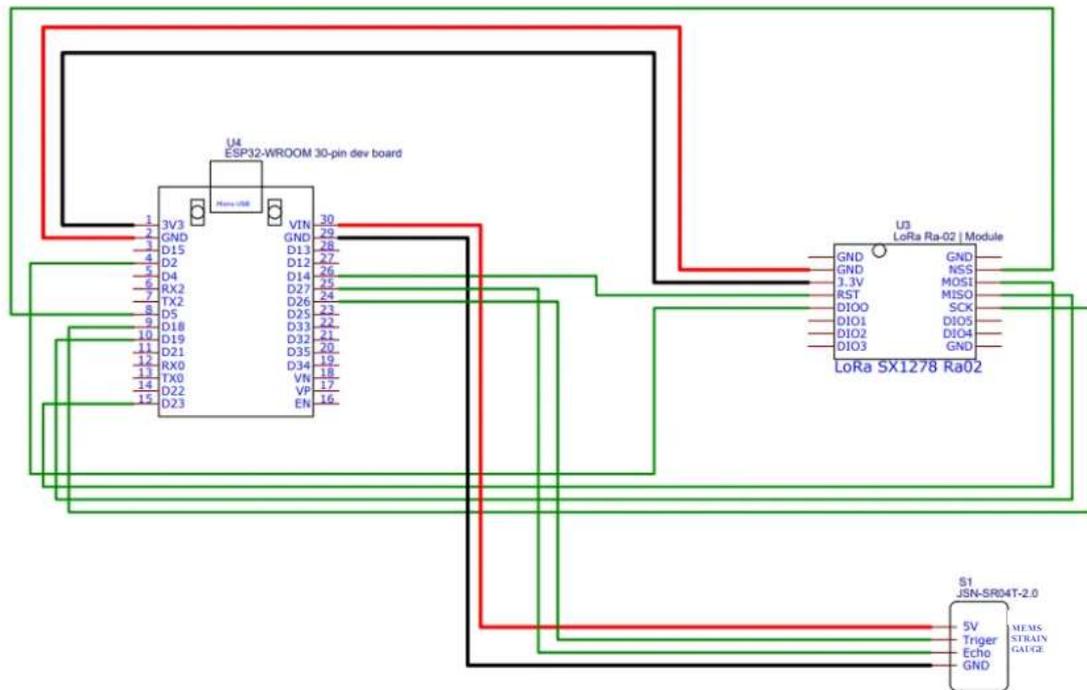


Рисунок 3.7 – Принципова схема підключення елементів схеми між собою

3.8 Програмне забезпечення передавача

На початку програми необхідно підключити усі бібліотеки та вказати змінні та призначення портів . Після чого починаються два основних цикли `setup()` та `loop()` які призначення для початкового налаштування та подальшої роботи передавача.

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

У `setup()` запускається серійний порт на швидкості 115200 бод з метою відлагодження. Після цього код чекає на готовність Serial, а потім виводить повідомлення у monitor про запуск LoRa-приймача. Наступним кроком

запускається LoRa модуль на частоті 915 МГц. Якщо модуль не стартує, виводиться помилка в Serial і мікроконтролер зависає у нескінченному циклі while(1).

```
void setup()
{
  Serial.begin(115200);

  while (!Serial);

  Serial.println("LoRa Receiver By : ");

  if (!LoRa.begin(915E6)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
    while (1);
  }
}
```

У loop() програма постійно перевіряє, чи прийнято LoRa-пакет. Для цього створюється строкова змінна packet, а packetSize отримує число байтів у пакеті через LoRa.parsePacket(). Якщо пакет є, то на Serial виводиться маркер «Received packet : ». Далі цикл while (LoRa.available()) читає весь пакет як текстовий рядок і заносить у змінну packet.

```
void loop() {

  String packet = "";

  int packetSize = LoRa.parsePacket();
  if (packetSize) {

    Serial.print("Received packet :-- ");

    while (LoRa.available()) {

      packet = LoRa.readString();

    }

  }
}
```

LoRa.parsePacket(), яка повертає розмір пакета – якщо він дорівнює нулю, це означає, що даних у ефірі немає, і програма переходить до наступної ітерації циклу. Якщо ж пакета є (тобто значення більше нуля), тоді пристрій переходить до читання прийнятого повідомлення.

У цей момент виконується зчитування всього пакета за допомогою LoRa.readString(). Ця команда одразу повертає текст, який був переданий

іншою LoRa-станцією. Отриманий рядок дублюється у монітор порта, щоб користувач міг бачити, що саме прийшло по радіоканалу.

Після цього програма намагається розділити отримані дані на частини. Вона шукає перший символ `;`, який використовується як роздільник між значеннями у пакеті (наприклад, "123.4;56.7"). Якщо символа-роздільника немає, програма вважає пакет некоректним і завершує обробку цього повідомлення.

У разі коректного формату програма виділяє значення, яке знаходиться перед першим `;` — це і є числовий параметр, що відповідає даним зі стретч-датчика (strain). Після цього значення виводиться у серійний монітор.

```
String strainValue = packet.substring(0, delimiter);

Serial.print("Strain: ");
Serial.println(strainValue);
```

3.9 Програмне забезпечення приймача

На початку підключаються бібліотеки SPI, LoRa та Adafruit_BMP280, після чого створюється об'єкт BMP280. Оголошуються глобальні змінні: `pin` для strain-датчика, `pin` для LDR, лічильник пакетів, службові змінні для випадкових чисел і буферні значення.

```
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>

#define STRAIN1PIN 7
Adafruit_BMP280 bmp;

float strain1;
int ldr = 4;
int counter = 0;
int Dummyvalue;
long randomNumber;
```

У функції `setup()` ініціалізується серійний порт, запускається генератор випадкових чисел на основі аналогового шуму, після цього виконується перевірка роботи BMP280. Якщо сенсор не знайдено, програма зупиняється.

```
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  randomSeed(analogRead(0));

  if (!bmp.begin()) {
    Serial.println(F("Could not find a valid strain gauge sensor, check wiring!"));
    while (1);
  }

  pinMode(ldr, OUTPUT);
  while (!Serial);
}
```

Після цього код чекає, поки `Serial` стане доступним, виводить назву станції та намагається запустити LoRa на частоті 915 МГц. Якщо LoRa успішно ініціалізовано, надсилається відповідне повідомлення у `Serial Monitor`.

У циклі `loop()` кожна передача пакета починається з виведення номера пакета. Створюється нове випадкове число, яке, судячи з коментаря, використовується для того, щоб уникнути втрат першого символу під час LoRa-передачі.

```
void loop()
{
  Serial.println();
  Serial.print("Sending packet: ");
  Serial.println(counter);
  randomNumber = random(1000);

  int randomNumber = random(100); Dummyvalue = randomNumber;
  double ldrvalue = analogRead(ldr);
  float s = readstrain();
```

Формування переданого пакета виконується через `beginPacket()`, далі виконується `LoRa.print(Datastring)`, але потім чомусь додається ще й

LoRa.print(counter), тобто пакет міститиме дві частини одна за одною без розділювачів. Після endPacket() лічильник пакетів збільшується, і програма робить паузу 3 секунди, після чого цикл повторюється.

```
String Datastring = String(Dummyvalue) + (";") + String(strian) + (";")

Serial.println(Datastring);
LoRa.beginPacket();
LoRa.print(Datastring);
LoRa.print(counter);
LoRa.endPacket();
counter++;

delay(3000);
}
```

3.10 Висновки до розділу

У розділі продемонстровано що модулі LoRa у парі із мікроконтролером ESP32 є ефективним рішенням для побудови сенсорних мереж для інтернет речей і дозволяє передавати дані на відстані до 20 кілометрів із низькими споживанням та високою стійкістю до перешкод.

Архітектура на мережі на базі LoRa передбачає використання кінцевих пристроїв із своїми модулями та використання мережевого серверу та серверу застосунків щоб забезпечити двонапрєвлену передачу даних.

Програмне забезпечення передбачає синхронізація та обрку сигналів, корекцію помилок, кодування та перевірку сигналу для забезпечення точної передачі даних. Розроблена топологія із використанням протоколів ESP-NOW та MQTT дозволяє дистанційно збирати, обробляти та візуалізувати дані забезпечуючи повних контроль над мережею.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ

4.1 Вибір програми для моделювання

Моделювання буде здійснюватися у двох програмах LTspice та Proteus 8.13. LTspice – це універсальний симулятор аналогових електронних схем з відкритим кодом 1973 року, який використовується в проектуванні інтегральних схем та плат. Його функція полягає в перевірці цілісності схем та прогнозуванні їхньої поведінки перед тим, як конструкцію можна буде виготовити.

Ця програма була популярною, оскільки була достатньо надійною та швидкою для практичного використання. З того часу з'явилися різні наступники та розробки її розробки. Одним із них є LTspice, який додав покращення до функцій SPICE. До них належать функції для легкого моделювання можливостей швидкого перемикання регуляторів та можливість відображення форм сигналів для більшості імпульсних регуляторів. Він також постачається з великою бібліотекою макромоделей та пасивних компонентів, що охоплює більшість іншого програмного забезпечення розробника для керування живленням та сигнальних ланцюгів. Він може забезпечувати схематичні зображення та навіть дозволяє налаштовувати кожен компонент окремо.

Одна з найкращих переваг цієї програми полягає в тому, що вона безкоштовна, але не має штучних обмежень щодо своїх можливостей. Вона також чудово підходить як навчальний інструмент завдяки своїй обширній документації, тому початківці можуть легко спробувати її використовувати. Однак її інтерфейс дуже нудний через застарілий вигляд. Розташування функцій досить просте, але виглядає не так гладко, як можна було б очікувати від симулятора схеми.[22]

Proteus — це комплексний інструмент, розроблений для інженерів, студентів та фахівців з електронного проектування. Це програмне забезпечення

поєднує в собі розширене моделювання та проектування схем в одній інтуїтивно зрозумілій платформі, що дозволяє створювати, аналізувати та вдосконалювати електронні проекти з високою точністю та ефективністю. Від базових систем до складних вбудованих конструкцій, Proteus пропонує всі інструменти, необхідні для втілення ваших ідей від концепції до реальності в надійному та доступному середовищі.

Можливості моделювання Proteus є частиною ключових функцій програмного забезпечення. Програма може емулювати поведінку електронних схем у режимі реального часу, що безцінно, коли справа доходить до виявлення помилок та внесення коректив перед створенням фізичного прототипу. Інструмент підтримує як аналогові, так і цифрові компоненти, а також інтегрує різні мікроконтролери, такі як PIC, AVR, ARM та Arduino, що полегшує проектування та налагодження вбудованих проектів. Бібліотека компонентів є великою та налаштованою, що гарантує, що елементи, необхідні для ваших проектів, завжди будуть під рукою. [23]

4.2 Моделювання Мосту Уінстона із одним тензоментричним датчиком

Моделювання відбудуватиметься у програмі LTspice та складатиметься із двох ключових частин схеми: мосту Уінстона та диференціального підсилювача. Зібрана схема зображено на рисунку 4.1. [24]

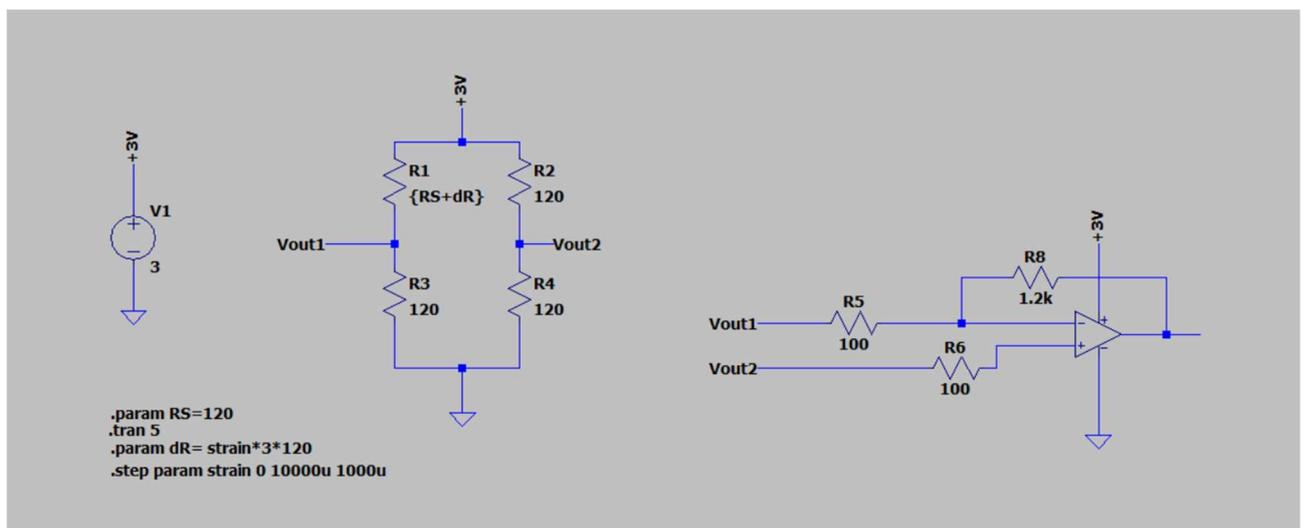


Рисунок 4.1 – схема мосту Уінстона із диференціальним підсилювачем

На рисунку 4.1 зібрано 3 основних блоки. Джерело живлення 3В так як планується використання перетворювача від батарейки форматом 18650 із номінальною напругою від 3 до 3.7 В.

Мосту Уїнстона який складається із 4 резисторів – R2-R4 із яких мають стабільний опір у 120, а R1 може змінювати свій опір під впливом механічного навантаження. Програмне середовище дозволяє імітувати зміну опору шляхом введення команд. В даному випадку до опору 120 Ом додається змінна dR яка обраховується множенням величини згинання (зміна strain яка змінюється від 0 до 10000и деформації із кроком 1000и); множника 3 який позначає коефіцієнт згинання та який можна знайти документації на датчик; множник опору резистору. Також програма симуляції дозволяє задавати допуск резисторів, тому всі резистори додатково мають 1% відхилення від номінальних параметрів. У точці з'єднання R1 R3 та R2 R4 розміщені контакти для вимірювання V_{out1} та V_{out2} відповідно.

Диференціального підсилювача який призначений для підсилення сигналу що знімається на вивідних клема мосту Уїнстона та підсилює його у 6 разів. Побудований на основі операційного підсилювача ОРА134. Співвідношення підсилення задається відношенням резисторів $R8/R5$, при умові що $R5=R6$.

Результати вимірювання зображені на рисунку 4.2 та 4.3. Кожна лінія має різний колір та позначає різний опір у тензодатчику. У таблиці 4.1 порівняно зміну деформації та вихідну напругу у двох точках виміру.

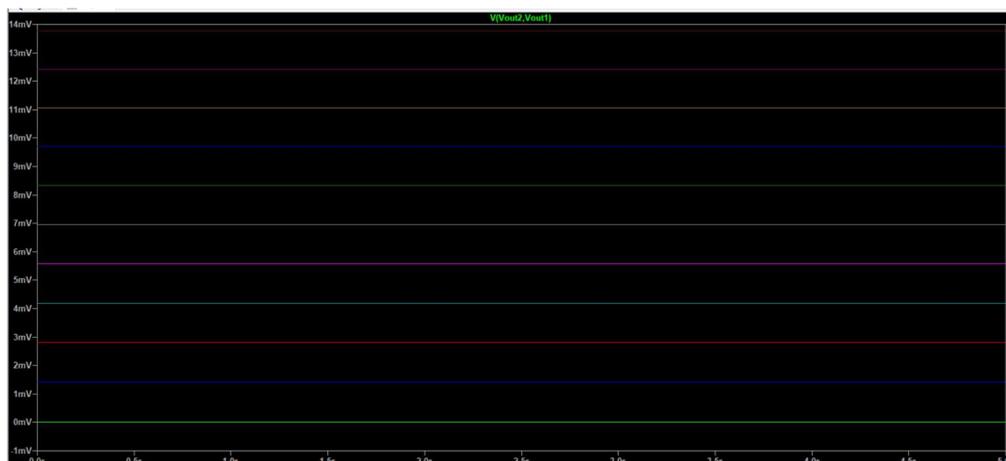


Рисунок 4.2 – Вихідна напруга на контактах вимірювання V_{out1} та V_{out2}

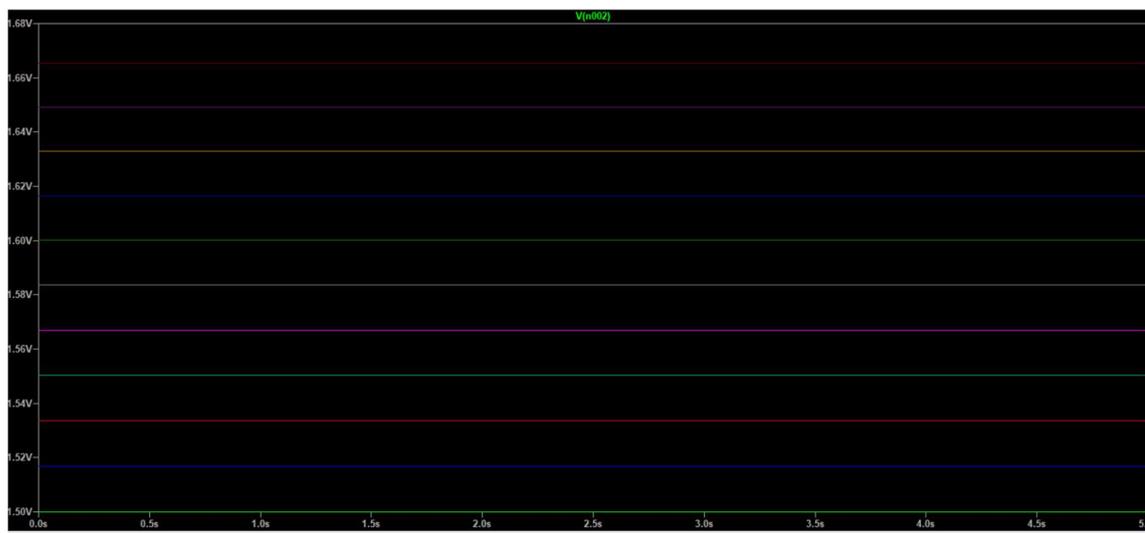


Рисунок 4.3 – Вихідна напруга підсилювача

Отримані зображення демонструють характер зміни напруги при деформації тензOMETричного елемента але не дозволяють візуально легко оцінити вплив прикладеного навантаження. Тому результати, зняті під час моделювання та вимірювань, були опрацьовані та подані у таблиці 4.1. Також для наочності дані переведені у графіки що зображені на рисунка 4.4 та 4.5 відповідно.

Таблиця 4.1 – співвідношення величини деформації до вихідних напруг

Величина мікродеформації	Напруга мосту Уінстона, мВ	Напруга підсилювача, В
0	0	1,5
1000μ	1,4	1,516
2000μ	2,8	1,53
3000μ	4,2	1,55
4000μ	5,6	1,56
5000μ	7	1,58
6000μ	8,4	1,6
7000μ	9,7	1,61
8000μ	11	1,63
9000μ	12,4	1,65
10000μ	13,8	1,66

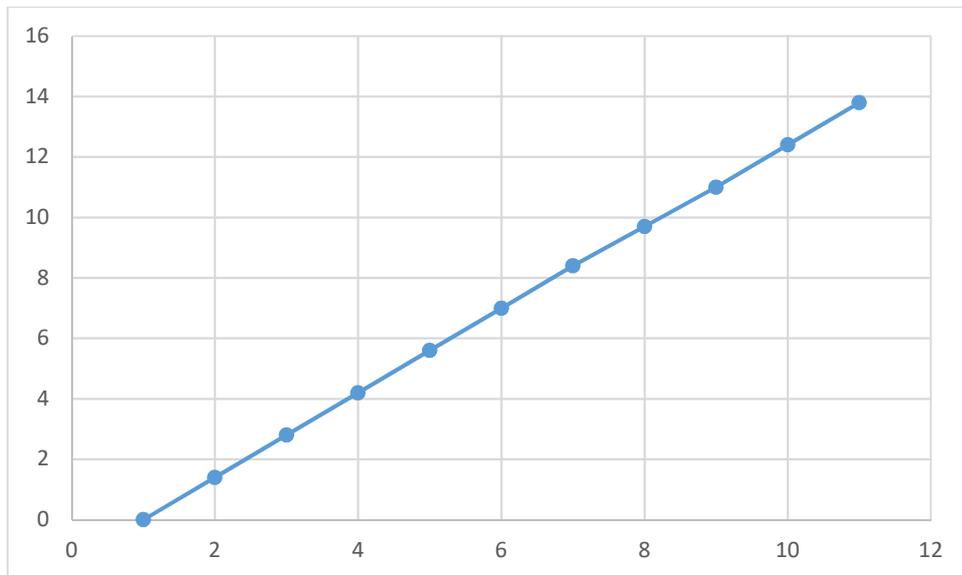


Рисунок 4.4 –Відношення напруги на мості до величини деформації

Характер на рисунку 4.4 кривої є практично лінійним у всьому досліджуваному діапазоні, що свідчить про стабільну реакцію мостової схеми на зміну опору тензорезистору. Зростання напруги відбувається пропорційно збільшенню деформації, що підтверджує коректність роботи моделі та адекватність обраних параметрів тензодатчика.

На рисунку 4.5 крива зберігає поступовий монотонний характер з легкими відхиленнями від ідеальної лінійності, що може бути зумовлено впливом температурних чи паразитних параметрів, а також похибками моделювання. Утім загальна тенденція відповідає очікуваній — вихідна напруга збільшується із зростанням деформації, підтверджуючи працездатність схеми та її чутливість до зміни мікродеформацій. Така плавність зростання свідчить про добру відтворюваність моделі та відсутність істотних стрибків або шумових впливів. Спостережені незначні відхилення від ідеальної прямої лінії можуть бути зумовлені особливостями обраного операційного підсилювача або впливом паразитних параметрів, що є типовим для подібних вимірювальних систем.

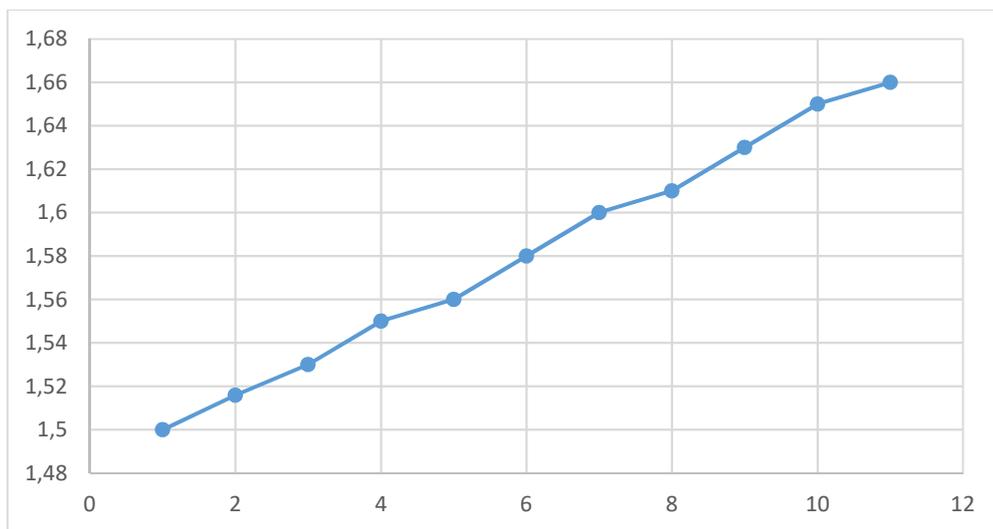


Рисунок 4.5 – Відношення вихідної напруги до величини деформації

4.3 Моделювання мосту Уінстона із чотирьох тензометричних датчиками

Для моделювання повного мосту було обрано пакет моделювання Proteus 8. Так як він має більше наочний спосіб представлення вихідної напруги при моделюванні 4 тензодатчиків. Хоч і не дозволяє одночасно змінювати параметри резисторів на необхідну величину. Зібрана схема у стані спокою представлена на рисунку 4.6. У таблиці 4.2 показані результати вимірювання при змінюванні декількох параметрів одночасно.

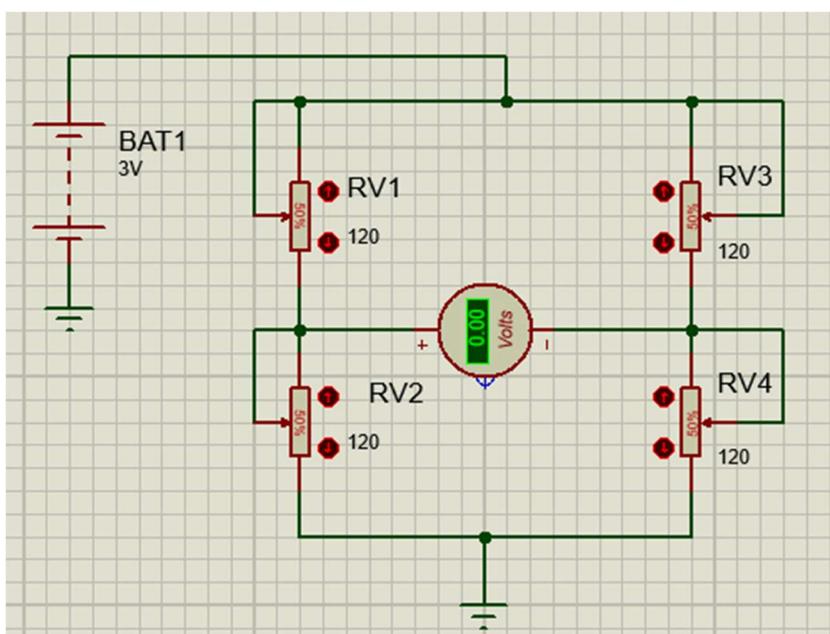


Рисунок 4.6 – Схема мосту Уінстона у стані спокою

Таблиця 4.2 – Результати вимірювання вимірювання моделювання мосту при зміні 4 резисторів

№ Вимірювання	Опір R1, Ом	Опір R2, Ом	Опір R3, Ом	Опір R4, Ом	Вихідна напруга, В
1	60	60	60	60	0
2	48	72	72	48	0
3	42	84	84	42	-0,05
4	30	90	78	36	-0,2
5	36	84	72	48	-0,3
6	12	96	96	12	-0,13
7	48	24	24	60	-0,43
8	102	96	96	24	1,11
9	120	6	18	120	0,39
10	72	90	12	120	-1,57
11	66	54	70	54	0,85
12	6	114	60	60	0,17
13	58	62	63	58	0,65
14	18	102	90	30	1,01
15	69	52	69	52	0,55

Коли співвідношення плеч моста порушується, з'являється вихідна напруга, величина та знак якої повністю залежать від того, яке плече "переважає". Якщо $R1/R2$ менше, ніж $R3/R4$, то середня точка лівого плеча виявляється нижче за потенціалом — тому вихідна напруга негативна. Якщо ж $R1/R2$ більше за $R3/R4$, вихід стає додатним.

Неочікуваними виглядають випадки із дуже сильними відмінностями номіналів, але з малого вихідного сигналу. Наприклад, у шостому вимірі опори 12 і 96 Ом у лівому плечі та 96 і 12 Ом у правому є майже дзеркальними. Хоч співвідношення не однакове, але міст поводить майже симетрично, тому вихідна напруга невелика. Це демонструє важливу властивість: не абсолютні значення опорів, а саме співвідношення визначає баланс або розбаланс моста.

Великі напруги, на рівні ± 1 В і більше, спостерігаються там, де співвідношення в плечах порушено одразу по двох напрямках, тобто одночасно змінені і верхній, і нижній опір одного з плеч. Це дає значний перекид і зміщує потенціал середньої точки.

Даний дослід чудово демонструє чутливість моста до невеликих змін опору і може бути використана у багатьох сферах для виявлення зміни механічного навантаження.

4.4 Висновки до розділу

Було здійснено моделювання мосту Уїнстона за допомогою двох програм моделювання LTspice та Proteus 8.13 які дозволили перевірити роботу схеми із використанням одного тензومتра та чотирьох.

У LTspice було змодельовано схему із одним тензометром та додатково схемою диференційного підсилювача на основі операційного підсилювача ОРА134 для підсилення вихідної напруги мосту. Вихідна напруга змінювалась лінійно відповідно до рівня деформації та не відхилялась від прогнозованих значень, що дозволяє використати після підсилювача аналогового-цифровий перетворювач для обробки даних мікроконтролером.

Моделювання ж повного мосту із чотирма тензодатчиками виконувалось у Proteus так як там більше легко можна слідкувати за одночасною зміною декількох параметрів, проте займає більше часу. Невеликі напруги виникали при симетричному навантаженню на тензодатчик які викликали однакове співвідношення опорів на обох плечах системи. Великі значення напруги при непропорційному одночасному тиску що викликало різне навантаження на різних датчик.

Результати демонструють високу чутливість моста до малих змін опору і підтверджують можливість його використання для вимірювання механічних деформацій.

5 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 «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач» 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.

5.1 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 «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач» 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. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
1	2	3	4	5
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	58	60	59
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0

Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4	5
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
Середнє значення балів експертів		59,0		

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

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПБ, посада)		
	1	2	3
1	2	3	4
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	75	75	75
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0

Продовження таблиці 5.2

1	2	3	4
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
Середнє значення балів експертів	75,0		

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

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [25]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (5.1)$$

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 59,0, k_{\text{теор}} = 75,0$ балів; $0,6$ та $0,4$ – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 59,0 + 0,4 \cdot 75,00 = 65,40 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – 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 «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач», даний рівень становить 65,40 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.2.1 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 [25]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

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

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

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

$$Z_o = 19350,00 \cdot 11 / 22 = 8500,03 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, (грн.)	Оплата за робочий день, (грн.)	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, (грн.)
Керівник науково-дослідної роботи	19350,00	772,73	11	8500,03
Старший науковий співробітник	18500,00	750,00	22	16500,00
Консультант (інженер-метролог вищої категорії)	15300,00	681,82	6	4090,92
Інженер-дослідник (розробник мікроелектронної апаратури)	15300,00	695,45	11	7650,00
Технік I-ї категорії	8750,00	397,73	22	8750,00
Всього				45490,95

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

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

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

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

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{zm}}, \quad (5.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=8000,00$ (грн.);

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [25];

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

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

t_{zm} – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,35 \cdot 1,15 / (22 \cdot 8) = 70,57 \text{ (грн.)}$$

$$З_{pl} = 70,57 \cdot 8,00 = 564,55 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, (грн.)	Величина оплати на робітника (грн.)
1	2	3	4	5	6
Монтаж-демонтаж дослідницької апаратури	8,00	3	1,35	70,57	564,55
Підготовка робочого місця розробника для проведення розробки і дослідження	7,50	2	1,10	57,50	431,25

Продовження таблиці 5.5

1	2	3	4	5	6
Підготовка компонентів мікроелектронного пристрою	4,30	4	1,50	78,41	337,16
Монтаж компонентів мікроелектронного пристрою	8,00	4	1,50	78,41	627,27
Налагодження мікроелектронного блоку	3,00	5	1,70	88,86	266,59
Формування бази даних розробки і дослідження	11,00	3	1,35	70,57	776,25
Налагодження програмних засобів проектування	2,50	5	1,70	88,86	222,16
Монтаж обладнання виведення результатів дослідження	1,35	3	1,35	70,57	95,27
Контроль протікання цифрового експерименту	6,50	4	1,50	78,41	509,66
Всього					3830,15

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $H_{\text{дод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 12%.

$$Z_{\text{дод}} = (45490,95 + 3830,15) \cdot 12 / 100\% = 5918,53 \text{ (грн.)}$$

5.2.2 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:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{одд}}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (5.6)$$

де H_{zn} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (45490,95 + 3830,15 + 5918,53) \cdot 22 / 100\% = 12152,72(\text{ грн.}).$$

5.2.3 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 «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач».

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

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

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\epsilon j}, \quad (5.7)$$

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.

$$M_1 = 2,000 \cdot 189,00 \cdot 1,05 - 0 \cdot 0 = 396,90 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, (грн.)	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, (грн.)
Офісний папір CARBONIX Ultra	189,00	2,000	0	0	396,90
Папір для записів CARBONIX Light A5	65,00	4,000	0	0	273,00
Органайзер офісний CARBONIX OFFICE	175,00	4,000	0	0	735,00
Канцелярське приладдя (набір офісного працівника)	205,00	4,000	0	0	861,00
Картридж для принтера Canon LBP6000	1650,00	2,000	0	0	3465,00
Диск оптичний NewVybir CD-R	28,00	4,000	0	0	117,60
Flesh-пам'ять Kingston 32 GB	199,00	1,000	0	0	208,95
Тека для паперів CARBONIX BOX-ZX	115,00	4,000	0	0	483,00
Всього					6540,45

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

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

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

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

$$K_e = 2 \cdot 25,50 \cdot 1,05 = 53,55 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, (грн.)	Сума, (грн.)
Транзистори	2	25,50	53,55
Резистори	1	7,40	7,77
Конденсатори безкорпусні	2	15,00	31,50
Всього			92,82

5.2.5 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:

$$B_{\text{снец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{нр.і}} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

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

$C_{np.i}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

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

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{спец} = 9850,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 10342,50 \text{ (грн.)}.$$

Отримані результати зведемо до таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, (грн.)	Вартість, (грн.)
Осцилограф СІ-93	1	9850,00	10342,50
Мультиметр В7-35	1	7300,00	7665,00
Частотомір ЧЗ-34	1	9520,00	9996,00
Всього			28003,50

5.2.6 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:

$$B_{прог} = \sum_{i=1}^k C_{инрг} \cdot C_{прог.i} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де $C_{инрг}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, (грн.);

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

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

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$V_{прз} = 410,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 430,50 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, (грн.)	Вартість, (грн.)
Доступ до мережі Internet (високошвидкісний) грн/місяць	1	410,00	430,50
Система імітаційного комп'ютерного моделювання SIMULINK програмного середовища MATLAB	1	5600,00	5880,00
Система керування реляційними базами даних MySQL	1	9500,00	9975,00
Всього			16285,50

5.2.7 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:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{\delta}}{T_e} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.11)$$

де $Ц_{\delta}$ – 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;

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

$$A_{обл} = (42899,00 \cdot 1) / (3 \cdot 12) = 1191,64 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, (грн.).	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, (грн.).
1	2	3	4	5
Програмно-аналітичний комплекс проектування на базі ПК HP i7-JD3200-UA23	42899,00	3	1	1191,64
Обладнання виводу інформації Лазерний принтер HP LaserJet Pro M102w с Wi-Fi (G3Q35A)	7499,00	4	1	156,23
Робоче місце інженера-дослідника спеціалізоване	7700,00	5	1	128,33
Офісна оргтехніка	8990,00	5	1	149,83
Приміщення лабораторії досліджень	629000,00	25	1	2096,67
ОС Windows 11	8460,00	3	1	235,00
Пакет Microsoft Office 2019	7840,00	3	1	217,78

Продовження таблиці 5.10

1	2	3	4	5
Маршрутизатор Asus ZenWiFi AX Mini XD4 3PK White (90IG07M0- MO3C40)	9029,00	4	1	188,10
Прикладний паке Microsoft Office 2019	6600,00	3	1	183,33
ОС Windows 11	6950,00	3	1	193,06
Всього				4739,97

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

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 $C_e = 12,56$ (грн.);

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

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

$$B_e = 0,36 \cdot 160,0 \cdot 12,56 \cdot 0,95 / 0,97 = 723,46(\text{ грн.}).$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, (грн.)
Програмно-аналітичний комплекс проектування на базі ПК HP i7-JD3200-UA23	0,36	160,0	723,46
Обладнання виводу інформації Лазерний принтер HP LaserJet Pro M102w с Wi-Fi (G3Q35A)	0,25	4,0	12,56
Робоче місце інженера-дослідника спеціалізоване	0,07	160,0	140,67
Офісна оргтехніка	0,45	1,3	7,35
Маршрутизатор Asus ZenWiFi AX Mini XD4 3PK White (90IG07M0-MO3C40)	0,02	160,0	40,19
Осцилограф CI-93	0,08	50,0	50,24
Мультиметр В7-35	0,04	50,0	25,12
Частотомір ЧЗ-34	0,12	50,0	75,36
Всього			1074,95

5.2.9 Службові відрядження

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

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

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де H_{cb} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», приймемо $H_{cb} = 21\%$.

$$B_{cb} = (45490,95 + 3830,15) \cdot 21 / 100\% = 10357,43 \text{ (грн.)}$$

5.2.10 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:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», приймемо $H_{cn} = 30\%$.

$$B_{cn} = (45490,95 + 3830,15) \cdot 30 / 100\% = 14796,33 \text{ (грн.)}$$

5.2.11 Інші витрати

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

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

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (5.15)$$

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

$$I_6 = (45490,95 + 3830,15) \cdot 50 / 100\% = 24660,55 \text{ (грн.)}$$

5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

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

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

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (45490,95 + 3830,15) \cdot 100 / 100\% = 49321,10 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{од} + Z_n + M + K_v + B_{стат} + B_{прк} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{ст} + I_6 + B_{нзв}. \quad (5.17)$$

$$B_{заг} = 45490,95 + 3830,15 + 5918,53 + 12152,72 + 6540,45 + 92,82 + 28003,50 + 16285,50 + 4739,97 + 1074,95 + 10357,43 + 14796,33 + 24660,55 + 49321,10 = 223264,96 \text{ (грн.)}$$

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

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.18)$$

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

$$ZB = 223264,96 / 0,9 = 248072,18 \text{ (грн.)}$$

5.3 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 «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач» 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:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.19)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Приймемо $I = 3$;

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 $R = 3$;

B – вартість науково-дослідної роботи, (тис. грн.) Прийmemo $B = 248072,18$ (грн.);

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,08$ років, (1 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [25].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 3^3 \cdot 2 \cdot 3 / 248,1 \cdot 0,08 = 7,84.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач» складають 248072,18 (грн.). Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему

«Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач» 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 магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто будову мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач. Проаналізовано сучасні методи виготовлення MEMS систем і способів перетворення механічної деформації у електричні параметри. Оглянуто застосування тензодатчиків у якості гіроскопа, витратоміра та засобу спостереження за екологією. Розроблено схему роботи датчика у парі із модулем LoRa. Описано проблеми які можуть виникнути при вимірюванні деформації та як із ними боротись. Вивчено побудову передачі даних у системі LoRa за допомогою чарпів та як вони будуються, яка вимагається довжина преамбули та розміщення даних у потоці повідомлення.

В першому розділі магістерської кваліфікаційної роботи розглянуто особливості тензометричних перетворювачів, наведені основні форми датчиків та їх виготовлення, проаналізовано застосування у нетипових приладах таких як акселерометр та витратомір на основі сили Коріоліса, наведено проблему вимірювання пов'язану із температурою навколишнього середовища та як її можна вирішити. Розглянуто механізм провідності у п'єзоелектричній структурі та як змінюється опір під дією деформації.

У другому розділі магістерської кваліфікаційної роботи розглянуто класичну систему побудови мікроелектромеханічного перетворювача та його електричні та механічні параметри, наведені основні способи їх виготовлення та інтеграції у CMOS структуру, оглянуто новий вид бездротового датчика, його будову та виготовлення, наведено застосування датчиків для вимірювання екологічних параметрів.

Третій розділ магістерської кваліфікаційної роботи розглядає модуль зв'язку LoRa. Його параметри, побудову повідомлення для передачі даних, формування послідовності сигналів, їх структуру побудову мережі. Описано пункти на які варто звернути увагу при виборі необхідного модуля. Також не малу увагу приділено вибору мікроконтролеру ESP32 із яким у парі буде

працювати LoRa. Описано його типові проекти застосування, наявні виходи та як об'єднати їх між собою. Накреслено схему електричну принципову для приймача та передача та написано програмне забезпечення для їх роботи.

У четвертому розділ магістерської кваліфікаційної роботи здійснено моделювання мосту Уінстона за допомогою двох симуляторів у конфігурації один тензометр та три постійні резистори, а також 4 тензометри. Дані опрацьовані та побудовані відповідні графіки.

Також у магістерській кваліфікаційній роботі виконані розрахунки економічної частини. Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач» складають 248072,18 (грн.). Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nikolay Gorbachuk. (2024). *Measuring Transducers and Sensors*. LAP LAMBERT Academic Publishing. ISBN 620-747057-5
2. Gorbachuk, M. (2023). Research of piezoresistive effect in silicon films and development of measuring transducers based on them. *European Science, (sge23-01), Intellectual and technological potential of the XXI century '2023*.
3. Mohammed, A. A., Moussa, W. A., & Lou, E. (2011). High-performance piezoresistive MEMS strain sensor with low thermal sensitivity. *Sensors*, 11(2), 1819–1846.
4. M. Matan. (2023, Oct 26). *Strain Gauge Accelerometer: Principles, Applications, and Advantages*. *Electricity-Magnetism*.
5. M. Liu, Q. Zhang, Y. Zhao, Y. Shao, & D. Zhang. (2020). Design and Development of a Fully Printed Accelerometer with a Carbon Paste-Based Strain Gauge. *Sensors*, 20(12), 3395.
6. Li, C., Zhang, R., Hao, L., & Zhao, Y. (2024). Development of a MEMS Piezoresistive High-g Accelerometer with a Cross-Center Block Structure and Reliable Electrode. *Sensors*, 24, 5540
7. F. Chen, Y. Zhou, L. Zhong, W. Yang and J. Gan, "Design of a Strain Gauge-Based Force Sensor With Three Ranges Based on Compliant Mechanisms," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 74, pp. 1-10, 2025, Art no. 9503210, doi: 10.1109/TIM.2025.3529078.
8. Schut, T., Wiegerink, R., & Lötters, J. (2020). μ -Coriolis Mass Flow Sensor with Resistive Readout. *Micromachines*, 11, 184.
9. Shaeffer, D. K. (2013). MEMS inertial sensors: A tutorial overview. *IEEE Communications Magazine*, 51(4), 100–109.
10. Han, X., Huang, M., Wu, Z., et al. (2023). Advances in high-performance MEMS pressure sensors: Design, fabrication, and packaging. *Microsystems & Nanoengineering*, 9.

11. Kartunov, S. (2015). Micro-Electromechanical Systems In The Ecology. Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, 2, 163. <https://doi.org/10.17770/etr2011vol2.981>
12. Nahorniuk, O.. (2024). METHOD OF RECOGNITION OF FPV-UAV RADIO SIGNALS FORMED ACCORDING TO CROSSFIRE AND EXPRESSLRS STANDARDS. Наукові праці Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 20. 90-98. 10.37701/dndivsovt.21.2024.11.
13. Lanmarket.ua. (n.d.). Що таке LoRa — енциклопедія. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://lanmarket.ua/ua/entsiklopediya/besprovodnye-tekhnologii/lora.html>
14. Al Homssi, Bassel & Dakic, Kosta & Maselli, Simon & Wolf, Hans & Sithamparanathan, Kandeepan & Al-Hourani, Akram. (2021). IoT Network Design using Open-Source LoRa Coverage Emulator. IEEE Access. PP. 10.1109/ACCESS.2021.3070976.
15. Xhonneux, Mathieu & Tapparel, Joachim & Balatsoukas-Stimming, Alexios & Burg, Andreas & Afisiadis, Orion. (2022). A Maximum-Likelihood-Based Two-User Receiver for LoRa Chirp Spread-Spectrum Modulation. IEEE Internet of Things Journal. PP. 1-1. 10.1109/JIOT.2022.3186732.
16. Jooby.eu Blog. (2023, July). What is a LoRa module. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://jooby.eu/blog/what-is-a-lora-module/>
17. Semtech Corporation, SX Han, Xiangguang & Huang, Mimi & Wu, Zutang & Gao, Yi & Xia, Yong & Yang, Ping & Fan, Shu & Lu, Xuhao & Yang, Xiaokai & Liang, Lin & Su, Wenbi & Wang, Lu & Cui, Zeyu & Zhao, Yihe & Li, Zhikang & Zhao, Libo & Jiang, Zhuangde. (2023). Advances in high-performance MEMS pressure sensors: design, fabrication, and packaging. Microsystems & Nanoengineering,
18. D. Wilcher. (2024, May 29). A Guide for the ESP32 Microcontroller Series. Digi-Key Maker Blog. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.digikey.com/en/maker/blogs/2024/a-guide-for-the-esp32-microcontroller-series>

19. Sokol, Miroslav & Galajda, Pavol & Jurik, Patrik & Pribula, Frederik & Sokolová, Zuzana. (2024). Design and Implementation of a Wireless Sensor Network Based on the ESP32 for IoT Applications. 69-73. 10.1109/ELMAR62909.2024.10694153.

20. Y. Saputra, J. Hua, N. Wendt, C. Julien, & G.-C. Roman. (2019). WARBLE: Programming Abstractions for Personalizing Interactions in the Internet of Things. In 2019 IEEE/ACM 6th International Conference on Mobile Software Engineering and Systems (MOBILESoft) (pp. 128–139). Montreal, QC, Canada.

21. N. El Rachkidy, A. Guitton, & M. Kaneko. (2018). Decoding Superposed LoRa Signals. In 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium (NOMS). Taipei, Taiwan. <https://doi.org/10.1109/LCN.2018.8638253>

22. Softonic. (2025, Nov 3). LTspice – Download. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://ltspice.en.softonic.com/>

23. Labcenter Electronics. Proteus [Software]. Uptodown. [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://proteus.en.uptodown.com/windows>

24. Michael Jackson. (2022). KWIK CIRCUIT FAQ – SPICE Model for a Quarter Bridge Strain Gauge Sensor. Analog Devices.

25. 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
МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ТЕНЗОМЕТРИЙНИ МЕМС ПЕРЕТВОРЮВАЧ

Виконав: студент 2-го курсу, групи МНТ-24м
спеціальності 176 Мікро-та наносистемна
техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Шпирко О.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н. доц., доцент кафедри ІРТС

 Осадчук Я.О.
(прізвище та ініціали)

«18»  2024 р.

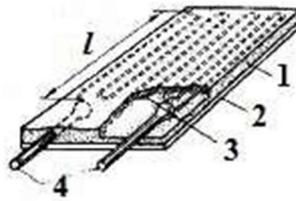


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд дротяного тензометричного датчика

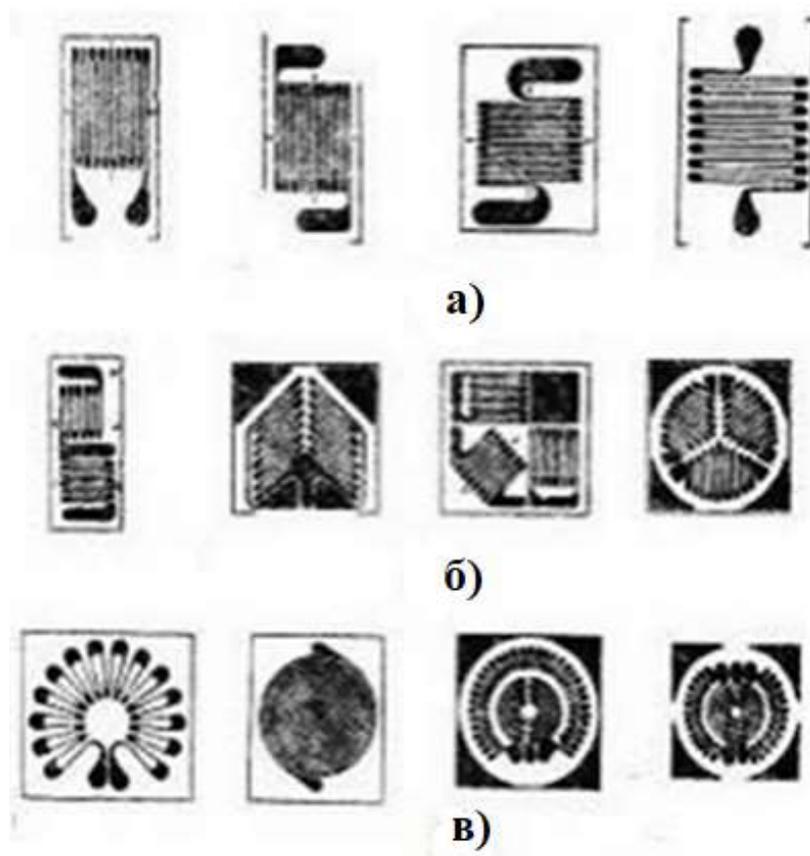


Рисунок 2 – Форми тензодатчиків. а)одно елементні квадратні б) багатоелементні квадратні або круглі м) мембрані

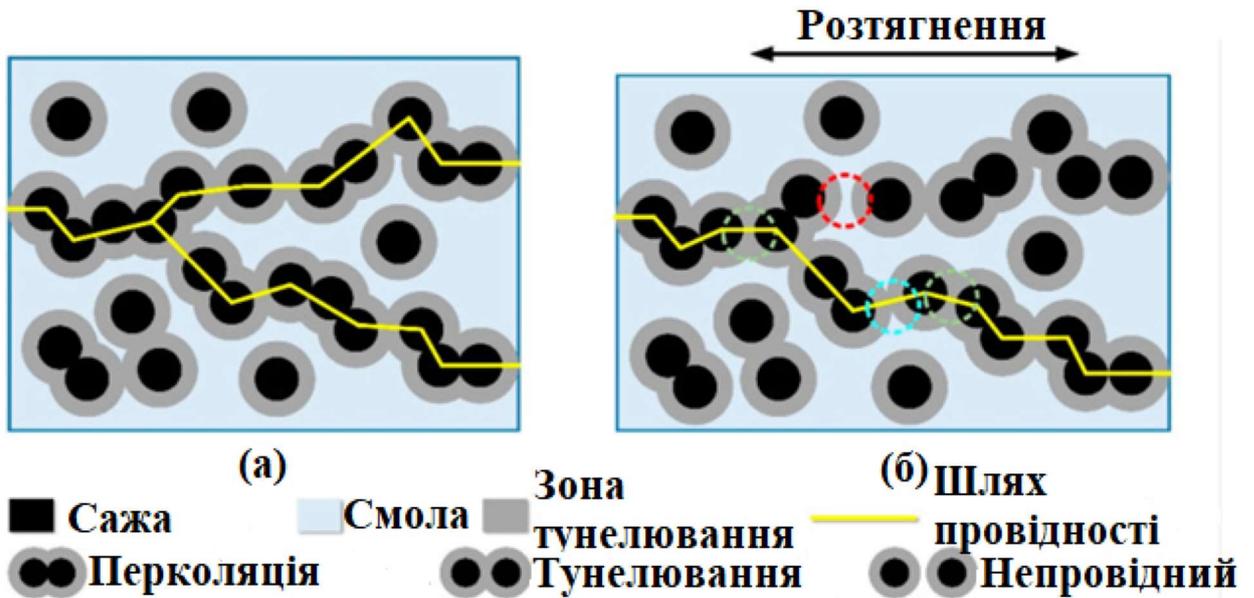


Рисунок 3 – Механізм провідності та п'єзорезистивний механізм тензодатчика на основі вуглецевої пасті з мікроперспективи: а) Без навантаження б) під час розтягування

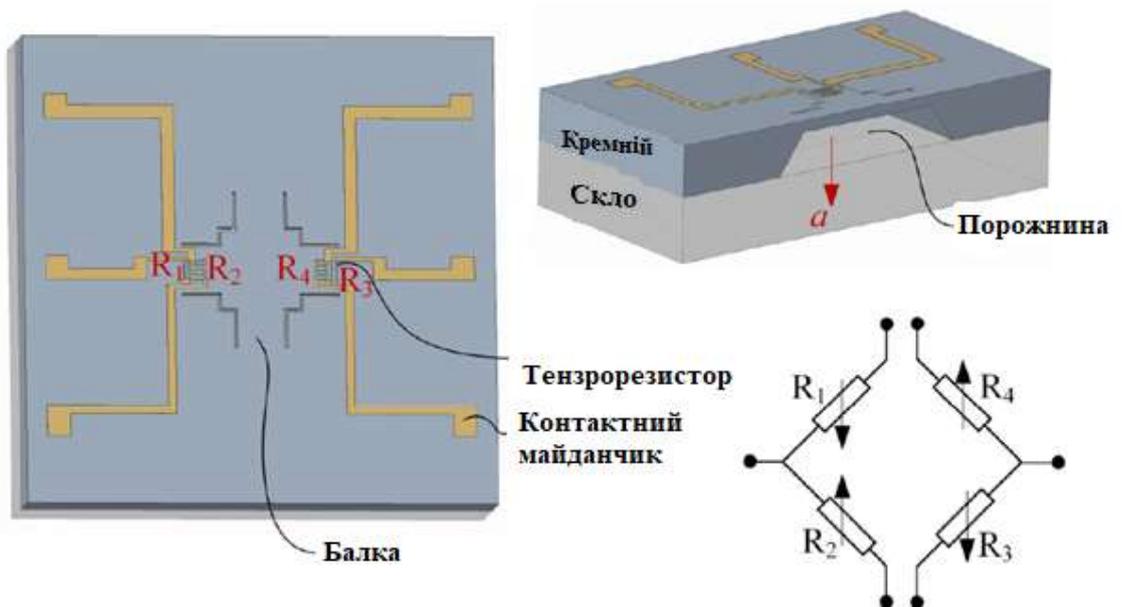


Рисунок 4 – Структура акселерометра побудованого на тензодатчиках

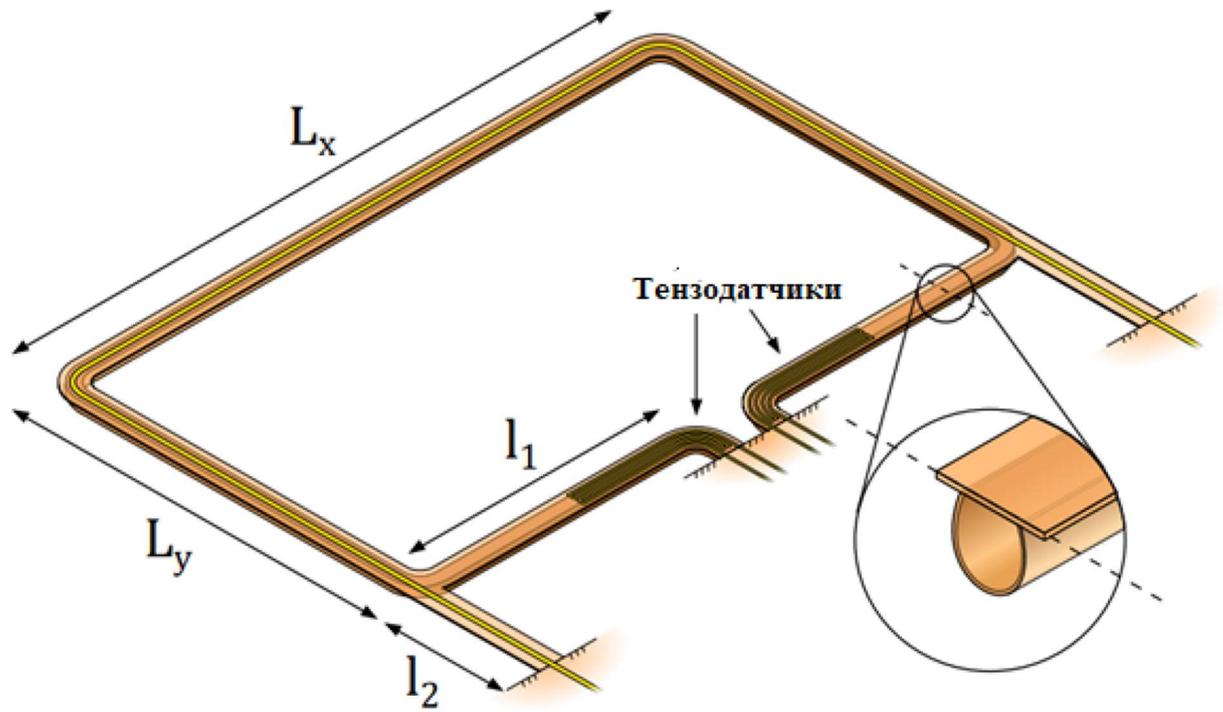


Рисунок 5 – Будова мікроканалу із розміщеними тензодатчиками

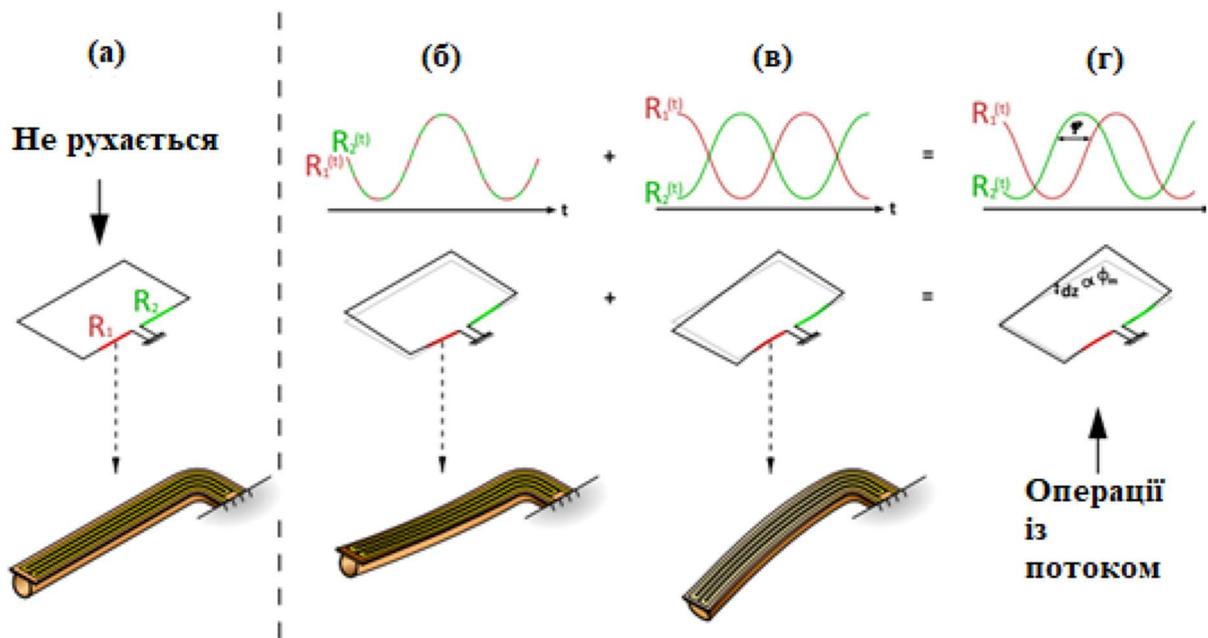


Рисунок 6 – Вихідні сигнали тензометричних датчиків при різних протіканнях рідини

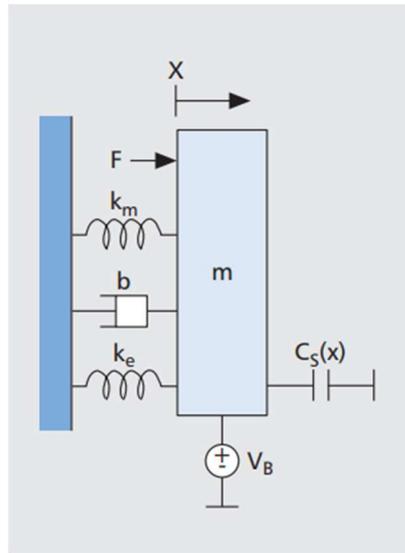


Рисунок 7 – Типова схема MEMS датчика

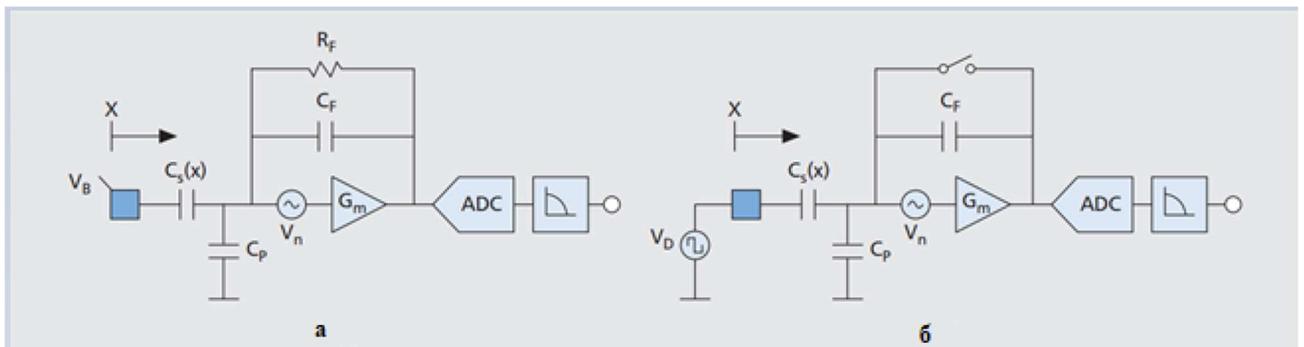


Рисунок 8 – Схема конфігурації датчика а) безперервне зондування, б) дискретне зондування

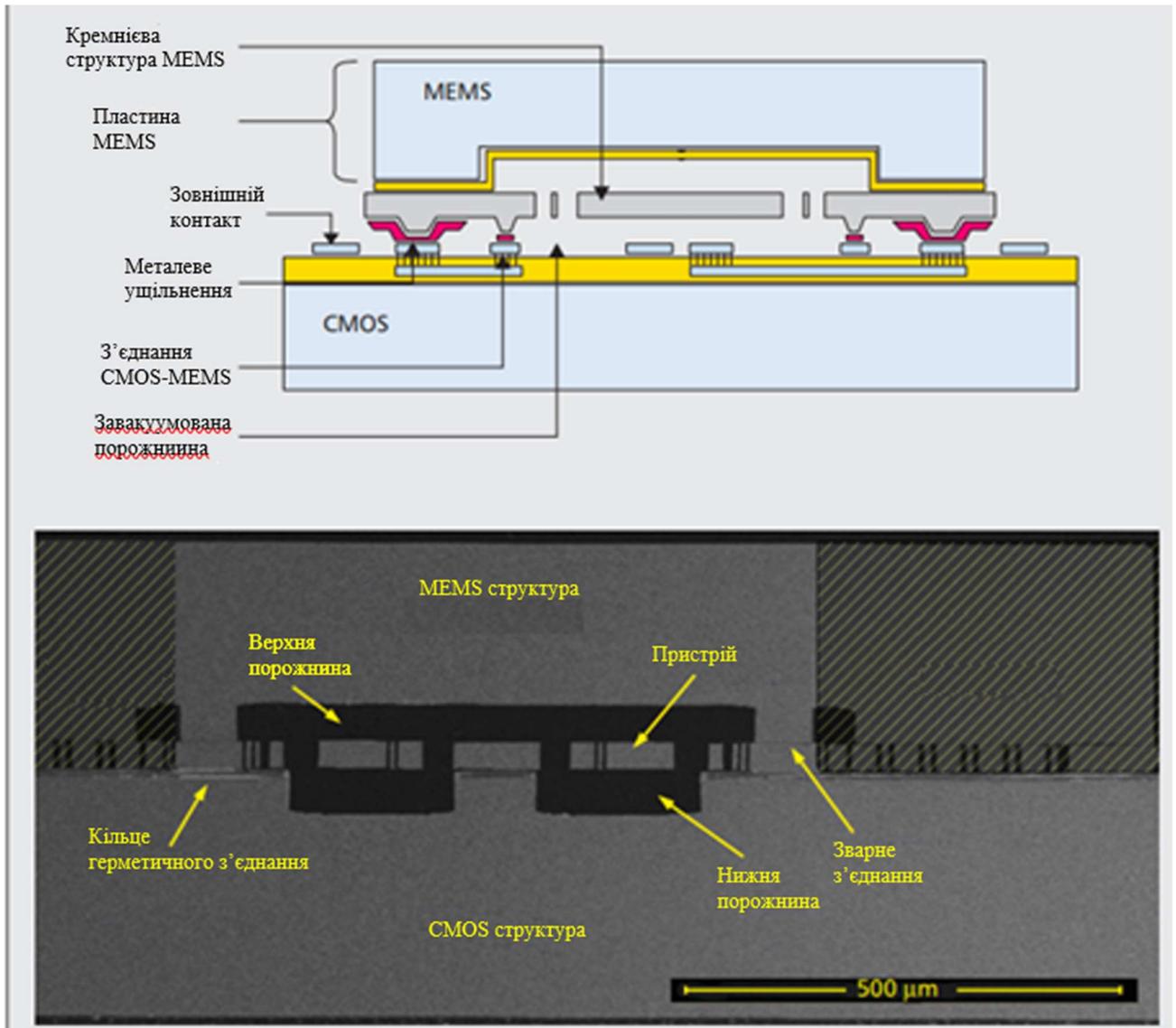


Рисунок 9 – Технологія виготовлення кремнієвих MEMS/CMOS-транзисторів:
а) структура; б) поперечний переріз пристрою

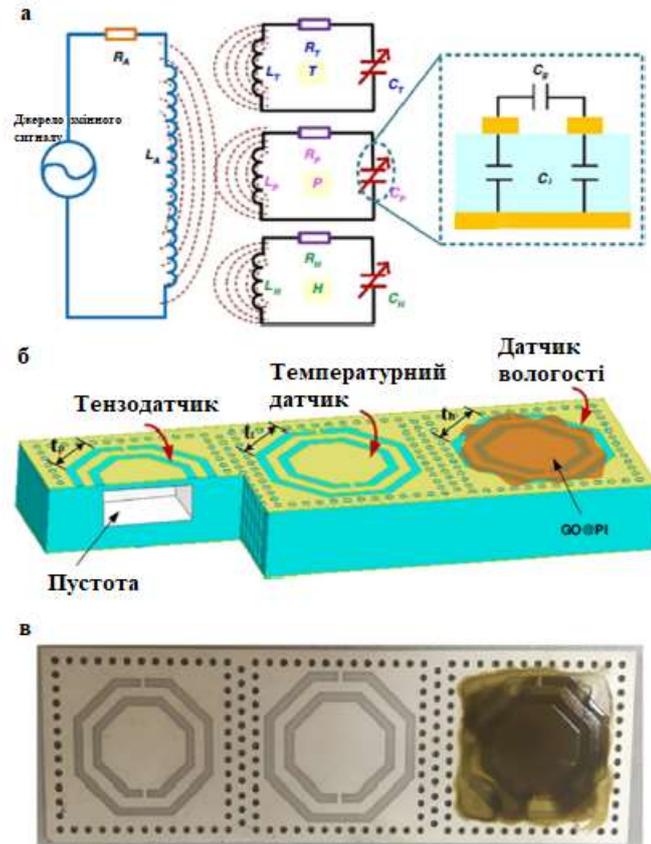


Рисунок 10 – Бездротовий мультипараметричний сенсор а) схема електрична-принципова б) структура сенсора с) фото готового виробу

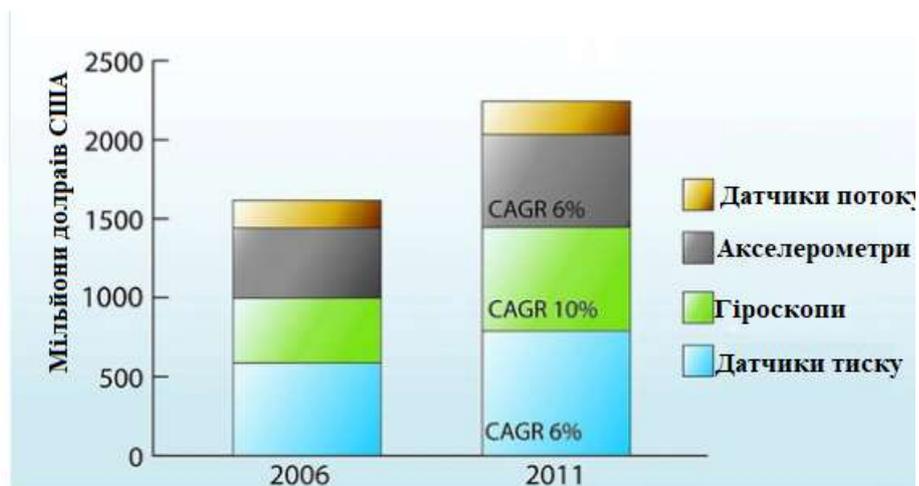


Рисунок 11 – Застосування MEMS датчиків у 2006 та 2011 році

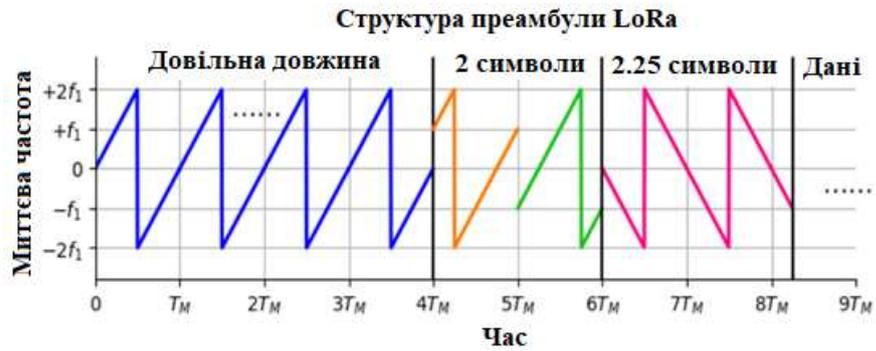


Рисунок 12 – Формування послідовності сигналів у модулях LoRa

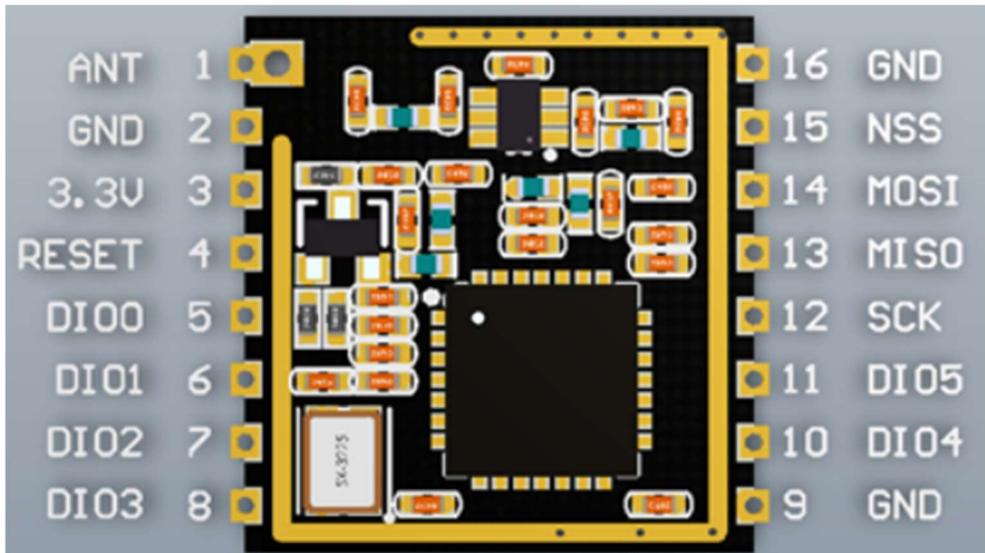


Рисунок 13 – Розпіновка модуля LoRa із чипом SX1276

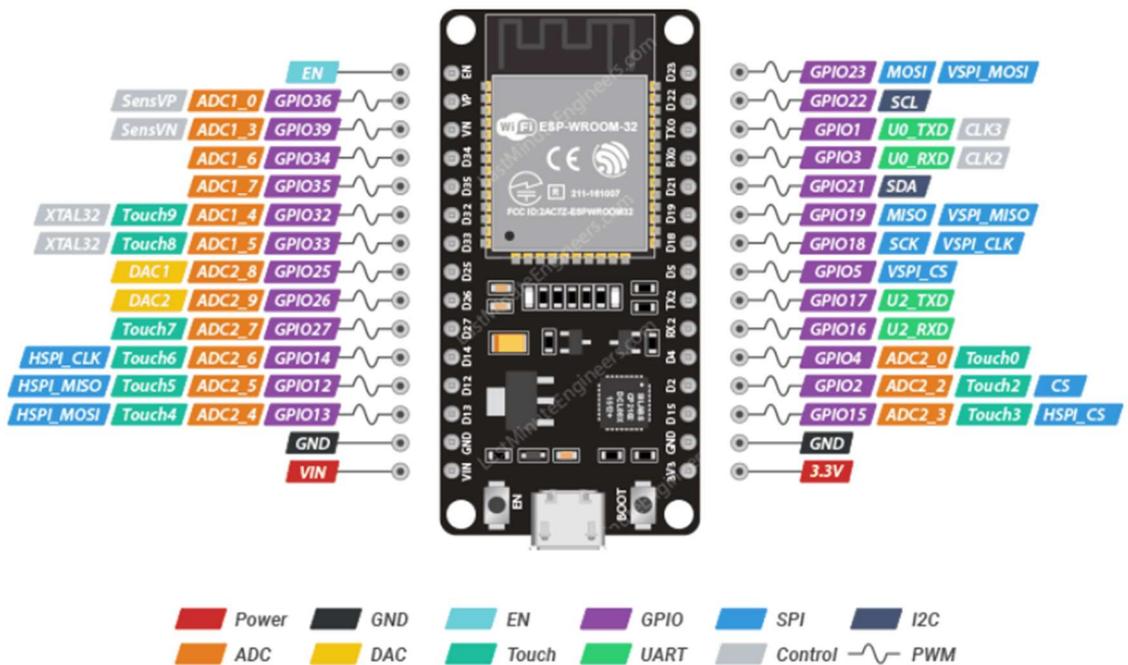


Рисунок 14 – Розпіновка мікроконтролера ESP32

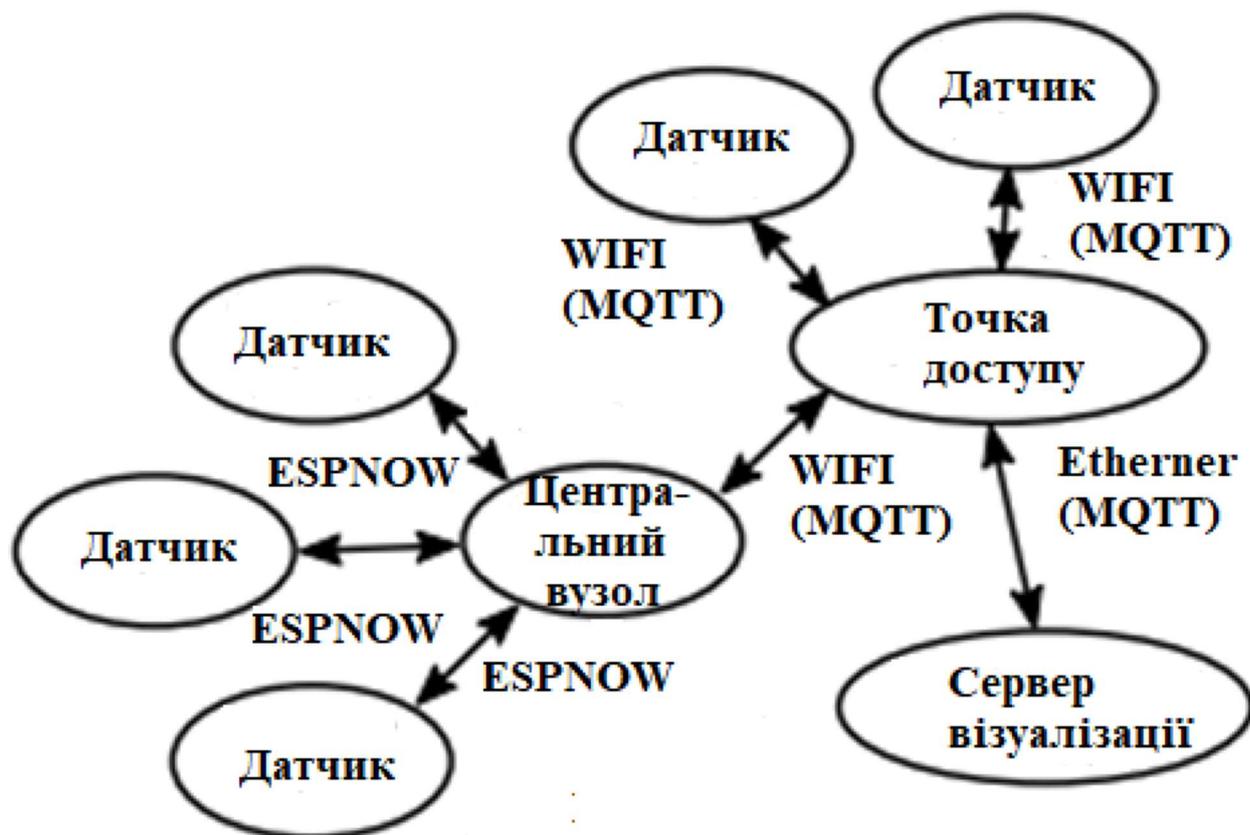


Рисунок 15 – Використовувана топологія мережі що будується

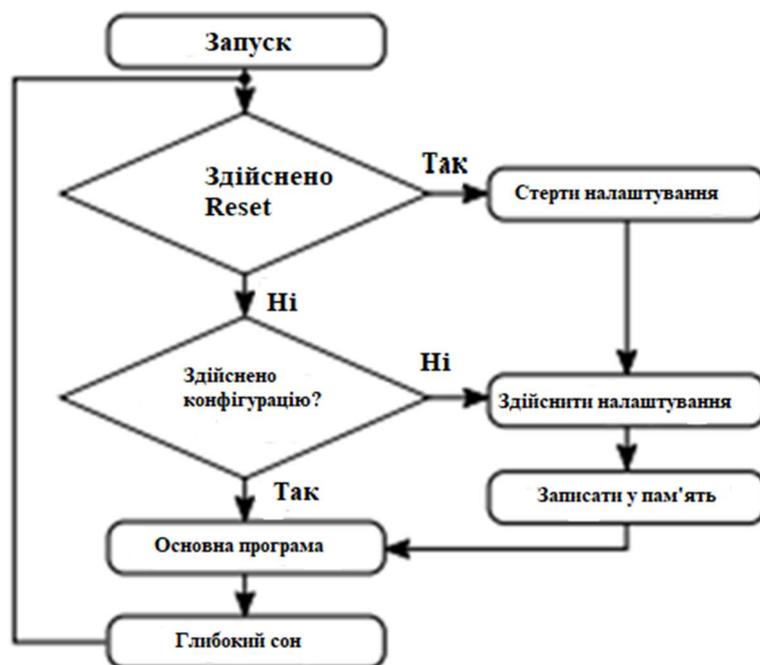


Рисунок 16 – Алгоритм ініціалізації, підключення та конфігурації

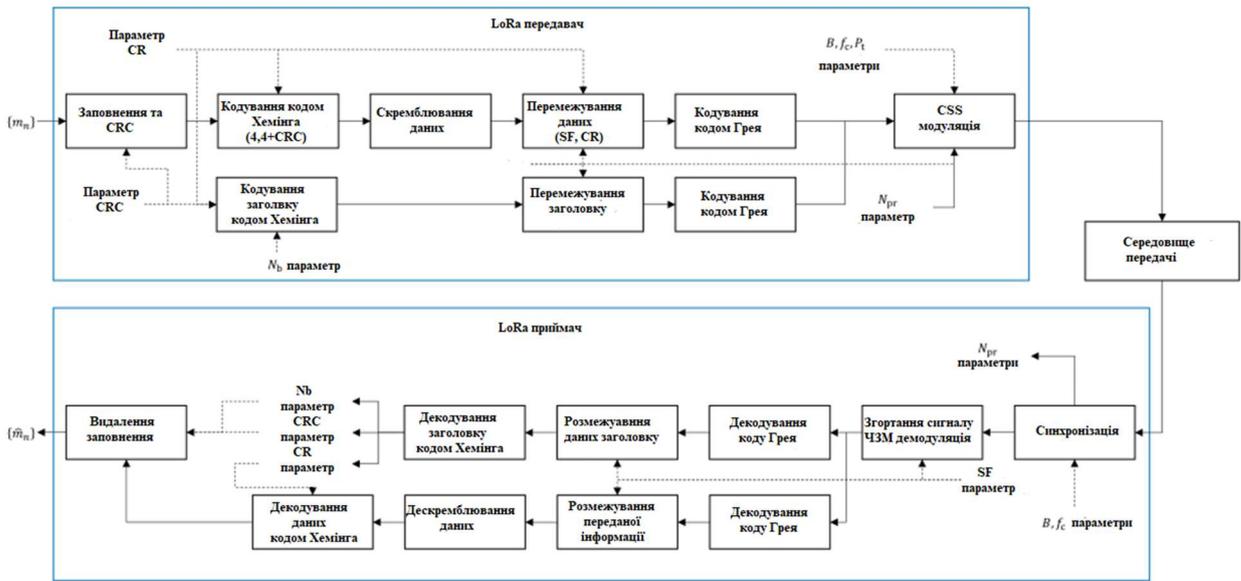


Рисунок 17 – Блок схема кодування та модуляції модуля LoRa для приймача та передавача

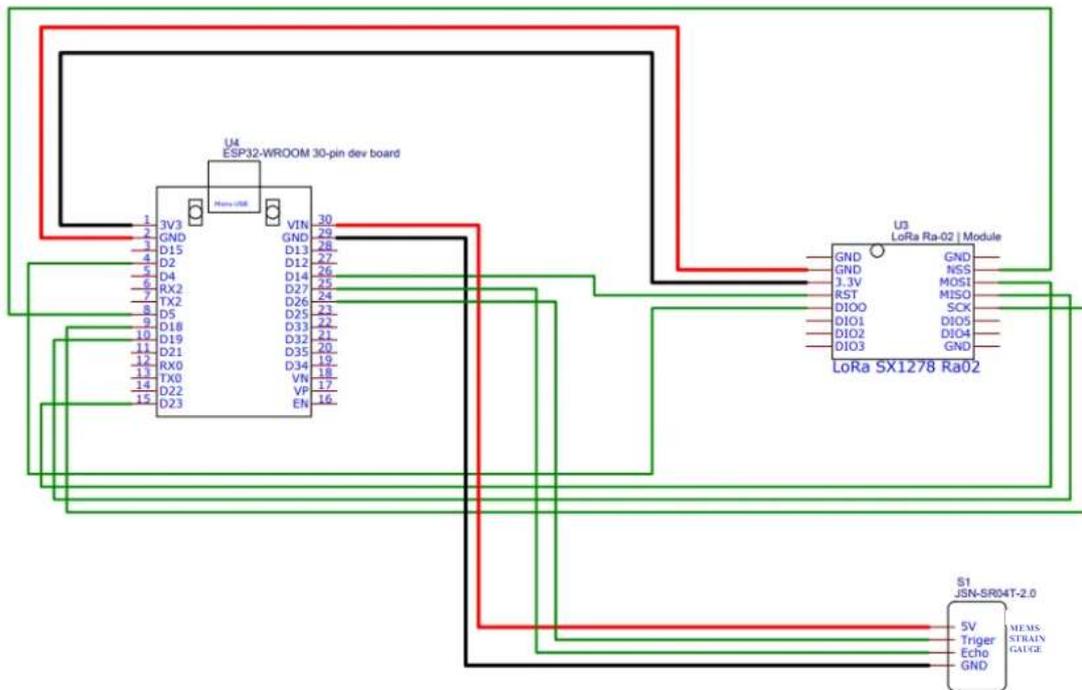


Рисунок 18 – Принципова схема підключення елементів схеми між собою

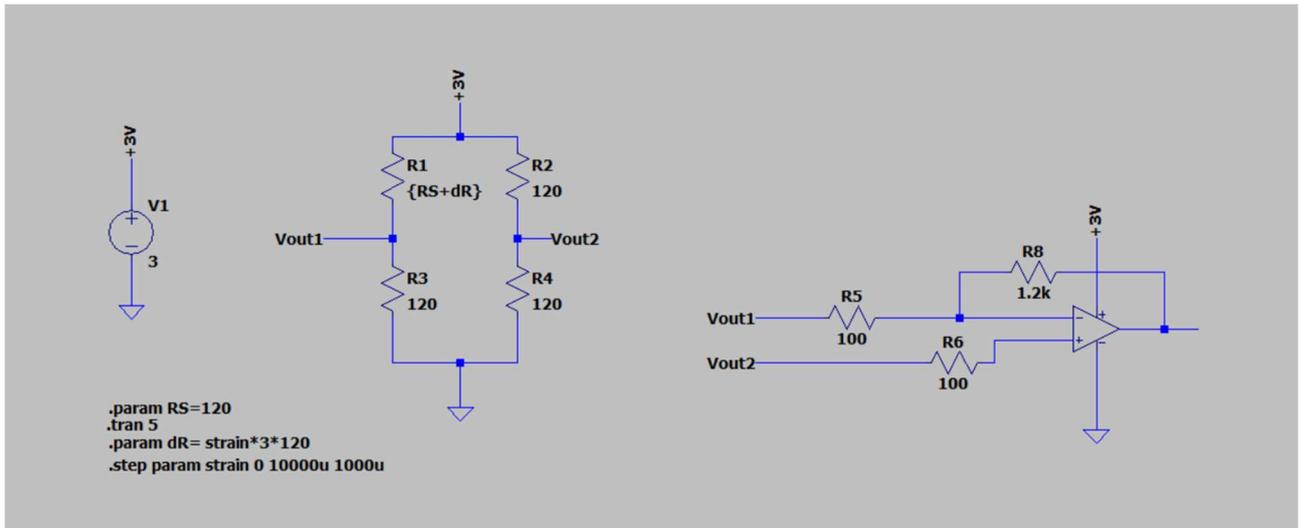


Рисунок 19 – схема мосту Уінстона із диференціальним підсилювачем



Рисунок 20 – Вихідна напруга на контактах вимірювання Vout1 та Vout2

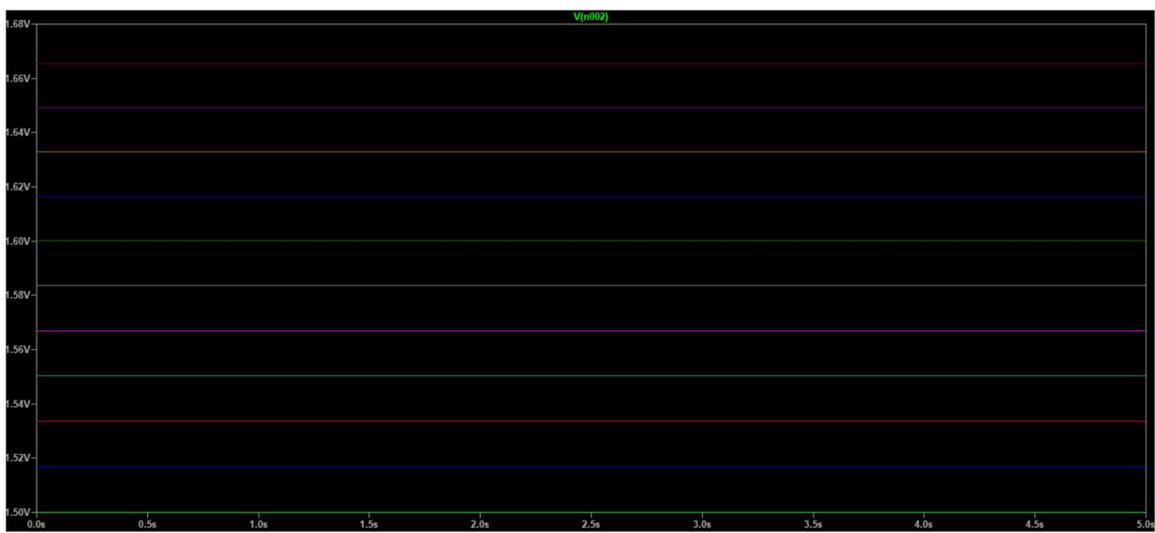


Рисунок 21 – Вихідна напруга підсилювача

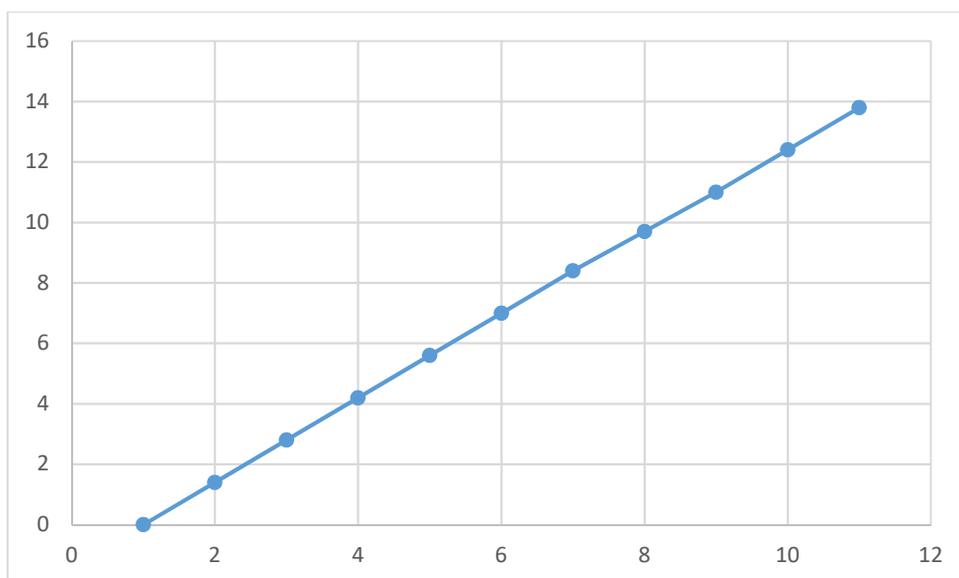


Рисунок 22 –Відношення напруги на мості до величини деформації

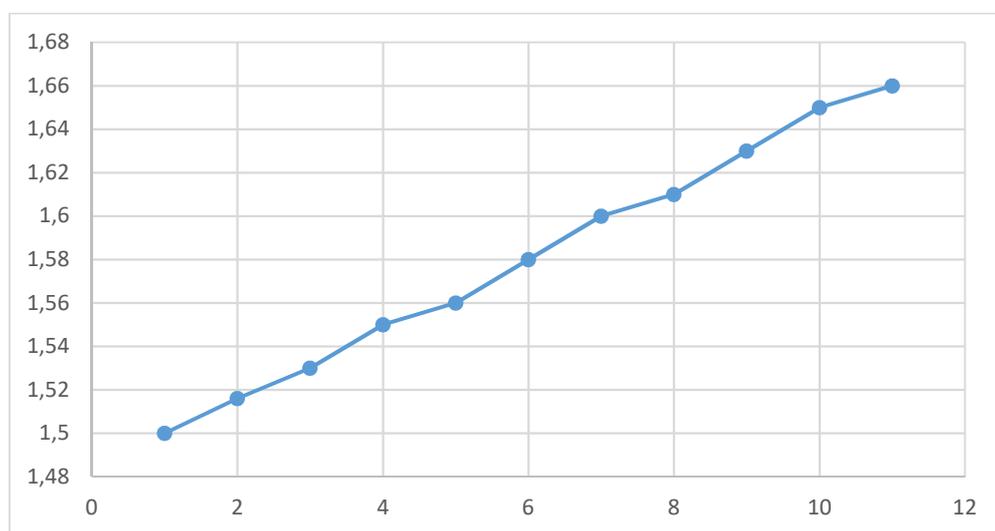


Рисунок 23 –Відношення вихідної напруги до величини деформації

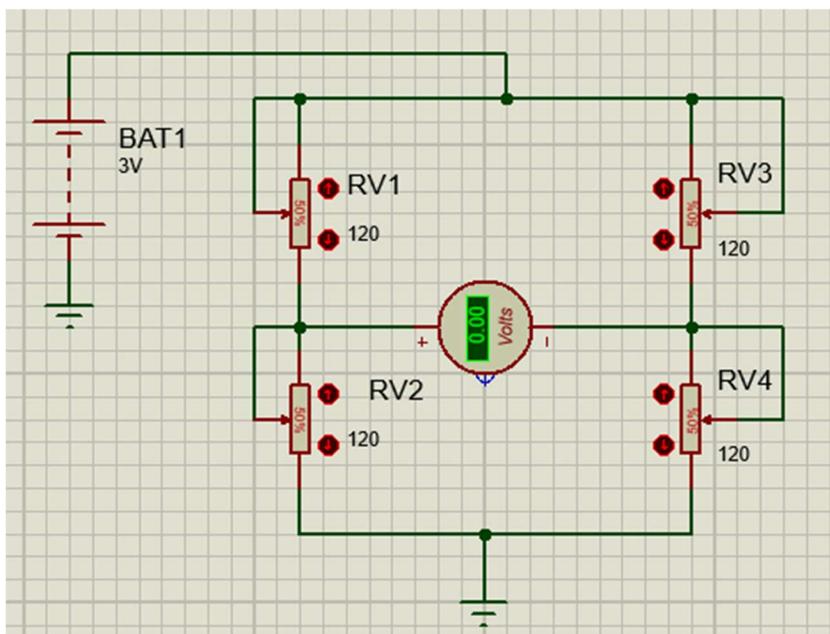


Рисунок 24 – Схема мосту Уінстона у стані спокою

Додаток Б
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ
МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ТЕНЗОМЕТРИЙНИ МЕМС ПЕРЕТВОРІЮВАЧ**

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: «Мікроелектронний тензометричний MEMS перетворювач»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
 (бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)
 Підрозділ Кафедра ІРТС
 (кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 5,93%

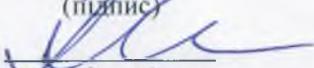
Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

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

Експертна комісія:

Савицький А.Ю. – к.т.н., доц. доцент каф. ІРТС
 (прізвище, ініціали, посада)

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


 (підпис)

 (підпис)

Особа, відповідальна за перевірку


 (підпис)

Семенов А.О.
 (прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

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

Здобувач  Шпирко О.А.
 (підпис) (прізвище, ініціали)

Додаток В

**ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ МІКРОКОНТРОЛЕРА
МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ТЕНЗОМЕТРИЙНИ MEMS ПЕРЕТВОРІЮВАЧ**

Програма приймача на базі модуля LoRa

```

#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>

#define STRAIN1PIN 7
Adafruit_BMP280 bmp;

float strain1;
int ldr = 4;
int counter = 0;
int Dummyvalue;
long randNumber; //Create Random Number To Avoid Transmission Loss For First Digit

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  randomSeed(analogRead(0));

  if (!bmp.begin()) {
    Serial.println(F("Could not find a valid strain gauge sensor, check wiring!"));
    while (1);
  }

  pinMode(ldr, OUTPUT);
  while (!Serial);

  Serial.println("Lora Strain Station");

  if (!LoRa.begin(915E6)) {
    Serial.println("Starting LoRa failed!");
  }
  else
  {
    Serial.println("Starting LoRa Successes!");
  }
}

void loop()
{
  Serial.println();
  Serial.print("Sending packet: ");
  Serial.println(counter);
  randNumber = random(1000);

  int randNumber = random(100); Dummyvalue = randNumber;
  double ldrvalue = analogRead(ldr);
  float s = readstrain();

  if (isnan(s)) {
    Serial.println(F("Failed to read from strain gauge sensor!"));
    return;
  }

  String Datastring = String(Dummyvalue) + (";") + String(strain1) + (";")
  Serial.println(Datastring);
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print(Datastring);
  LoRa.print(counter);
  LoRa.endPacket();
  counter++;
  delay(3000);
}

```

Програма передавача на базі модуля LoRa.

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

void setup()
{
  Serial.begin(115200);

  lcd.begin();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("LoRa Receiver");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Starting...");
  delay(2000);
  lcd.clear();

  if (!LoRa.begin(915E6)) {
    Serial.println("LoRa start FAILED!");
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("LoRa FAILED!");
    while (1);
  }

  Serial.println("LoRa Receiver Ready");
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Receiver Ready");
  delay(1000);
  lcd.clear();
}
```

```
void loop()
{
  int packetSize = LoRa.parsePacket();

  if (packetSize)
  {
    String packet = LoRa.readString();

    Serial.print("Received: ");
    Serial.println(packet);
    int delimiter = packet.indexOf(';');

    if (delimiter == -1) {
      Serial.println("Invalid packet");
      return;
    }

    String strainValue = packet.substring(0, delimiter);
    Serial.print("Strain: ");
    Serial.println(strainValue);

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Strain Value:");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(strainValue);

    delay(2000);
  }
}
```