

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:

«АВТОГЕНЕРАТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ»

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

(шифр) назва напрямку підготовки, спеціальності)

Бондаренко О.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор, зав. каф. ІРТС
Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«14» 12 2023 р.

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

Семенова О.О.
(прізвище та ініціали)

«15» 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«10» 12 2023 р.

Вінниця ВНТУ - 2023 рік

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС
д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«16» вересня 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Бондаренку Олегу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж»

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

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

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

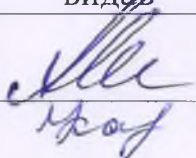
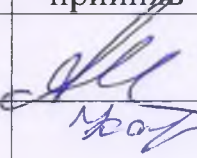
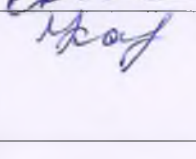
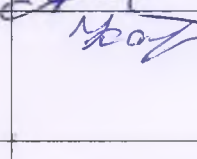
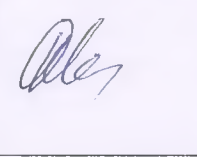
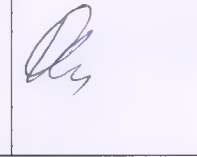
2. Строк подання студентом роботи 15.12.2023р.

3. Вихідні дані до роботи: Робочий діапазон частот від 100 кГц до 5 МГц. Напруга живлення 3,3-5В. Струм споживання 1,5-15мА. Діапазон вимірювання тиску від 60-120 кПа.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Аналіз сучасного стану сенсорів тиску. Основи теорії роботи напівпровідникових сенсорів тиску. Розробка автогенераторного перетворювача тиску для бездротових сенсорних мереж. Економічна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Діапазони тиску. Схематичний вигляд абсолютного, диференціального, манометричного кремнієвого MEMS датчика тиску. Ступінчастий принцип роботи мембранного датчика тиску з використанням п'єзорезистивного ефекту. Зразкове моделювання FEM розподілу напруги на верхній стороні квадратичної мембрани. Основи датчиків UHF RFID. Схематичний вигляд у поперечному перерізі стадій процесу p- і p⁺-дифузії для створення п'єзорезисторів для кремнієвого датчика тиску. Схема автогенераторного перетворювача тиску. Еквівалентна схема автогенераторного перетворювача тиску по постійному струму. Експериментальна і теоретична залежності частоти генерації автогенераторного перетворювача тиску.

6. Консультанти розділів роботи


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

7. Дата видачі завдання 17.09.2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент


(підпис)

Бондаренко О.С.

Керівник роботи


(підпис)

Осадчук О.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.38

Бондаренко О.С. Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ 2023 р. – 121 стор, 35 рис., 17 табл. 70 бібл. – українською мовою.

У магістерській кваліфікаційній роботі було проведено аналіз публікацій, який присвячений теоретичним та експериментальним дослідженням фізичних ефектів при дії тиску у MEMS структурах та конструкціях датчиків тиску показує, що дослідження та розробка автогенераторних перетворювачів тиску для бездротових сенсорних мереж є перспективним науковим напрямком у розвитку засобів вимірювання тиску та деформації для сучасних мікропроцесорних інформаційно-вимірювальних систем. Резонансні MEMS датчики тиску та деформації показують високі метрологічні показники поряд з тенденцією до мікромініатюризації, а також покращенням цінових характеристик, можливістю їхньої інтелектуалізації на основі технологічної та конструктивної сумісності з цифровими пристроями у бездротових сенсорних мережах.

У другому розділі розглянуті основи теорії створення MEMS сенсорів тиску. Для розуміння роботи і правильності функціонування п'єзореzystивних датчиків тиску, описано виробництво найбільш типового основного матеріалу – кремнію – разом із його особливими властивостями, пов'язаними з кристалічністю. Зокрема, це включає п'єзореzystивний ефект, який є основою для представленого тут принципу датчика.

У третьому розділі розглянуто метод вимірювання тиску на основі тензореактивного ефекту в автогенераторному перетворювачі тиску з тензочутливим елементом, який відрізняється від існуючих використанням залежності імпедансу транзисторної структури від дії тиску, що дозволило перетворювати тиск у частоту, причому тензочутливі елементи виступають і в ролі активних елементів автогенераторного перетворювача тиску, що надало принципову можливість підвищення точності і чутливості вимірювання тиску. Розроблено математичні моделі автогенераторного перетворювача тиску на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з чутливими резистивними чутливим елементом, в яких на відміну від існуючих, враховано вплив тиску на елементи нелінійних еквівалентних схем перетворювача, що дало можливість визначити функцію перетворення і рівняння чутливості. Проведено експериментальні дослідження, які показали, що чутливість автогенераторного перетворювача тиску на основі мостової MEMS тензочутливої схеми чутливість пристрою складала 1,25 кГц/кПа – 1,55 кГц/кПа в діапазоні тисків 50 кПа -130 кПа.

Ключові слова: сенсор тиску, радіовимірювальний сенсор тиску з частотним виходом, MEMS структура, від'ємний диференціальний опір, імпеданс.

ABSTRACT

Bondarenko O.S. Self-generating pressure transducer for wireless sensor networks. Master's qualification thesis. – Vinnytsia: VNTU 2023 – 121page, 35 figure, 17 table. Bible -70 In ukrainian.

In the master's qualification work, an analysis of publications devoted to the theoretical and experimental research of physical effects under the action of pressure in MEMS structures and designs of pressure sensors was carried out. It shows that the research and development of self-generating pressure transducers for wireless sensor networks is a promising scientific direction in the development of pressure measurement tools and deformations for modern microprocessor information and measurement systems. Resonant MEMS pressure and strain sensors show high metrological indicators along with the trend towards microminiaturization, as well as the improvement of price characteristics, the possibility of their intellectualization based on technological and constructive compatibility with digital devices in wireless sensor networks.

In the second chapter, the basics of the theory of creating MEMS pressure sensors are considered. To understand the operation and correct functioning of piezoresistive pressure sensors, the production of the most typical base material - silicon - is described, together with its special properties related to crystallinity. In particular, this includes the piezoresistive effect, which is the basis for the sensor principle presented here.

In the third section, the method of pressure measurement based on the tensor-reactive effect in an autogenerator pressure transducer with a strain-sensitive element is considered, which differs from the existing ones by using the dependence of the impedance of the transistor structure on the action of pressure, which made it possible to convert pressure into frequency, and the strain-sensitive elements also act as active elements of the autogenerator converter pressure, which provided a fundamental opportunity to increase the accuracy and sensitivity of pressure measurement.

Mathematical models of the self-generating pressure transducer based on transistor structures with negative differential resistance with sensitive resistive sensitive elements were developed, in which, unlike the existing ones, the effect of pressure on the elements of the nonlinear equivalent circuits of the transducer was taken into account, which made it possible to determine the conversion function and sensitivity equation. Experimental studies were conducted, which showed that the sensitivity of the self-generating pressure transducer based on the bridge MEMS strain-sensitive circuit, the sensitivity of the device was 1.25 kHz/kPa - 1.55 kHz/kPa in the pressure range of 50 kPa -130 kPa.

Key words: pressure sensor, radio measuring pressure sensor with frequency output, MEMS structure, negative differential resistance, impedance.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СЕНСОРІВ ТИСКУ	7
1.1 Застосування сенсорів тиску	7
1.2 Проектування та виготовлення п'єзорезистивних датчиків тиску	12
1.3 Функціональний принцип роботи п'єзорезистивних датчиків тиску	16
1.4 Сенсорні RFID-мітки	22
1.5 Таксономія тегів RFID із підтримкою датчика	24
1.6 Корисність RFID-міток із підтримкою сенсора	26
1.7 Контроль тиску в шинах	31
1.8 RFID датчики тиску	33
1.9 Основи збору радіочастотної енергії та технології датчиків RFID	35
1.10 Методи датчиків RFID - технічний прогрес та інноваційні застосування	40
1.11 Висновки до розділу	43
2 ОСНОВИ ТЕОРІЇ РОБОТИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СЕНСОРІВ ТИСКУ	44
2.1 Фізичні основи застосування напівпровідників для створення сенсорів тиску	44
2.2 Електричні властивості монокристалічного кремнію	46
2.3 П'єзорезистивний ефект у легованому монокристалічному кремнію	54
2.4 Висновки до розділу	58
3 РОЗРОБКА АВТОГЕНЕРАТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ	59
3.1 Автогенераторний перетворювач тиску на основі мостових MEMS тензочутливої схеми	59
3.2 Математична модель для визначення активної і реактивної складової імпедансу транзисторної структури від дії тиску	68
3.3 Висновки до розділу	74
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	75
4.1 Оцінювання наукового ефекту	75
4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи	78
4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	90
4.4 Висновок до розділу	91
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	92
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи	92

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	95
5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Дослідження безпеки роботи в умовах дії загрозливих факторів надзвичайних ситуацій щення	101
5.4 Висновок до розділу	104
ВИСНОВКИ	104
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	105
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративна частина	111
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки магістерської кваліфікаційної роботи	121

ВСТУП

Актуальність. Сучасний стан розвитку радіовимірювальної техніки визначається тенденцією до динамічного впровадження високоефективних мініатюрних резонансних MEMS сенсорів тиску в системах радіоконтролю та діагностики технічних і нетехнічних процесів у військовій, аерокосмічній, автомобільній та інших галузях сучасної економіки України [1-15].

На даний момент є нагальна необхідність розширення наукових досліджень в галузі вітчизняного виробництва радіовимірювальних сенсорів тиску з частотним виходом з огляду на концепцію їх можливого розвитку в напрямках: чутливості, точності, ефективності технічних показників, високої надійності, відтворюваності та інтеграції з мікропроцесорними пристроями обробки вимірювальної інформації [1-4].

Потужність джерела збору енергії може бути в різних формах, таких як механічний рух і вібрація, сонячна енергія, теплова енергія, електромагнітна енергія тощо. З початку 1990-х років, коли Тесла та Герц запропонували концепцію бездротового збору енергії [5] дослідження бездротового збору енергії стають все більш масштабними в науковому співтоваристві. Згідно з основами RFID, збір радіочастотної енергії можна розділити на індуктивний зв'язок і зворотне розсіювання [6]. HF RFID, що працює на несучій частоті 13,56 МГц, передає та приймає потужність за допомогою індуктивного зв'язку ближнього поля [7], а UHF, що працює на несучій частоті 840–960 МГц, передає та приймає потужність із зворотним розсіюванням у дальній зоні [4]. Крім того, безчипова RFID, яка виконує свої вимірювання за допомогою зсуву резонансної частоти, також стала основною темою дослідження. Це дослідження зосереджено на техніці датчиків HF та UHF RFID.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є покращення метрологічних показників автогенераторного перетворювача тиску технологічно сумісних з мікроелектронною технологією за рахунок перетворення електричного сигналу в частотний вихідний сигнал.

Об'єктом дослідження є процес перетворення тиску у частотний вихідний сигнал у чутливих до тиску автогенераторних перетворювачах тиску, що породжує задачу розбудови частотних сенсорів тиску з покращеними метрологічними характеристиками.

Предмет дослідження - характеристики автогенераторного перетворювача тиску на основі реактивних властивостей транзисторних напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором.

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

- проаналізувати існуючі резонансні MEMS сенсори тиску та обґрунтувати переваги автогенераторних перетворювачів тиску на основі транзисторних напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором по відношенню до існуючих;

- розробити математичні моделі автогенераторного перетворювача тиску на основі біполярних та польових транзисторних напівпровідникових структур з врахуванням впливу тиску на чутливі елементи нелінійних еквівалентних схем та експериментально довести їх адекватність;

- виконати експериментальну перевірку залежностей електричних характеристик та параметрів розроблених математичних моделей автогенераторного перетворювача тиску від дії тиску та дослідити їх електричні параметри.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні: диференціального та інтегрального числення для створення математичних моделей; рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей автогенераторного перетворювача тиску; основних положень теорії функції комплексної змінної для отримання рівнянь чутливості та функцій перетворення; теорії розрахунку нелінійних електричних кіл для визначення імпедансу автогенераторного перетворювача тиску.

Наукова новизна магістерської кваліфікаційної роботи:

1. Розглянуто вплив тиску на напівпровідникові матеріали, а також на чутливі до тиску елементи MEMS структурах.
2. Розглянуто метод вимірювання тиску на основі тензореактивного ефекту в автогенераторному перетворювачі тиску з тензочутливим елементом, який відрізняється від існуючих використанням залежності імпедансу транзисторної структури від дії тиску, що дозволило перетворювати тиск у частоту, причому тензочутливі елементи виступають і в ролі активних елементів автогенераторного перетворювача тиску, що надало принципову можливість підвищення точності і чутливості вимірювання тиску.
3. Розроблено математичні моделі автогенераторного перетворювача тиску на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з чутливими резистивними чутливим елементом, в яких на відміну від існуючих, враховано вплив тиску на елементи нелінійних еквівалентних схем перетворювача, що дало можливість визначити функцію перетворення і рівняння чутливості.

Практичне значення одержаних результатів магістерської кваліфікаційної роботи:

У результаті математичного моделювання автогенераторного перетворювача тиску на основі транзисторних структур з від'ємним диференційним опором з чутливими резистивними чутливим елементом, в яких на відміну від існуючих, враховано вплив тиску на елементи нелінійних еквівалентних схем перетворювача, що дало можливість визначити функцію перетворення і рівняння чутливості. Проведено експериментальні дослідження, які показали, що чутливість автогенераторного перетворювача тиску на основі мостової MEMS тензочутливої схеми чутливість пристрою складала 1,25 кГц/кПа – 1,55 кГц/кПа в діапазоні тисків 50 кПа -130 кПа.

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

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

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СЕНСОРІВ ТИСКУ

1.1 Застосування сенсорів тиску

Інформація про вимірюваний тиск і його вимірювання за допомогою датчиків тиску важлива в багатьох областях застосування. Деякі приклади, які представляють різні вимірювання тиску, зведені в табл. 1.1.

У наступних підрозділах детально описано три різні приклади застосування: вимірювання атмосферного тиску, вимірювання тиску в автомобільній техніці та вимірювання потоку в дослідженнях літаків.

Таблиця 1.1 - Застосування датчиків тиску

Зразкові області застосування	Приклади необхідності вимірювання тиску
Екологічна інженерія	Атмосферний тиск як параметр погоди
Автомобільна техніка	Тиск повітря в шинах, тиск у паливному баку, тиск повітря на вході, тиск гальмівної рідини
Медичні технології	Артеріальний тиск, внутрішньоочний тиск, дихальний тиск, внутрішньоутробний тиск, внутрішньочерепний тиск, внутрішньонирковий тиск
Технологія будівництва	Тиск води систем водопостачання та опалення
Хімічна інженерія	Тиск як параметр процесу
Техніка безпеки	Тиск в масляних резервуарах, тиск як параметр конструктивного стану будівель
спорт	Тиск повітря під час стрибків з парашутом і планеризму, тиск води під час пірнання

Вимірювання атмосферного тиску

Атмосферний тиск визначається як сила, з якою повітря діє на одиницю площі [1]. На рівні моря середній тиск становить приблизно 101,325 кПа (=1013,25 мбар). Для вимірювання атмосферного тиску використовуються різні види барометричного тиску. В принципі, розрізняють рідинні та нерідинні барометри. Найвідомішим рідинним барометром є ртутний барометр. Вага ртутного стовпа, що заповнює вертикальну скляну трубку, урівноважує атмосферну силу, що діє на резервуар ртуті в основі; ртутний стовп піднімається вище при високому

атмосферному тиску і навпаки. Через свою токсичність сьогодні ртутні барометри більше не використовуються.

Датчики барометричного тиску без рідини також називають анероїдними барометрами або барографами [2]. Усі вони є датчиками абсолютного тиску, показання яких не залежать від погодних умов або висоти. Вони складаються з евакуйованої металевої капсули, яка може деформуватися, і містить міцну пружину, яка запобігає руйнуванню. Скорочення капсули залежить від атмосферного тиску і аналогічно перетворюється, посилюється та відображається механічним індикатором рівня.

Третя — і найсучасніша — група датчиків атмосферного тиску — це мікромехатронні барометри, які виготовлені за допомогою мікротехнологій і мають принаймні один розмір менше 1 мм [4,5]. Мікромехатронні барометри також мають сенсорну комірку (порожнину), що деформується. На відміну від згаданих вище металевих капсул, сама порожнина суцільна і має одну гнучку бічну стінку, утворену тонкою мембраною. Порожнина може мати прямокутну або циліндричну форму, таким чином, мембрана відповідно прямокутна (або квадратна) або кругла. Як і у випадку з датчиками абсолютного тиску на основі капсули, максимальний залишковий тиск всередині мікропорожнини знаходиться в діапазоні кількох Па [6, 7]. Різна товщина мембрани робить сенсор адаптованим до різних діапазонів тиску.

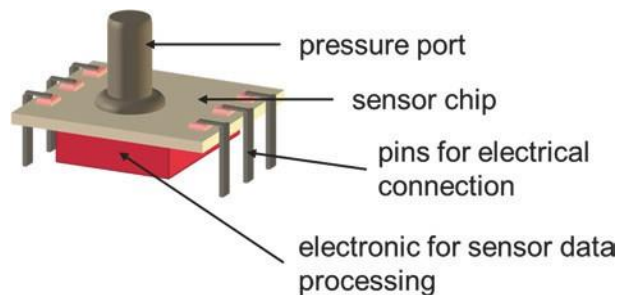


Рисунок 1.1 – Схема комерційного датчика тиску повітря. Виробник: Silicon Microstructures, Inc

Датчик тиску HSA-BARO First Sensor забезпечує діапазон від 60 до 110 кПа) [8-10]. Деформація мембрани (у випадку датчика абсолютного тиску лише кривизна всередину) перетворюється на аналоговий електричний вихідний сигнал (детальний опис у наступних підрозділах). Мікромехатронні барометри можна знайти в метеостанціях, реєстраторах екологічних даних, висотомірах, а також у смартфонах, розумних годинниках і космічних системах, маючи великі переваги, оскільки вони невеликі, легкі, міцні,

надійні та економічні (рис.1.1).

Застосування сенсорів тиску в автомобільній промисловості.

Сьогодні автомобільна промисловість є одним із найбільших ринків для датчиків MEMS. У сучасних автомобілях практично всі системи управління електронні, складаються з великої кількості різних датчиків. Ці датчики мають бути невеликими, енергоефективними, надійними навіть у суворих умовах і придатними для виробництва у великих кількостях за дуже низькими витратами. Три основні сфери застосування: трансмісія, безпека та комфорт. Датчики тиску в основному використовуються в трансмісії та зонах безпеки. Таблиця 1.2 показує вибір різних значень тиску, що вимірюється.

Існує в основному три типи датчиків тиску MEMS для автомобілів:

- Керамічні ємнісні датчики тиску: підходять для суворих умов, з чудовим захистом від електромагнітних перешкод, високою здатністю створювати надлишковий тиск, чудовими ударними та вібраційними характеристиками та довгостроковою стабільністю [10].

- Кремнієві поверхневі ємнісні датчики тиску з мікромашинами: придатні для діапазону низького тиску, призначені для опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) і змінного об'єму повітря (VAV), контролю статичного тиску, моніторингу фільтрів і застосування в медичному обладнанні.

- Кремнієві об'ємні мікромеханічні п'єзорезистивні датчики тиску: сумісні з більшістю рідких і газоподібних середовищ.

Таблиця 1.2 – Зразкові значення автомобільного тиску

Значення тиску для вимірювання	Тип датчика	Діапазон тиску	Температурний діапазон
Тиск теплоносія	Датчик низького тиску	0–100 кПа	–40 – +135 °C
Тиск бічного удару (зміна тиску всередині дверей)	Датчик відносного тиску	50–110 кПа	–40 – +85 °C
Повітряно-паливне співвідношення	Датчик абсолютного барометричного тиску	60–165 кПа	–40 – +125 °C
Турбокомпресор/наддув перед дросельною заслінкою	Датчик абсолютного тиску	10–350 кПа	–40 – +120 °C

Тиск повітря на вході після дросельної заслінки	Датчик абсолютного тиску в колекторі (MAP).	50–400 кПа	–40 – +140 °С
Тиск повітря в шинах	Диференціал (калібр)датчик тиску	100–450/900 кПа	–40 – +125 °С
Тиск паливного баку	Датчик абсолютного або відносного тиску	50–600 кПа	–40 – +135 °С

Продовження таблиці 1.2 – Зразкові значення автомобільного тиску

Тиск масла	Датчик абсолютного або відносного тиску	0,5–5 МПа	–40 – +140 °С
Тиск гальмівної рідини	Датчик абсолютного або манометричного тиску	0–0,1 ... 41 МПа	–20 – +135 °С
Тиск палива в системах прямого впорскування бензину (GDI) і системі Common Rail	Датчик абсолютного високого тиску	0–3,5 ... 350 МПа	–40 – +140 °С

Вимірювання тиску в літакобудуванні.

Одним із ключових завдань дослідження літаків є підвищення підйомної сили, наскільки це можливо (системи високої підйомної сили для майбутніх літаків). Цілі: (а) зменшити споживання палива та (б) забезпечити більш крутий кут зльоту (і посадки). Друга мета — зменшити шумове забруднення аеропорту поблизу житлових районів шляхом швидкого досягнення крейсерської висоти та забезпечення сполучення між містами навіть на короткі відстані (короткий зліт і посадка [STOL]). Ефективним методом впливу на повітряний потік над крилом і таким чином збільшення підйомної сили є видування певного потоку повітря через щілину на поверхні крила [11]. Щоб знати, коли і скільки повітря потрібно видувати, потрібно контролювати потік над крилом. Виміряні дані необхідно безперервно передавати до відповідної системи приводу, створюючи замкнуту систему активного керування потоком.

Відповідна установка датчика потоку складається з двох різних датчиків: датчика тиску та датчика швидкості потоку. Амбітні вимоги цього

додатка полягає в тому, що датчики повинні лежати всередині поверхні крила, не впливаючи на форму поверхні, наприклад, створюючи будь-які кроки. Крім того, датчики піддаються впливу суворих навколишніх середовищ внаслідок ударів частинок, великої різниці температур, води, льоду тощо. Таким чином, датчики мають бути поверхнево пасивними. Це означає, що вони можуть не мати жодних активних елементів, таких як провідники та сенсорні елементи на своїй зовнішній поверхні. Потенційно, вони повинні мати додаткові запобіжні заходи. Додатковими вимогами є висока надійність (або надійне резервування в масиві датчиків), мінімально інвазивний метод застосування та зручність обслуговування. Основним завданням установки датчика потоку є виявлення завихрень, що свідчать про турбулентний потік, який значно зменшує підйомну силу. Вихори можна ідентифікувати за високочастотними змінами тиску до 3 кГц. Тиск знаходиться в діапазоні від 60 до 110 кПа. Відповідно до теореми про вибірку Найквіста-Шеннона, частота вибірки датчика тиску має бути принаймні 2 рази вища за очікувану максимальну частоту вимірювання (тобто ≥ 6 кГц). Таким чином, його власна частота має бути вище 15 кГц ($>$ у 2,5 рази вище частоти дискретизації [12]). Рисунок 1.2 показує поперечний розріз крила з високою підйомною силою та активний контроль потоку. Розумні положення датчиків перед та позаду щілини. До речі: ідея вимірювання та впливу на умови польоту запозичена від птахів. У птахів є механорецептори на кожному фолікулі пір'я, які постійно контролюють потік повітря та вимірюють швидкість потоку, щоб виявити турбулентність [13].

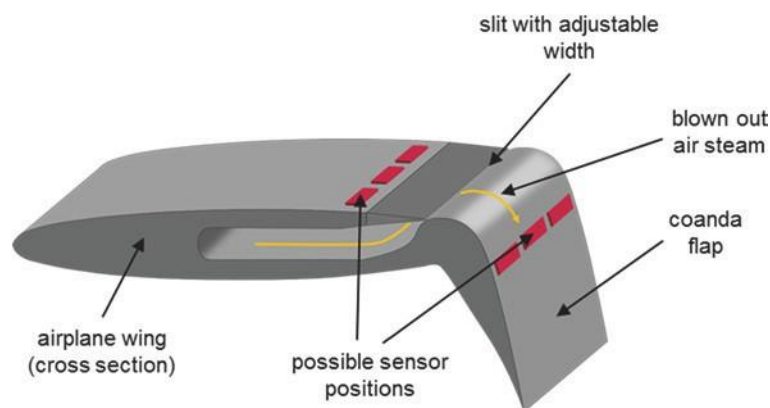


Рисунок 1.2 – Вигляд у розрізі високого підйомного крила з закрилком коанда та щілиною з регульованою шириною для видування потоку, що впливає на потік повітря. Датчики потоку (тиск + швидкість потоку) знаходяться перед або/або позаду щілини

1.2 Проектування та виготовлення п'єзорезистивних датчиків тиску

Два терміни «датчик» і «вимірювач» (або «вимірювач») мають дещо різні значення. Датчик виявляє зовнішні фізичні подразники та реагує особливим чином. Калібр — міра або еталон вимірювання. Він використовується для порівняння цільового стану (калібру) з фактичним станом значення, яке потрібно виміряти. Типовим мірником є лінійка. Через свій порівнювальний характер у деяких літературних джерелах датчики тиску називаються манометрами. У свою чергу, манометричний тиск є сумою атмосферного тиску та тиску, який необхідно виміряти.

Рисунок 1.3 показує фундаментальну функціональну структуру датчика, що передбачає механічну вимірювану величину. Центральна частина — це перетворювач або первинний датчик, який перетворює сигнал стимулу в електричну величину, як правило, з потребою в допоміжному джерелі живлення. На практиці часто не існує жодного принципу сприйняття, який уможливував би пряме перетворення. У цих випадках необхідно використовувати один або більше перетворювачів, щоб кондиціонувати вхідний сигнал таким чином, щоб його можна було перетворити в електричний сигнал. Зазвичай вихідний сигнал датчика не можна використовувати безпосередньо, його потрібно посилити та лінеаризувати, а можливі сигнали перешкод необхідно компенсувати. Все це робиться за допомогою схеми формування сигналу.

Термін «статичний тиск» (ps) має те саме значення, що й «тиск», який є силою, нормальною до поверхні (FN) на одиницю площі (A) нерухомої рідини (рідини або газу) (рівняння.1.1).

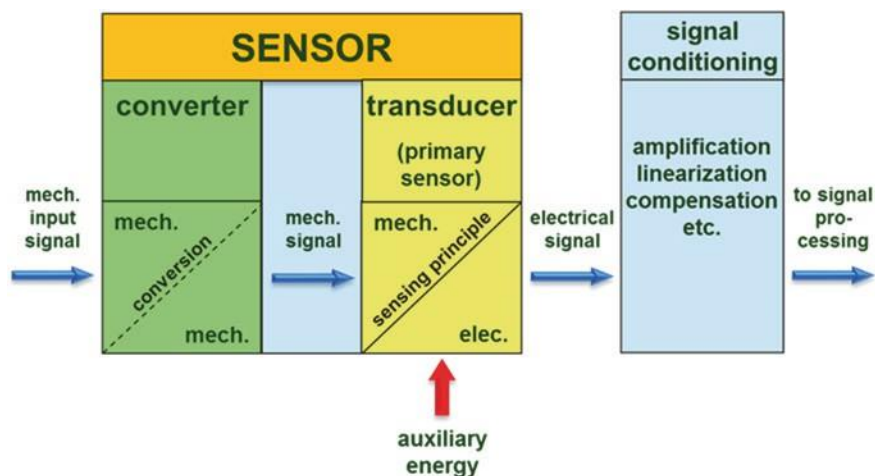


Рисунок 1.3 – Фундаментальна функціональна структура датчиків

$$p_s = \frac{F_N}{A} \quad (1.1)$$

Гідростатичний тиск (p_h) - це сума статичного тиску навколишнього середовища p_s і тиску на дні нерухомого стовпа рідини з густиною рідини D , висотою h_f і під дією сили тяжіння g (вираз 1.2). У деяких публікаціях термін Dgh_f називають «гравітаційний напір» або «гравітаційний тиск».

$$p_h = p_s + Dgh_f \quad (1.2)$$

Динамічний тиск (q) не є тиском у звичайному розумінні. Вона визначається як кінетична енергія на одиницю об'єму частинки рідини з густиною рідини D і швидкістю потоку v (рівняння 1.3).

$$q = \frac{D}{2}v^2 \quad (1.3)$$

Відповідно до принципу Бернуллі, загальний тиск p_t є сумою гідростатичного та динамічного тиску і залишається постійним (рівняння 1.4).

$$p_t = p_s + Dgh_f + \frac{D}{2}v^2 = \text{const.} \quad (1.4)$$

У Міжнародній системі одиниць (СІ) одиницею тиску є паскаль (Па, кПа, МПа). Метрична одиниця бар (бар) походить від одиниці СІ. У метеорології більш популярні одиниці вимірювання мілібар (мбар) або гектопаскаль (гПа). Крім того, тиск подано в торрах (Торр), що приблизно дорівнює тиску, створюваному одним міліметром ртутного стовпа в стовпі. Останній зазвичай використовується як одиниця артеріального тиску. Фунт на квадратний дюйм (psi) — звичайна одиниця США, розроблена з системи (британських) імперських одиниць. У цьому розділі книги всі значення тиску наведені в Па, кПа або МПа. Перерахунок одиниць тиску частково наведено в табл 1.3.

Атмосферний тиск навколишнього середовища на рівні моря (101,325 кПа) є еталонним значенням для всіх інших типів тиску. Тиск вище 101,325 кПа є надлишковим тиском; нижчий тиск називається негативним тиском або вакуумом. Крім того, вакуум диференціюється в грубому вакуумі ($100 \text{ Па} < p < 30 \text{ кПа}$), середнього вакууму ($0,1 \text{ Па} < p < 100 \text{ Па}$), високого вакууму ($1 \cdot 10^{-5} \text{ Па} < p < 0,1 \text{ Па}$) та надвисокого вакууму ($p < 1 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$).

Постачальники датчиків тиску часто вказують діапазон вимірювання за «високим тиском» ($p > 101,325$ кПа), «середнім тиском» (5 кПа $< p < 101,325$ кПа) і «низьким тиском» ($p < 5$ кПа) (рис.1.4), (та наведено в додатку А рис.1).

Таблиця 1.3 – Вибір одиниць тиску та їх перерахунок

одиниця	символ	Перетворення			
	л				
Паскаль (SI)	1 Па	= 1 Н/м ²	= 1 кг/(м · с ²)	= 1 Дж/м ³	
Бар	1 бар	= 100 000 Па	= 1000 гПа	= 100 кПа	= 0,1 МПа
Мілібар	1 мбар	= 0,001 бар	= 100 Па		
Torr	1 торр	= 1,33322 мбар	= 133,3224 Па		
Фунтів на квадратний дюйм	1 psi	= 68,9476 мбар	= 6,894757 кПа		

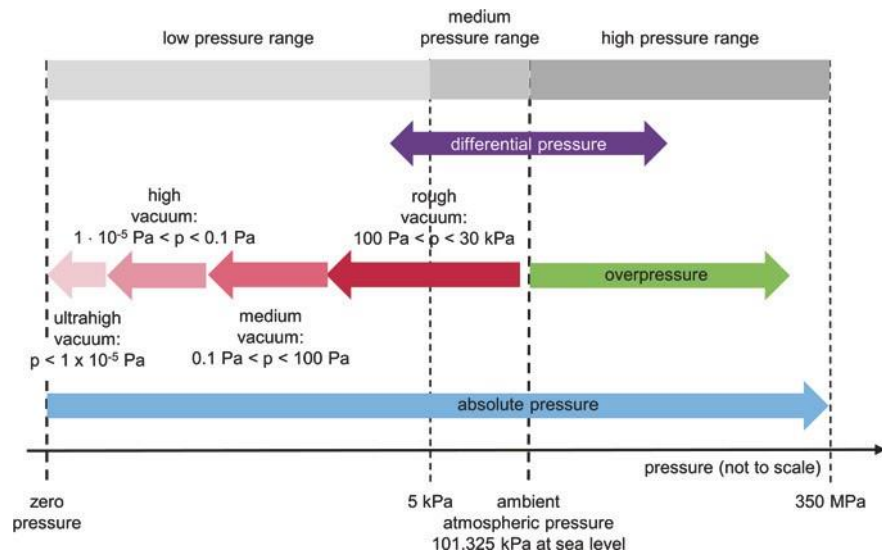


Рисунок 1.4 – Діапазони тиску

Незалежно від принципу роботи, конструкції та діапазону вимірювання датчики тиску можна класифікувати на датчики/манометри абсолютного та диференціального тиску.

Абсолютний тиск вимірюється відносно ідеального вакууму при нульовому тиску. На практиці мікроехатронні датчики тиску неможливо

виготовити з ідеальним вакуумом у порожнині. Зазвичай герметичний вакуум p_0 становить близько 3,45 Па [14]. З цим середнім вакуумом як еталоном датчики абсолютного тиску не залежать від атмосферного тиску і тому не залежать від місця вимірювання (особливо від його висоти) та умов навколишнього середовища (погода).

Датчик перепаду тиску вимірює різницю тиску між двома джерелами тиску (p_1 і p_2). Таким чином, датчики перепаду тиску повинні мати два окремих порти тиску. Якщо одним із джерел є атмосферний тиск навколишнього середовища, то датчик називають манометричним або датчиком відносного тиску. Датчик надлишкового тиску також має порожнину, яка закрита гнучкою мембраною, але ця порожнина відкрита для зовнішнього середовища.

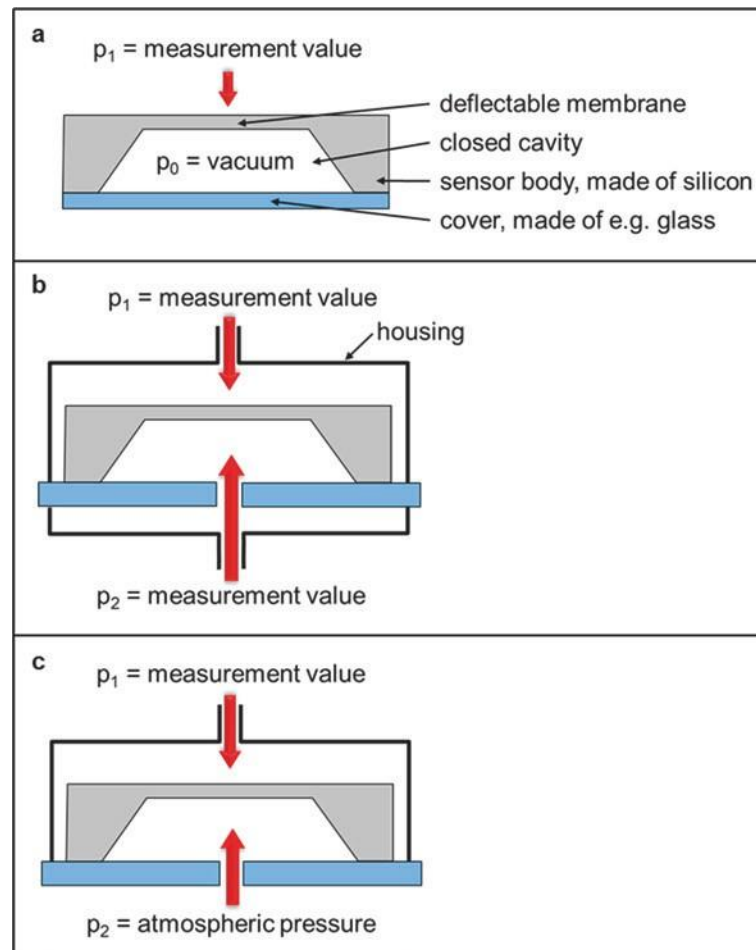


Рисунок 1.5 – Схематичний вигляд абсолютного (а), диференціального (б) і манометричного (с) кремнієвого MEMS датчика тиску

Рисунок 1.5 (та наведено в додатку А рис.2) показує три типи датчиків тиску, виготовлених мікротехнологічним шляхом із кремнієвих 100-пластин із використанням мокрого хімічного травлення, що призводить до типової пірамідальної форми порожнини. Покриття порожнини може бути зроблено,

наприклад, зі скла. Виробництво кремнієвого датчика тиску MEMS детально описано в наступному підрозділі.

Мембранні датчики тиску є аналоговими датчиками. Електричний сигнал передається по кабелю на передавач, який перетворює його в сигнал, який можна зчитувати. Недоліком отриманого великого аналогового тракту передачі є ризик фальсифікації сигналу через електромагнітний шум, корозію роз'єму, опір і повний опір кабелю тощо. Останні датчики пропонують можливість подолати ці недоліки. Вони мають додаткову електронну мікросхему, що перетворює вихідний сигнал у цифровий у безпосередній близькості від датчика. Передача цифрових сигналів є набагато більш безпечною і навіть може бути безконтактною завдяки індуктивному зв'язку. Деякі провайдери називають ці датчики «цифровими датчиками тиску», що, строго кажучи, неправильно, оскільки фактичний сигнал датчика все одно є аналоговим.

1.3 Функціональний принцип роботи п'єзорезистивних датчиків тиску

Важливою особливістю датчиків тиску MEMS є закрита мембрана порожнина. Різні матеріали та різноманітні конструкції дозволяють знайти відповідні датчики тиску для широкого діапазону тиску та багатьох умов навколишнього середовища. У цьому розділі книги особлива увага приділяється об'ємним мікромашинним кремнієвим датчикам тиску. Для них відповідними принципами датчика є ємнісний, п'єзоелектричний, індуктивний і п'єзорезистивний принцип перетворювача. Нижче наведено лише коротке пояснення перших трьох принципів, а потім детальний опис п'єзорезистивного принципу.

Принцип ємнісного перетворювача заснований на ємнісному вимірюванні прогину мембрани. Мембрана виконує роль рухомого електрода, оскільки дно порожнини є нерухомим. Під дією різниці тиску мембрана відхиляється і таким чином змінює відстань між електродами і, як наслідок, ємність. Розміри та конструкція ємнісних датчиків подібні до п'єзорезистивних датчиків тиску [15]. Невелика ємність датчика вимірюється за допомогою додаткової електроніки.

П'єзоелектричний датчик тиску реагує на механічне напруження, що виникає в відхиленій мембрані. Для цього на мембрану наноситься п'єзоелектричний матеріал, наприклад, кварц або п'єзокераміка. Деформація призводить до зсуву електричного заряду на атомарному рівні, який можна макроскопічно виміряти як зміну напруги. П'єзоелектричний датчик може виявляти перехідні процеси тиску, але не може виміряти статичний тиск,

оскільки п'єзоелектричні матеріали демонструють втрати заряду під статичним навантаженням, що спричиняє дрейф вихідної напруги [16]. Датчик може бути розроблений як тонка плівка, прикріплена до вигнутих поверхонь [17].

Індуктивний принцип заснований на котушці з рухомим феритовим стрижнем. Стрижень з'єднаний з мембраною датчика тиску, що призводить до зміни індуктивності при зміні тиску [18].

Можна сказати, що п'єзорезистивний ефект є найбільш часто використовуваним принципом перетворювача для датчиків тиску. П'єзорезистивні датчики тиску зазвичай видають напругу в діапазоні мілівольт при застосуванні напруги збудження (= допоміжної енергії) в однозначному діапазоні напруги. Рекомендується підсилювати сигнал біля датчика. Відповідно до рис.1.3, функціональний принцип а мембранний п'єзорезистивний датчик тиску можна розділити на три етапи:

1. Перетворення тиску p як механічного вхідного сигналу в прогин мембрани, що призводить до механічної деформації.

2. Перетворення механічної деформації ϵ в механічну напругу σ за законом Гука.

3. Перетворення механічної напруги в зміну опору, що виникає як зміна напруги $V_{\text{поза}}$ (Рис.1.6), (та наведено в додатку А рис.3).

Останнє є основним принципом датчика.

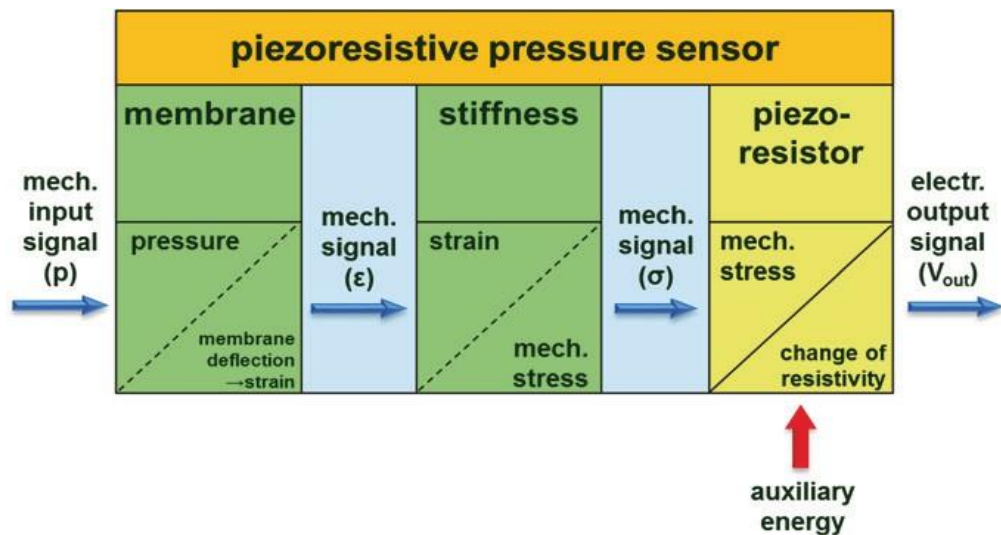


Рисунок 1.6 – Ступінчастий принцип роботи мембранного датчика тиску з використанням п'єзорезистивного ефекту

П'єзорезистивний ефект був відкритий лордом Кельвіном у 1856 році. Термін походить від грецького $\pi\acute{\epsilon}\zeta\omega$, що означає «тиснути» або «стискати».

Якщо провідний або напівпровідниковий матеріал деформується, створюючи деформацію (ϵ) і механічну напругу (σ), електричний опір R змінюється як функція питомого опору ρ , довжини L і площі поперечного перерізу A провідник (рівняння 1.5).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1.5)$$

У провідних матеріалах зміна питомого опору ρ має незначний вплив, а геометрична зміна домінує (рис.1.7).

Зміна площі поперечного перерізу може бути описана за допомогою числа Пуассона ν (рівняння 1.6).

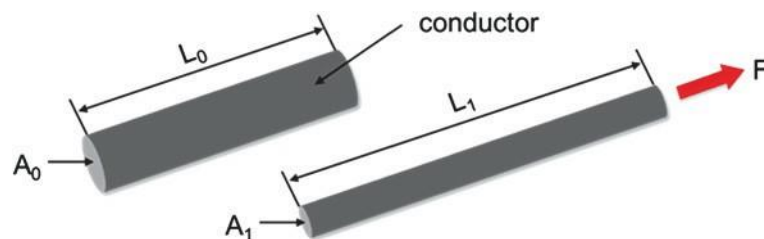
$$\nu = \frac{\epsilon_{\text{lateral}}}{\epsilon_{\text{axial}}} \quad (1.6)$$

Для провідних матеріалів (зазвичай металів, таких як мідь, алюміній тощо) зміну опору ΔR можна записати як (рівняння 1.7):

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu) \frac{\Delta L}{L} = K \frac{\Delta L}{L} \quad (1.7)$$

де K -фактор, що представляє чутливість до деформації. Типові значення коефіцієнта Пуассона для металів становлять від 0,3 до 0,4, отже коефіцієнт K дорівнює приблизно 2. У напівпровідникових матеріалах, таких як кремній, п'єзорезистивний ефект визначається зміною питомого опору ρ , а коефіцієнт K набагато вищий (до 200).

Щоб пояснити, як відбувається зміна ρ , зробимо екскурс до кристалографічного і електричні властивості монокристалічного кремнію необхідні.



$$L_1 > L_0 \text{ and } A_1 < A_0 \Rightarrow R_1 > R_0$$

Рисунок 1.7 – Геометрична зміна провідника, викликана прикладеною силою F , впливає на електричний опір

Розгляд того, як розташувати п'єзорезисторний міст Уїтстона в

мембрані датчика тиску, призводить до основного завдання розробки відповідної конструкції датчика. Оскільки конструкція мікропристроїв загалом значною мірою залежить від методів виготовлення, які будуть використовуватися, і вони обмежені ними, їх слід уточнити спочатку. Приклад датчика тиску, який детально описано в цьому розділі книги, виготовляється:

- за допомогою кремнієвої пластини 100,
- з такими методами осадження тонких плівок, як термічне окислення кремнію (згадане пізніше), плазмове хімічне осадження з парової фази (PECVD) нітриду кремнію та знову діоксиду кремнію, а також розпилення металевих провідних шляхів,
- за допомогою фотолітографії для перенесення шаблонів, розроблених САД, на маскувальний шар тонкої плівки або кремнієву підкладку,
- з технікою мокрого хімічного травлення тонких плівок,
- з дифузійним легуванням для створення p'езорезисторів (як уже пояснювалося вище),
- і з анізотропним вологим хімічним травленням кремнію для формування мембрани покрита порожнина.

Рисунок 1.8 показує три можливі варіанти мембранного пристрою, виготовленого з кремнієвої пластини 100 методом анізотропного вологого хімічного травлення.

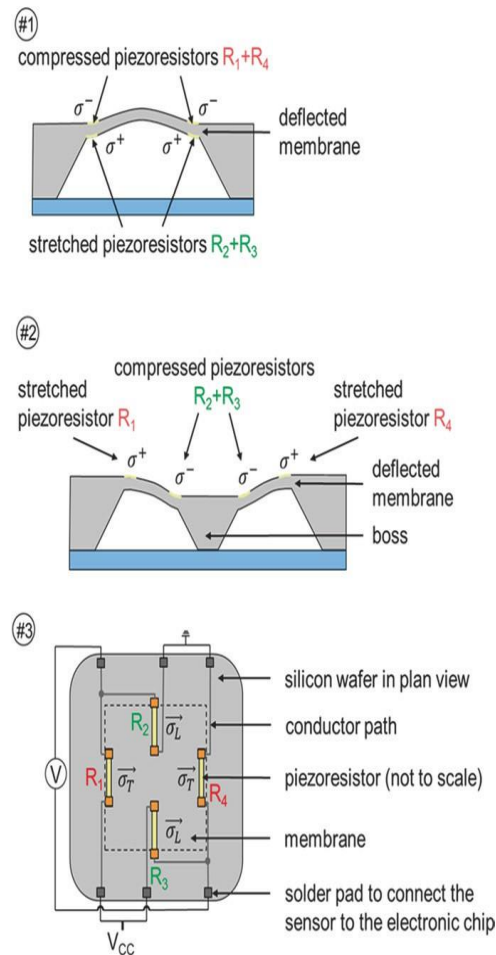


Рисунок 1.8 – Три можливі варіанти розміщення чотирьох п'єзорезисторів Вітстона в кремнієвій мембрані датчика тиску. Версії №1 і №2 зображені у вигляді розрізу датчика тиску, версія №3 показана як вид у плані з таким самим поперечним перерізом, як версія №1

Чотири резистори розташовані таким чином, що два з них завжди підвищують, а два інших зменшують напружений стан. Версія №1 використовує протилежні напруги σ^- і σ^+ на верхній і нижній стороні мембрани відповідно. (Напружені стани зворотні, якщо мембрана вигнута всередину.) П'єзорезистори розташовані в областях максимального напруження, тобто прямо на краю мембрани. Мембрана у версії №2 посилена і, отже, випрямлена в середині завдяки так званому виступу, твердій частині на нижній стороні мембрани. Таким чином досягається те, що обидва, σ^- і σ^+ , зустрічаються на стороні верхньої мембрани. (Як і в №1, напружені стани змінюються, якщо мембрана виступає назовні).

П'єзорезистор Вітстоуна

Таким чином, міст може бути повністю складений на поверхні пластини, яку набагато легше виготовити. Крім того, втулку можна використовувати як захист від механічного перевантаження мембрани, запобігаючи її надмірному вигину, принаймні в одному напрямку. Недоліком

є те, що мембрану потрібно збільшити (або потоншити, але це обмежено виготовленням), щоб отримати таку ж жорсткість i , отже, таку ж чутливість, ніж без бобини. Версія №3 – це знову мембрана без виточок, але з використанням функції р-легування, щоб мати майже однакові значення πL і πT , але з протилежними знаками. Як і у версії №1, чотири п'єзорезистори розташовані прямо на краях мембрани, але всі на верхній стороні. Дві з них розташовані паралельно краю мембрани, піддаючись поперечній напрузі σT . Дві інші зазнають дії поздовжнього напруження σL .

Щоб визначити оптимальне положення, конструкцію та геометрію п'єзорезисторів, рекомендується спочатку розробити модель FEM, щоб теоретично моделювати вплив прогину мембрани, а точніше механічних навантажень, що виникають, на зміну опору i , отже, на поведінку датчика (рис.1.9), (та наведено в додатку А рис.4). Під час цього етапу розробки може стати очевидним, що для досягнення необхідної продуктивності датчика необхідно використовувати комбінацію методів виробництва, відмінних від тих, що вважалися спочатку. На основі результатів моделювання часто потрібне перепроектування датчика. Це тягне за собою перезапуск процесу розробки та дослідження нових граничних умов. Такий процес розробки називається ітераційним і є характерним для мікросистемних технологій.

Перш ніж перейти до теми виготовлення мембранного пристрою, пояснюються застосовані передні процеси. Це очищення пластини, термічне окислення поверхні кремнієвої пластини та видалення незамаскованих ділянок тонких плівок шляхом травлення. Фотолітографія, а також плазмове хімічне осадження з парової фази (PECVD) нітриду кремнію та діоксиду кремнію, а також осадження металу також належать до початкових процесів.

Класифікація мікротехнологій на початкові та внутрішні процеси походить від напівпровідникової технології. Розрізняють процеси виробництва мікросхем між виготовленням на рівні пластини та зондуванням пластини (передній кінець) і кріпленням та технології підключення, починаючи з поділу мікросхем (back-end). В мікротехнології додано процеси, що використовуються для глибокої обробки матеріалу підкладки.

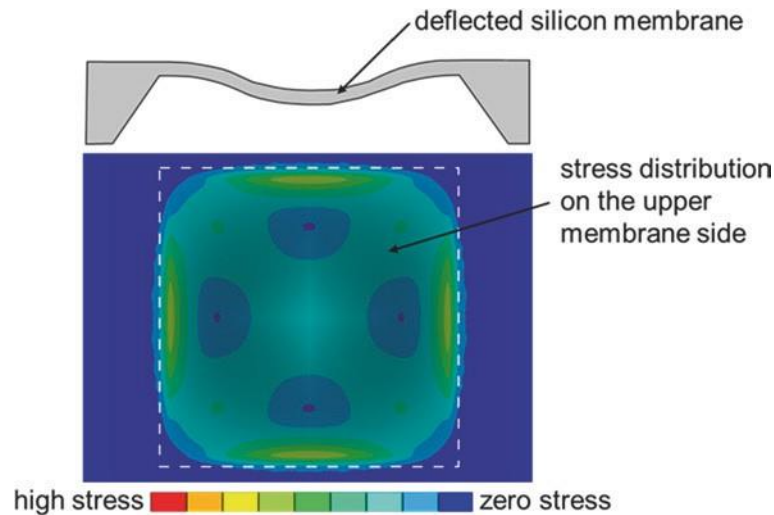


Рисунок 1.9 – Зразкове моделювання FEM розподілу напруги на верхній стороні квадратичної мембрани, яка відхиляється

Цю третю область зазвичай називають «мікрообробкою» (рис.1.10) і розміщується між двома іншими відносно всього потоку процесу. Найпершим кроком до виготовлення будь-якого кремнієвого мікропристрою є базове очищення сирого субстрату. Весь процес очищення сам по собі вже короткий процес.

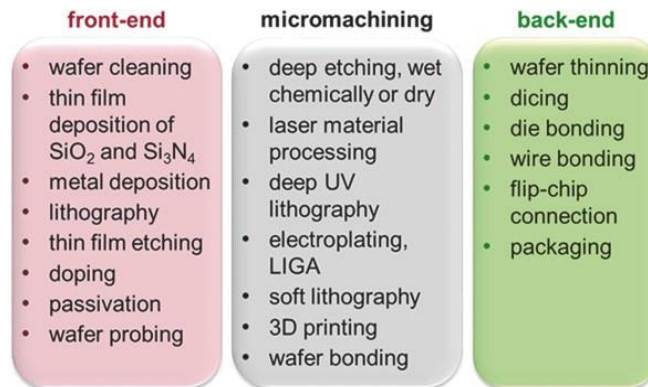


Рисунок 1.10 – Мікротехнології, пов'язані з трьома областями переднього кінця, мікрообробки та внутрішнього

1.4 Сенсорні RFID-мітки

BRIDGE (Розбудова радіочастотної ідентифікації для глобального довкілля) – це проект RFID вартістю 13 мільйонів євро, який триває 3 роки та частково фінансується (7,5 мільйонів євро) Європейським Союзом. Метою проекту BRIDGE є дослідження, розробка та впровадження інструментів для забезпечення розгортання додатків EPCglobal у Європі. В останні роки автоматична ідентифікація з

підтримкою RFID викликала великий інтерес. Різні галузі усвідомили важливість відстеження активів у режимі реального часу або підвищення видимості активів. Будь-який актив, будь то особа, автомобільна деталь, об'єкти в ланцюжку дистрибуції, книга в бібліотеці, товар у дорозі тощо, збільшує свою вартість, забезпечуючи видимість місця розташування. Якщо окрім відстеження, ми можемо записати умови навколишнього середовища або стан самого об'єкта, як-от температуру, тиск, вологість, нахил, прискорення та освітленість тощо для будь-яких відхилень від нормального чи простого запису. Тоді ми маємо всі дані, необхідні для прийняття зважених рішень щодо об'єкта.

Всюди суцї етикетки зі штрих-кодом, які спровокували революцію в системах ідентифікації, у все більшій кількості випадків виявляються неадекватними [21].

Інтеграція датчиків (особливо на основі кремнію) у напівпасивні мітки RFID нещодавно викликала великий інтерес серед спільноти RFID. Лише кремній може задовольнити агресивні вимоги щодо економічності більшості нових програм. Кремнієві датчики також виграють від величезних ресурсів, розроблених для основної електроніки: мікропроцесори, пам'ять і передові лінійні мікросхеми. Перевага використання технології кремнієвих сенсорів полягає не лише у підвищеному співвідношенні ціна/продуктивність, але й у неймовірних обсягах виробництва, які дає виробництво ІС [22].

Теорія та передумови

Технологія, яка створює основу для кремнієвих сенсорів і мікроструктур, називається мікрообробкою. Більш точно це визначається як тривимірне моделювання кремнію за допомогою стандартної або модифікованої технології пакетної обробки напівпровідників. Кремнієва мікрообробка поступово змінила уявлення сучасних інженерів про фізичні датчики. Поле механічних структур у кремнії, зокрема сенсорів, привернуло багато уваги в останні роки [23].

Ринок кремнієвих датчиків рухається в тому ж напрямку, що й інші електронні компоненти: вищий рівень інтеграції. У випадку кремнієвих датчиків існує два варіанти можливої інтеграції на чіпі: електронна інтеграція та механічна інтеграція [22].

Кремній широко використовується у виробництві суто електронних інтегральних схем, де використовуються лише його електричні властивості. Електронна інтеграція використовує електричні властивості кремнію. Його інтеграція спирається на розроблену технологічну форму на монолітних і гібридних інтегральних схемах. Основний чутливий

елемент включає всього чотири резистори. Ці резистори вимагають додаткового формування сигналу, щоб забезпечити корисний сигнал для кінцевого користувача. Традиційно все формування сигналу виконувалося поза мікросхемою датчика за допомогою дискретних компонентів. Різні рівні формування сигналу на мікросхемі мають як переваги, так і недоліки. Чим вищий рівень електронної інтеграції мікросхеми, тим більша вартість розробки та інструментів. Однак вищий рівень інтеграції пропонує нижчу вартість у великих обсягах.

Механічна інтеграція використовує механічні властивості кремнію. Існуючі механічні конструкції виготовляються за традиційною технологією. Потенціал зменшення розміру механічних компонентів на одному чіпі відкриває доступ до низьковартісної технології серійного виробництва великого обсягу.

За останні кілька десятиліть у мікроелектромеханічні системи (MEMS) було вкладено значні дослідження, розробки та гроші. MEMS відноситься до пристроїв, виготовлених за технологією масового, поверхневого або мікрівиробництва LIGA [24].

Іншою помітною технологічною тенденцією є включення живлення мікроконтролера для виконання різних функцій на рівні датчика.

1.5 Таксономія тегів RFID із підтримкою датчика

У цьому розділі представлено термінологію, яка використовується в усьому документі. Важливо знати основні поняття, пов'язані з мітками RFID, щоб мати можливість зрозуміти проблеми та рішення, з якими ми маємо справу в цьому документі. Термінологія, яка використовується в цьому документі, є загальноприйнятою серед спільноти RFID.

Система RFID — це система бездротової ідентифікації, що містить зчитувач RFID, мітки, локальне програмне забезпечення/інфраструктуру та серверну систему (наприклад, систему планування ресурсів підприємства (ERP)). RFID-мітка є ідентифікаційним пристроєм у системі та містить принаймні мікрочіп, приєднаний до антени, яка надсилає дані на зчитувач RFID. RFID-мітка містить унікальний серійний номер, а також може містити додаткові дані. Мітки RFID можуть бути активними, пасивними або напівпасивними. Мітка RFID завжди містить ознаку ідентифікації, незважаючи на те, що вона активна, пасивна або напівпасивна.

Різниця між типами тегів

Пасивний тег: Мітка RFID, яка не містить джерела живлення.

Зчитувач передає радіочастотні сигнали. Це електромагнітне поле, створене зчитувальним пристроєм, живить тег і дозволяє йому надсилати інформацію, що зберігається на чіпі.

Напівпасивний тег: Клас тегів RFID, які містять джерело живлення, наприклад батарею, для живлення схеми мікročіпа. На відміну від активних тегів, напівпасивні теги не використовують акумулятор для зв'язку зі зчитувачем. Комунікація здійснюється абсолютно так само, як і пасивні теги. Напівпасивні теги можуть бути неактивними, доки не будуть активовані сигналом від зчитувача. Це економить заряд батареї та може подовжити термін служби мітки.

Активний тег: Клас тегів RFID, який містить джерело живлення, наприклад батарею, для живлення схеми мікročіпа. Активні мітки передають сигнал на зчитувач і можуть бути зчитані з 100 футів (35 метрів) або більше.

датчик: Електронний пристрій, який виробляє електронний сигнал у відповідь на фізичний подразник. Датчики все частіше інтегруються в RFID-мітки, щоб дозволити виявити подразник у визначеному місці. Приклад: моніторинг температури охолодженого продукту. Датчик може бути інтегрований до будь-якого з вищевказаних класів.

Класи тегів EPCglobal

Паралельно з класом 1 EPCglobal розширює також класи тегів з більш високою функціональністю, які стосуються повністю пасивних тегів зворотного розсіювання.

Теги класу 2 залишаються пасивними, але виходять за межі класу 1, додаючи такі можливості, як автентифікований доступ.

Теги класу 3 визначаються як пасивні мітки, що працюють від батареї, які обмінюються даними за допомогою методів зворотного розсіювання пасивних міток, але отримують живлення від батареї замість використання радіочастотної енергії від зчитувача. Це дозволяє значно розширити діапазон, зберігаючи перевагу класу 1 мінімальної складності тегів.

Теги класу 4 також працюють від батареї, але повністю активні та можуть отримувати та передавати незалежно, що забезпечує ще більший радіус дії та більшу стійкість до перешкод.

RFID-мітки з підтримкою сенсора

RFID-мітка з підтримкою датчика (пізніше також: «сенсорна мітка») — це RFID-мітка, яка містить датчик для моніторингу деяких фізичних параметрів (наприклад, температури), але також містить ту саму ідентифікаційну функцію, що й «звичайна» RFID-мітка. Такий вид

сенсорної мітки може належати до класу 2, класу 3 або класу 4 у класифікації міток EPCglobal. Будучи повністю пасивною, сенсорна мітка класу 2 може вимірювати фізичні параметри (використовувати датчики) лише за умови живлення від запитувача. Оскільки теги класу 3 працюють від батареї, вони можуть працювати незалежно. Тому він може містити функції журналювання для відстеження результатів вимірювання як функції часу або може записувати заздалегідь визначені події. Перевагою 4 класу є підвищена надійність зчитування та відстань.

1.6 Корисність RFID-міток із підтримкою сенсора

Прийняття RFID прискорилося протягом останніх років. Основним сприятливим фактором стала ратифікація загальноприйнятих стандартів (головним чином ISO18000-6C) і, отже, наявність взаємно сумісного апаратного забезпечення. Зараз ці мітки RFID використовуються для багатьох застосувань, таких як управління ланцюгом поставок, управління поверненнями активів і незавершені роботи у виробництві. Встановлення та підтримка необхідної RFID та IT-інфраструктури завжди є інвестицією, яку слід використовувати ефективно. Теги з увімкненим датчиком можуть використовувати ту саму інфраструктуру.

Теги з підтримкою сенсора мають вищу перевагу перед багатьма іншими конкуруючими технологіями: автоматизований збір даних зі стандартизованою (і навіть потенційно існуючою) інфраструктурою. Існують різні функції додавання вартості, які можуть увімкнути сенсорні мітки: температурні мітки для надання температурного профілю всього холодового ланцюга швидкопсувних продуктів (як показано в розділі 6); мітки датчика прискорення, щоб забезпечити докази ударів під час транспортування цінних крихких предметів; електронні ярлики з пломбами, щоб забезпечити докази фальсифікації будь-якого транспортованого предмета або упаковки продукту навіть без візуального огляду. Але це лише кілька прикладів потенційного використання.

Думаючи про RFID-мітки з підтримкою сенсора, ми не повинні забувати про основну функцію RFID: унікальну ідентифікацію об'єкта. Ця функція все ще є важливою частиною RFID-міток із підтримкою датчика, а також полегшує зв'язок даних датчика з конкретним об'єктом.

Існуючі продукти є хорошими орієнтирами для будь-кого, незалежно від позиції в ланцюжку створення вартості. Патентне дослідження є традиційним способом отримати уявлення про рівень технології. Теги з підтримкою датчиків були б неможливими без

датчиків, вбудованих у ІС.

Основна увага приділяється подібним інтегрованим датчикам на основі RFID, але також представлені деякі продукти, які можна замінити сенсорною міткою. Представлені як функціональні (наприклад, мета використання, протокол зв'язку, можливість реєстрації даних), так і нефункціональні (наприклад, розмір, термін служби, довговічність).

Сучасні ринки RFID-міток із підтримкою сенсорів ще досить незрілі. Небагато виробників пропонують бірки з функцією сенсора. Тих, хто вже пропонує рішення або продукти, можна легко назвати піонерами в цій галузі RFID. Найважливіші висновки (найближчі до обсягу цього документа) представлені в наступних параграфах.

«CAEN – A927 Temperature Logger UHF Semi-Passive Tag» — це УВЧ напівпасивна UHF RFID-мітка, яка відстежує температуру як функцію часу. При звичайному використанні термін служби батареї становить приблизно 3 роки. Тег можна використовувати як приклад для моніторингу температури в усьому ланцюжку постачання медичних продуктів або швидкопсувних харчових продуктів. Тег відповідає стандарту ISO 18000-6B. [33]

«Infratab – Freshtime Tag» — це напівпасивна RFID-мітка, сумісна з ISO UHF 18000-6B. Відповідно до веб-сайту виробника, ISO 18000-6C (gen2) і ISO HF 15693/18000-3 знаходяться в стадії розробки. Мітки Freshtime використовуються для контролю температури швидкопсувних продуктів. Термін служби від 1 дня до 3+ років залежно від батареї та налаштувань. Після програмування інформації про швидкопсувний товар тег може працювати незалежно та сповіщати користувача, коли це необхідно. Ці попередження можуть включати порушення температурного порогу, час, що минув, або вони можуть базуватися на розрахунках терміну придатності. Також більш детальні дані та історію можна отримати за допомогою запитів RFID. [34]

«KSW – VarioSens Basic» — це напівпасивна ВЧ-мітка RFID розміром з кредитну картку. Тег відповідає стандарту ISO 15693-3. Тег дозволяє користувачеві вимірювати температуру, порівнювати температуру зі стандартними значеннями та зберігати відповідну інформацію. Цю інформацію може збирати зчитувач RFID. Залежно від застосування та інтервалу вимірювання етикетку можна використовувати повторно. [35]

«ALIEN – Battery Assisted Passive Tag» — це тег зворотного розсіювання далекого радіусу дії, що працює в діапазоні ISM 2,45 ГГц. На мітці є літієва батарея на 220mAh, яка забезпечить довгі роки роботи.

Тег можна сполучати з будь-яким датчиком через шину I2C (необхідна спеціальна програма). Стандартне сімейство продуктів пропонує версію з вбудованим датчиком температури. У цій версії з підтримкою сенсора розмір пам'яті становить 4 Кб. Дальність читання/запису надійна до 30 м. [36]

«American Thermal – Log IC» — це активна HF RFID-мітка, яку можна використовувати як сторожовий таймер у чутливих до температури середовищах або середовищах з температурним регулюванням. Тег дозволяє контролювати температуру як середню кінетичну температуру та як функцію часу. Мітку можна запрограмувати на відображення попереджувальної лампочки, якщо температура впала нижче зазначеного значення. Обіцяно 64000 читань. Бирка має ліцензію на використання як багаторазової або одноразової. [37]

«*Montalbanotechnology – MTСенс*» це HF RFID смарт-мітка з формою та розміром кредитної картки. Її можна розмістити на плоских або округлих поверхнях. Мітка отримує дані про температуру як функцію часу. Дані можна зчитувати будь-коли протягом життєвого циклу пристрою, а також після того, як акумулятор розрядиться. Акумулятор прослужить не менше чотирьох місяців. Мітка сумісна зі стандартом RF-ID ISO 15693. [38]

«Savi – Sensor Tag» — активна RFID-сенсорна мітка для металевої тари. Мітка працює на робочій частоті 433 МГц. Бирка дозволяє користувачеві контролювати як температуру, так і вологість металевих контейнерів під час транспортування та зберігання. Також доступні більш вдосконалені датчики, які включають датчики дверей, світла та удару. Її можна використовувати для моніторингу безпеки та цілісності відправлень. Тег подає читачеві тривогу в режимі реального часу, якщо зібрані дані перевищують або опускаються нижче встановленого діапазону, визначеного користувачем. Очікуваний термін служби батареї становить близько 4 років при звичайному використанні. Робочий діапазон досягає приблизно 100 м з Savi Fixed Reader. [39]

«Microstrain – EmbedSense» — пасивна RFID-мітка, що використовує частоту 125 кГц. Бирка призначена для обертових машин, розумних конструкцій і медичних приладів. Він підходить для використання в суворих умовах. Мітка може вимірювати температуру до 150°C і відцентрову силу до 60 000 g. Відстань зчитування зазвичай знаходиться в діапазоні від 25 до 50 мм. [40]

«Axcess Inc – Сімейство активних датчиків» включає багато різних типів активних тегів RFID, що використовують частоту 315 МГц.

Залежно від моделі їх можна використовувати для ідентифікації осіб або транспортних засобів. Термін служби становить близько 1-3 років, а радіус дії становить близько 10 м за нормального використання. Залежно від моделі тег може зберігати дані про температуру, вологість або радіацію. [41]

«*Bioett – біосенсор*» являє собою комбінацію штрих-коду та пасивної RFID-мітки. Біосенсор буде реагувати на температуру та час, збільшуючи силу електричного сигналу. Цей сигнал збирається ручним сканером, а також ідентифікатор датчика.

«*Evigia – EV524*» Платформа включає сімейство продуктів, які працюють на частоті 2,4 ГГц. Мітки можна використовувати для вимірювання температури, вологості та вібрації. У стандартну комплектацію входить акумулятор, здатний працювати до 2,5 років. З більшим довгостроковим пакетом термін експлуатації може досягати 4 років. Радіус зчитування становить понад 60 м з ручним зчитувачем. Мітку можна налаштувати на тривогу, коли вимірювання перевищують допустимий діапазон. [42] «*Bisa - ActiveTag*» включає сімейство з трьох активних тегів, що працюють у діапазоні ISM 2,45 ГГц. Тег датчика температури дозволяє користувачеві контролювати температуру позначеного елемента. Мітка з датчиком вібрації може виявляти безперервну або імпульсну вібрацію чи удари. Її можна використовувати, наприклад, для вимірювання прискорення. Дальність зчитування від 30 до 50 метрів. [43]

«*Сурас - SecurePak*» це поштовий пакет, який включає зберігання даних і виявлення несправностей і пошкоджень. У комплект входить вбудований датчик температури. SecurePak має радіус зчитування 5 мм. Він використовує частоту 13,56 МГц і сумісний із ISO 15693. [44]

«*G2 Microsystems – G2C501*» це активна УВЧ-мітка, яка може поєднуватися з датчиком руху, температури, безпеки, удару, вологості, радіації або тиску. Датчик може розбудити тег, коли виконуються заздалегідь визначені умови. Вимірювання можна зберігати в енергонезалежній пам'яті на кристалі або у зовнішній флеш-пам'яті, якщо точка доступу або зчитувач недоступні. Дані можуть бути передані через точку доступу 801.11, зчитувачі ISO 24730-2 або зчитувачі EPC. [45]

«*Рішення Identec – i-Q32T*» являє собою активну УВЧ-мітку з датчиком температури. Він може отримувати дані на відстані до 30 м від портативного пристрою та до 100 м від стаціонарного запитувача. Мітка має термін служби батареї понад 6 років. Мітка доступна з внутрішнім

або зовнішнім датчиком температури, який може вимірювати температуру позначеного елемента через визначені інтервали.

“Scanpak's - TTB-434-01” є активним тегом класу IV. Є чотири різні моделі, які містять датчик світла, тиску, температури або ваги. Усі ці моделі мають датчики тампера, рівня заряду батареї та удару. Датчик удару пробуджує мітку при її переміщенні. Тег працює на частоті 434 МГц і може спілкуватися зі зчитувачем на відстані 100 м і більше.

На ринках існує кілька різних технологій, які конкурують із сенсорними мітками RFID. Незважаючи на те, що ці інші датчики майже без винятку виготовляються лише для зондування, вони досить великі та дорогі. Найважливішими конкурентами є реєстратори даних, індикатори та WSN (бездротова сенсорна мережа). Звичайний тег RFID, ймовірно, все одно прикріплений до упаковки, тому додавання тегу датчика не є великою зміною. Як було сказано раніше, сенсорний тег може зберігати дані так само, як і реєстратори даних. Перевагами реєстраторів даних є їх кращі характеристики. Залежно від моделі, реєстратор даних може вимірювати напругу, струм і деякі інші одиниці, які недоступні з датчиком. Але через їх розмір і ціну немає аргументів для використання реєстратора даних як частини логістичного ланцюга.

Іншою конкуруючою технологією є сімейство індикаторів. Зазвичай це одноразові, дешеві та прості клейкі штампи, які можна розмістити на сухій поверхні. Однією з найкращих переваг індикаторів є їх видимість. Вони служать візуальним захистом від необережного поводження. На відміну від сенсорних міток, індикатори не можуть зберігати дані вимірювань і часу. Зазвичай індикатор має лише одне вимірювання, яке може бути, наприклад, температурою, ударом, вологістю або тиском. У ситуаціях, коли потрібно більше ніж одне вимірювання, потрібні декілька індикаторів замість використання лише однієї мітки датчика. Сенсорна мітка може досягати ширшого діапазону вимірювань і є точнішою, ніж індикатор. Якщо ви вже використовуєте звичайну мітку RFID у своїй системі, немає вагомих аргументів для використання індикатора замість зміни звичайної мітки на мітку датчика.

Бездротова сенсорна мережа (WSN) — це загальний іменник для автономних сенсорних вузлів, які можуть спілкуватися один з одним, щоб створити спеціальну мережу. Це означає, що кожен датчик підтримує алгоритм багатопрхідної маршрутизації (тобто кілька вузлів можуть пересилати пакети даних на базову станцію). Мережі потрібен один вузол шлюзу для доступу до даних датчиків. Ця технологія може задовольнити вимоги додатків, де також можна використовувати сенсорні

мітки. Кожен вузол повинен мати унікальний ідентифікатор. Однак такий підхід досить важкий. Вузли, які спілкуються один з одним і утворюють спеціальну мережу, потребують складних алгоритмів і енергії для виконання цих алгоритмів. Більш енергоефективний метод полягає у використанні одного зчитувача як «основного», як це зроблено з RFID. Тому технології WSN і RFID стають все ближче одна до одної.

Патентне дослідження є одним із методів оцінки сучасного стану RFID в цілому. Опитування патентного пошуку було розпочато з пошуку патентів, які містили RFID та датчик. Досить швидко стало очевидно, що дві різні сфери популярніші за інші. Ці дві області, де; датчики тиску в шинах і управління холодним ланцюгом. Потім опитування було продовжено, зосередивши пошук на цих двох областях. Обидва пошукові запити були зроблені з використанням бази даних PatBase. Пошук проводився в назві та в розділах анотації патентів.

1.7 Контроль тиску в шинах

Пошук було розпочато з оцінки різних областей пошуку. Досить скоро стало очевидно, що датчики тиску в шинах мають багато патентів, пов'язаних з ними. Причина цього полягає в тому, що наприкінці 1990-х років у США понад 100 смертей були спричинені аваріями з перевертанням, які були спричинені розривом протектора в шинах Firestones. Це змусило адміністрацію президента Білла Клінтона опублікувати закон про протектори, який зобов'язує використовувати відповідну систему контролю тиску в шинах, щоб попередити водія про серйозне зниження тиску в шинах. Загалом було знайдено 26 патентів, які використовують RFID для визначення тиску в шинах. Вони наведені в таблиці 1.

Патенти шукали за допомогою двох різних пошукових запитів щодо міток датчиків RFID у датчиках тиску в шинах. Запити мали невеликі відмінності у підході до теми. Термін пошуків не обмежувався, хоча акт Клінтон був складений ще в 90-х роках. Таким чином, найстаріший патент, перерахований тут, який стосується датчиків тиску в шинах і радіотехнологій, датований 13 січня 1971 року. Крім того, географічна область не була обмежена, оскільки патенти, дійсні в ЄС і США, часто застосовуються в інших областях і навпаки.

Запит для контролю тиску в шинах №1:(RFID або радіочастотна ідентифікація або тег або транспондер або інкрустація або етикетка) і датчик і (температура або тиск або прискорення*)

Запит для контролю тиску в шинах № 2:(RFID або радіочастотна ідентифікація або тег або транспондер або інкрустація або етикетка) і датчик і пасивний.

Таблиця 1.3 – Патенти щодо вимірювання тиску в шинах

Патент	Назва патенту
US 7061380 B1	Мітка моніторингу та запису з радіочастотним інтерфейсом та індикатором несправності
WO 06059822 A1	Безпотужний/бездротовий датчик на основі поверхневої акустичної хвилі з тип збирання енергії
US 6255940 B1	Прилад для контролю стану шин
US 6970100 B2	Температурний тег і система моніторингу, запису та звітності
US 20050242939 A1	Система контролю тиску в шинах
US 6720866 B1	Пристрій радіочастотної ідентифікації мітки з сенсорним входом
США 6854324	Пристрій контролю шин
US 20030080862 A1	Система контролю тиску в шинах
US 6788192 B2	Транспондер для шини, шина з транспондером і спосіб виготовлення
US 6712276 B1 Заявка	Спосіб і апаратура для автоматизованого вимірювання властивостей швидкопсувних продуктів споживання
US 6544614 B1	Упаковка з термочутливою етикеткою
US 5483827 A	транспондер з активною інтегральною схемою та сенсорний апарат для зондування
США 6087930	транспондер з активною інтегральною схемою та сенсорний апарат для зондування
Заявка WO 9929524 A1	Датчик тиску в шині і спосіб його використання
GB 2327755 A1 Заявка	етикетка з датчиком температури
US 5540092 A	система і метод контролю пневматичної шини
Заявка WO 9736758	система і метод контролю пневматичної шини

За останні кілька десятиліть датчики стали основними компонентами комунікаційних пристроїв. Датчики, визначені як [19] «пристрої, які перетворюють (або перетворюють) фізичні величини, такі як тиск або прискорення (так звані заходи), у вихідні сигнали (зазвичай

електричні), які служать вхідними для систем керування», є мостами, що з'єднують зовнішній аналоговий світ. з цифровим світом, який можна легко аналізувати та обробляти. З іншого боку, швидкий розвиток технології RFID відкриває абсолютно нові можливості для розвитку датчиків.

В результаті виведено мітки з підтримкою сенсора RFID, які можна використовувати в таких сферах, як відстеження проектів, моніторинг навколишнього середовища, автомобільні електронні системи, телемедицина та контроль виробничих процесів тощо. Без сумніву, вони відіграватимуть важливу роль у все більшій кількості сфер, оскільки технологія поступово розвиватиметься.

Приблизно основні датчики, які використовуються сьогодні, можна класифікувати відповідно до їх функцій наступним чином.

- температура
- Тиск
- Прискорення
- Нахил
- Вологість
- світло
- Датчик газу
- Хімічні сенсори

1.8 RFID датчики тиску

Останніми роками мікроелектромеханічні системи (MEMS) зазнали стрімкого розвитку, пов'язані з розвитком технології. Що стосується датчиків, то звичним методом є створення мініатюрних версій їхніх макроскопічних антитипів. Однак вони демонструють все кращу цінність порівняно зі звичайними. Як один із основних представників датчик тиску MEMS, як показано на ілюстрації 3, сьогодні домінує на ринку.

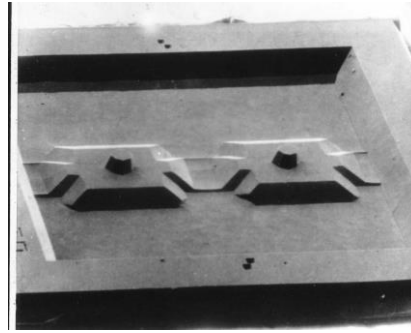


Рисунок 1.11 – Датчик тиску MEMS

Існує в основному три підходи [28] до датчиків тиску MEMS.

(1) П'єзорезистивні датчики

П'єзорезистивний ефект кремнію означає, що опір змінюється залежно від прикладеного до нього навантаження [29]. П'єзорезистивні датчики тиску реалізуються шляхом встановлення на них п'єзорезисторів, зміна опору яких лінійна з прикладеним тиском. Як повідомлялося, кремнієві тензометричні сенсори з металевою діафрагмою вперше були комерційно представлені в 1958 році [30]. У 1970-х роках компанії, що займаються виробництвом мікросенсорів, почали рухатися до широкомасштабних і дешевих програм [31–35]. В даний час біомедичні та автомобільні програми є одними з найважливіших областей застосування. Ці нові типи датчиків мають деякі хороші переваги, отримані від високоякісного кремнію. Наприклад, міцність на розрив кремнію може бути втричі вищою, ніж міцність дроту з нержавіючої сталі, гістерезис, пов'язаний з металом, усувається, і, можливо, найголовніше, кремній має великі калібрувальні коефіцієнти, які на порядок вищі, ніж у металевих сплавів.

(2) Ємнісні датчики

Ємнісний датчик винайдений на основі принципу паралельних пластинчастих конденсаторів. Після належного проектування ємність ємнісного датчика майже пропорційна прикладеному тиску [36], а ціною за це є знижена чутливість. У порівнянні з п'єзорезистивними датчиками тиску, ємнісний датчик має більш складні вимоги до схеми та відносно простий перетворювач. Як наслідок, ємнісний датчик отримує більше переваг від зростаючого рівня дизайну схеми.

(3) Резонансні датчики

Резонансний датчик тиску вимірює тиск, контролюючи резонансну частоту вбудованого моста [37–39]. Резонансний промінь діє як чутливий тензодатчик [40], резонансна частота змінюється разом із натягом у вбудованих конструкціях, що визначається напруженим станом діафрагми. Існує багато механізмів сприйняття резонансної частоти. Структура може збуджуватися напругою змінного струму, тоді як резонансна частота виявляється за допомогою контрольного п'єзореzystора [37, 38], оптично збуджена та оптично виміряна, або електростатично збуджена та ємнісна чутливість [41]. Один ключовий момент

Існує те, що резонансний датчик тиску зазвичай може досягати кращої чутливості до тиску, нижчої чутливості до температури та виявляє більшу стійкість до шуму порівняно з традиційними п'єзореzистивними та ємнісними датчиками, що принесло резонансному датчику тиску чудове майбутнє.

1.9 Основи збору радіочастотної енергії та технології датчиків RFID

Потужність джерела збору енергії може бути в різних формах, таких як механічний рух і вібрація, сонячна енергія, теплова енергія, електромагнітна енергія тощо. З початку 1990-х років, коли Тесла та Герц запропонували концепцію бездротового збору енергії [30] дослідження бездротового збору енергії стають все більш масштабними в науковому співтоваристві. Згідно з основами RFID, збір радіочастотної енергії можна розділити на індуктивний зв'язок і зворотне розсіювання [32]. HF RFID, що працює на несучій частоті 13,56 МГц, передає та приймає потужність за допомогою індуктивного зв'язку ближнього поля [33], а UHF, що працює на несучій частоті 840–960 МГц, передає та приймає потужність із зворотним розсіюванням у дальній зоні [34]. Крім того, безчипова RFID, яка виконує свої вимірювання за допомогою звуку резонансної частоти, також стала основною темою дослідження. Це дослідження зосереджено на техніці датчиків HF та UHF RFID, для яких протягом останніх кількох років було широко повідомлено про нові дослідження та нові технічні рішення.

ВЧ-індуктивний зв'язок і ВЧ-датчики RFID

ВЧ датчики RFID передають або отримують як енергію, так і дані через індуктивний зв'язок, який досягається змінним магнітним полем між котушковими антенами запитувача та міткою. Змінне магнітне поле генерується резонансним баком індуктор-конденсатор (LC), структура та

еквівалентні схеми якого зображені на рис.1.12, (та наведено в додатку А рис.5) [35].

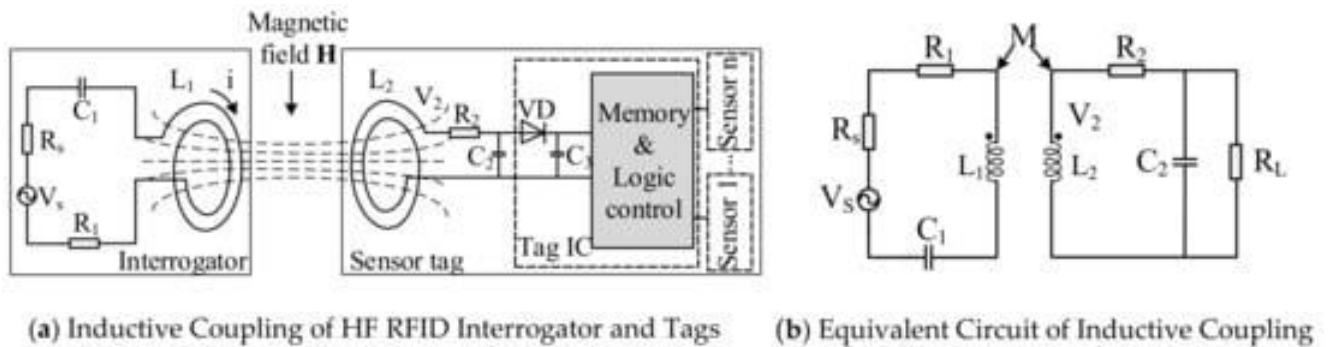


Рисунок 1.12 – Основи високочастотних датчиків RFID

Як показано на рис.1.12, V_s є радіочастотним джерелом у запропонованому пристрої, L_1 і C_1 утворюють резонансний контур (резонанс до частоти V_s) для передачі енергії, а резонансна частота f_0 , зазвичай 13,56 МГц для ВЧ. RFID. Антени-мітки L_2 і C_2 складають приймач, який працює на одній частоті. Резонансну частоту можна розрахувати наступним чином:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (1.8)$$

Індуктивна напруга v_2 на мітці антени прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку Ψ через котушки, який можна представити як:

$$v_2 = -\frac{d\Psi}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt} \left(\int B \cdot dS \right) = -N_2 \frac{d}{dt} \left[\int \frac{\mu_0 i_1 a^2 N_1}{2[a^2 + r^2]^{3/2}} \cos \alpha dS \right] \quad (1.9)$$

де N_2 і N_1 - кількість обмоток котушок мітки і запитувача антени, Φ - магнітний потік кожної обмотки котушки, B і S - сила магнітної індукції і площа котушок, i_1 - струм запитальної котушки, a — радіус запитальної котушки, r — відстань між двома котушками, а α — кут між B і S . У (1.8), коли кут між B і S дорівнює θ^0 , v_2 може обчислюється за таким виразом:

$$v_2 = - \left[\frac{\mu_0 N_1 N_2 a^2 S}{2[a^2 + r^2]^{3/2}} \right] \frac{di}{dt} = -M \frac{di}{dt} \quad (1.10)$$

де M – коефіцієнт взаємної індукції, який можна розрахувати за допомогою

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 a^2 S}{2(a^2 + r^2)^{3/2}}$$

Формули (1.9) і (1.10) забезпечують чіткий зв'язок між отриманою потужністю та ключовими параметрами двох антен та їх співвідношенням. Напруга V_2 може бути оброблена схемами випрямляча та регулятора для живлення мікросхеми RFID та модуля датчика для збору даних та передачі інформації.

УВЧ зворотне розсіювання та УВЧ сенсорні методи

На відміну від системи HF RFID, режим роботи датчика UHF RFID – це радіолокаційне зворотне розсіювання, що складається з запитувача UHF, тракту радіочастотної передачі, RFID-мітки та сенсорного модуля, структура якого показана на рис.1.13, (та наведено в додатку А рис.6). Ефективність передачі потужності визначається параметрами основних компонентів, включаючи потужність випромінювання та посилення передавальної та приймальної антен, довжину хвилі несучого сигналу та відстань між передавальною та приймальною антенами.

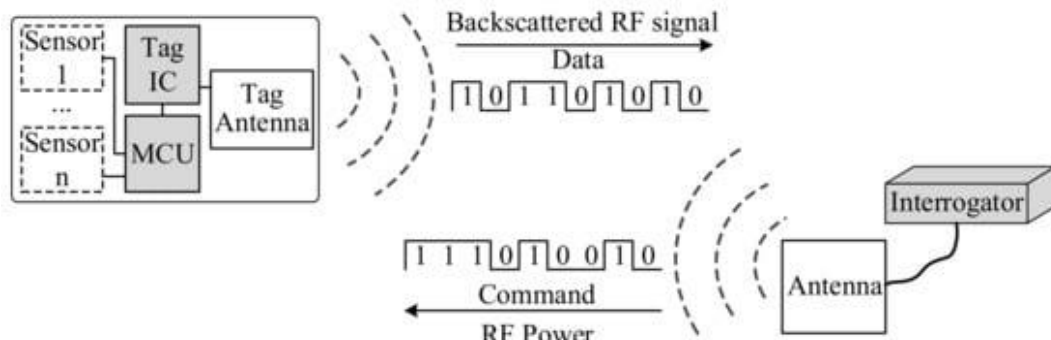


Рисунок 1.13 – Основи датчиків UHF RFID

Передача радіочастотної потужності запитувач-мітка

Будучи пасивним пристроєм, сенсорна мітка RFID отримує потужність запитувача для завершення процедур вимірювання та передачі даних. Відповідно до математичної залежності для радіочастотної передачі, заданої рівнянням Фрііса [38], щільність потужності радіочастотної енергії на відстані R від антени запитувача S може бути представлена як:

$$S = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \quad (1.11)$$

де P_T і G_T - потужність і посилення передавальної антени. Припустимо, що ефективний розмір приймальної антени мітки дорівнює A_E , визначений як

$$A_E = \lambda^2 G_{\text{Tag}} / (4\pi),$$

посилення приймальної антени дорівнює G_{Tag} , а довжина хвилі радіочастотного несучого сигналу дорівнює λ , тоді прийнята потужність P_{Tag} може бути виражена як:

$$P_{\text{Tag}} = S \cdot A_E = P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_T G_{\text{Tag}} \quad (1.12)$$

UHF RFID Power Reflection

Радіочастотна потужність, відображена міткою, прямо пропорційна поперечному перерізу мітки (RCS). Потужність, відбиту міткою RFID P_{Back} , можна позначити рівнянням (1.13), де S — щільність потужності, а щільність потужності S_{Back} можна позначити рівнянням (1.14), P_T і G_T — потужність передачі та посилення тегової антени. Припустимо, що G_R - коефіцієнт підсилення антени запитувача, ефективний розмір приймальної антени дорівнює

$$A_w = \lambda^2 G_R / (4\pi),$$

а потужність, отримана запитувачем P_R , може бути представлена рівнянням (1.15):

$$P_{\text{Back}} = S \sigma = \frac{P_T G_T}{4\pi R^2} \sigma \quad (1.13)$$

$$S_{\text{Back}} = \frac{P_T G_T \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (1.14)$$

$$P_R = S_{\text{Back}} A_w = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1.15)$$

Інформація мітки, включаючи ідентифікатор мітки та інформацію датчика, передається запитувачу шляхом модуляції відбитих несучих радіочастотних хвиль. Очевидно, що коефіцієнт підсилення антен, відстань між антенами та RCS мітки є ключовими параметрами, що визначають відстань зчитування та ефективність результуючих вимірювань датчика RFID.

Датчики RFID без мікросхем

Датчики RFID без мікросхем просто змінюють радарний профіль міток RFID для передачі даних датчика без потреби у складних інтегральних схемах, структура яких показана на рис.1.14, (та наведено в додатку А

рис.7). Коли приймальна антена мітки приймає сигнал, переданий запитувачем, резонансний контур вибирає сигнали різних частот для генерації певної резонансної частоти та іншої резонансної амплітуди, а потім повертає дані запитувачу через передавальну антену мітки. Потім запитувач аналізує зміни амплітуди та фази свого сигналу певної частоти. Нарешті, ідентифікатор сигналу кодується відповідно до різних спектральних характеристик після обробки даних. Коли мітка без чіпів розміщена на досліджуваному матеріалі (MUT), резонансна частота буде дрейфувати зі зміною даних датчика, як показано на рис.1.14б [41].

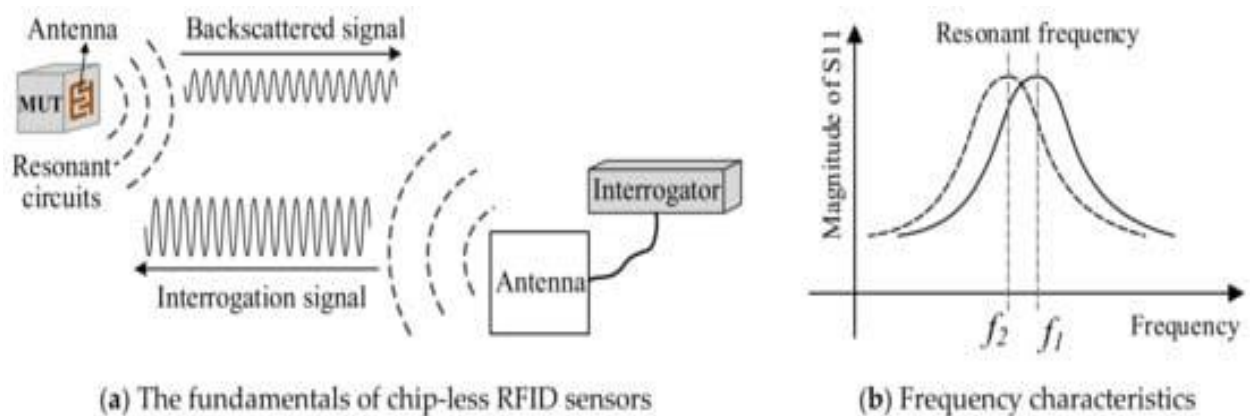


Рисунок 1.14 – Безчіпові датчики RFID — основи та частотні характеристики

Функція RFID без чіпа визначається антеною, яка зазвичай призначена для певних застосувань. Ідентифікатор RFID без чіпа визначається характерними частотами мітки в серії конкретних значень [42]. Оскільки деякі фізичні особливості досліджуваних матеріалів можуть бути відображені резонансними контурами у вигляді ємності та індуктивності. Ємність зберігання даних RFID без чіпа набагато менша, ніж чіпного. Однак завдяки кремнієвим чіпам вартість безчіпових RFID значно нижча, ніж чіпових. Таким чином, RFID без чіпа став конкурентоспроможним вибором для недорогих програм зондування та ідентифікації [43].

На додаток до HF, UHF і безчіпових датчиків RFID, деякі програми використовують комерційні мітки для вимірювання відстані до об'єктів і локалізації, які можуть знайти застосування в таких програмах, як локалізація та навігація роботів, локалізація продуктів на великих складах і в логістиці тощо.

1.10 Методи датчиків RFID — технічний прогрес та інноваційні застосування

У порівнянні з іншими підходами до збору енергії навколишнього середовища, радіочастота є відносно ефективним підходом, який може отримати більше доступної потужності в середовищі з низьким рівнем енергії [34]. Крім того, збирання радіочастотної енергії, інтегроване з передачею інформації, що називається бездротовим зв'язком живлення (WPC) і SWIPT [35], уможливило багато інноваційних програм бездротового живлення, ідентифікації та зв'язку. Особливо в останні роки, з безперервним прогресом технологій застосування IoT [37] і збільшенням малопотужних датчиків і мікроконтролерів, інтеграція сенсорних методів з RFID привернула великий інтерес дослідників і досягла значного прогресу. Цей розділ має на меті надати своєчасний огляд останніх технічних досягнень та інноваційних застосувань.

Нові конструкції антен: передній кінець методів вимірювання RFID

Схема збору радіочастотної енергії в основному складається з антени, випрямляча, помножувача напруги та пристрою накопичення енергії, як показано на рис.1.15, у якому антена вловлює радіочастотну енергію в електромагнітному полі, а потім випрямляч перетворює радіочастотну енергію в постійний струм. напруги через випрямляч і, нарешті, зберігає підвищену напругу помножувача напруги в накопичувачі енергії.

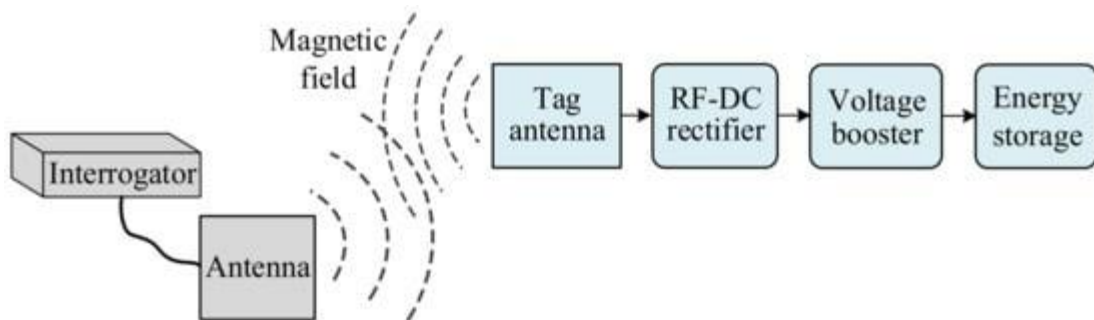


Рисунок 1.15 – Схема схеми збору радіочастотної енергії

Анени RFID, які зазвичай використовуються, показані на рис.1.16. Антена на рис.1.16а зазвичай використовується для систем HF, а антени на рис.1.16b–d зазвичай застосовуються для систем UHF. Анени з високим коефіцієнтом підсилення можуть підвищити ефективність перетворення та отримувати більше потужності, тому перевага віддається антенам із високим коефіцієнтом підсилення. Ефективність антен можна оцінити за такими параметрами, як посилення, смуга частот, діаграма

спрямованості, поляризація, фізичний розмір або сфери застосування.

Розташована в передній частині сенсорного пристрою RFID, антена є ключовим компонентом, що визначає продуктивність датчика RFID, включаючи його відстань зчитування, швидкість роботи та розмір сенсорного модуля. Таким чином, новий дизайн антени для підвищення продуктивності сенсорних пристроїв і для різних сценаріїв застосування стає гарячою точкою. Основні внески зосереджені на мініатюризації розміру, складних антенах, 3D-антенах, металевих поверхневих антенах, багатодіапазонних антенах, всенаправлених і спрямованих антенах тощо.

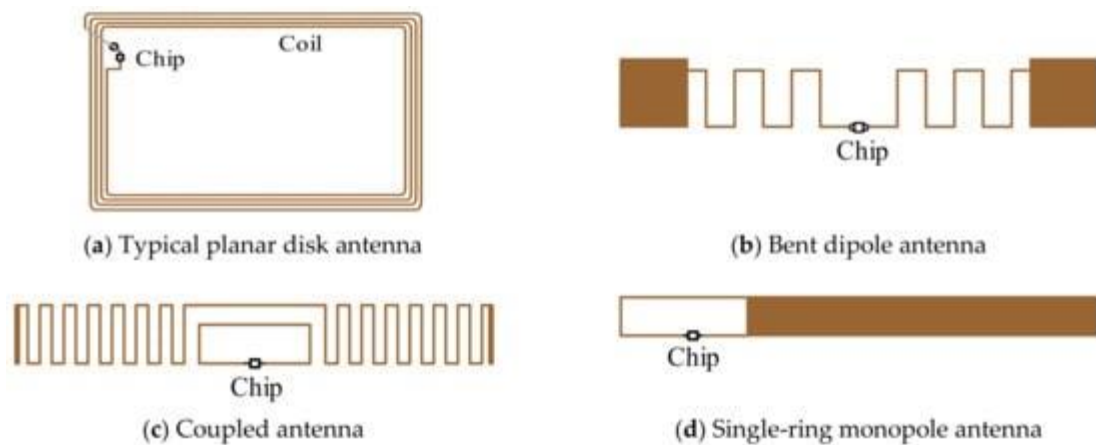


Рисунок 1.16 – Часто використовувані антени RFID

Стосовно металевих антен для поверхневого монтажу Чен [49] запропонував мініатюрну конструкцію UHF RFID антени для металевих предметів, що складається з двох прямокутних ділянок, електрично з'єднаних через заземлення, і непов'язаного міжпровідного шару для формування RFID-тег антени. Мініатюрна конструкція досягається шляхом введення провідного шару в структуру антени для збільшення ємнісного реактивного опору антени. Загальний розмір становить $32 \times 18 \times 3,2$ (мм), а максимальна дальність зчитування RFID-мітки, розміщеної на металевому об'єкті, становить приблизно 1,5 м. Тривимірні антени також викликали інтерес, щоб отримати всенаправлені діаграми спрямованості в незалежних від орієнтації додатках RFID, і пропонується багато нових конструкцій. Kguesi та ін. [43] представив мініатюрну 3D-кубічну антену зі складеною меандровою лінією для бездротової сенсорної мережі (WSN) і застосування RFID у зондуванні навколишнього середовища з 3D-розміром $3 \times 3 \times 3$ см, яка може знайти застосування в інтелектуальній упаковці, інтегруючи її в куб порожнистий інтер'єр. Крім того, багатодіапазонні антени, всенаправлені та спрямовані антени також є привабливими темами для різних застосувань RFID. Збільшуючи робочі діапазони антен для збору

енергії в декількох діапазонах частот, можна збільшити вихідну напругу збирача радіочастотної енергії [46]. Keurouz та ін. [47] розробив тричастотну антену (900 МГц, 1800 МГц і 2,45 ГГц) для збору радіочастотної енергії, і ефективність збору енергії значно зросла. Однак, завдяки збільшенню кількості антен, розмір площі контуру був збільшений. Лю та ін. [50] запропонував ємнісно навантажену рамкову антену з індуктивним зв'язком із всенаправленою діаграмою спрямованості для UHF RFID-міток, з малим розміром 43×43 мм, вимірний максимальний діапазон зчитування прототипу становить 9,5 м із загальною переданою потужністю 4,0 Вт ефективна ізотропна випромінювана потужність (EIRP). Всеспрямована діаграма спрямованості в горизонтальній площині робить запропоновану мітку нечутливою для встановлення на різних цільових об'єктах.

Оскільки датчики RFID використовуються для різних цілей і сценаріїв застосування в різних навколишніх середовищах, конструкція антени повинна бути налаштована відповідно до вимог конкретних застосувань. Однак для датчиків RFID конструкція антени типової мітки RFID є універсальною та вимагає узгодження імпедансу для максимального діапазону зчитування. Але, завдяки датчикам і різним пристроям, споживання енергії значно зросло. Щоб отримати стабільні дані датчика RFID, антену датчика RFID також можна налаштувати як багатопортову для збору природної енергії для покращення збору енергії бездротового датчика з автономним живленням, як показано на рис.1.17.

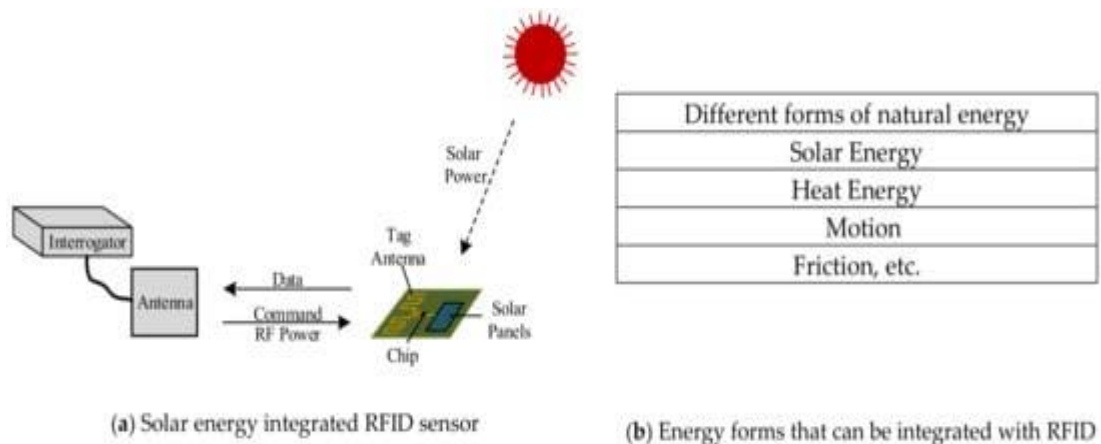


Рисунок 1.17 – Датчик RFID із багатопортовим збором енергії

1.11 Висновки до розділу

Проведений аналіз публікацій, який присвячений теоретичним та експериментальним дослідженням фізичних ефектів при дії тиску у MEMS структурах та конструкціях датчиків тиску показує, що дослідження та розробка автогенераторних перетворювачів тиску для бездротових сенсорних мереж є перспективним науковим напрямком у розвитку засобів вимірювання тиску та деформації для сучасних мікропроцесорних інформаційно-вимірювальних систем. Резонансні MEMS датчики тиску та деформації показують високі метрологічні показники поряд з тенденцією до мікромініатюризації, а також покращенням цінових характеристик, можливістю їхньої інтелектуалізації на основі технологічної та конструктивної сумісності з цифровими пристроями у бездротових сенсорних мережах.

2 ОСНОВИ ТЕОРІЇ РОБОТИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СЕНСОРІВ ТИСКУ

2.1 Фізичні основи застосування напівпровідників для створення сенсорів тиску

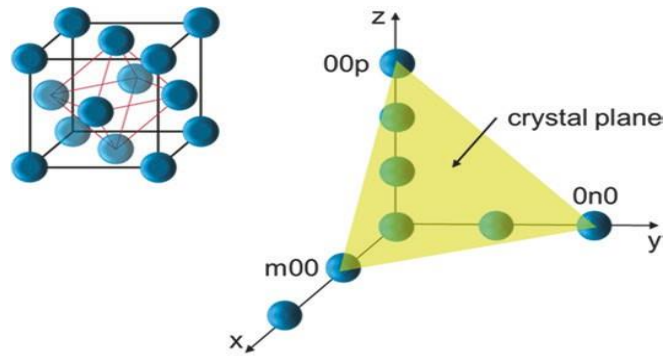
Кристалічна структура кремнію є кубічною гране центричною (fcc). Кристалічні площини визначаються індексами Міллера h , k і l , які виникають в результаті взяття найменшого спільного знаменника зворотної величини перетинів осі. Отримані чисельники є індексами Міллера. Співвідношення між точками перетину кристалічної площини, системою кристалічних осей та індексами Міллера показано на рис.2.1. Виникає особлива ситуація, коли площини паралельні одній або двом осям, а отже не перетинаючи їх. Ці ділянки осі (m , n , p) визначаються за допомогою ∞ . Ділення на ∞ визначається як 0, що безпосередньо є індексом Міллера (тобто без визначення спільного знаменника). Наприклад, кристалічна площина, яка паралельна осям y і z ($n = p = \infty$) і перетинає вісь x при $m = 1$, має індекс Міллера (100).

Крім того, слід звернути особливу увагу на позначення індексів Міллера. Позначення в круглих дужках (hkl) використовується для визначення монокристалічної площини. Для від'ємного індексу Міллера число підкреслюється (наприклад, $(h\bar{k}l)$). Якщо індекси Міллера записані у фігурних дужках $\{hkl\}$, позначається набір або сімейство площин, які еквівалентні завдяки симетрії кристалічної решітки. Наприклад, літаки(100), (010), (001), 100, 010, 001 можна позначити як $\{100\}$. У кубічних кристалах напрям площини є перпендикулярним до площини і записується як $[uvw]$ (= єдиний напрямок) або $\langle uvw \rangle$ (набір еквівалентних напрямків = сімейство напрямків).

Що стосується об'ємної мікрообробки кремнію, найбільше грають кристалічні площини $\{100\}$, $\{110\}$ і $\{111\}$ (рис.2.2).

Площинами найбільш легкого руйнування для кремнію і германію є атомні площини (111). Більшість напівпровідникових матеріалів, використовуваних для створення сенсорів тиску, мають кристалічні ґратки типу алмаза чи цинкової обманки, які є тетраедричними структурами. В даних структурах кожен атом оточений чотирма іншими найближчими атомами, які розташовані у вершинах відповідного тетраедра. Відповідно зв'язок між найближчими атомами здійснюється однією парою електронів з протилежними напрямками спінів. Ґратки типу алмаза є двома гранецентрованими кубічними ґратками, які зсунуті відносно один одного на

одну чверть об'ємної діагоналі елементарної комірки. Кремній є алмазоподібним напівпровідником, у якому у вузлах тієї чи іншої ґратки знаходяться атоми.



x, y, z: axes of the crystalline cartesian coordinate system

m00, 0n0, 00p: intersection points of crystal plane and axes (axis sections)

An exemplary crystal plane, as it is drawn in:

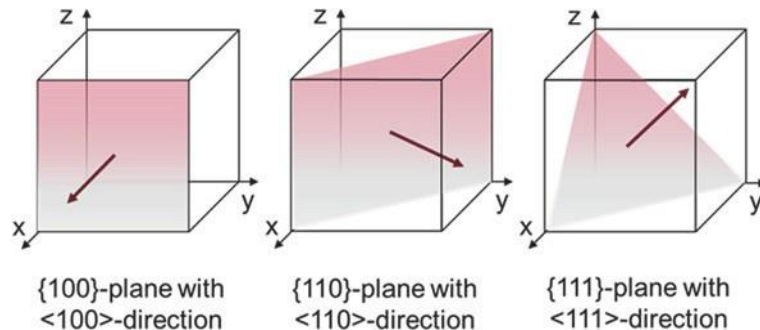
axis sections: $m = 1,$
 $n = 2,$
 $p = 3$

reciprocal of axis sections: $\frac{1}{1}, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$

taking the lowest common denominator: $\frac{6}{6}, \frac{3}{6}, \frac{2}{6}$

Miller indices: (6 3 2)

Рисунок 2.1 –Визначення індексів Міллера зразкової кристалічної площини в кубічному кристалі. Вгорі зліва: кубічна гранецентрована кристалічна решітка з ромбоедричною примітивною елементарною коміркою



{100}-plane with <100>-direction

{110}-plane with <110>-direction

{111}-plane with <111>-direction

Рисунок 2.2 – Основні кристалічні площини в кубічній решітці кремнію. Відповідні напрямки площин перпендикулярні до площин (стрілки)

2.2 Електричні властивості монокристалічного кремнію

Електричну поведінку провідників, напівпровідників та ізоляторів можна добре зрозуміти за допомогою зонної моделі, вперше описаної Феліксом Блохом [42]. В окремих атомах електрони (носії негативного заряду) займають дискретні енергетичні рівні. У твердих тілах з великою кількістю однакових атомів ($N \sim 10^{23}$) кожен енергетичний рівень розпадається на N рівнів, які настільки близькі за енергією, що зливаються в суцільні енергетичні смуги. Смуги розділені забороненими зонами, енергетичними діапазонами, в яких відсутні електронні стани. Енергетично найвищою зоною, повністю зайнятою електронами, є так звана валентна зона. Зона, яка енергетично лежить вище, має незайняті рівні електронів і називається зоною провідності.

В одновалентних провідниках зона провідності лише частково зайнята електронами. У двовалентних провідниках зона провідності порожня, але енергетично перекривається валентною зоною. Тому електрони можуть переходити в зону провідності. В обох випадках електрони із зони провідності можуть рухатися через тверде тіло так, що тече електричний струм. Зона провідності напівпровідників і ізоляторів вільна і відокремлена від валентної зони забороненою зоною. Для напівпровідників різниця енергій між валентною зоною та зоною провідності, тобто ширина забороненої зони, менше приблизно 3 еВ.

Для ізоляторів ширина забороненої зони перевищує приблизно 3 еВ. При кімнатній температурі, типовий питомий опір ρ напівпровідників, таким чином, лежить між 10^{-3} і 10^9 Ом см, а ізоляторів більше 10^9 Ом см. При підвищенні температури з'являється все більше електронів з валентної зони

напівпровідникові тверді речовини, такі як кремній, поглинають достатньо енергії, щоб подолати заборонену зону та перетворитися на зону провідності. У зоні провідності вони можуть проводити струм, як і незайняті електронні стани («дірки», позитивні носії заряду), які вони залишили у валентній зоні. Таким чином, в обох енергетичних зонах проводиться електричний струм (власна провідність). Але, незважаючи на це, провідність чистого кремнію навіть при більш високих температурах досить низька, а зміна питомого опору внаслідок механічної напруги занадто мала, щоб її можна було правильно виміряти. Іншими словами: перш за все, питомий опір кремнію, як правило, повинен бути зменшений (тобто провідність повинна бути збільшена). Тільки тоді можна виміряти зміну питомого опору, спричинену механічною напругою.

Добре відомим і широко використовуваним методом основного

зменшення ρ і, таким чином, покращення вимірності п'єзорезистивного ефекту є додавання сторонніх атомів, що називається легуванням. У періодичній таблиці кремній є елементом IUPAC група 14 (стара класифікація: група IV A = 4-та основна група) у періоді 3. Вона має чотири валентні електрони. У кубічній решітці кожен атом має чотири сусідніх атоми, з якими він має спільні валентні електрони (ковалентний зв'язок). Отже, валентність група повністю зайнята. Сторонні атоми (допанти) інтегруються в кристалічну решітку, замінюючи вихідні атоми. Для кремнію типовою легуючою добавкою є фосфор. Фосфор належить до групи IUPAC 15, має п'ять валентних електронів. Надлишок електронів не може зв'язатися із сусідом (рис.2.3, ліворуч). Його енергетичний рівень знаходиться трохи нижче нижньої енергетичної межі зони провідності і може бути легко збуджений у зоні провідності. Вже при кімнатній температурі майже всі надлишкові електрони перемістилися в зону провідності. Таким чином, електропровідність зумовлена рухом носіїв негативного заряду. Допінг групи 15 за IUPAC тому називають донорами, а допінг – n-допінгом. Іншими можливими донорами є сурма та миш'як. Доповнення атомами з трьома валентними електронами (група IUPAC 13, акцептори) в решітку кремнію називається p-легуванням (рис.2.3). Електрони з валентної зони кремнію можуть легко збуджуватися на енергетичний рівень акцептора, який розташований трохи вище верхньої частини валентної зони кремнію. Таким чином, утворюються незайняті електронні стани, або дірки. Вони діють так, ніби вони є позитивними носіями заряду, але в принципі на провідність також впливає рух електронів. Відповідними акцепторами є бор, алюміній, галій та індій. Провідність збільшується в обох випадках — загалом при n-донорній імплантації трохи більше, ніж при p-донорній імплантації через їх дещо різні рівні енергії [53].

Легування як метод зменшення ρ реалізується на практиці для створення так званих п'єзорезисторів. Це геометрично визначені області, які розташовані в областях деформівної конструкції, де механічне напруження найбільше. У випадку мембрани це крайові області (див. рис.2.3), у випадку консолі, вони розташовані поблизу місця з'єднання сипучого матеріалу з консоллю.

Для p- і n-легування доступні різні методи обробки. Простим, але неточним методом є дифузія. Дифузія походить від латинського *diffundere* і означає розповсюдження, розливання, розсіювання. Іншими словами, різниця концентрацій двох різних матеріалів вирівнюється, на практиці прискорюється допоміжною енергією (тобто при температурах від 800 до 1100 °C). Процес відбувається в дифузійній печі. Залежно від фізичного

стану легуючої домішки дифузійні процедури розрізняють на дифузію з газової фази, з твердої фази і, по-третє, дифузію з джерелом рідини. При дифузії з газової фази газ-носії (азот N₂ або аргон Ar) збагачується легуючою добавкою, яка також є газоподібною (наприклад, трихлорид бору BCl₃ або диборан B₂H₆ для легування бором, або фосфін PH₃ для фосфору).

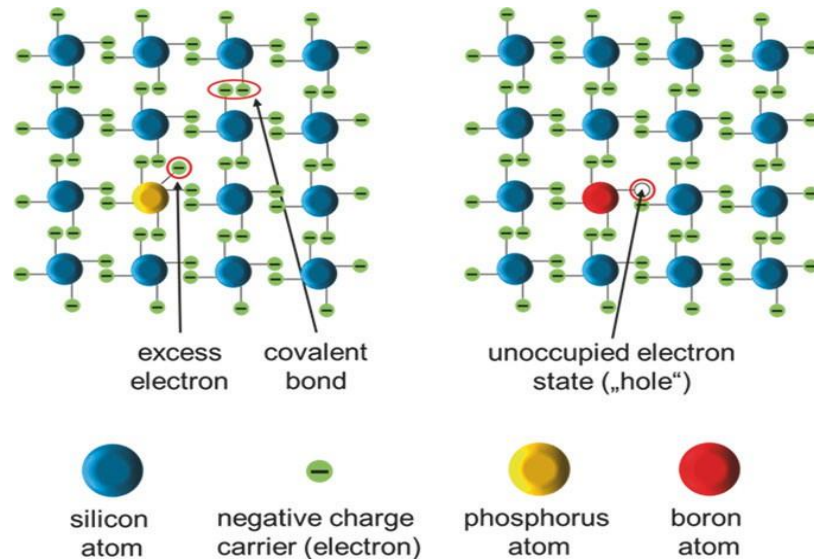


Рисунок 2.3 – n-легований кремній фосфором (ліворуч) і p-легований бором (праворуч)

Зазвичай шар, що містить допant (наприклад, оксид бору B₂O₃, нітрид бору BN і п'ятиокис фосфору P₂O₅), попередньо наноситься на пластину. Третій метод дифузії також використовує газ-носії. Однак різниця з першим методом полягає в тому він проходить через допant у рідкій формі (наприклад, трибромід бору BBr₃, трихлорид фосфору PCl₃ та оксихлорид фосфору POCl₃), таким чином транспортуючи допant до поверхні пластини.

Просторові та часові зміни концентрації допantu $N(x,t)$ в основному описуються за допомогою 2-го закону Фіка (рівняння дифузії) із залежним від температури коефіцієнтом дифузії D , глибиною проникнення x перпендикулярно до поверхні пластини та процесом тривалість t (рівняння 2.1):

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 N(x,t)}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

Дифузія з газоподібними і рідкими легуючими речовинами зазвичай відбувається в два етапи. Перший – це дифузія з невичерпним джерелом (попередня дифузія): газ, що несе допant, тече безперервно, так що допанти доступні в необмеженій кількості. По-друге, це заїзд, який буде пояснено

нижче.

Для вирішення диференціального рівняння в частинних похідних необхідно визначити граничні умови. Для дифузії з невичерпним джерелом це означає, що концентрація допantu N на поверхні пластини $x = 0$ є постійною в будь-який час (= початкова концентрація N_0 при температурі процесу) (рівняння 2.2) і що на момент початку дифузії в кремнієвій підкладці немає легуючих домішок (Рівняння 2.3).

$$N(x = 0, t) = N_0 \quad (2.2)$$

$$N(x > 0, t = 0) = 0 \quad (2.3)$$

З цими граничними умовами розв'язок рівняння 2.1 виглядає наступним чином (рівняння 2.4):

$$N(x, t) = N_0 \cdot \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} e^{-\tau^2} d\tau \right) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (2.4)$$

зі змінною інтегрування τ і додатковою функцією похибок

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x).$$

Відповідно до першої граничної умови, співвідношення N і N_0 у кремнію поверхні завжди дорівнює 1. Профіль дифузії в основному залежить від коефіцієнта дифузії D і тривалості процесу t або точніше від довжини дифузії $2Dt$ (Рис.2.4).

Видно, що концентрація легуючої домішки досить швидко зменшується зі збільшенням глибини проникнення x . Максимальна глибина проникнення x_r становить близько сто нанометрів.

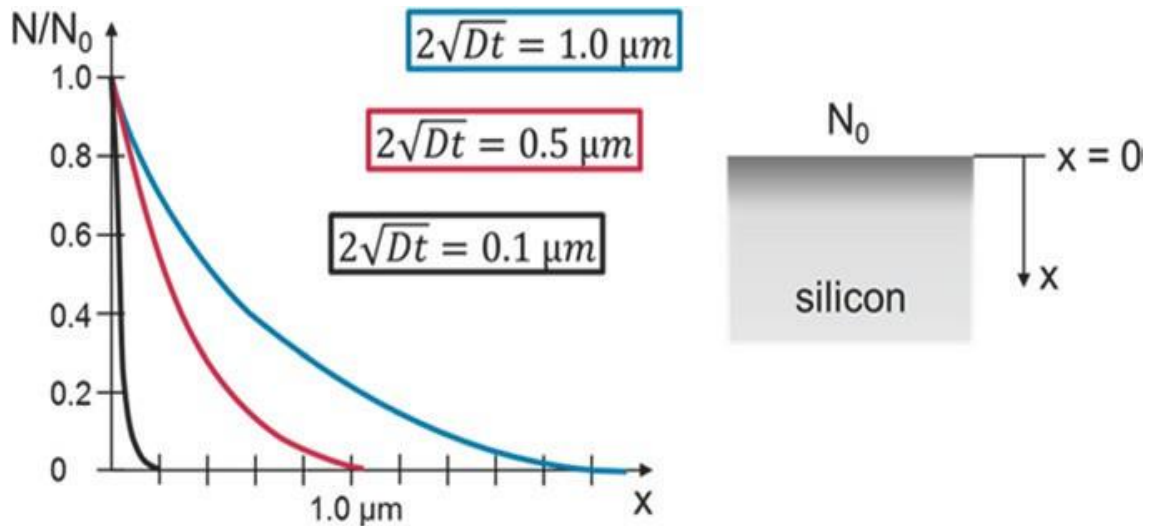


Рисунок 2.4 – Профіль для дифузії з невичерпним джерелом для різних довжин дифузії

Вироблений таким чином п'єзорезистор не дуже підходить для визначення напруги матеріалу. Тому рекомендується другий, відразу наступний етап процесу: так звана вхідна дифузія. Для початку потік газу припиняється, але температура залишається такою ж високою, як і для попередньої дифузії (або навіть підвищується) протягом усього етапу введення.

Оскільки постійне надходження легуючої домішки припинилося, вхідна дифузія є дифузиею з кінцевим джерелом. Щоб зрозуміти, як можна розрахувати профіль концентрації легуючої домішки після введення, спрощена модель дифузії зі скінченим джерелом використовується для створення граничних умов і розв'язку рівняння в частинних похідних. Джерело кінцевої легуючої домішки можна розглядати як тонкий твердий шар легуючої домішки (наприклад, шар нітриду бору BN або пентоксиду фосфору P2O5, нанесеного методом напилення), що покриває поверхню кремнію. Він має товщину x_{fs} і однорідну вихідну концентрацію N_0 .

$$N(x, t = 0) = N_0 \quad \text{for } 0 \leq x \leq x_{fs} \quad (2.5)$$

Друга гранична умова говорить, що на початку немає легуючих домішок нижче x_{fs} :

$$N(x, t = 0) = 0 \quad \text{for } x > x_{fs} \quad (2.6)$$

Крім того, можна очікувати, що з шару не витікає легуюча добавка навколишнє протягом усього процесу (тобто без поповнення джерела):

$$\left. \frac{\partial N(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (2.7)$$

Застосовуючи ці граничні умови, розв'язок диференціального рівняння в частинних похідних (рівняння 2.1) виглядає наступним чином (Рівняння 2.8):

$$N(x, t) = \frac{N_0}{2} \left(\operatorname{erfc} \frac{x - x_{fs}}{2\sqrt{Dt}} - \operatorname{erfc} \frac{x + x_{fs}}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (2.8)$$

Цей термін можна додатково спростити шляхом перетворення в ермітові поліноми та скорочення всіх членів з x^2 і вище (рівняння 2.9):

$$N(x, t) = \frac{N_0 x_{fs}}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}} \quad (2.9)$$

У графічному вигляді ця функція є гауссовим профілем (рис.2.5). Порівняно з дифузією з нескінченним джерелом, розподіл допantu набагато однорідніший на глибині проникнення x .

Щоб повернутися до фактичної двоетапної дифузії пари, попередньо дифундований шар можна розглядати як кінцеве джерело легуючої домішки, як у попередній спрощеній моделі, але x_{fs} потрібно замінити на x_p , максимальну глибину проникнення легуючої домішки після попередньої дифузії. t_p це час, коли припиняється попередня дифузія та одночасно починається введення. Перша гранична умова дифузії зі скінченним джерелом (рівняння 2.9) потрібно поєднати з рівнянням 2.8:

$$N(x, t = t_p) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt_p}} \quad \text{for } 0 \leq x \leq x_p \quad (2.10)$$

Друга гранична умова залишається незмінною, знову замінюючи x_{fs} на x_p (рівняння 2.10). Щоб запобігти повторному витoku попередньо нанесених легуючих домішок, введення відбувається в окислювальній атмосфері, утворюючи тонкий шар діоксиду кремнію (SiO_2) на поверхні. Шар SiO_2 працює як зворотний дифузійний бар'єр тому що його коефіцієнт дифузії D_{SiO_2} набагато менший, ніж D_{Si} . Таким чином, третя гранична умова також залишається незмінною (рівняння 2.8).

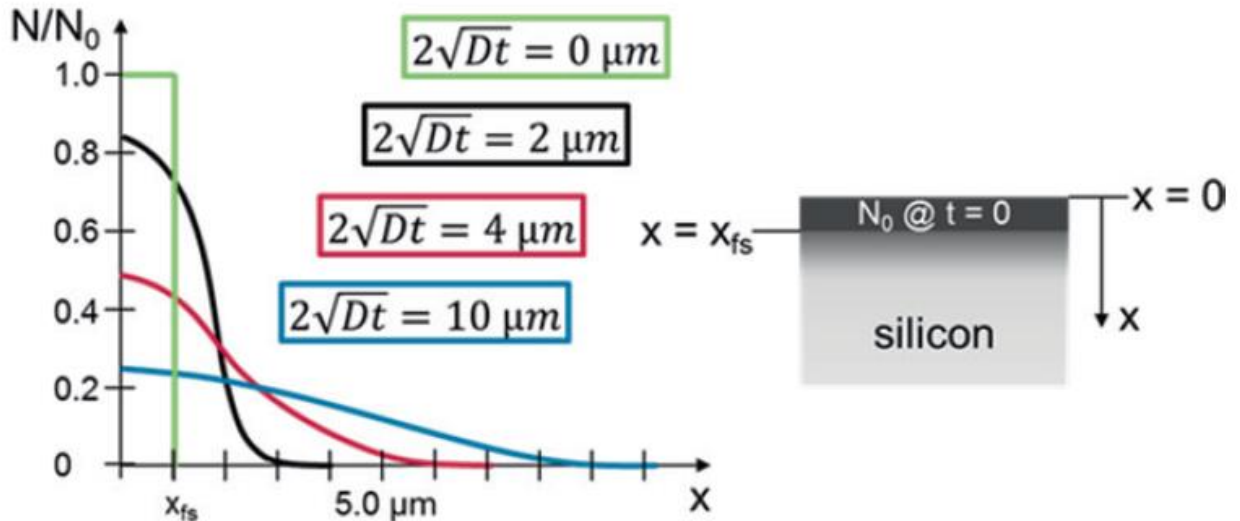


Рисунок 2.5 – Гауссовий профіль дифузії зі скінченим джерелом для різної довжини дифузії $2\sqrt{Dt}$. Площі під усіма функціями парні та дорівнюють площі під зеленою функцією при $t = 0$

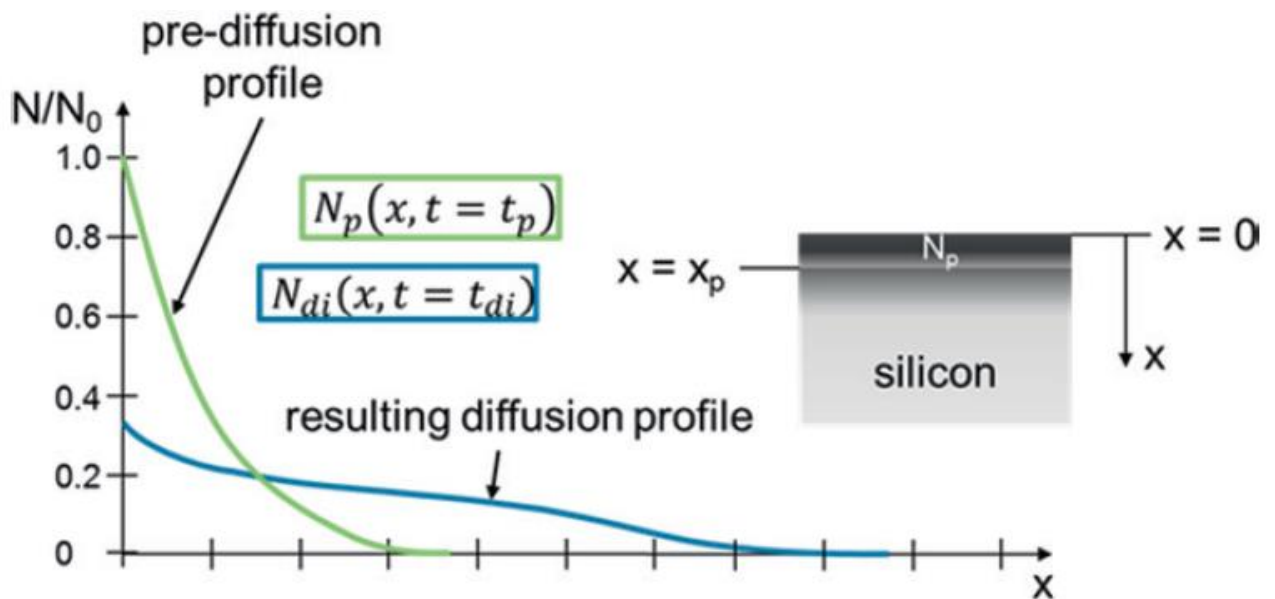


Рисунок 2.6 – Попередня дифузія з безкінечним джерелом легуючої домішки плюс введення. Отриманий дифузійний профіль є згортанням профілю попереднього осадження та профілю Гауса

Якщо добуток коефіцієнта дифузії D_{di} та часу процесу t_{di} заповнення набагато більший, ніж $D_{p}t_p$, остаточний профіль дифузії є результатом згортання erfc -профілю попередньої дифузії та гауссового профілю дифузії з кінцеве джерело легуючої домішки (рис.2.6).

Щоб нарешті пов'язати теорію з практикою, вказується ланцюжок

процесу для виготовлення р-легованих п'єзорезисторів об'ємного мікромашинного кремнієвого датчика тиску (рис.2.7), (та наведено в додатку А рис.8). Він містить дві різні послідовні дифузії: «нормальну» р-дифузію для генерування самих п'єзорезисторів і р⁺-дифузію з вищою концентрацією допанту, яка обмежена кінцями резистора, забезпечуючи безвідмовний електричний контакт з провідником. шляхи, зроблені на наступному етапі виготовлення. Концентрація n-легуючої домішки підкладки NSubstrate 10^{15} атомів на см³, процес р-дифузії призводить до концентрації легуючої домішки приблизно $5 \cdot 10^{19}$ атомів на см³, який вважається постійним на глибині проникнення. Питомий опір ρ становить приблизно 0,005 Ом см.

Створення стор-дифузійна маска: п'єзорезистори або п'єзорезистивні доріжки чітко визначені збоку. Оскільки процес дифузії впливає на всю пластину (всю поверхню та обидві сторони), ділянки, які не підлягають легуванню, повинні бути захищені від проникнення легуючої домішки. Зазвичай це досягається загальним осадженням шару діоксиду кремнію (SiO₂).

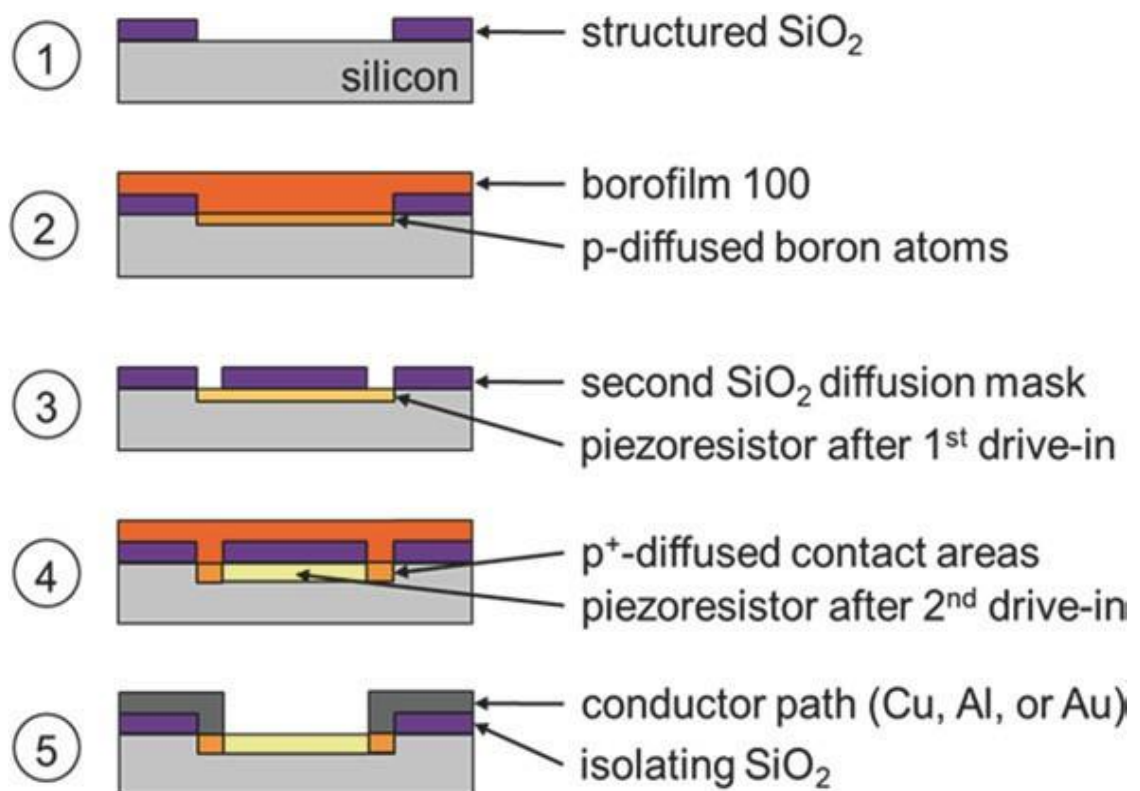


Рисунок 2.7 – Схематичний вигляд у поперечному перерізі стадій процесу р- і р⁺-дифузії для створення п'єзорезисторів для кремнієвого датчика тиску. На цьому малюнку показана лише верхня сторона пластини

Осадження легуючої домішки і с-попередня дифузія: доведено, що рідке джерело бору під назвою borofilm 100 від EMULSITONE CHEMICALS, LLC легко наноситься та створює рівномірний дифузійний шар. Борофільм обертають на поверхню кремнієвої пластини, яку попередньо зробили гідрофільною, а потім запікають при 200 °С протягом 20 хвилин для видалення надлишку розчинника. Подальша попередня дифузія відбувається при 900 °С протягом 30 хв. Шар бороплівки містить набагато більше атомів бору, ніж потрібно для легування кремнієм, тому його можна розглядати як нескінченне джерело.

Видалення залишків бороплівки та створення s^+ -дифузійна маска: борну плівку видаляють у 40% фтористоводневій кислоті (HF). Шар SiO₂ відразу витравлюється в HF. Після ретельного очищення пластини наноситься другий термічний SiO₂. Завдяки високим температурам 1100 °С протягом 30 хв одночасно відбувається введення р-дифузії. Знову s^+ -дифузійна маска структурована фотолітографією та травленням.

2.3 П'єзорезистивний ефект у легovanому монокристалічному кремнію

На цьому етапі можна далі розглянути п'єзорезистивний ефект легovanого монокристалічного кремнію. Загалом, це квантово-фізичний ефект. Механічна напруга σ в п'єзорезисторах, що виникає внаслідок прогину мембрани, призводить до деформації кристалічної решітки. Індукована деформація змінює середній час між зіткненнями носіїв заряду i , у свою чергу, впливає на рухливість носіїв заряду μ . Питомий опір ρ безпосередньо пов'язаний з рухливістю заряду (рівняння 2.11)

$$\rho = \frac{1}{|q|(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)} \quad (2.11)$$

Отже, у напівпровідникових матеріалах домінуюча зміна ρ є функцією механічної напруги σ (розтяг = σ^+ і стиснення = σ^- призводить до зміни опору протилежних знаків). Геометричним ефектом можна знехтувати, а зв'язок між $\Delta\rho/\rho$ і σ є п'єзорезистивним коефіцієнтом π (рівняння 2.12).

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi \cdot \sigma \quad (2.12)$$

Як і більшість властивостей кремнію, п'єзорезистивний коефіцієнт є анізотропним, що в даному випадку означає, що воно залежить від напрямку

площини кристала. На практиці це має велике значення для напрямку, в якому повинні бути розташовані п'єзореzystори для отримання максимальної чутливості (тобто для датчика тиску співвідношення прикладеного тиску до вихідної напруги). У тривимірному просторі механічна напруга розбивається на нормальні напруги $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ і напруги зсуву $\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$. п'єзореzystивні коефіцієнти залежать як від трьох декартових напрямків, так і від трьох напрямків зсуву, таким чином утворюючи матрицю 6×6 . Оскільки монокристалічний кремній є кубічною кристалічною системою, симетрії зменшують кількість п'єзореzystивних коефіцієнтів до π_{11}, π_{12} і π_{44} . Відношення питомого опору до напруги для напрямку кристала $\langle 100 \rangle$ подано в рівнянні 2.13. Щоб отримати це для інших напрямків, наприклад $\langle 110 \rangle$ або $\langle 111 \rangle$, трансформуйте мають бути застосовані матриці [31].

$$\begin{pmatrix} \Delta\rho_1/\rho \\ \Delta\rho_2/\rho \\ \Delta\rho_3/\rho \\ \Delta\rho_{12}/\rho \\ \Delta\rho_{13}/\rho \\ \Delta\rho_{23}/\rho \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Найпростіша конструкція п'єзореzystора показана на рис.2.8. Механічна напруга виникає або паралельно (поздовжнє, σ_L), або перпендикулярне (поперечне, σ_T) струму I .

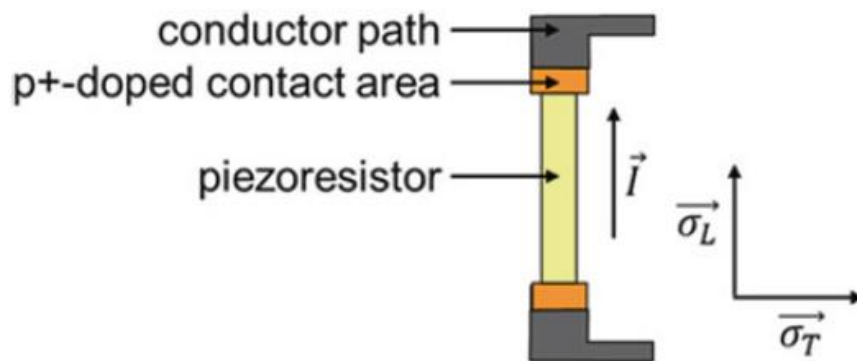


Рисунок 2.8 – Найпростіша конструкція п'єзореzystора

Тому розрахунок зміни опору можна спростити до формули 2.14. Щоб отримати π_L і π_T , π_{11}, π_{12} і π_{14} потрібно перетворити за допомогою матриці перетворення Ейлера [31].

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_L \cdot \sigma_L + \pi_T \cdot \sigma_T \quad (2.14)$$

Для MEMS кремнієвих датчиків тиску, як правило, 100 пластин використовуються, що означає, що поверхня пластини орієнтована в напрямку $\langle 100 \rangle$. Технологія виготовлення передбачає, що п'єзореzystори

також лежать у площині $\{100\}$. Результат перетворення для напрямку кристала $\langle 100 \rangle$ наведено в рівнянні 2.15. Кут ϕ вимірюється починаючи з напрямку $\langle 100 \rangle$

$$\begin{aligned} \pi_L &= \pi_{11} + 2(\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})((\cos \phi)^2(\sin \phi)^2) \\ \pi_T &= \pi_{12} - (\pi_{44} + \pi_{12} - \pi_{11})((\cos \phi)^2(-\sin \phi)^2 + (\sin \phi)^2(\cos \phi)^2) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Розподіл залежних від напрямку значень π_L і π_T резисторів з р-легуванням у пластині 100 схематично зображено на рис.2.9, (та наведено в додатку А рис.9).

У літературі та інтернеті часто зустрічається позначення «(100) wafer» (з дефісом і без). Але це може призвести до непорозумінь: оскільки кристалічна структура кремнію кубічна і, отже, дуже симетрична, властивості однакові в усіх еквівалентних кристалічних напрямках. Отже, орієнтація поверхні не обмежується однією площиною монокристала (100) або, швидше, одним напрямком $[100]$, а позначення краще мати як $\{100\}$ wafer. Це здається досить незвичайним, тому в цій книзі було встановлено позначення 100-пластинка.

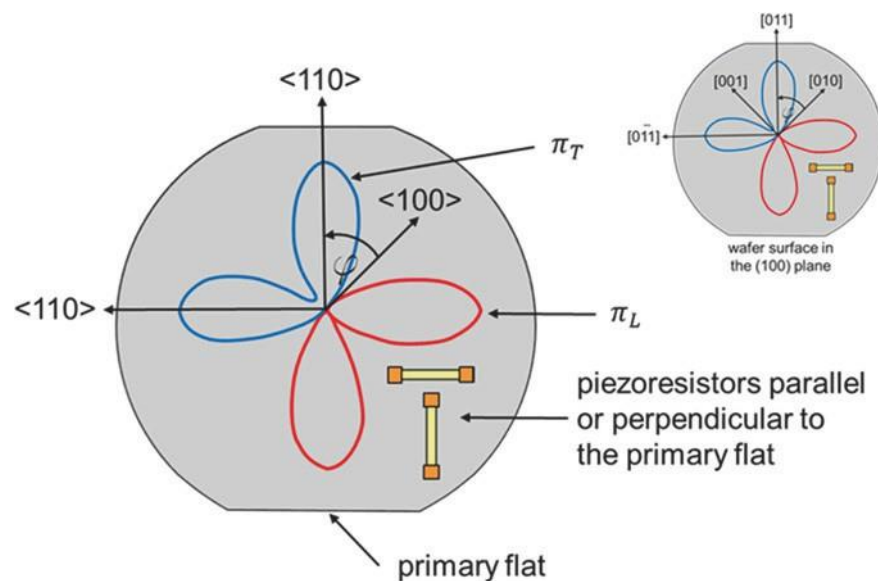


Рисунок 2.9 – Кремнієва 100-пластина з напрямками кристалів відносно первинної плоскої і залежні від напрямку значення π_L і π_T р-легованих резисторів. Праворуч угорі: особливий випадок 100-подібної пластини з точною площиною поверхні (100)

Максимум π_L і π_T для резисторів з р-легуванням виникає під кутом $\phi = 45^\circ$ і 135° або, точніше, у напрямку кристала $\langle 110 \rangle$ (рівняння 2.16). З цього,

можна зробити висновок, що для досягнення максимальної чутливості п'єзореzystори повинні бути розташовані паралельно або перпендикулярно первинній площині

$$\begin{aligned}\pi_L &= \frac{1}{2}(\pi_{11} + \pi_{44} + \pi_{12}) \\ \pi_T &= \frac{1}{2}(\pi_{11} - \pi_{44} + \pi_{12})\end{aligned}\quad (2.16)$$

При використанні ефекту п'єзореzystивного датчика додаткова проблема виникає через досягнення не тільки високої чутливості, але й високої точності. Складність полягає в тому, що п'єзореzystивні коефіцієнти також чутливі до температури. Багатообіцяючим рішенням є не використовувати лише один п'єзореzystор і вимірювати залежну від опору вихідну напругу в певному положенні, а побудувати повний міст Уїтстона з чотирьох резисторів. Міст Уїтстона являє собою комбінацію двох дільників напруги, між якими вимірюється вихідна напруга (рис.2.10), (та наведено в додатку А рис.10).

Максимальна вихідна напруга на зміну опору ΔR і лінійна крива вихідної напруги отримані з чотирма п'єзореzystорами однакового опору R у стані без напруги. При цьому температурні впливи впливають однаково на всі резистори і напруга моста залишається незмінною.

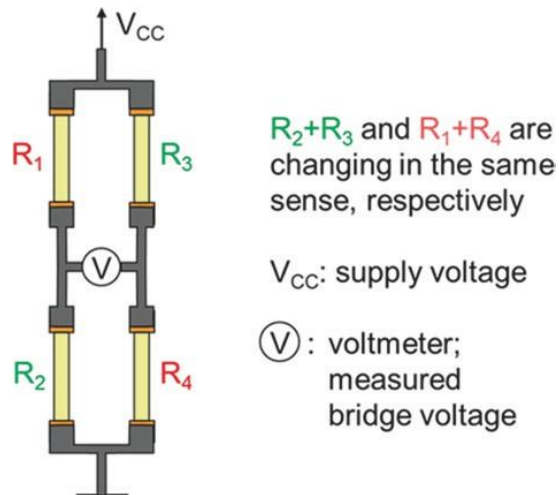


Рисунок 2.10 – Чотири резистори, з'єднані в міст Уїтстона

Через неминучі виробничі відхилення необхідно враховувати (невелику) залежність від напруги зміщення та температури, яку можна усунути під час подальшої обробки сигналу. Виміряна мостова напруга V_{out} цього «повного мосту» дорівнює (рівняння 2.17):

$$V_{out} = \frac{\Delta R}{R} \cdot V_{cc} \quad (2.17)$$

2.4 Висновки до розділу

Для розуміння роботи і правильності функціонування п'єзорезистивних датчиків тиску, описано виробництво найбільш типового основного матеріалу — кремнію — разом із його особливими властивостями, пов'язаними з кристалічністю. Зокрема, це включає п'єзорезистивний ефект, який є основою для представленого тут принципу датчика. Крім того, також пояснюється концепція легування, тобто введення сторонніх атомів у кристал кремнію з метою підвищення електропровідності та, таким чином, чутливості сенсора. Конструкція датчика, у свою чергу, сильно залежить від використовуваних методів виробництва. Тому вони також пояснюються тут у тому порядку, у якому вони фактично виконуються.

3 РОЗРОБКА АВТОГЕНЕРАТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ ДЛЯ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

3.1 Автогенераторний перетворювач тиску на основі мостових MEMS тензочутливої схеми

Схема автогенераторного перетворювача тиску складається з МДН та біполярного транзисторів (рис.3.1), (та наведено в додатку А рис.11) [53]. Активна складова імпедансу на електродах колектор-стік транзисторної структури носить від'ємний характер, а реактивна складова імпедансу має ємнісний характер.

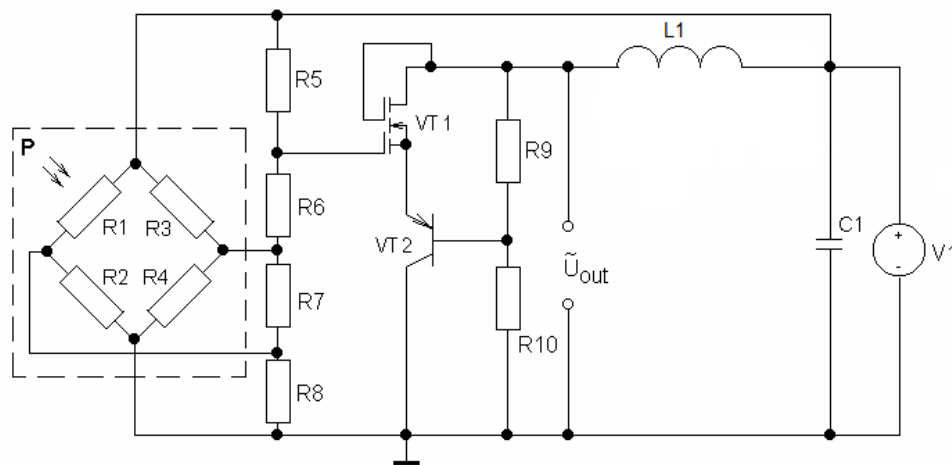


Рисунок 3.1 – Схема автогенераторного перетворювача тиску

Для визначення аналітичної залежності вольт-амперної характеристики автогенераторного перетворювача тиску розглядається еквівалентна схема за постійним струмом (рисунок 3.2), (та наведено в додатку А рис.12). Визначення аналітичної залежності вольт-амперної характеристики автогенераторного перетворювача тиску дає можливість переконатись в існуванні від'ємного диференціального опору, який відповідає падаючій ділянці ВАХ та правильно обирати робочу точку на вольт-амперній характеристиці вольт-амперної характеристики автогенераторного перетворювача тиску.

В еквівалентній схемі автогенераторного перетворювача тиску використано наступні позначення: R_1 - опір тензорезисторів; R_2 - опір бази біполярного транзистора; R_3 - опір колектора біполярного транзистора; R_4 - опір пасивної індуктивності; R_5 - опір емітера біполярного транзистора; R_6 - опір виток польового транзистора; R_7 - опір витік-перший затвор польового двозатворного транзистора; R_8 - опір першого затвору польового

транзистора; R_9 , R_{11} та R_{12} - опори виток-стоку польового двозатворного транзистора, відповідно; R_{10} - опір підкладки польового транзистора; R_{13} - опір стік-другий затвор польового двозатворного транзистора; R_{14} - омічний опір другого затвора польового двозатворного транзистора; R_{15} - опір р-п переходу стоку польового транзистора.

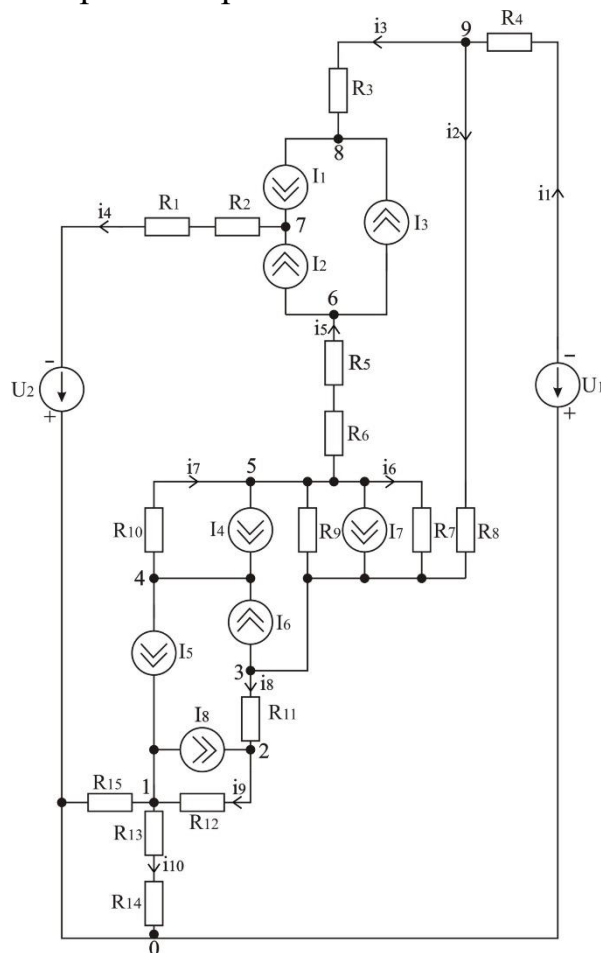


Рисунок 3.2 – Еквівалентна схема автогенераторного перетворювача тиску по постійному струму

Струми, які протікають через біполярний транзистор I_1 , I_2 , I_3 визначаються з виразів:

$$I_1 = I_{bc} / BR, \quad I_2 = I_{be} / BF, \quad I_3 = (I_2 - I_1) / K_{Qb}, \quad (3.1)$$

де BR - коефіцієнт підсилення струму біполярного транзистора в інверсному режимі; BF - коефіцієнт підсилення струму біполярного транзистора в нормальному режимі; K_{Qb} - коефіцієнт, який визначається з виразу

$$K_{Q_b} = \frac{\text{відношення заряду основних носіїв в базі}}{\text{відношення заряду основних носіїв в базі при нульовому зміщенні}} = \\ = K_{Q_1} (1 + (1 + 4K_{Q_2})^{NK}) / 2,$$

де $K_{Q_1} = 1/(1 - U_{bc}/U_{AF} - U_{be}/U_{AR})$; $K_{Q_2} = I_{be}/I_{KF} + I_{bc}/I_{KR}$; U_{AF} та U_{AR} - напруга Ерлі біполярного транзистора в нормальному та інверсному режимі; I_{KF} - для біполярного транзистора початкова точка спаду BF від зміни струму через колектор в прямому режимі; I_{KR} - для біполярного транзистора початкова точка спаду залежності BR від зміни струму через емітер у інверсному режимі; NK - коефіцієнт, який визначає множник K_{Q_b} ; I_{be} та I_{bc} - струми база-емітер біполярного транзистора та база-колектор біполярного транзистора, відповідно, які обчислюються за виразами [54]:

$$I_{be} = I_s (\exp(U_{be}/(NF * U_T)) - 1),$$

$$I_{bc} = I_s (\exp(U_{bc}/(NR * U_T)) - 1),$$

де I_s - струм насичення біполярного транзистора при температурі 27^0 C;

$$U_T = kT/q;$$

U_{be} та U_{bc} - напруги на переходах біполярного транзистора база-емітер та база-колектор;

NF - коефіцієнт неідеальності переходів біполярного транзистора в нормальному режимі;

NR - коефіцієнт неідеальності переходів біполярного транзистора в інверсному режимі.

Для біполярного транзистора об'ємний опір бази визначається співвідношенням:

$$R_b = \begin{cases} R_{bm} + (R_{bx} - R_{bm})/K_{Q_b} \text{ при } I_{Rb} = \infty; \\ R_{bm} + 3(R_{bx} - R_{bm}) \frac{\operatorname{tg} x - x}{x * \operatorname{tg}^2 x} \text{ при } I_{Rb} > 0, \end{cases}$$

$$\text{де } x = \frac{\sqrt{1 + 14,59025 I_b / I_{Rb}} - 1}{2,4317 \sqrt{I_b / I_{Rb}}};$$

R_{bx} - максимальний об'ємний опір бази біполярного транзистора за

нульового зміщення; R_{bm} - максимальний опір бази біполярного транзистора за великих струмів; I_{Rb} - струм бази біполярного транзистора, за якого опір бази падає на 50 % від повного діапазону між значеннями опорів R_b та R_{bm} .

Струми стік-витік польового транзистора $I_7 = I_8$ в лінійному режимі роботи ($U_{ds} < (U_{gs} - U_{nop})$) визначається виразом [55]

$$I_7 = I_8 = \frac{\mu C_0 W}{L} \left((U_{gs} - U_{nop}) U_{ds} - \frac{U_{ds}^2}{2} \right), \quad (3.2)$$

де U_{ds} - напруга стік-витік польового транзистора; μ - рухливість носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі польового транзистора, U_{gs} - напруга затвор-витік польового транзистора; W - ширина каналу польового транзистора, L - довжина каналу польового транзистора.

Порогова напруга польового транзистора визначається виразом [54]

$$U_{nop} = \varphi_{SiO_2} + 2\varphi_B - \frac{Q_s}{C_0} + \frac{1}{C_0} \sqrt{4\varepsilon_s q N_A \varphi_B},$$

де Q_s - питомий поверхневий заряд у напівпровідниковому матеріалі польового транзистора, Ф/м²; ε_s - відносна електрична проникність у напівпровідниковому матеріалі польового транзистора; N_A - концентрація домішок у напівпровідниковому матеріалі польового транзистора; C_0 - питома ємність підзатворного оксиду.

Потенціал Фермі у напівпровідниковому матеріалі польового транзистора описується виразом

$$\varphi_B = \pm kT / q \ln(N_A / n_i),$$

де n_i - концентрація носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі польового транзистора.

У режимі насичення за умови $U_{ds} \geq (U_{gs} - U_{nop})$ струм стік-витік польового транзистора визначається виразом

$$I_7 = \frac{\mu C_0 W}{6L} \left((U_{gsat} + 2\varphi_B)^2 + U_{gs} (U_{gsat} + 2\varphi_B) - 12\varphi_B (U_{gs} - \varphi_B - \frac{4}{3} K \varphi_B^{1/2}) \right)$$

де $K = (\varepsilon_S q N_A / C_0)^{1/2}$, U_{dSat} - напруга стік-витік польового транзистора в режимі насичення

$$U_{dSat} = U_{gs} - 2\varphi_B + K^2(1 - (1 + 2U_{gs} / K^2)^{1/2}).$$

Опір стік-витік польового транзистора R_{ds} у лінійній області описується виразом [55]

$$R_{ds} = \frac{L}{W\mu C_0} (U_{gs} - U_{nop}),$$

а в області насичення польового транзистора

$$R_{ds} = \frac{12 \left[L(U_d - U_{dSat})^{1/2} - 2(\varepsilon_S / qN_A)^{1/2} (U_d - U_{dSat}) \right]}{W\mu C_0 (2\varepsilon_S / qN_A)^{1/2}} \times$$

$$\times \frac{1}{(U_{dSat} + 2\varphi_B)^2 + U_{gs}(U_{dSat} + 2\varphi_B) - 12\varphi_B(U_{gs} - \varphi_B - 4/3K\varphi_B^{1/2})},$$

де U_d - напруга на стоці польового транзистора.

Струми польового транзистора: підкладка-витік I_6 , I_5 і струм підкладка-стік I_4 польового транзистора обчислюються за виразами:

$$I_4 = I_S (\exp(U_{pd} / (N_D U_{nop})) - 1), \quad (3.3)$$

$$I_5 = I_6 = I_S (\exp(U_{ps} / (N_S U_{nop})) - 1), \quad (3.4)$$

де U_{ps} - напруга підкладка-витік польового транзистора,

U_{pd} - напруга підкладка-стік польового транзистора,

N_D і N_S - коефіцієнти неідеальності переходів польового транзистора підкладка-стік, а також підкладка-витік.

На основі еквівалентної схеми (рис. 3.2) використовуючи метод вузлових потенціалів та прийнявши вузол 0 у якості базисного, система рівнянь Кірхгофа буде мати вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} I_8 - I_5 = -\varphi_1(y_9 + y_{10}) + \varphi_2 y_9; \\ -I_8 = \varphi_1 y_9 - \varphi_2(y_9 + y_8) + \varphi_3 y_8; \\ I_6 - I_7 = \varphi_2 y_8 - \varphi_3(y_8 + y_6 + y_2) + \varphi_5 y_6 + \varphi_9 y_2; \\ -I_4 + I_5 - I_6 = -\varphi_4 y_7 + \varphi_5 y_7; \\ I_4 + I_7 = \varphi_3 y_6 + \varphi_4 y_7 - \varphi_5(y_5 + y_6 + y_7) + \varphi_6 y_5; \\ I_2 + I_3 = \varphi_5 y_5 - \varphi_6 y_5; \\ -(I_1 + I_2) + U_2 y_4 = -\varphi_7 y_4; \\ I_1 - I_3 = -\varphi_8 y_3 + \varphi_9 y_3; \\ U_1 y_1 = \varphi_3 y_2 + \varphi_8 y_3 - \varphi_9(y_3 + y_2 + y_1). \end{array} \right. \quad (3.5)$$

Провідності гілок еквівалентної схеми транзисторної структури (рис. 3.2) визначаються виразами:

$$\begin{aligned} y_1 &= 1/R_L, \quad y_2 = 1/R_8, \quad y_3 = 1/R_3, \quad y_4 = 1/(R_1 + R_2), \quad y_5 = 1/(R_5 + R_6), \\ y_6 &= (R_9 + R_7)/(R_9 R_7), \quad y_7 = 1/R_{10}, \quad y_8 = 1/R_{11}, \quad y_9 = 1/R_{12}, \\ y_{10} &= (R_{13} + R_{14} + R_{15})/((R_{13} + R_{14})R_{15}). \end{aligned}$$

Для спрощення системи рівнянь будемо використовувати такі позначення:

$$\begin{aligned} A_1 &= I_5 - I_8, \quad A_2 = -I_8, \quad A_3 = I_6 - I_7, \quad A_4 = -I_4 + I_5 - I_6, \quad A_5 = I_4 + I_7, \\ A_6 &= I_2 + I_3, \quad A_7 = -I_1 - I_2 - U_1 y_4, \quad A_8 = I_1 - I_3, \quad A_9 = U_1 y_1. \end{aligned}$$

На підставі вище прийнятих позначень, система рівнянь (3.5) прийме наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = -\varphi_1(y_9 + y_{10}) + \varphi_2 y_9; \\ A_2 = \varphi_1 y_9 - \varphi_2(y_8 + y_9) + \varphi_3 y_8; \\ A_3 = \varphi_2 y_8 - \varphi_3(y_2 + y_6 + y_8) + \varphi_5 y_6 + \varphi_9 y_2; \\ A_4 = -\varphi_4 y_7 + \varphi_5 y_7; \\ A_5 = \varphi_3 y_6 + \varphi_4 y_7 - \varphi_5(y_5 + y_6 + y_7) + \varphi_6 y_5; \\ A_6 = \varphi_5 y_5 - \varphi_6 y_5; \\ A_7 = -\varphi_7 y_4; \\ A_8 = -\varphi_8 y_3 + \varphi_9 y_3; \\ A_9 = \varphi_3 y_2 + \varphi_8 y_3 - \varphi_9(y_3 + y_2 + y_1), \end{array} \right. \quad (3.6)$$

На підставі восьмого рівняння системи (3.6) знайдемо величину φ_8

$$\varphi_8 = \varphi_9 - A_8 / y_3. \quad (3.7)$$

З урахуванням виразу (3.7) з дев'ятого рівняння системи (3.6) визначимо величину φ_3

$$\varphi_3 = A_9 / y_2 + A_8 y_3 / y_2 - \varphi_9 y_3 / y_2 + \varphi_9 (y_1 + y_2 + y_3) / y_2. \quad (3.8)$$

Із четвертого рівняння системи (3.6) знайдемо величину φ_4

$$\varphi_4 = \varphi_5 - A_4 / y_7. \quad (3.9)$$

Із шостого рівняння системи (3.6) знайдемо величину φ_6

$$\varphi_6 = (\varphi_5 y_5 - A_6) / y_6. \quad (3.10)$$

Підставивши вирази (3.8), (3.9) і (3.10) в п'яте рівняння системи (3.6) знайдемо величину φ_5

$$\varphi_5 = \varphi_9 \frac{(y_1 + y_2 + y_3) y_6}{B_1 y_2} - \varphi_9 \frac{y_3 y_6}{B_1 y_2} - \frac{A_5}{B_1} + \frac{A_9 y_6}{B_1 y_2} + \frac{A_8 y_3 y_6}{B_1 y_2} - \frac{A_4}{B_1} - \frac{A_6 y_5 y_6}{B_1}, \quad (3.11)$$

де $B_1 = y_5 + y_6 - y_5^2 / y_6$.

З першого рівняння системи (3.6) знайдемо величину φ_1

$$\varphi_1 = \varphi_2 y_9 / (y_9 + y_{10}) - A_1 / (y_9 + y_{10}). \quad (3.12)$$

На підставі виразів (3.8) та (3.12) з другого рівняння системи (3.6) знайдемо величину φ_2

$$\varphi_2 = \varphi_9 \frac{(y_1 + y_2 + y_3) y_8}{y_2} - \varphi_9 \frac{y_3 y_8}{B_2 y_2} - \frac{A_2}{B_2} - \frac{A_1 y_9}{B_2 (y_9 + y_{10})} + \frac{A_9 y_8}{B_2 y_2} + \frac{A_8 y_3 y_8}{B_2 y_2}, \quad (3.13)$$

де $B_2 = y_8 + y_9 - y_9^2 / (y_9 + y_{10})$.

На підставі виразів (3.8), (3.11) і (3.13) з третього рівняння системи (3.6) знайдемо величину φ_9

$$\begin{aligned} \phi_9 = & -\frac{A_3}{C_1} - \frac{A_8 y_2}{C_1 B_2} - \frac{A_1 y_8 y_9}{C_1 B_2 (y_9 + Y_{10})} + \frac{A_9 y_8^2}{C_1 B_2 y_2} + \frac{A_8 y_8^2 y_3}{C_1 B_2 y_2} - \frac{A_9 (y_2 + y_6 + y_8)}{C_1 y_2} - \\ & - \frac{A_8 y_3 (y_2 + y_6 + y_8)}{C_1 y_2} - \frac{A_5 y_6}{C_1 B_1} + \frac{A_9 y_6^2}{C_1 B_1 y_2} + \frac{A_8 y_6^2 y_3}{C_1 B_1 y_2} - \frac{A_4 y_6}{C_1 B_1} - \frac{A_6 y_6^2 y_5}{C_1 B_1}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

де

$$\begin{aligned} C_1 = & -\frac{y_8^2 (y_1 + y_2 + y_3)}{y_2} + \frac{y_8^2 y_3}{B_2 y_2} - \frac{y_3 (y_2 + y_6 + y_8)}{y_2} + \frac{(y_1 + y_2 + y_3)(y_2 + y_6 + y_8)}{y_2} - \\ & - \frac{y_6^2 (y_1 + y_2 + y_3)}{B_1 y_2} + \frac{y_6^2 y_3}{B_1 y_2} - y_2. \end{aligned}$$

Струм протікаючий у вихідному колі транзисторної структури, визначається виразом

$$i_{вих} = i_1 = (-U_1 - \phi_9) y_1.$$

Після підстановки в останнє рівняння системи величини ϕ_9 з рівняння (3.14), визначаємо аналітичний вираз для ВАХ автогенераторного перетворювача тиску

$$\begin{aligned} i_{вих} = & -U_1 y_1 + \frac{A_3 y_1}{C_1} + \frac{A_8 y_2 y_1}{C_1 B_2} + \frac{A_1 y_8 y_9 y_1}{C_1 B_2 (y_9 + y_{10})} - \frac{A_9 y_8^2 y_1}{C_1 B_2 y_2} - \frac{A_8 y_8^2 y_3 y_1}{C_1 B_2 y_2} + \\ & + \frac{A_9 y_1 (y_2 + y_6 + y_8)}{C_1 y_2} + \frac{A_8 y_3 y_1 (y_2 + y_6 + y_8)}{C_1 y_2} + \frac{A_5 y_6 y_1}{C_1 B_1} - \frac{A_9 y_6^2 y_1}{C_1 B_1 y_2} - \frac{A_8 y_6^2 y_3 y_1}{C_1 B_1 y_2} + \\ & + \frac{A_4 y_6 y_1}{C_1 B_1} + \frac{A_6 y_6^2 y_5 y_1}{C_1 B_1}. \end{aligned}$$

(3.15)

Згідно формули (3.15) розрахована вольт-амперна характеристика автогенераторного перетворювача тиску. На рис. 3.3 (та наведено в додатку А рис.13) наведені експериментальні вольт-амперні характеристики автогенераторного перетворювача тиску на основі біполярного та польового транзисторів BC857 та VF998 і чутливого до тиску елемента МРХНЗ6400АС6Т1.

Вольт-амперна характеристика в статичному режимі представлена на рисунку 3.3. Підключення зовнішньої пасивної індуктивності до виводів колектор-стік транзисторної структури дозволяє побудувати автогенератор, вихідна частота якого під дією тиску змінюється. Динамічна вольт-амперна

характеристика автогенераторного перетворювача тиску наведена на рис. 3.4, (та наведено в додатку А рис.14).

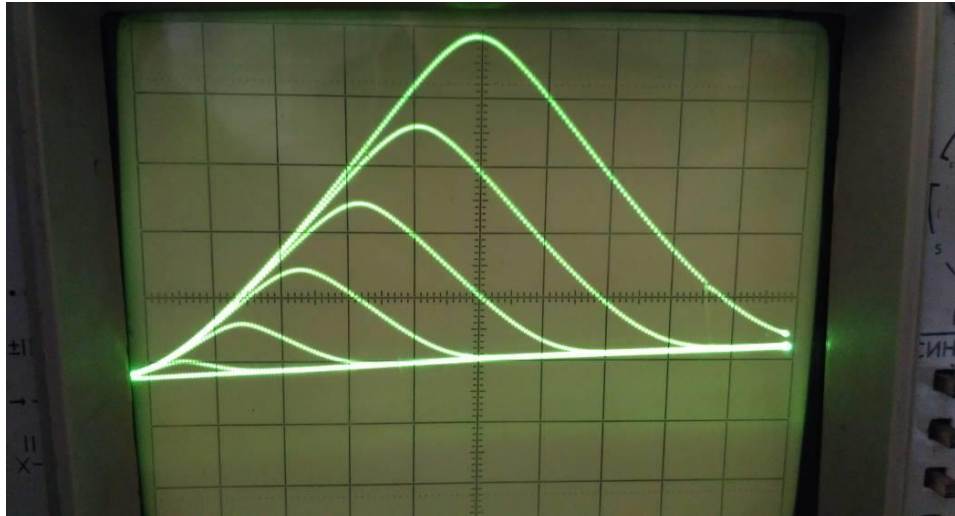


Рисунок 3.3 – Статична ВАХ автогенераторного перетворювача тиску (по вертикальній осі: одна поділка – 5 мА, а по горизонтальній осі – 1 В)

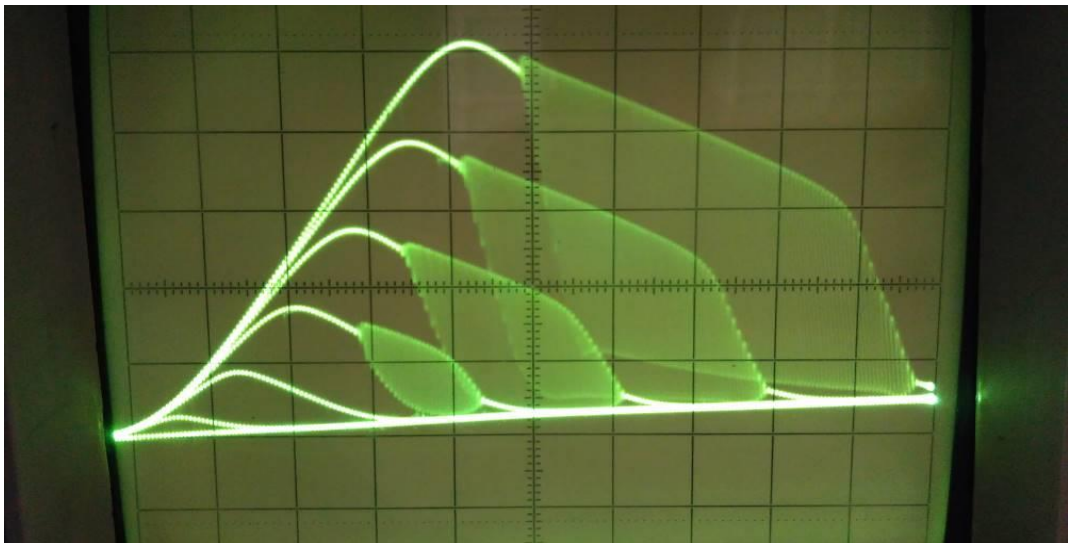


Рисунок 3.4 – Динамічна ВАХ автогенераторного перетворювача тиску (по вертикальній осі одна поділка – 5 мА, а по горизонтальній осі – 1В)

З рисунка 3.3 видно, що при збільшенні напруги керування U_2 збільшується ділянка від'ємного диференційного опору. При напрузі керування $U_2 = 3\text{ В}$ ділянка від'ємного диференційного опору по U_1 лежить в межах 4 – 8 В, а при $U_2 = 5\text{ В}$ - в межах 5 – 10 В.

3.2 Математична модель для визначення активної і реактивної складової імпедансу транзисторної структури від дії тиску

Для визначення властивостей автогенераторного перетворювача тиску необхідно розглянути математичну модель, на основі якої можна отримати залежність активної і реактивної складової імпедансу транзисторної структури від дії тиску, аналітичний вираз для функції перетворення, а також рівняння чутливості автогенераторного перетворювача тиску. Розрахунки проведено на основі нелінійних еквівалентних схем біполярного і польового транзисторів, які утворюють автогенераторний перетворювач тиску (рис.3.5), (та наведено в додатку А рис.15).

Для визначення основних параметрів автогенераторного перетворювача тиску, які характеризують роботу перетворювача тиску (рис. 3.1), на основі нелінійної еквівалентної схеми, представленої на рис. 3.5, розраховано імпеданс транзисторної структури на електродах колектор-стік біполярного транзистора та польового транзистора. Для зручності розрахунків на рис. 3.6 наведена перетворена нелінійна еквівалентна схема автогенераторного перетворювача тиску.

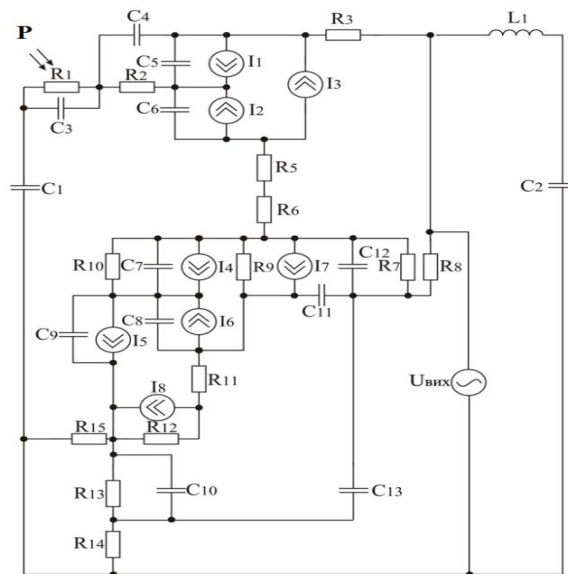


Рисунок 3.5 - Еквівалентна схема автогенераторного перетворювача тиску на основі нелінійних еквівалентних схем біполярного і польового транзисторів

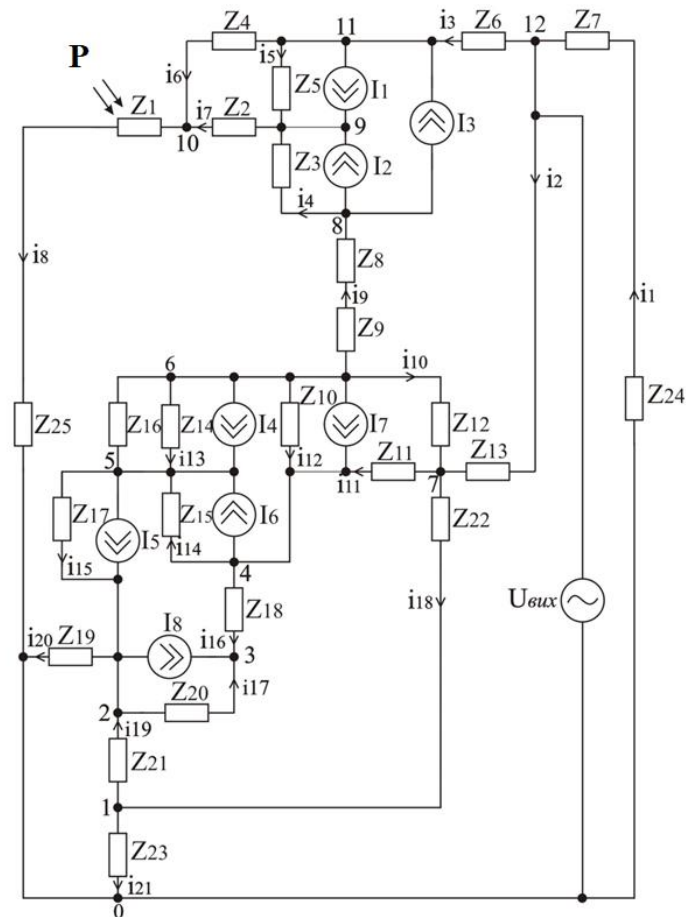


Рисунок 3.6 – Перетворена еквівалентна схема автогенераторного перетворювача тиску

Як показано у розділі 3.1, вольт-амперна характеристика автогенераторного перетворювача тиску має ділянку від'ємного диференційного опору, яка дозволяє компенсувати втрати у коливальному контурі автогенераторного перетворювача тиску, який утворений еквівалентною ємністю на електродах колектор-стік біполярного транзистора і польового транзистора та зовнішньою пасивною індуктивністю. Для визначення функції перетворення автогенераторного перетворювача тиску необхідно знайти залежність частоти генерації від зміни тиску. Система рівнянь Кірхгофа, складена на основі нелінійної еквівалентної схеми автогенераторного перетворювача тиску (рис. 3.6), прийнявши вузол 0 як базисний:

$$\begin{cases}
0 = -\phi_1(y_{18} + y_{19} - y_{21}) - \phi_2 y_{19} + \phi_7 y_{18}; \\
I_8 - I_5 = \phi_1 y_{19} - \phi_2 (y_{19} + y_{20} + y_{17} + y_{15}) + \phi_3 y_{17} + \phi_5 y_{15}; \\
-I_8 = \phi_2 y_{17} + \phi_3 (y_{16} - y_{17}) + \phi_4 y_{16}; \\
I_6 - I_1 = \phi_2 y_{16} - \phi_4 (y_{16} + y_{14} + y_{12} + y_{11}) + \phi_5 y_{14} + \phi_6 y_{12} + \phi_7 y_{11}; \\
I_5 - I_4 - I_6 = \phi_2 y_{15} + \phi_4 y_{14} - \phi_5 (y_{15} - y_{13} - y_{14}) + \phi_6 y_{13}; \\
I_4 + I_8 = \phi_4 y_{12} + \phi_5 y_{13} - \phi_6 (y_{13} + y_{12} + y_{10} + y_9) + \phi_7 y_{13} + \phi_8 y_9; \\
0 = \phi_1 y_{18} + \phi_4 y_{11} + \phi_6 y_{13} - \phi_7 (y_{10} + y_{11} + y_2 + y_{18}) + U_{aux} y_2 \\
I_2 + I_3 = \phi_6 y_9 - \phi_8 (y_9 + y_4) + \phi_9 y_4; \\
-(I_2 + I_1) = \phi_8 y_4 - \phi_9 (y_4 + y_7 + y_5) + \phi_{11} y_5 + \phi_{10} y_7; \\
0 = \phi_9 y_7 + \phi_{11} y_6 - \phi_{10} (y_8 + y_7 + y_6); \\
I_1 - I_3 - U_{aux} y_3 = \phi_9 y_5 - \phi_{11} (y_6 + y_5 + y_3) + \phi_{10} y_6; \\
U_{aux} (y_3 + y_2 + y_1) = \phi_7 y_2 + \phi_{11} y_3,
\end{cases} \quad (3.16)$$

де провідності гілок еквівалентної схеми автогенераторного перетворювача тиску, які визначаються виразами:

$$\begin{aligned}
y_1 &= 1/(Z_{24} + Z_7); \quad y_2 = 1/Z_{13}; \quad y_3 = 1/Z_6; \quad y_4 = 1/Z_3; \quad y_5 = 1/Z_5; \quad y_6 = 1/Z_4; \\
y_7 &= 1/Z_2; \quad y_8 = 1/(Z_{25} + Z_1); \quad y_9 = 1/(Z_8 + Z_9); \quad y_{10} = 1/Z_{12}; \quad y_{11} = 1/Z_{11}; \\
y_{12} &= 1/Z_{10}; \quad y_{13} = (Z_{16} + Z_{14})/(Z_{16}Z_{14}); \quad y_{14} = 1/Z_{15}; \quad y_{15} = 1/Z_{17}; \quad Y_{16} = 1/Z_{18}; \\
y_{17} &= 1/Z_{20}; \quad y_{18} = 1/Z_{22}; \quad y_{19} = 1/Z_{21}; \quad y_{20} = 1/Z_{19}; \quad y_{21} = 1/Z_{23},
\end{aligned}$$

$$\text{де } Z_1 = \frac{R_1}{1 + \omega^2 R_1^2 C_3^2} - j \frac{R_1^2 \omega C_3}{1 + \omega^2 R_1^2 C_3^2}; \quad Z_2 = R_2; \quad Z_3 = -\frac{j}{\omega C_6}; \quad Z_4 = -\frac{j}{\omega C_4};$$

$$Z_5 = -\frac{j}{\omega C_5}; \quad Z_6 = R_3; \quad Z_7 = j\omega L_1; \quad Z_8 = R_5; \quad Z_9 = R_6; \quad Z_{10} = R_9; \quad Z_{11} = -\frac{j}{\omega C_{11}};$$

$$Z_{12} = \frac{R_7}{1 + \omega^2 R_7^2 C_{12}^2} - j \frac{R_7^2 \omega C_{12}}{1 + \omega^2 R_7^2 C_{12}^2}; \quad Z_{13} = R_8; \quad Z_{14} = -\frac{j}{\omega C_7}; \quad Z_{15} = -\frac{j}{\omega C_8};$$

$$Z_{16} = R_{10}; \quad Z_{17} = -\frac{j}{\omega C_9}; \quad Z_{18} = R_{11}; \quad Z_{19} = R_{15}; \quad Z_{20} = R_{12};$$

$$Z_{21} = \frac{R_{13}}{1 + \omega^2 R_{13}^2 C_{10}^2} - j \frac{R_{13}^2 \omega C_{10}}{1 + \omega^2 R_{13}^2 C_{10}^2}; \quad Z_{22} = -\frac{j}{\omega C_{13}}; \quad Z_{23} = R_{14}; \quad Z_{24} = -\frac{j}{\omega C_2};$$

$$Z_{25} = -\frac{j}{\omega C_1},$$

де R_1 - опір тензочутливого моста; R_2, R_3, R_5 - об'ємний опір бази, колектора і емітера біполярного транзистора; R_6, R_{15}, R_8 та R_{14} - об'ємні опори витоку, стоку та першого і другого затворів польового двозатворного

транзистора; R_7 - об'ємний опір затвор-витік польового транзистора; R_8 - об'ємний опір затвору польового транзистора; R_9 , R_{11} і R_{12} - об'ємні опори стік-витік польового транзистора; R_{10} - опір підкладки польового транзистора; R_{13} - опір затвор-стік польового транзистора $VT2$; R_{15} - опір р-п переходу стоку польового транзистора $VT2$; C_1 - ємність конденсатора C_1 ; C_2 - ємність конденсатора C_2 ; C_3 - внутрішня ємність тензочутливого елементу; C_4 - ємність між зовнішнім виводом бази та колектора біполярного транзистора; C_5 , C_6 - ємність переходу база-колектор і база-емітер біполярного транзистора; C_7 - ємність підкладка-витік польового транзистора; C_8 та C_9 - ємності підкладка-стік польового транзистора; C_{10} та C_{12} - ємності затвор-стік польового транзистора; C_{11} - ємність затвор-стік польового транзистора; C_{13} - ємність між першим і другим затвором польового транзистора; L_1 - зовнішня пасивна індуктивність.

У даному перетворювачі в якості чутливого елементу використаний MEMS напівпровідниковий сенсор тиску MPXHZ6400AC6T1. В такому сенсорі на мембрані розміщено тензочутливі резистори, опір яких змінюється під час дії тиску. Розглянемо принцип роботи і деякі конструктивні особливості тензочутливого моста MPXHZ6400AC6T1. Чутливим до тиску елементом є мембрана, яка створена в пластині з монокристалічного кремнію методом хімічного анізотропного травлення, технологія і принцип дії якого розглянутий у другому розділі. На поверхні чутливого до тиску елемента, в місцях найбільших механічних напруг, методом дифузії сформовані чутливі до тиску резистори. Чутливий до тиску елемент характеризується стабільністю в часі та відсутністю гістерезисних властивостей. Конфігурація мембрани чутливої до тиску залежить від конфігурації травлення та має форму квадрату. На основі MEMS резисторів чутливих до тиску були проведені експериментальні дослідження, на підставі яких отримано залежність частоти генерації автогенераторного перетворювача тиску.

На основі нелінійної еквівалентної схеми автогенераторного перетворювача тиску отримано аналітичну залежність функції перетворення радіотехнічного приладу вимірювання тиску, яка дозволяє визначити залежність частоти генерації від тиску і описується виразом

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{B_1 + \sqrt{B_1^2 + 4L_1C_{GD}(C_{CE}R_1(P)R_4(P))^2}}{2L_1C_{GD}(R_1(P)R_4(P)C_{CE})^2}}, \quad (3.17)$$

де

$$B_1 = L_1 C_{GD} - (C_{CE} R_1(P) R_4(P))^2 - C_{GD} C_{CE} R_1^2(P) R_4^2(P),$$

L_1 – зовнішня пасивна індуктивність, C_{CE} – прохідна ємність колектор-емітер біполярного транзистора, C_{GD} – ємність затвор-стік польового транзистора.

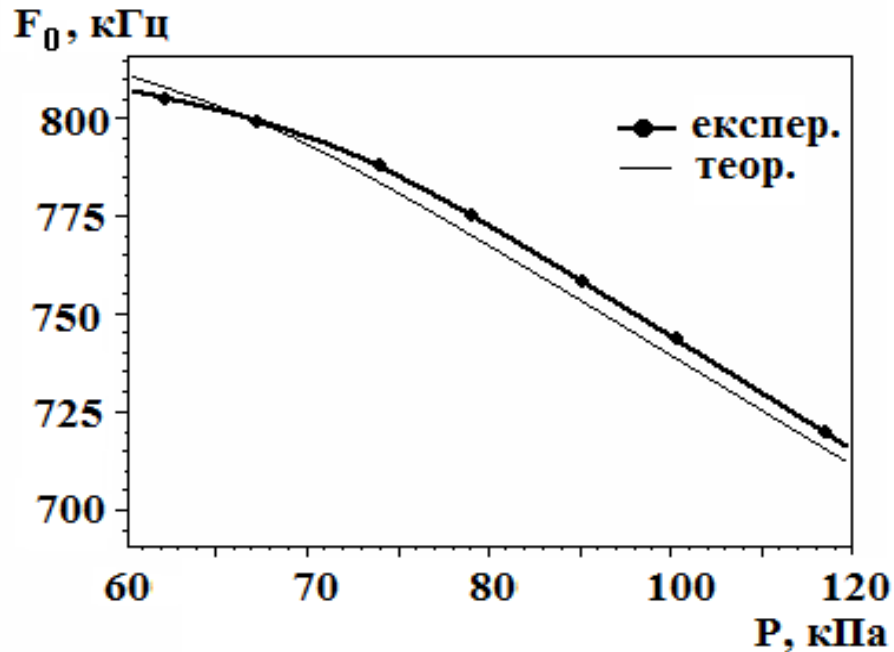


Рисунок 3.7 – Експериментальна і теоретична залежності частоти генерації автогенераторного перетворювача тиску

Графічна залежність функції перетворення автогенераторного перетворювача тиску наведена на рисунку 3.7 (та наведено в додатку А рис.16).

Чутливість автогенераторного перетворювача тиску визначена на основі рівняння (3.17) і описується аналітичним виразом:

$$\begin{aligned}
S_P^{F_0} = & 0.0562 \left(\frac{1}{B_2} \left(2C_{ce}^2 R_1(P) R_4^2(P) \left(\frac{\partial R_1(P)}{\partial P} \right) - 2C_{ce}^2 R_1^2(P) R_4(P) \left(\frac{\partial R_4(P)}{\partial P} \right) - \right. \right. \\
& - 2C_{gd} C_{ce} R_1(P) R_4^2(P) \left(\frac{\partial R_1(P)}{\partial P} \right) - 2C_{gd} C_{ce} R_1^2(P) R_4(P) \left(\frac{\partial R_4(P)}{\partial P} \right) + \frac{1}{2} \times \\
& \times \left(-2C_{ce}^2 R_1(P) R_4^2(P) \left(\frac{\partial R_1(P)}{\partial P} \right) - 2C_{ce}^2 R_1^2(P) R_4(P) \left(\frac{\partial R_4(P)}{\partial P} \right) - 2C_{gd} C_{ce} R_1(P) \times \right. \\
& \times R_4^2(P) \left(\frac{\partial R_1(P)}{\partial P} \right) - 2C_{gd} C_{ce} R_1^2(P) R_4(P) \left(\frac{\partial R_4(P)}{\partial P} \right) + 8L_1 C_{gd} C_{ce}^2 R_1(P) R_4^2(P) \times \\
& \times \left. \left. \left(\frac{\partial R_1(P)}{\partial P} \right) + 8L_1 C_{gd} C_{ce}^2 R_1^2(P) R_4(P) \left(\frac{\partial R_4(P)}{\partial P} \right) \right) \right) / B_3 - \frac{1}{B_2} \left(2(L_1 C_{gd} - C_{ce}^2 R_1^2(P) \times \right. \\
& \times R_4^2(P) - C_{gd} C_{ce} R_1^2(P) R_4^2(P) + B_3 \left(\frac{\partial R_1(P)}{\partial P} \right) \right) - \frac{1}{B_2} \left(2(L_1 C_{gd} - C_{ce}^2 R_1^2(P) R_4^2(P) - \right. \\
& - C_{gd} C_{ce} R_1^2(P) R_4^2(P) + B_3 \left(\frac{\partial R_4(P)}{\partial P} \right) \left. \left. \left. \left. \left. \right) \right) \right) \right) \right) / \\
& \left(\frac{1}{B_2} (L_1 C_{gd} - C_{ce}^2 R_1^2(P) R_4^2(P) - C_{gd} C_{ce} R_1^2(P) R_4^2(P) + B_3) \right)^{1/2},
\end{aligned}
\tag{3.18}$$

де $B_2 = 2L_1 C_{GD} (R_1(P) R_4(P) C_{CE})^2$,

$B_3 = \sqrt{B_1 + 4L_1 C_{GD} (C_{CE} R_1(P) R_4(P))^2}$.

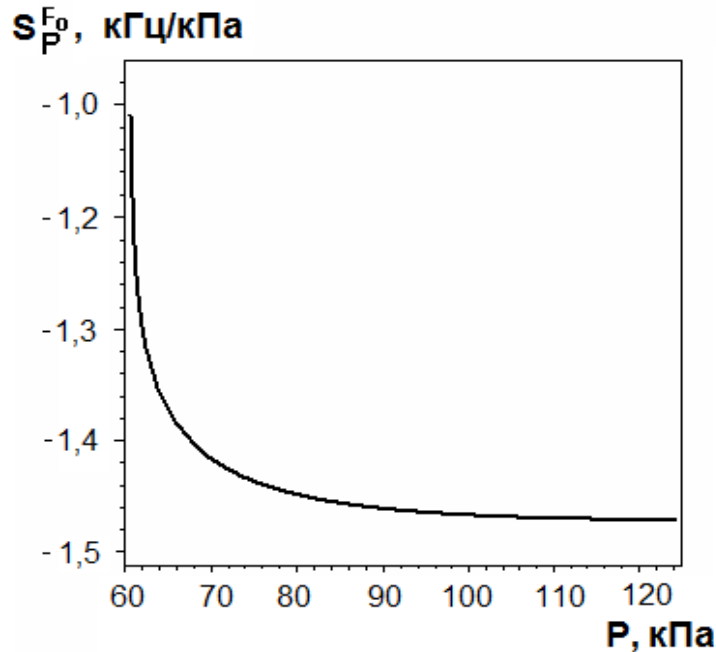


Рисунок 3.8 – Залежність чутливості від тиску автогенераторного перетворювача тиску

На основі експериментальних досліджень автогенераторного перетворювача тиску встановлено, що частота генерації змінювалась від 805 кГц до 725 кГц при зміні тиску від 50 кПа до 130 кПа. Чутливість автогенераторного перетворювача тиску складає 1,25 кГц/кПа – 1,55 кГц/кПа.

3.3 Висновки до розділу

1. Розглянуто метод вимірювання тиску на основі тензореактивного ефекту в автогенераторному перетворювачі тиску з тензочутливим елементом, який відрізняється від існуючих використанням залежності імпедансу транзисторної структури від дії тиску, що дозволило перетворювати тиск у частоту, причому тензочутливі елементи виступають і в ролі активних елементів автогенераторного перетворювача тиску, що надало принципову можливість підвищення точності і чутливості вимірювання тиску.
2. Розроблено математичні моделі автогенераторного перетворювача тиску на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з чутливими резистивними чутливим елементом, в яких на відміну від існуючих, враховано вплив тиску на елементи нелінійних еквівалентних схем перетворювача, що дало можливість визначити функцію перетворення і рівняння чутливості.
3. Проведено експериментальні дослідження, які показали, що чутливість автогенераторного перетворювача тиску на основі мостової MEMS тензочутливої схеми чутливість пристрою складала 1,25 кГц/кПа – 1,55кГц/кПа в діапазоні тисків 50 кПа -130 кПа.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

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

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

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

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

4.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

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

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

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	-	-	-
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (повному або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	55	-	50
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	-	40	-
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	-	-	-
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	-	-	-
Середнє значення балів експертів		48,3		

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

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

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	-	-	-
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	60	-	62
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	-	60	-
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	-	-	-
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	-	-	-
Середнє значення балів експертів	60,7		

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 [Козловський В.О., Лесько О.Й., Кавецький В.В.]

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

де $k_{нов}$, $k_{теор}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{нов} = 48,3$, $k_{теор} = 60,7$ балів;

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

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 48,3 + 0,4 \cdot 60,67 = 53,27 \text{ балів.}$$

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

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

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

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж», даний рівень становить 53,27 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

4.2.1 Витрати на оплату праці

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

оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [Козловський В.О., Лесько О.Й., Кавецький В.В.]

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

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

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

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

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

$$Z_o = 16450,00 \cdot 28 / 22 = 20936,36 \text{ (грн.)}.$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи	16450,00	747,73	28	20936,36
Ст. науковий співробітник	15910,00	723,18	28	20249,09
Консультант (інженер-розробник бездротових сенсорних мереж)	16055,00	729,77	8	5838,18
Фахівець 1-ї категорії	7210,00	327,73	22	7210,00
Всього				54233,64

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж» розраховуємо за формулою

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

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

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

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою

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

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

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

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

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

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

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

$$З_{р1} = 56,53 \cdot 5,10 = 288,31 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Налаштування робочого місця дослідника	5,10	2	1,10	56,53	288,31
Інсталяція програмного забезпечення моделювання мереж	6,22	4	1,50	77,09	479,49
Налагодження моделі мережі	7,85	5	1,70	87,37	685,83

Продовження таблиці 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Тренування моделі	3,18	5	1,70	87,37	277,83
-------------------	------	---	------	-------	--------

Проведення цифрового експерименту	5,60	3	1,35	69,38	388,52
Формування бази даних результатів	12,30	3	1,35	69,38	853,36
Всього					2973,34

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

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

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

$$Z_{\text{доп}} = (54233,64 + 2973,34) \cdot 10 / 100\% = 5720,70 \text{ (грн.)}$$

4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

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

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

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

$$Z_n = (54233,64 + 2973,34 + 5720,70) \cdot 22 / 100\% = 13844,09 \text{ (грн.)}$$

4.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання

роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

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

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

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

n – кількість видів матеріалів;

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

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

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

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

$$M_1 = 4,0 \cdot 169,00 \cdot 1,1 - 0 \cdot 0 = 743,60 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Начиння канцелярське	169,00	4,0	0	0	743,60
Картридж для принтера (HP-2002)	1056,00	1,0	0	0	1161,60
Картридж для плотера (HP-2106)	400,00	2,0	0	0	880,00
Диск оптичний (CD-RW)	32,00	3,0	0	0	105,60
Диск оптичний (CD-R)	26,00	3,0	0	0	85,80

Продовження таблиці 4.6 – Витрати на матеріали

USB-пам'ять (16 ГБ)	126,00	2,0	0	0	277,20
---------------------	--------	-----	---	---	--------

Органайзер офісний	177,00	4,0	0	0	778,80
Папір для заміток (А5) 500-70	116,00	2,0	0	0	255,20
Папір канцелярський офісний (А4) 500-80	184,00	2,0	0	0	404,80
Папір креслярський (А1)	30,00	8,0	0	0	264,00
Папір креслярський (А3)	14,50	10,0	0	0	159,50
Лак УР-231	345,00	0,0500	0	0	18,98
Спирт етиловий	170,00	0,2500	0	0	46,75
Припій ПОС-61	528,00	0,0300	0	0	17,42
Флюс БС-2	165,00	0,0100	0	0	1,82
Всього					5201,06

4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

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

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

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

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

$$K_e = 1 \cdot 850,00 \cdot 1,1 = 935,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Радіомодем	1	850,00	935,00
Вузол живлення	1	210,00	231,00
Блок візуалізації поточного стану	1	520,00	572,00
Блок вводу для зміни режимів роботи	1	160,00	176,00
Інтерфейсний блок	1	650,00	715,00
Мікроконтролер ESP 32 DIVKIT3	1	475,00	522,50
Сенсор тиску	1	293,00	322,30
BF928	1	21,70	23,87
BFP450	1	37,55	41,31
BFT93	1	51,25	56,38
Всього			3595,35

4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

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

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

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

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

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

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

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 12000,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 13200,00 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Осцилограф Singlent SDS-1052	1	12000,00	13200,00
Паяльна станція ПС-280-А/8	1	1495,00	1644,50
Вольтметр цифровий	1	4840,00	5324,00
Блок координатора	1	1250,00	1375,00
Всього			21543,50

4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

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

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

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

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

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

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

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 7800,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 8580,00 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 4.9

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Пакет Visual System Simulator	1	7800,00	8580,00
Пакет Microwave Office	1	7150,00	7865,00
Пакет MATLAB SIMULINK	1	5210,00	5731,00
Всього			22176,00

4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

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

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

де $Ц_б$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

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

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

$$A_{обл} = (44560,00 \cdot 2) / (4 \cdot 12) = 1856,67 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.10

Таблиця 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Електронний комплекс системи проектування	44560,00	4	2	1856,67
Персональний комп'ютер дослідника мереж	21599,00	4	2	899,96
Спеціалізоване робоче місце дослідника	8600,00	5	2	286,67
Пристрої виводу інформації	6850,00	4	2	285,42
Маршрутизатор	6500,00	4	2	270,83
Серверний блок	11230,00	5	2	374,33
Оргтехніка	7200,00	5	2	240,00

Продовження таблиці 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Приміщення лабораторії досліджень	398000,00	20	2	3316,67
Всього				7530,54

4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою

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

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

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

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

$K_{\text{вн}i}$ – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{\text{вн}i} < 1$;

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

$$B_e = 0,28 \cdot 210,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 441,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Електронний комплекс системи проектування	0,28	210,0	441,00
Персональний комп'ютер дослідника мереж	0,08	210,0	126,00
Спеціалізоване робоче місце дослідника	0,06	210,0	94,50
Пристрої виводу інформації	0,12	6,0	5,40
Маршрутизатор	0,02	160,0	24,00

Продовження таблиці 4.11 – Витрати на електроенергію

Серверний блок	0,04	160,0	48,00
Оргтехніка	0,45	2,3	7,76
Осцилограф Singlent SDS-1052	0,13	120,0	117,00
Паяльна станція ПС-280-А/8	0,10	120,0	90,00
Вольтметр цифровий	0,04	120,0	36,00
Всього			989,66

4.2.9 Службові відрядження

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

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

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

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», приймемо $H_{cv} = 0\%$.

$$B_{cv} = (54233,64 + 2973,34) \cdot 0 / 100\% = 0,00 \text{ (грн.)}$$

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

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

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

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

$$B_{cn} = (54233,64 + 2973,34) \cdot 30 / 100\% = 17162,09 \text{ (грн.)}$$

4.2.11 Інші витрати

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

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

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

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

$$I_{is} = (54233,64 + 2973,34) \cdot 50 / 100\% = 28603,49 \text{ (грн.)}$$

4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

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

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

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

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

$$B_{nzb} = (54233,64 + 2973,34) \cdot 100 / 100\% = 57206,97 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

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

$$B_{заг} = 54233,64 + 2973,34 + 5720,70 + 13844,09 + 5201,06 + 3595,35 + 21543,50 + 22176,00 + 7530,54 + 989,66 + 0,00 + 17162,09 + 28603,49 + 57206,97 = 240780,43 \text{ (грн.)}.$$

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

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

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,95$.

$$ZB = 240780,43 / 0,95 = 253453,09 \text{ (грн.)}.$$

4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

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

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

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

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

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

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

T_C – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_C = 2$;

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

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 253453,09$ (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 [Козловський В.О., Лесько О.Й., Кавецький В.В.].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = \frac{4^3 \cdot 2 \cdot 4}{253,5 \cdot 0,08} = 24,24.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

4.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж» складають 253453,09 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Українським законодавством визначено, що всі роботодавці мають створити безпечні та нешкідливі умови праці для працівників. Однак проблема виробничого травматизму є надзвичайно актуальною в Україні. За висновками зарубіжних експертів, які провели дослідження в Україні за програмою Міжнародної організації праці (МОП), велика кількість нещасних випадків із смертельними наслідками пояснюється недостатньою підготовкою робітників та роботодавців у справах охорони праці, відсутністю належного контролю за безпекою на робочих місцях та недотриманням встановлених норм. Крім того, повільне впровадження на підприємствах засобів і пристроїв колективної безпеки відзначається як одна з основних причин цієї проблеми.

Розробка автогенераторного перетворювача тиску для бездротових сенсорних мереж здійснювалося в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На працівника, відповідно до Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», мали вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

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

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

Враховуючи особливості проведеного дослідження, в розділі були визначені технічні вирішення для безпечного виконання завдань. Основна увага зосереджена на технічних рішеннях щодо гігієни праці та виробничої санітарії.

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

5.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Обладнання робочого місця визначає не лише ефективність праці, а й загальний рівень продуктивності. Надійне обладнання робочого місця

впливає на безпеку праці та ризик виробничих травм, сприяючи створенню безпечного робочого середовища. Вірно обране обладнання робочого простору сприяє інноваційності та технологічному розвитку, відкриваючи можливості для впровадження нових методів та рішень.

Список законодавчих актів, які регулюють аспекти організації робочого місця, обладнаного персональним комп'ютером (ПК), досить обширний. Відповідно до вимог статті 2 та статті 21 Кодексу законів про працю, а також статті 13 Закону України «Про охорону праці», роботодавець несе відповідальність за забезпечення працівникам комфортних та безпечних умов праці. Цей закон визначає основні принципи, пов'язані із реалізацією конституційного права працівників на охорону життя та здоров'я під час праці, на належні, безпечні і здорові умови праці. Він також регулює відносини між роботодавцем і працівником щодо безпеки, гігієни праці та виробничого середовища, встановлюючи єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

Більшість нормативно-правових актів у цій сфері мають підзаконний характер, включаючи правила, інструкції, державні санітарні норми та правила (ДСанПН) та інші. Ці документи детально регламентують аспекти конструкції електронно-обчислювальної техніки, особливості організації приміщень для роботи з нею та інші вимоги. До них відносяться ДСанПН 3.3.2.007-98 [60], ДСТУ 8604:2015, НПАОП 0.00-7.15-18 та інші.

Під час розробки автогенераторного перетворювача тиску для бездротових сенсорних мереж, де обробка отриманих даних здійснювалася за допомогою ПК, потрібно дотримуватися гігієнічних норм, правил і вимог безпеки при роботі з персональним комп'ютером. Всі елементи та їх взаємне розташування на робочому місці повинні відповідати принципам ергономіки, враховуючи особливості трудової діяльності. Робочі місця, оснащені персональними комп'ютерами, слід розташовувати таким чином, щоб світло надходило збоку, переважно зліва, через світлові прорізи. Це забезпечить оптимальні умови для праці, сприяючи комфорту та здоров'ю працівників.

Висота робочого столу з комп'ютером повинна бути регульованою в межах від 680 до 800 мм, забезпечуючи оптимальні умови для виконання роботи. Ширина і глибина столу повинні дозволяти здійснення операцій у зоні досяжності моторного поля, рекомендовані розміри – від 600 до 1400 мм у ширину та глибину від 800 до 1000 мм. Робочий стіл повинен мати простір для ніг, висота якого не менше 600 мм, ширина не менше 500 мм, а глибина на рівні колін - не менше 450 мм і на рівні простягнутої ноги - не менше 650 мм.

Стілець для робочого місця має бути підйомно-поворотним і

регульованим за висотою, кутом нахилу сидіння та спинки, а також відстанню від спинки до переднього краю сидіння. Поверхня сидіння повинна бути плоскою з заокругленим переднім краєм. Регулювання кожного з параметрів повинно здійснюватися незалежно, легко і надійно фіксуватися. Для зменшення статичного навантаження на м'язи верхніх кінцівок, рекомендується використовувати підлокітники завдовжки не менше 250 мм і шириною 50-70 мм, що регулюються за висотою над сидінням у межах 230-260 мм і відстанню між ними від 350 до 500 мм. Поверхня сидіння і спинки стільця повинна бути напівм'якою з нековзним, повітронепроникним покриттям, яке легко очищається і не спричиняє електризації.

Для оптимального забезпечення зручності та збереження високого рівня працездатності працівників, які використовують комп'ютерну техніку, необхідно дотримуватися визначених параметрів розташування обладнання. Екран ПК рекомендується розташовувати на відстані від 600 до 700 мм від очей користувача, з урахуванням розміру літерно-цифрових знаків і символів. Для забезпечення зручності використання, клавіатура має бути оснащена опорним пристроєм, який дозволяє змінювати кут нахилу поверхні клавіатури в межах від 5 до 15°. Висота середнього рядка клавіш не повинна перевищувати 30 мм. Поверхня клавіатури має бути матовою з коефіцієнтом відбиття 0,4.

Раціональна організація робочого місця, враховуючи вказані параметри, дозволить зменшити втомленість розробника і підтримувати високий рівень працездатності.

5.1.2 Електробезпека приміщення

Досліджуване приміщення оснащено трьохфазною чотирипровідною мережею, яка має нейтраль і заземлення, і функціонує при напрузі 380/220 вольт. Згідно з Правилами налаштування електроустановок (ПУЕ), це приміщення належить до категорії без підвищеної небезпеки (сухий мікроклімат, мінімізовано рівень пилу, температурні параметри повітря відповідають встановленим нормам.

Електротехнічне устаткування, включаючи апаратуру, кабелі та розподільні пристрої, відповідає всім необхідним вимогам для безпечної експлуатації, як у звичайних, так і в аварійних умовах, таких як короткі замикання, перенапруги та перевантаження. Це дозволяє забезпечити надійність та безпеку експлуатації електричних систем у досліджуваному приміщенні. Такий підхід дозволяє не лише забезпечити безпеку працівників, але й забезпечити нормальну експлуатацію електротехнічного обладнання та

освітлення, сприяючи безперебійному функціонуванню систем в будь-яких умовах [61]

Для забезпечення безпеки в досліджуваному приміщенні впроваджені такі технічні заходи:

1. Недоступність струмопровідних частин шляхом використання прихованої проводки та розташування кабелів у спеціальних ринвах.

2. Ізолювання струмопровідних частин за допомогою використання ізоляції, опір якої відповідає нормам. Також передбачено регулярний контроль та профілактику ізоляції для забезпечення її надійності.

3. Напруга освітлювальної мережі становить 220 В із заземленою нейтраллю.

Також передбачено використання ізоляційних пристроїв, огороження струмопровідних частин та використання низьких напруг. Особи, які обслуговують електроустановки, повинні використовувати індивідуальні засоби захисту, такі як спеціалізоване взуття та рукавиці. Засоби захисту повинні періодично перевірятися та захищатися від механічних пошкоджень та впливу факторів, що можуть погіршити їх діелектричні властивості.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Розробка автогенераторного перетворювача тиску для бездротових сенсорних мереж здійснювалося за допомогою використання відповідного програмного забезпечення. Визначимо технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії під час виконання цієї роботи. Температура, відносна вологість, швидкість повітря та теплове випромінювання нагрітих поверхонь є ключовими характеристиками мікроклімату. Під час виконання трудових завдань необхідно забезпечити теплову взаємодію між людьми та виробничим середовищем. Параметри мікроклімату для умов виконання роботи (категорія Ia), визначені відповідно до Державних санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень (ДСН 3.3.6.042-99) [62], подані в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

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

Для забезпечення відповідності параметрів нормам мікроклімату передбачено комплекс заходів, який включає в себе централізовану парову систему опалення, системи припливно-витяжної вентиляції, регулярне провітрювання та систематичне вологе прибирання. Проведене вимірювання показників мікроклімату на робочому місці дослідника підтвердило, що ці значення знаходяться в межах допустимих, тобто . робоче середовище відповідає встановленим стандартам, забезпечуючи комфорт та безпеку працівників.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Для забезпечення оптимальних умов для виробничої діяльності важливо не лише створити комфортні метеорологічні умови, але й відповідну чистоту повітря. Атмосферне повітря в нормальних умовах містить азот (78,08%), кисень (20,94%), вуглекислий газ (0,04%), аргон та інші інертні гази (0,94%), а також водяну пару. Однак у процесі виробничої діяльності у повітрі робочої зони можуть накопичуватися різні шкідливі речовини, які використовуються в технологічних процесах. Забезпечення високої якості повітря в робочих приміщеннях не лише сприяє комфортним умовам праці, але й гарантує безпеку та здоров'я працівників, зменшуючи вплив шкідливих речовин на їхнє здоров'я.

Гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони наведені в таблиці 5.2. Параметри іонного складу повітря на робочому місці, де використовується персональний комп'ютер, повинні відповідати встановленим нормам, які визначені в таблиці 5.2 [63]

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Озон	0,16	0,03	1
Вуглекислий газ (CO ₂)	3	1	4
Пил нетоксичний	10	4	4

Таблиця 5.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

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

Для забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється видалення шкідливих речовин, що потрапляють у повітря робочої зони, за рахунок механічної вентиляції. Кількість пилу, що наявна в приміщенні, зменшується за допомогою систематичного вологого прибирання.

5.2.3 Виробниче освітлення

Значення зорового апарату людини для трудової діяльності надзвичайно важливе, і ефективність його функціонування у значній мірі залежить від умов освітлення. Освітлення впливає не тільки на роботу очей, але також і на загальний стан організму. При належному рівні освітлення підвищується якість та швидкість виконання роботи. Науково підтверджено, що існує пряма залежність між ефективністю праці та умовами освітлення. Недостатнє освітлення збільшує напругу зорового аналізатора, провокує швидку втомлюваність, головний біль та сприяє виникненню виробничих травм.

Норми освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 [64] для робочої зони визначені в таблиці 5.4.

Таблиця 2.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	або верхнє	Бокове	або верхнє	Бокове
Високої точності	0,3 - 0,5	III	Г	великий	світлий	700	300	5	2	3	1,2

Природне освітлення у досліджуваному приміщенні здійснюється через вікно, орієнтовані на північний схід. Штучне освітлення в приміщенні здійснюється системою загального рівномірного освітлення. Як джерела світла використовуються переважно люмінесцентні лампи типу ЛБ.

Для забезпечення нормованих значень освітленості у приміщенні двічі на рік здійснюється чищення віконного скла, раз в два місяці – очищення ламп від пилу та систематична заміна світильників, що перегоріли.

5.2.4 Виробничий шум

У сучасних умовах виробничий процес часто відбувається в умовах інтенсивного шуму та вібрації, що може негативно позначитися на працездатності та здоров'ї працівників. Механічні коливання вузлів та деталей призводять до створення коливань повітря, які сприймаються органами слуху людини як звукові хвилі. Сукупність різноманітних звуків за частотою та інтенсивністю, які викликають неприємні відчуття, називається шумом. Вплив шуму на організм людини в основному пов'язаний із впровадженням нового високопродуктивного обладнання та механізмів, механізацією та автоматизацією виробничих процесів, а також переходом на високу швидкість у роботі верстатів та агрегатів.

Допустимі рівні звукового тиску та рівні звуку для приміщення, де виконувалася робота, визначені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного шуму [65]

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

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні передбачено використання звукопоглинаючих матеріалів.

5.2.5 Виробничі випромінювання

Під час розробки автогенераторного перетворювача тиску для бездротових сенсорних мереж існує ймовірність впливу на працівника електромагнітного поля, яке генерується обладнанням, що присутнє на робочому місці. Наслідки впливу електромагнітного випромінювання на працівника залежать від його інтенсивності, тривалості та частоти випромінювання. Висока інтенсивність електромагнітного випромінювання може призвести до нагрівання тканин, що призводить до негативних наслідків. Окремі дослідження вказують на можливість впливу електромагнітного випромінювання на здоров'я, зокрема підвищення ризику розвитку певних захворювань чи впливу на психоемоційний стан. Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань наведені в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 - Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань [66]

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	10В / м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	0,3 А / м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати: для дорослих користувачів для дітей дошкільних установ і що вчаться середніх спеціальних і вищих навчальних закладів	20кВ / м 15кВ / м

Для забезпечення безпеки від дії ЕМВ використовують такі заходи:

1. Організаційні заходи: організація робочих місць, оптимальне розміщення технологічного устаткування, розробка гігієнічно-обґрунтованих режимів праці та відпочинку, зменшення часу перебування у зоні опромінення.
2. Технічні заходи: віддалення робочого місця від джерела випромінювання.
3. Лікувально-профілактичні заходи: періодичні медогляди.

5.2.6 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні фактори – це аспекти, які об'єднують психічні та фізіологічні аспекти діяльності людини. Ці фактори включають у себе взаємодію між психічними процесами та фізіологічними реакціями факторів під впливом різних умов і чинників, таких як стрес, емоції, робочі навантаження, умови праці та інші впливи на психофізіологічний стан людини. Оцінка психофізіологічних факторів під час розробки автогенераторного перетворювача тиску для бездротових сенсорних мереж проводилася відповідно до Гігієнічної класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу.

Загальні енергозатрати організму: до 174 Вт.

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

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

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

Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження:

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

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

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

Сенсорні навантаження:

– зосередження (% за зміну) – до 5-75%;

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

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

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

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

Емоційне навантаження:

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

Режим праці:

- тривалість робочого дня – більше 8 год;
- змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

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

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

5.3.1 Дія вогню на живі організми під час пожежі

Якщо людина перебуває в зоні впливу пожежі, то вона може потрапити під дію таких небезпечних та шкідливих чинників: токсичні продукти горіння; вогонь; підвищена температура середовища; дим; недостатність кисню; руйнування будівельних конструкцій; вибухи; витікання небезпечних речовин, що відбуваються внаслідок пожежі; паніка.

Токсичні продукти горіння становлять найбільшу загрозу для життя людини, особливо при пожежах у будівлях. Адже в сучасних виробничих, побутових та адміністративних приміщеннях знаходиться значна кількість синтетичних матеріалів, що є основними джерелами токсичних продуктів горіння. Так, при горінні пінополіуретану та капрону утворюється ціанистий водень (синильна кислота), вініпласту – хлористий водень та оксид вуглецю, лінолеуму – сірководень та сірчистий газ і тощо. Найчастіше при пожежах відзначається високий вміст у повітрі оксиду вуглецю. Так, у підвалах, шахтах, тунелях, складах його вміст може становити від 0,15 до 1,5%, а в приміщеннях – 0,1-0,6%.

Вогонь – надзвичайно небезпечний чинник пожежі, однак випадки його безпосередньої дії на людей зустрічаються досить рідко. Під час пожежі температура полум'я може досягати 1200-1400 °С і у людей, що знаходяться у зоні пожежі випромінювання полум'я можуть викликати опіки та больові відчуття.

Небезпека підвищеної температури середовища полягає у тому, що вдихання розігрітого повітря разом із продуктами горіння може призвести до ураження органів дихання та смерті. В умовах пожежі підвищення температури середовища до 60 °С вже є життєво небезпечною для людини.

Дим являє собою велику кількість видимих найдрібніших твердих та (або) рідинних часточок незгорівших речовин, що знаходяться в газах у завислому стані. Він викликає інтенсивне подразнення органів дихання та слизових оболонок (сильний кашель, сльозотечу тощо). Крім того, у

задимлених приміщеннях внаслідок погіршення видимості сповільнюється евакуація людей, а часом провести її зовсім неможливо. Так, при значній задимленості приміщення видимість предметів, що освітлюються лампочкою потужністю 20 Вт, складає не більше 2,5 м.

Недостатність кисню спричинена тим, що в процесі горіння відбувається хімічна реакція окислення горючих речовин та матеріалів. Небезпечною для життя людини уже вважається ситуація, коли вміст кисню в повітрі знижується до 14% (норма 21 %). При цьому втрачається координація рухів, з'являється кволість, запаморочення, гальмування свідомості. При концентрації кисню 9-11% смерть настає через кілька хвилин [70].

5.3.2 Визначення витрат води для гасіння пожежі

Вихідні дані: Розміри приміщення: $12 \times 6 \times 3,2$ м.

Витрати води при пожежі складаються з витрат води на зовнішнє та внутрішнє гасіння пожежі

$$Q_{пож} = Q_{зов} + Q_{вн} \text{ [м}^3\text{]}, \quad (5.1)$$

де $Q_{зов}$, $Q_{вн}$ – витрати води на зовнішнє та внутрішнє гасіння пожежі, м³.
Об'єм приміщення знайдемо за формулою

$$V = abh \text{ [м}^3\text{]}, \quad (5.2)$$

де a , b , h – довжина, ширина та висота приміщення відповідно, м.

Після підстановки відомих значень у формулу (5.2) одержимо

$$V = 12 \cdot 6 \cdot 3,2 = 230,4 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Витрати води на зовнішнє гасіння пожежі визначаються за формулою

$$Q_{зов} = 3,6g_1T_1 \text{ [м}^3\text{]}, \quad (5.3)$$

де g_1 – витрати води на пожежу (приймається відповідно до СНиП 2.04.02–84 для ширини будівлі до 60 м і об'єму приміщення до 3 тис.м³ $g_1 = 10$ л/с);

T_1 – розрахункова тривалість зовнішнього гасіння пожежі ($T_1 = 3$ год).

Витрати води на внутрішнє гасіння пожежі:

$$Q_{\text{вн}} = 3,6ng_2T_2 \text{ [м}^3\text{]}, \quad (5.5)$$

де n – кількість струменів відповідно СНиП 2.04.01-85 ($n = 2$);

g_2 – мінімальні витрати води на один струмінь ($g_2 = 5$ л/с);

T_2 – розрахунковий час роботи пожежних кранів ($T_2 = 3$ год).

Після підстановки відомих значень у формули (5.2, 5.3, 5.1) одержимо

$$Q_{\text{зов}} = 3,6 \cdot 10 \cdot 3 = 108 \text{ (м}^3\text{)};$$

$$Q_{\text{вн}} = 3,6 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 3 = 108 \text{ (м}^3\text{)};$$

$$Q_{\text{пож}} = 108 + 108 = 216 \text{ (м}^3\text{)}.$$

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

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

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

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

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

5.4 Висновки

Визначено витрати води для гасіння пожежі. Розроблено превентивні заходи з підвищення безпеки роботи в умовах дії надзвичайних ситуацій.

ВИСНОВКИ

У першому розділі проведений аналіз публікацій, який присвячений теоретичним та експериментальним дослідженням фізичних ефектів при дії тиску у MEMS структурах та конструкціях датчиків тиску показує, що дослідження та розробка автогенераторних перетворювачів тиску для бездротових сенсорних мереж є перспективним науковим напрямком у розвитку засобів вимірювання тиску та деформації для сучасних мікропроцесорних інформаційно-вимірювальних систем. Резонансні MEMS датчики тиску та деформації показують високі метрологічні показники поряд з тенденцією до мікромініатюризації, а також покращенням цінових характеристик, можливістю їхньої інтелектуалізації на основі технологічної та конструктивної сумісності з цифровими пристроями у бездротових сенсорних мережах.

У другому розділі розглянуті основи теорії створення MEMS сенсорів тиску. Для розуміння роботи і правильності функціонування п'єзорезистивних датчиків тиску, описано виробництво найбільш типового основного матеріалу — кремнію — разом із його особливими властивостями, пов'язаними з кристалічністю. Зокрема, це включає п'єзорезистивний ефект, який є основою для представленого тут принципу датчика. Крім того, також пояснюється концепція легування, тобто введення сторонніх атомів у кристал кремнію з метою підвищення електропровідності та, таким чином, чутливості сенсора. Конструкція датчика, у свою чергу, сильно залежить від використовуваних методів виробництва.

У третьому розділі розглянуто метод вимірювання тиску на основі тензореактивного ефекту в автогенераторному перетворювачі тиску з тензочутливим елементом, який відрізняється від існуючих використанням залежності імпедансу транзисторної структури від дії тиску, що дозволило перетворювати тиск у частоту, причому тензочутливі елементи виступають і в ролі активних елементів автогенераторного перетворювача тиску, що надало принципову можливість підвищення точності і чутливості вимірювання тиску.

Розроблено математичні моделі автогенераторного перетворювача тиску на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з чутливими резистивними чутливим елементом, в яких на відміну від існуючих, враховано вплив тиску на елементи нелінійних еквівалентних схем перетворювача, що дало можливість визначити функцію перетворення і рівняння чутливості. Проведено експериментальні дослідження, які показали, що чутливість автогенераторного перетворювача тиску на основі мостової MEMS тензочутливої схеми чутливість пристрою складала 1,25 кГц/кПа – 1,55 кГц/кПа в діапазоні тисків 50 кПа -130 кПа.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Deutscher Wetterdienst (DWD). [Online]. Available: www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/presse/wetterrekorde.pdf?blob=publicationFile&v=11. [Accessed: 24-Jan-2020].
2. First sensor, “Pressure types.” [Online]. Available: www.first-sensor.com/en/products/pressure-sensors/pressure-sensors-and-transmitters/pressure-types.html. [Accessed: 14-Jan-2020].
3. Silicon Microstructures, “Digital Sensor Systems.” [Online]. Available: www.si-micro.com/products/digital-sensors.html. [Accessed: 24-Jan-2020].
4. Sensata Technologies, “Sensor Solutions For Heavy Duty Applications,” 2018. [Online]. Available: www.sensata.com/resources/sensor-solutions-heavy-duty-applications-brochure. [Accessed: 14-Jan-2020].
5. Bosch, “Fuel injection and air management.” [Online]. Available: www.bosch-mobility-solutions.com. [Accessed: 14-Jan-2020].
6. Eltek group, “Tank & Fuel line Pressure Sensor.” [Online]. Available: www.eltekgroup.it. [Accessed: 14-Jan-2020].
7. Eltek group, “Oil Pressure Sensor.” [Online]. Available: www.eltekgroup.it. [Accessed: 26-Jan-2020].
8. KA Sensors, “KA Sensors.” [Online]. Available: www.kasensors.com. [Accessed: 14-Jan-2020].
9. Infineon, “PRO-SILTM Pressure Sensor for Side Crash Detection and Pedestrian Protection Systems.” [Online]. Available: www.infineon.com. [Accessed: 14-Jan-2020].
10. Kavlico, “Kavlico.” [Online]. Available: www.kavlico.com. [Accessed: 14-Jan-2020].
11. R. Radespiel and M. Burnazzi, “Fundamentals in Coanda Flap Design,” in Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 2015.
12. C. E. Shannon, “The Mathematical Theory of Communication,” Bell Syst. Tech. J., vol. 27, no. 3, pp. 379–423, 1948.
13. M. Wang and Z. Zhou, “The evolution of birds with implications from new fossil evidences,” in The Biology of the Avian Respiratory System: Evolution, Development, Structure and Function, Springer International Publishing, 2017, pp. 1–26.
14. Honeywell, “Understanding Absolute Pressure Sensors.” [Online]. Available: sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=49918. [Accessed: 14-Jan-2020].
15. T. Beutel, Mikrotechnische Sensorik für aktive Hochauftriebssysteme.

Aachen: Shaker, 2013.

16. P. Puangmali, K. Althoefer, L. D. Seneviratne, D. Murphy, and P. Dasgupta, “State-of-the-Art in Force and Tactile Sensing for Minimally Invasive Surgery,” *IEEE Sensors*, vol. 8, no. 4, pp. 371–381, 2008.

17. W. Luber and J. Becker, “Application of PVDF foils for the measurements of unsteady pressures on wind tunnel models for the prediction of aircraft vibrations,” in *Proceedings of ISMA 2010 – International Conference on Noise and Vibration Engineering*, 2010, pp. 3633–3652.

18. Arshad and R. Tasnim, “An inductive transducer based pressure sensor for biomedical applications,” in *International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*, 2015.

19. Si-Mat, “Silizium Wafer.” [Online]. Available: www.si-mat.com/de/silizium-wafer.html. [Accessed: 14-Jan-2020].

20. K. E. Peterson, “Silicon as a mechanical Material,” in *Micromechanics and MEMS: Classic and Seminal Papers to 1990*, Wiley-IEEE Press, 1997, pp. 58–95.

21. Topsil, “Application Note: Preferred (Pzf) Silicon for Power Electronics,” 2014.

22. F. Bloch, “Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern,” *Zeitschrift für Phys.*, vol. 52, no. 7, pp. 555–600, Jul. 1929.

23. B. J. Van Zeghbroeck, “Mobility - Resistivity - Sheet Resistance.” [Online]. Available: eee.colorado.edu/~bart/book/mobility.htm. [Accessed: 14-Jan-2020].

24. “RFID Handbook” second edition, Klaus Finkenzeller, published by John Wiley & Sons Ltd, 2003

25. “Sensor Handbook”, Sabrie Soloman, published by McGraw-Hill, 1999

26. Caen A927 Data sheet. [Online]. Available: <http://www.caen.it/rfid/syproduct.php?fam=tag&mod=A927> (26.10.2007)

27. Infratab’s Freshtime™ tag. [Online]. Available: http://www.infratab.com/infratab/freshtime_tags.html (26.10.2007)

28. KSW - VarioSens Basic Card Data sheet. [Online]. Available: <http://www.ksw-microtec.de/index.php?ILNKID=14&iL=2> (26.10.2007)

29. ALIEN – Battery Assisted Passive Tag specifications. [Online]. Available: http://www.alientechnology.com/docs/AT_DS_BAP.pdf (26.10.2007)

30. American Thermal–Log IC specifications. [Online]. Available: <http://www.americanthermal.com/log-ic.html> (26.10.2007)

31. Montalbanotechnology– MTSens. [Online]. Available:

<http://www.montalbanotechnology.com/mt/> (26.10.2007)

32. Savi–Sensor Tag datasheet. [Online]. Available: <http://www.savi.com/products/pr.rfid.security.shtml> (26.10.2007)

33. Microstrain–EmbedSense datasheet. [Online]. Available: http://www.microstrain.com/pdf/EmbedSense_Rev1_datasheet.pdf (26.10.2007)

34. Axxess inc–Active sensorfamily. [Online]. Available: <http://www.axcessinc.com/products/tags.html> (26.10.2007)

35. Bioett – Biosensor. [Online]. Available: <http://www.bioett.se/> (26.10.2007)

36. Evigia–EV524 preliminary specification.[Online]. Available: <http://www.evigia.com/products/files/ProductSpecSheet524M.pdf> (26.10.2007)

37. Identec Solutions– i-Q32T specifications. [Online]. Available: http://www.identecolutions.at/fileadmin/user_upload/PDFs/product_sheets/i-Q32T_V1.1_Eng.pdf (26.10.2007)

38. Scanpak - TTB-434-01. [Online]. Available: <http://www.scanpak.com/> (15.06.2007)

39. Giurlani Walter, Berretti Enrico, Lavacchi Alessandro. Measuring the Thickness of Metal Coatings: A Review of the Methods // *Coatings*. 2020, 10. 10.3390/coatings10121211.

40. Microelectronic sensors of physical quantities: in 3 volumes / Vuysik Valdemar, Gotra Zenon Yuriyovych, Grigoriev Vitaly Viktorovych, Kalita Vlodzimezh, Melnyk Oleg Myronovych, Potentski Yezhi; under the editorship Z. Yu. Gotry; Ministry of Education and Science of Ukraine, National Lviv Polytechnic University, T.1. 2002. – 475 p.

41. Lei Hang, Wenquan Jin, Hyeon Sik Yoon, Yong Geun Hong and Do Hyeun Kim. Design and Implementation of a Sensor-Cloud Platform for Physical Sensor Management on CoT Environments // *Electronics*, 2018, 7, 140; –P.1-25. doi:10.3390/electronics7080140

42. Borysov O.V., Yaganov P.O. Microelectronic sensors based on silicon p-n junctions. - Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 2017. –174 p.

43. Damdam A.N., Ozay L.O., Ozcan C.K., Alzahrani A., Helabi R., Salama K.N. IoT-Enabled Electronic Nose System for Beef Quality Monitoring and Spoilage Detection // *Foods*, 2023, 12(11): 2227. <https://doi.org/10.3390/foods12112227>

44. *Sensors and actuators: technology and applications* / edited by Princeton Brown. New York: Library Press. 2017. –268 p.

45. Sait S., Abbas Y., Boubenider F. Estimation of thin metal sheets thickness using piezoelectric generated ultrasound // *Appl. Acoust.*, 2015, vol. 99, – P.85–91.

46. Zipf Mark E. Radiation Transmission-based Thickness Measurement Systems - Theory and Applications to Flat Rolled Strip Products, *Advances in Measurement Systems*. –Milind Kr Sharma (Ed.), USA, 2010. –592 p.

47. Bozydar Knyziak A., Rzodkiewicz W., Kaczorowska E., Derlacinski M. New X-ray testing methods of aerosol products for industrial radiography // *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, Vol. 844, no. November 2016. –P.141–146.

48. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Krynochkin R.V. Radio measuring transducers for determining the thickness of films based on devices with negative resistance. – Vinnitsia: VNTU, 2013. – 136 p.

49. Osadchuk O.V. Krynochkin R.V. Device for measuring and controlling the thickness of metal and polymer films // *Visnyk VPI*, 2010, No. 4, –P.90–93.

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

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

52. Osadchuk A.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. Scientific journal. ISSN 2077-6772. Vol. 13 No 4, 04001(6 p.) (2021) DOI: 10.21272/jnep.13(4).04001 https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2021/4/articles/jnep_04001.pdf

53. Osadchuk I.O., Osadchuk O.V., Osadchuk V.S. Research of self-generating parametric temperature sensors // *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, No. 1, 2022 (305) – P.172-180. DOI 10.31891/2307-5732-2022-305-1-172-180

54. Structural and functional materials / V.P. Babak, D.F. Baisa, V.M. Rizak, S.F. Filonenko. In two parts. - K.: Technology. – Part 1, 2003. – 344 p.; part 2, 2004. – 368 p.

55. Kolesov S.M., Kolesov I.S. Electrical materials science (Electrotechnical materials). Textbook. - K.: "Delta", 2008. –516 p.

56. Minkin V.I., Osipov O.A., Zhdanov Y.A., Vaughan W.E. Basic Principles of the Theory of Dielectrics. In: Vaughan, W.E. (eds) Dipole Moments in Organic Chemistry. Physical Methods in Organic Chemistry. Springer, Boston, MA. 1970. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1770-8_1

57. Electrotechnical materials: Part 1. Dielectric materials / V.M. Kirylenko, K.V. Kirylenko. V.M. Golovko - Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 2021. – 224 p.

58. Marius Grundmann. The Physics of Semiconductors. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. –701 p.

59. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

60. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14_nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html

61. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_praop_0_00-7_15-18_01_ua.php

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

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

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

65. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Електронний ресурс] – Режим доступу до сторінки: http://hrliga.com/index.php?module=norm_base&op=view&id=819

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

67. СанПіН 2.2.4.1294-03 «Фізичні фактори виробничого середовища. Гігієнічні вимоги до аероіонного складу повітря виробничих і громадських приміщень» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.ionization.ru/issue/iss5.htm>

68. СанПіН 2.2.4.1191-03 «Електромагнітні поля у виробничих умовах» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.vrednost.ru/2241191-03.php>

69. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=7988

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

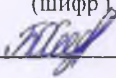
Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

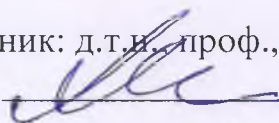
**АВТОГЕНЕРАТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ ДЛЯ
БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ**

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

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)


_____ Бондаренко О.С.
(прізвище та ініціали)

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


_____ Осадчук О.В.
(прізвище та ініціали)

«14» _____ 12 2023 р.

Вінниця ВНТУ - 2023 рік

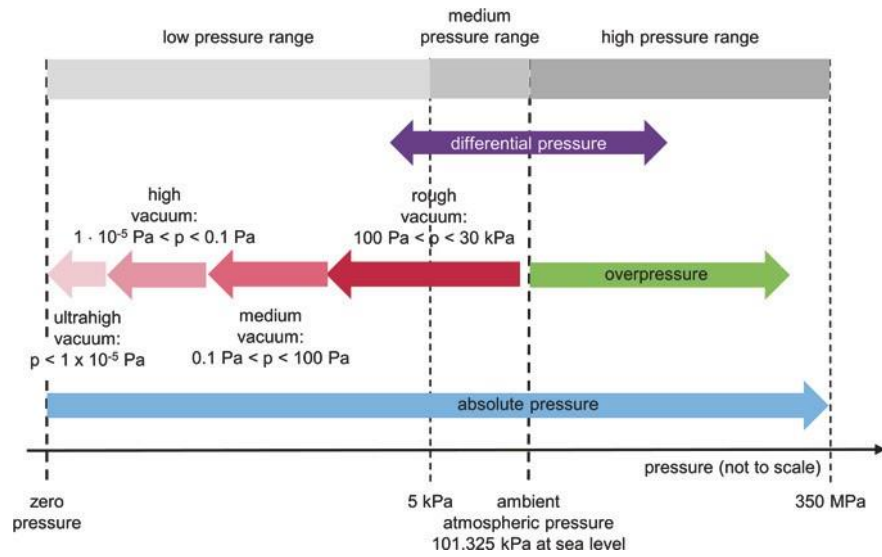


Рисунок 1 – Діапазони тиску

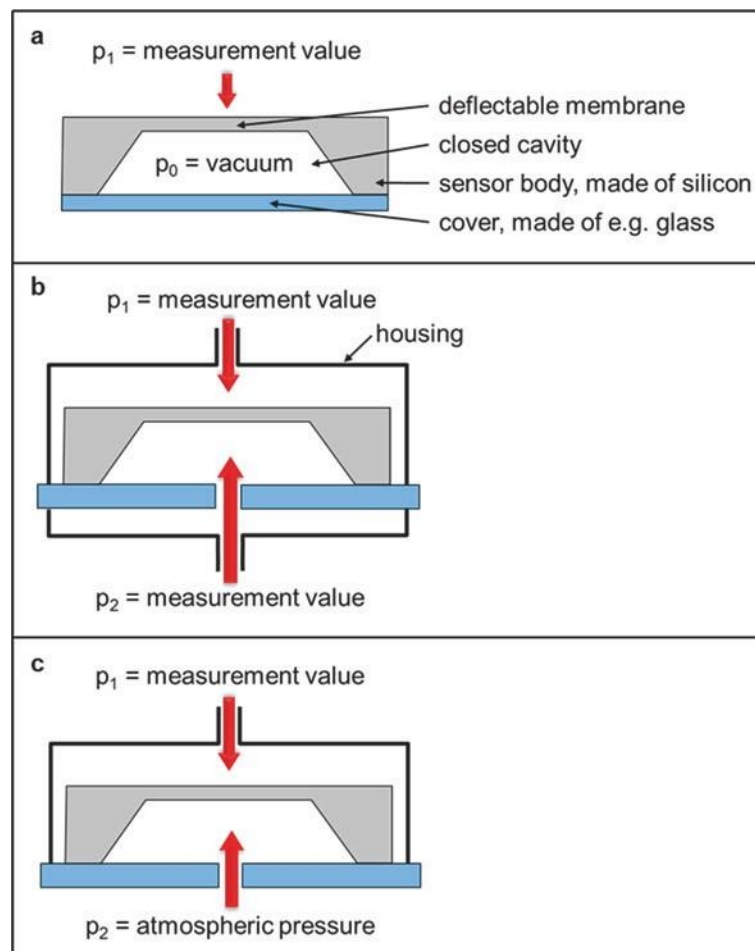


Рисунок 2 – Схематичний вигляд абсолютного (а), диференціального (b) і манометричного (c) кремнієвого MEMS датчика тиску

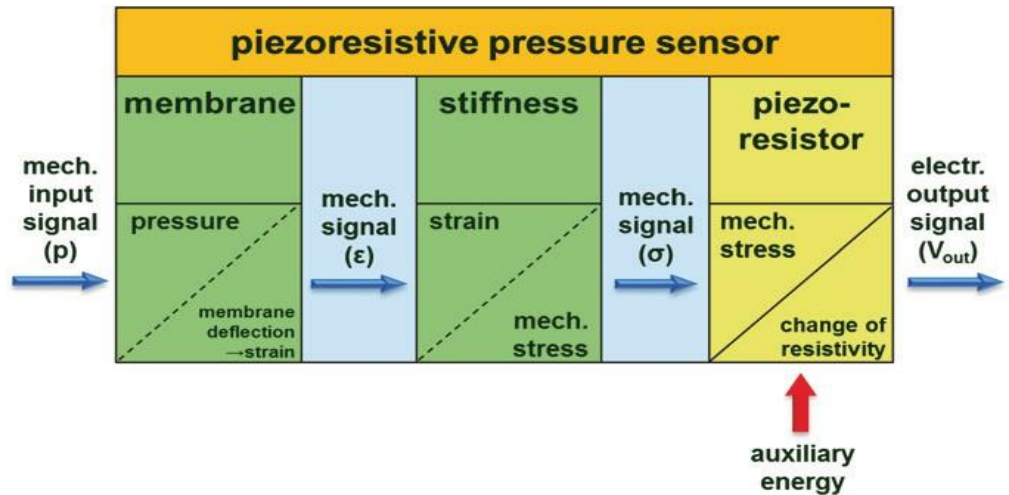


Рисунок 3 – Ступінчастий принцип роботи мембранного датчика тиску з використанням п'єзорезистивного ефекту

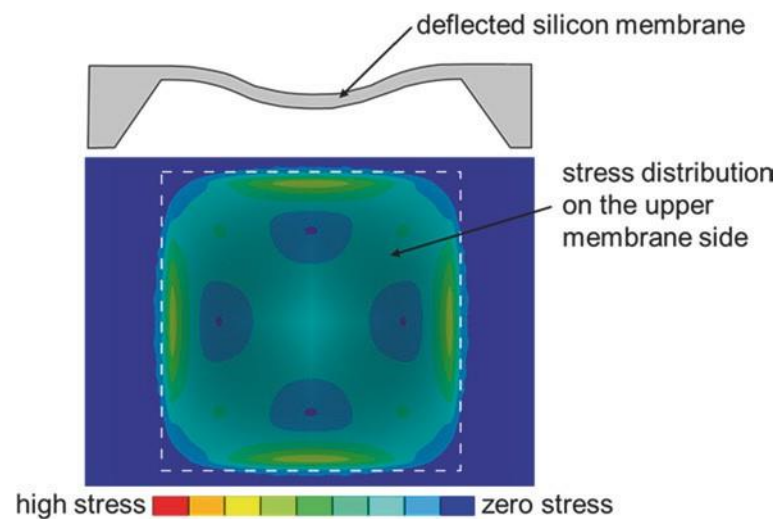
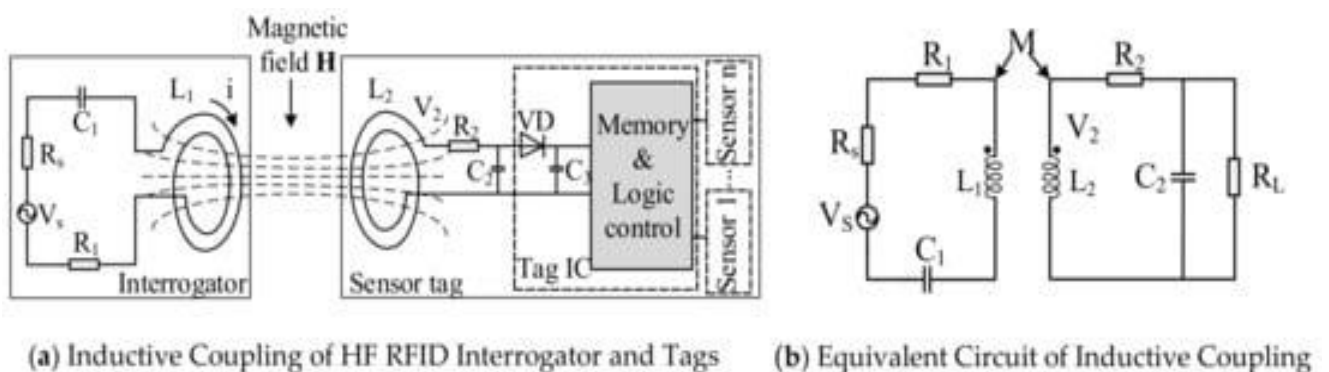


Рисунок 4 – Зразкове моделювання FEM розподілу напруги на верхній стороні квадратичної мембрани, яка відхиляється



(a) Inductive Coupling of HF RFID Interrogator and Tags

(b) Equivalent Circuit of Inductive Coupling

Рисунок 5 – Основи височастотних датчиків RFID

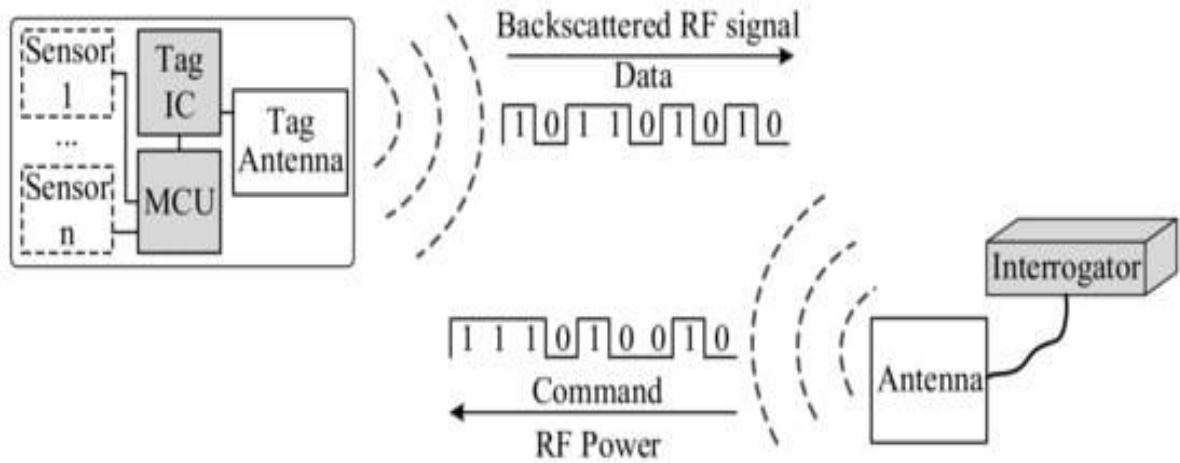


Рисунок 6 – Основи датчиків UHF RFID

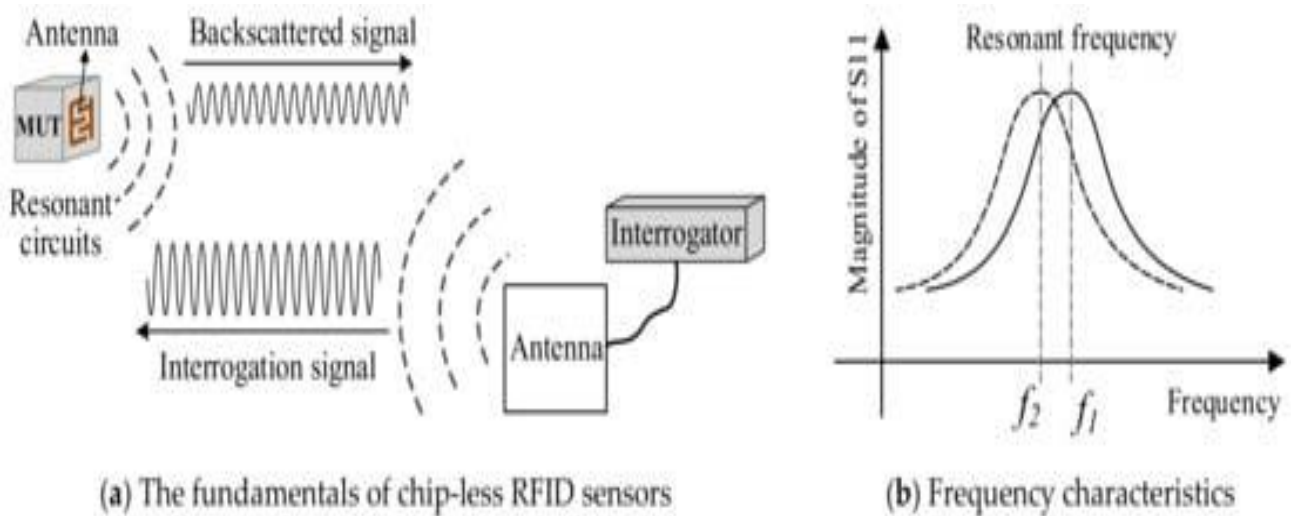


Рисунок 7 – Безчіпові датчики RFID — основи та частотні характеристики

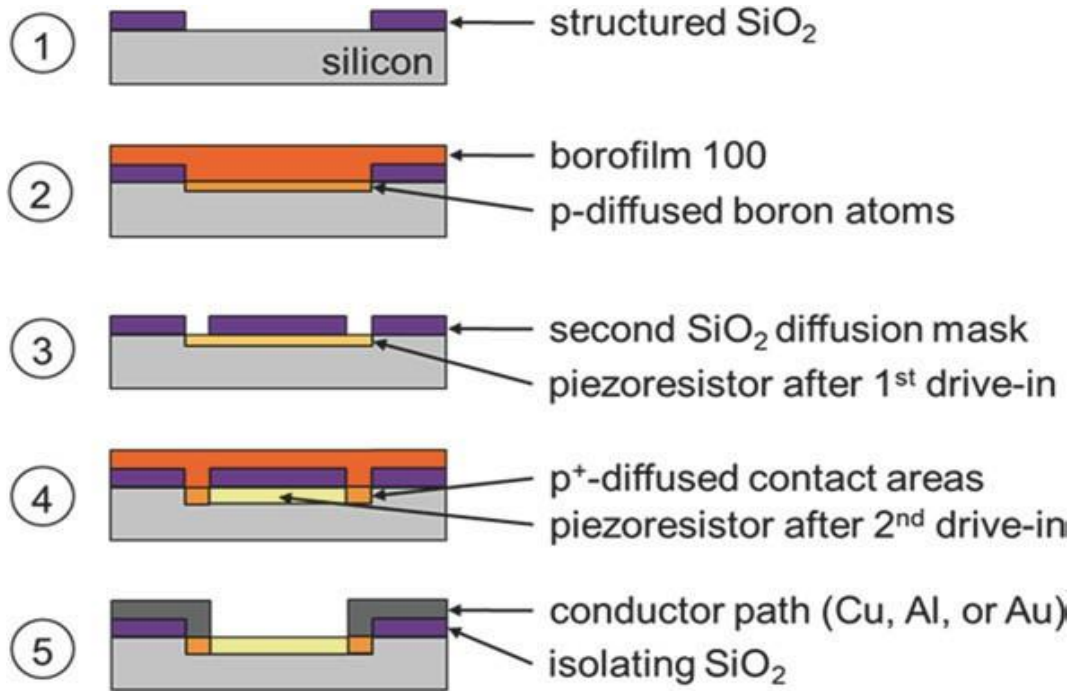


Рисунок 8 – Схематичний вигляд у поперечному перерізі стадій процесу р- і р⁺-дифузія для створення п'єзорезисторів для кремнієвого датчика тиску. На цьому малюнку показана лише верхня сторона пластини

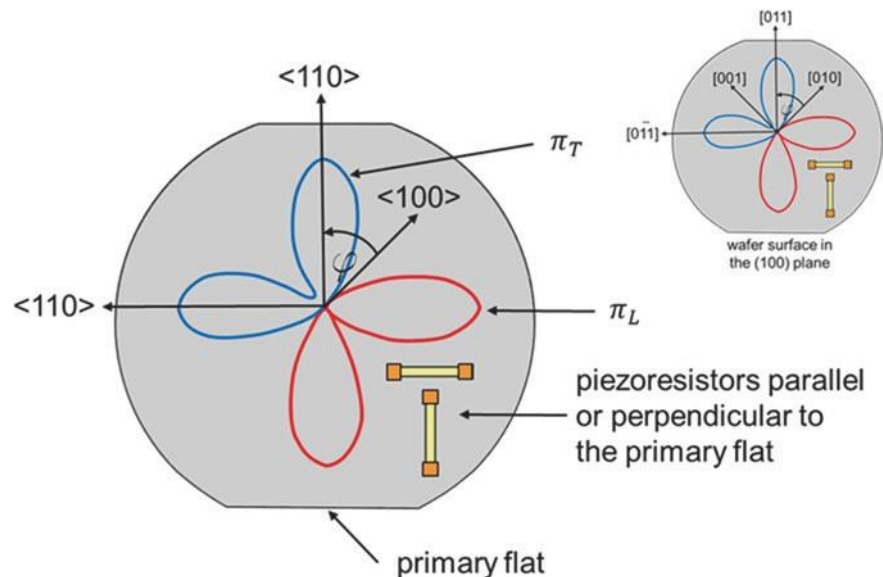


Рисунок 9 – Кремнієва 100-пластина з напрямками кристалів відносно первинної площі і залежні від напрямку значення π_L і π_T -легованих резисторів. Праворуч угорі: особливий випадок 100-подібної пластини з точною площиною поверхні (100)

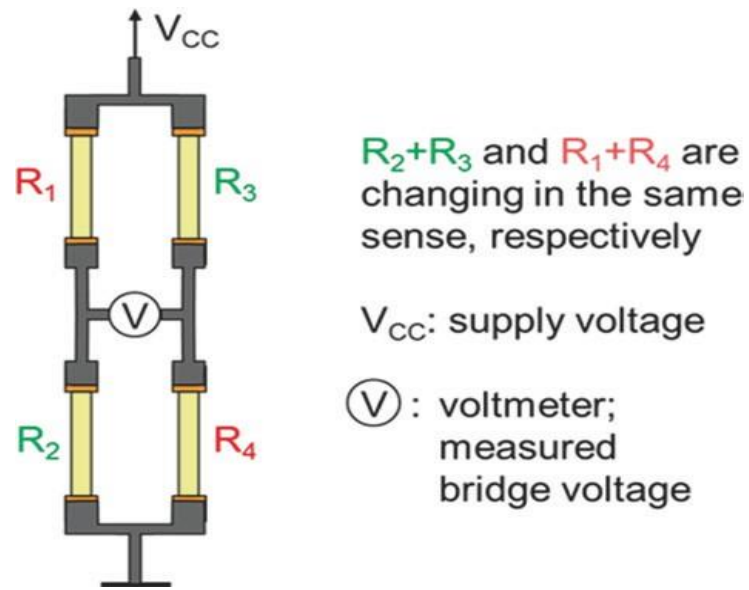


Рисунок 10 – Чотири резистори, з'єднані в міст Уїтстона

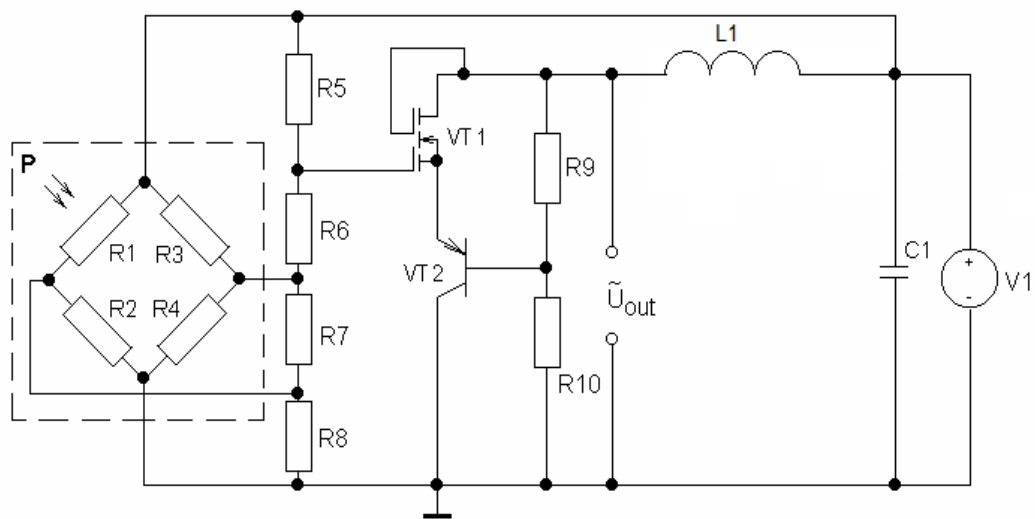


Рисунок 11 – Схема автогенераторного перетворювача тиску

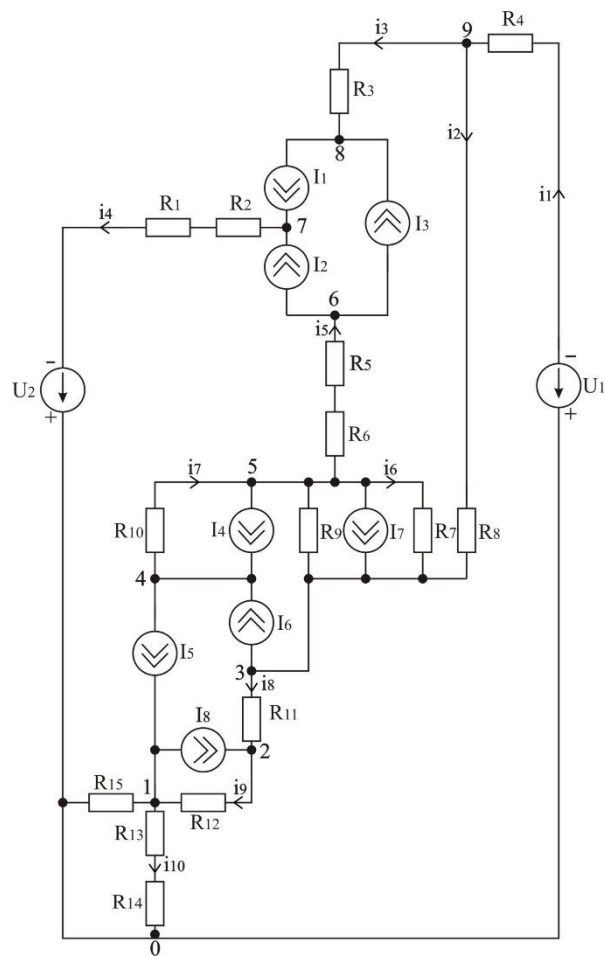


Рисунок 12 – Еквівалентна схема автогенераторного перетворювача тиску по постійному струму

$$\begin{cases}
 I_8 - I_5 = -\varphi_1(y_9 + y_{10}) + \varphi_2 y_9; \\
 -I_8 = \varphi_1 y_9 - \varphi_2(y_9 + y_8) + \varphi_3 y_8; \\
 I_6 - I_7 = \varphi_2 y_8 - \varphi_3(y_8 + y_6 + y_2) + \varphi_5 y_6 + \varphi_9 y_2; \\
 -I_4 + I_5 - I_6 = -\varphi_4 y_7 + \varphi_5 y_7; \\
 I_4 + I_7 = \varphi_3 y_6 + \varphi_4 y_7 - \varphi_5(y_5 + y_6 + y_7) + \varphi_6 y_5; \\
 I_2 + I_3 = \varphi_5 y_5 - \varphi_6 y_5; \\
 -(I_1 + I_2) + U_2 y_4 = -\varphi_7 y_4; \\
 I_1 - I_3 = -\varphi_8 y_3 + \varphi_9 y_3; \\
 U_1 y_1 = \varphi_3 y_2 + \varphi_8 y_3 - \varphi_9(y_3 + y_2 + y_1).
 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 i_{\text{вих}} = & -U_1 y_1 + \frac{A_3 y_1}{C_1} + \frac{A_8 y_2 y_1}{C_1 B_2} + \frac{A_1 y_8 y_9 y_1}{C_1 B_2 (y_9 + y_{10})} - \frac{A_9 y_8^2 y_1}{C_1 B_2 y_2} - \frac{A_8 y_8^2 y_3 y_1}{C_1 B_2 y_2} + \\
 & + \frac{A_9 y_1 (y_2 + y_6 + y_8)}{C_1 y_2} + \frac{A_8 y_3 y_1 (y_2 + y_6 + y_8)}{C_1 y_2} + \frac{A_5 y_6 y_1}{C_1 B_1} - \frac{A_9 y_6^2 y_1}{C_1 B_1 y_2} - \frac{A_8 y_6^2 y_3 y_1}{C_1 B_1 y_2} + \\
 & + \frac{A_4 y_6 y_1}{C_1 B_1} + \frac{A_6 y_6^2 y_5 y_1}{C_1 B_1}.
 \end{aligned}$$

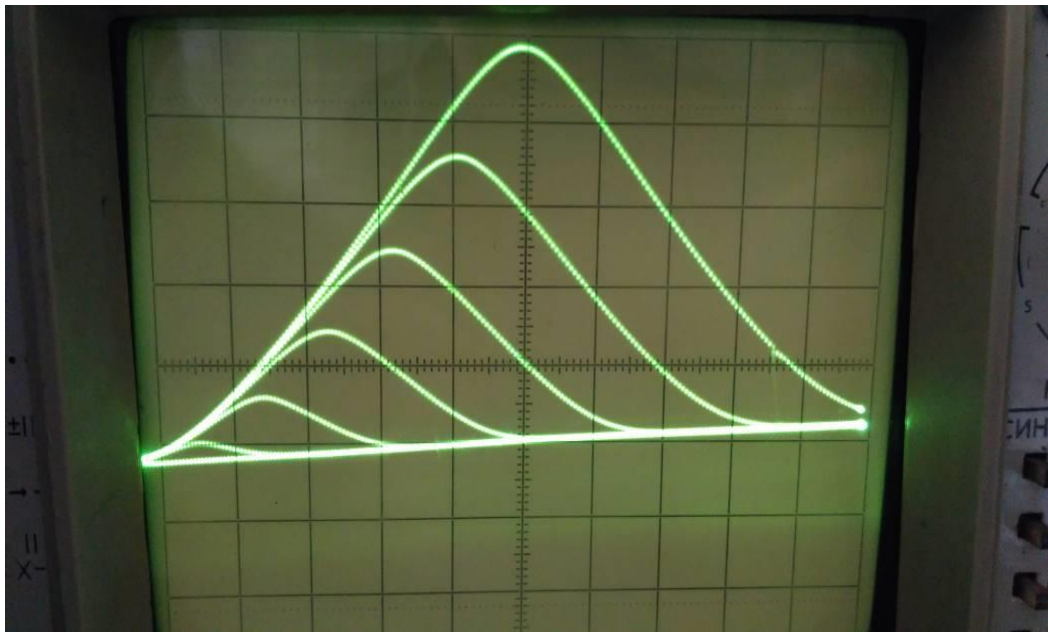


Рисунок 13 – Статична ВАХ автогенераторного перетворювача тиску (по вертикальній осі: одна поділка – 5 мА, а по горизонтальній осі – 1 В)

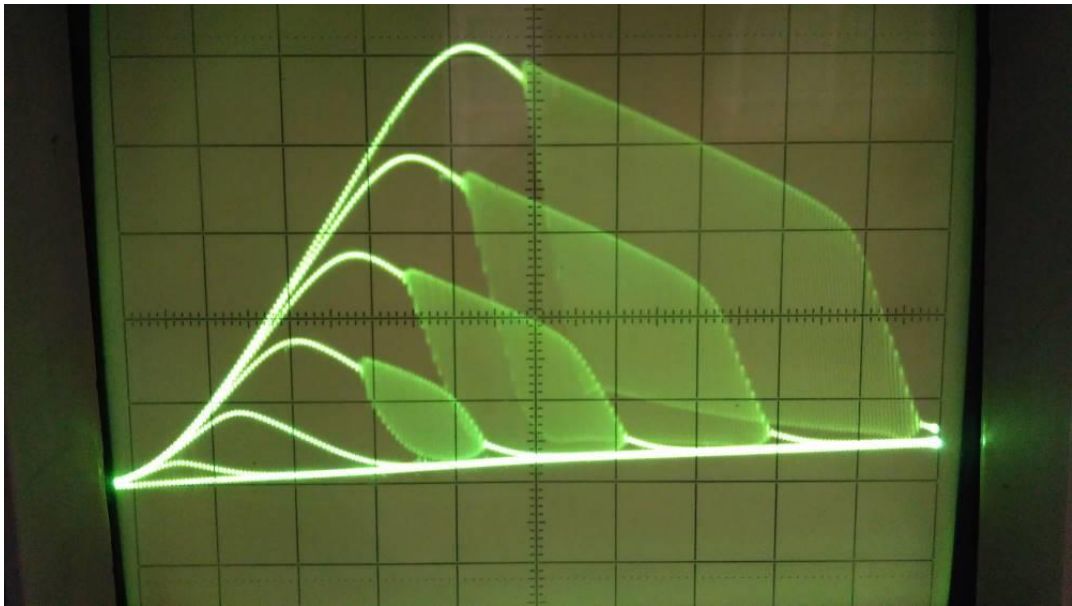


Рисунок 14 – Динамічна ВАХ автогенераторного перетворювача тиску (по вертикальній осі одна поділка – 5 мА, а по горизонтальній осі – 1В)

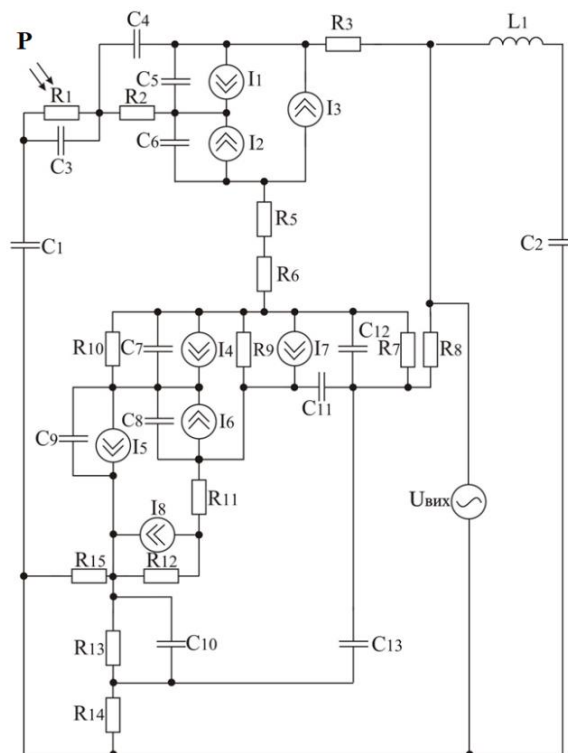


Рисунок 15 - Еквівалентна схема автогенераторного перетворювача тиску на основі нелінійних еквівалентних схем біполярного і польового транзисторів

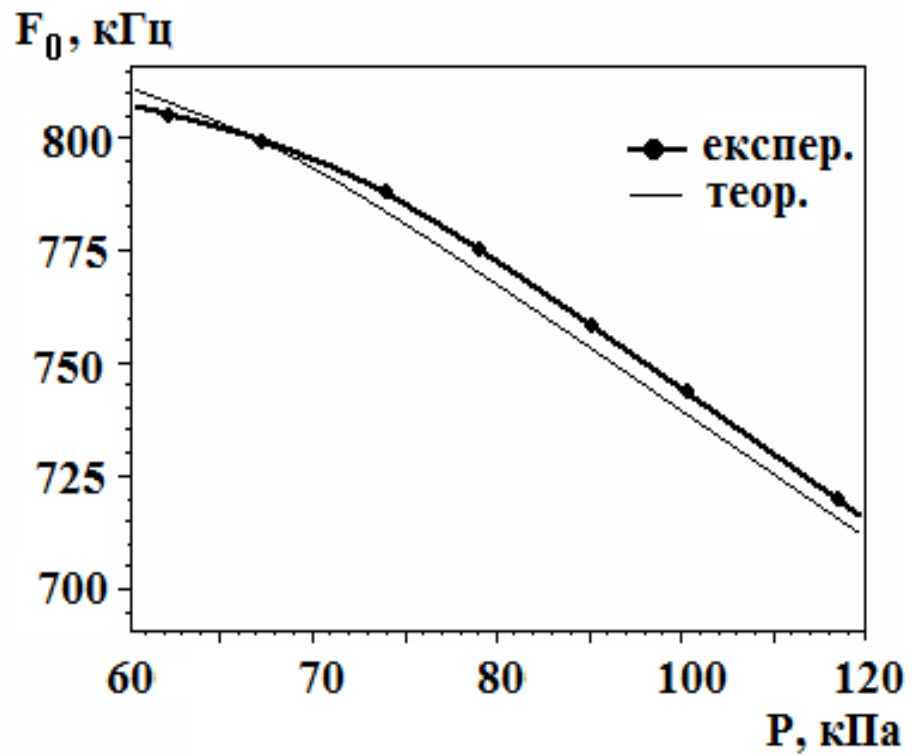


Рисунок 16 – Експериментальна і теоретична залежності частоти генерації автогенераторного перетворювача тиску

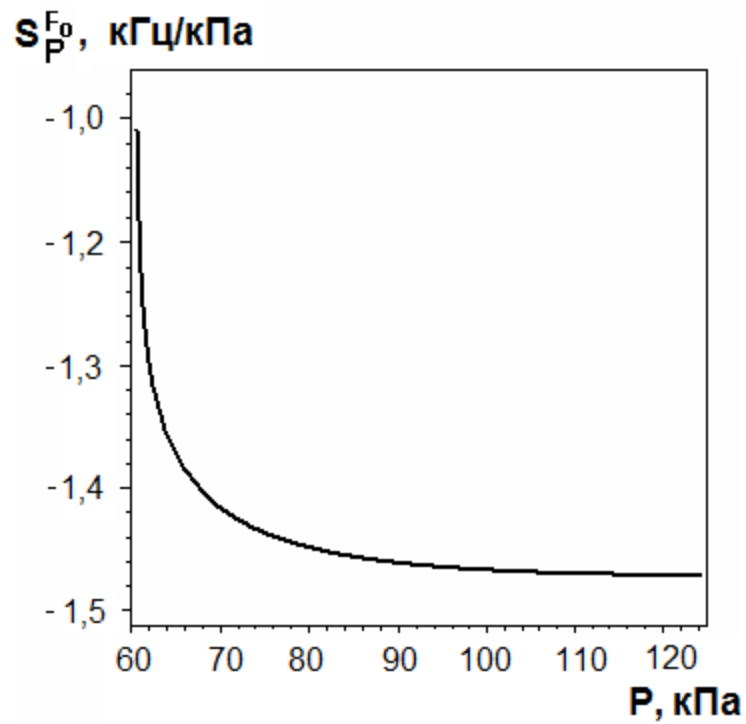


Рисунок 17 – Залежність чутливості від тиску автогенераторного перетворювача тиску

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ
АВТОГЕНЕРАТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ТИСКУ ДЛЯ
БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Автогенераторний перетворювач тиску для бездротових сенсорних мереж»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра ІРТС
(кафедра, факультет)

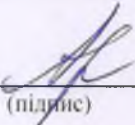
Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 95,25% Схожість 4,75%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

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

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Звягін О.С.
(прізвище, ініціали)

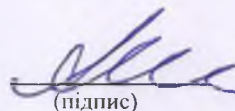
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Бондаренко О.С.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Осадчук О.В.
(прізвище, ініціали)