

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра радіотехніки
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка
до магістерської кваліфікаційної роботи
«Магістр»
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ
СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-18м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка Освітня програма: Радіотехніка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)
Кравецький М. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доцент каф. РТ

Осадчук Я. О.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2019 р.

Рецензент асистент каф. ТКСТБ

Макогон В. І.

(прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2019 р.

Вінницький національний технічний університет

Факультет Інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем

Кафедра Радіотехніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри РТ

д.т.н., професор О.В. Осадчук

“ 03 ” 10 2019 року

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

Кравецькому Миколі Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором»

керівник роботи Осадчук Ярослав Олександрович, к.т.н., доцент

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ 02 ” 10 2019 року №254

2. Строк подання студентом роботи 17 грудня 2019 року

3. Вихідні дані до роботи: напруга живлення від 3,5-5,5В; струм споживання від 1,5мА-15мА; діапазон вимірювання тиску від 0,1 кПа-120кПа; діапазон температур від -20-50⁰С.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз сучасного стану перетворювачів тиску; механізм дії тиску на напівпровідниковий матеріал; радіовимірювальні сенсори тиску на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором; економічна частина, безпека життєдіяльності; висновки; перелік посилань; додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): ємнісний сенсор та перетворювач тиску; MEMS сенсор тиску; схема радіовимірювального перетворювача тиску на основі біполярно-польової транзисторної структури; схема радіовимірювального перетворювача тиску; електрична схема радіовимірювального перетворювача тиску; кквівалентна схема радіовимірювального перетворювача тиску;

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	к.т.н., доцент Осадчук Я. О.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	к.т.н., доцент Березюк О. В.		
Економічна частина	к.т.н., доцент Адлер О. О.		

7. Дата видачі завдання 04 жовтня 2019 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	02.09.2019-15.09.2019	
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	16.09.2019-22.09.2019	
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	23.09.2019-02.10.2019	
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	03.10.2019-20.10.2019	
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	21.10.2019-29.10.2019	
6.	Розділ моделювання	30.10.2019-03.11.2019	
7.	Розробка графічної частини МКР	04.11.2019-10.11.2019	
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	11.11.2019-15.11.2019	
9.	Охорона праці (ОП)	16.11.2019-22.11.2019	
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11.2019-27.11.2019	
11.	Нормоконтроль	28.11.2019-29.11.2019	
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12.2019-06.12.2019	
13.	Захист МКР ЕК	09.12.2019-17.12.2019	

Студент

(підпис)

Кравецький М. В

Керівник роботи

(підпис)

Осадчук Я. О.

РЕФЕРАТ

УДК 621.397

Кравецький М.В. Розробка та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2019. –131 с. На українській мові. Бібліогр.: 68 назв; Рисунок 33; Таблиць 15.

У магістерській кваліфікаційній роботі було розроблено частотні перетворювачі тиску на основі тензочутливих біполярних транзисторних структур з від'ємним опором з ємнісним характером реактивної складової повного опору структури, які можуть бути виготовлені на основі стандартної групової інтегральної технології у вигляді автогенераторних вимірювальних перетворювачів тиску з вихідним частотним сигналом.

Створення математичних моделей частотних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур з від'ємним опором з врахуванням їх тензореактивних властивостей, яке обумовлене наступною розробкою і промисловою реалізацією таких перетворювачів, базується на з'ясуванні характеру залежності електричних параметрів та характеристик напівпровідникових пристроїв, зокрема транзисторів, від тиску.

Проведені експериментальні дослідження, які показали, що чутливість частотного перетворювача тиску на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором складає 0,5 – 3,0 кГц/кПа в діапазоні тиску 60 кПа – 125 кПа. За узагальненими показниками технічної досконалості, розроблені мікроелектронні частотні перетворювачі тиску кращі в 2,5 рази в порівнянні з існуючими. Аналіз проведених теоретичних і експериментальних досліджень показав, що математична модель перетворювача тиску на основі тензочутливих біполярних та МОН транзисторних структур описує поведінку перетворювачів з похибкою $\pm 5\%$.

Розрахунки на економічність приладу показали, що його впровадження у виробництво є економічно ефективним. Оскільки Ток < 3...5-ти років, то фінансування даної наукової розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором є доцільним.

В розділу охорони праці було розглянуто як безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення безпечної відстані від джерела електричного поля, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором, безпека в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: тензорезистивний перетворювач, перетворювач тиску, тензорезистор, напівпровідник, МОН–транзисторах, сенсор тиску, біполярний транзистор.

ABSTRACT

Kravetsky M.V. Development and investigation of a parametric transducer based on a transistor structure with a negative resistance. Master's qualification work. – Vinnitsa: VNTU, 2019. –131 p. In Ukrainian language. Bibliogr .: 68 titles; Fig. 33; Tab. 15.

In master's qualification work was developed frequency converters on the basis of strain-sensitive bipolar transistor structures with negative resistance with capacitive nature of the full component impedance reactive component, which can be made on the basis of standard group integrated technology in the form of autogenerator transducers with signal transducers.

Creation of mathematical models of frequency converters of pressure on the basis of transistor structures with negative resistance taking into account their tensoreactive properties, which is conditioned by the subsequent development and industrial realization of such converters, is based on finding out the nature of dependence of electrical parameters and characteristics of semiconductor devices, in particular transistors.

Experimental studies have been performed which showed that the sensitivity of the frequency converter on the basis of a bipolar transistor structure with a negative resistance is 0.5 – 3.0 kHz / kPa in the pressure range 60 kPa – 125 kPa. According to the generalized indicators of technical excellence, the developed microelectronic pressure transducers are 2.5 times better than the existing ones. Analysis of theoretical and experimental studies showed that the mathematical model of a pressure transducer based on strain-sensitive bipolar and MOSFET transistor structures describes the behavior of transducers with an error of $\pm 5\%$.

Calculations on the efficiency of the device showed that its introduction into production is cost effective. Since the Current is <3 ... 5 years, it is advisable to fund this research and development of a parametric pressure transducer based on a transistor structure with negative resistance.

The section on occupational safety was considered as emergency safety, as technical solutions for occupational hygiene and industrial sanitation, determination of safe distance from an electric field source, technical solutions for industrial and fire safety during the development of a parametric pressure transducer based on the transistor structure from the resistance, safety in emergencies.

Key words: strain gauge converter, pressure transducer, strain gauge, semiconductor, MOSFET transistors, pressure sensor, bipolar transistor.

З М І С Т

ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТИСКУ	11
1.1 Методика виміру тиску у текучих середовищах	11
1.2 Тензорезистивні перетворювачі	13
1.3 Мікроелектронні перетворювачі тиску.....	15
1.4 Ємнісні перетворювачі тиску.....	20
1.5 Висновки до розділу.....	24
2 МЕХАНІЗМ ДІЇ ТИСКУ НА НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ МАТЕРІАЛ ...	25
2.1 Фізичний механізм дії тиску на напівпровідниковий матеріал	25
2.2 Математична модель деформаційного ефекту в МОН–транзисторах ...	35
2.3 Висновки до розділу.....	44
3 РАДІОВІМІРЮВАЛЬНІ СЕНСОРИ ТИСКУ НА ОСНОВІ РЕАКТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР З ВІД’ЄМНИМ ОПОРОМ	45
3.1 Сенсор тиску з частотним виходом на основі біполярного тензочутливого транзистора	45
3.2 Радіовимірвальний мікроелектронний сенсор тиску на основі біполярно польової транзисторної структури з тензочутливим резистивним мостом.....	48
3.3 Радіовимірвальний перетворювач тиску з активним індуктивним елементом і тензочутливим резистивним мостом.....	49
3.4 Радіовимірвальний перетворювач тиску на основі двоколекторного тензотранзистора.....	54
3.5 Радіовимірвальний перетворювач тиску на основі двохстокового МОН тензотранзистора.....	58
3.6 Оцінювання метрологічних параметрів радіовимірвальних перетворювачів тиску.....	61
4 АНАЛІЗ КОМЕРЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ РОЗРОБКИ (ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АУДИТ РОЗРОБКИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД’ЄМНИМ ОПОРОМ	69
4.1 Визначення рівня комерційного потенціалу розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від’ємним опором.....	69
4.2 Визначення рівня якості розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від’ємним опором.....	70
4.3 Визначення конкурентоспроможності розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від’ємним опором	73
4.4 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи.....	74

4.5 Розрахунок загальних витрат на розробку та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором	78
4.6 Прогнозування витрат на виконання та впровадження та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором	79
4.7 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором	79
4.8 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та період їх окупності	81
4.9 Розрахунок відносної ефективності вкладених коштів в НДДКР та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором	81
4.10 Розрахунок терміну окупності коштів, вкладених в наукову розробку та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором	82
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	83
5.1 Технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці	83
5.1.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони	83
5.1.2 Виробниче освітлення	85
5.1.3 Виробничі віброакустичні коливання	86
5.1.4 Виробничі випромінювання	87
5.2 Технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором	88
5.2.1 Безпека щодо організації робочих місць	88
5.2.2 Електробезпека	89
5.2.3 Пожежна безпека	89
5.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях	91
5.3.1 Дослідження стійкості роботи параметричного перетворювача тиску в умовах дії іонізуючих випромінювань	91
5.3.2 Дослідження стійкості роботи параметричного перетворювача тиску в умовах дії електромагнітного імпульсу	93
5.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи параметричного перетворювача тиску в умовах надзвичайних ситуацій	94
ВИСНОВКИ	96
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	98
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання	103
Додаток Б (обов'язковий) Ємнісний сенсор та перетворювач тиску	108
Додаток В (обов'язковий) MEMS сенсор тиску	110
Додаток Д (обов'язковий) Схема радіовимірювального перетворювача тиску на основі біполярно-польової транзисторної структури	112
Додаток Е (обов'язковий) Схема радіовимірювального перетворювача тиску	114

Додаток Ж (обов'язковий) Електрична схема радіовимірювального перетворювача тиску	116
Додаток К (обов'язковий) Еквівалентна схема радіовимірювального перетворювача тиску	118
Додаток Л (обов'язковий) Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації радіовимірювального перетворювача тиску	120
Додаток М (обов'язковий) Лістинги програм розрахунку радіовимірювальних перетворювачів тиску	122

ВСТУП

Актуальність. Узагальнення основних напрямків в галузі стимулюючих факторів вітчизняних розробки та виробництва мініатюрних чутливих перетворювачів тиску, інтегрованих в конструктивні рішення на мікрорівні, відокремлює:

- наявність наукової та виробничо–технологічної культури, що сформувалася в період становлення та розвитку галузі вітчизняної мікроелектроніки;

- наявність базового устаткування, виробничих потужностей та організаційної інфраструктури мікроелектронного виробництва для виготовлення виробничих зразків інтегральних перетворювачів різної номенклатури;

- активно зростаючий світовий ринок перетворювачів механічних величин різного функціонального призначення, конструктивного та схемотехнічного виконання;

- поява сучасних систем обробки інформації та керування нового покоління інтегральних схем на основі застосування мікропроцесорних засобів вимірювань з вбудованими цифровими блоками опрацювання і керування.

Вагомий внесок в процес розвитку інформаційно–вимірювальних засобів в напрямку розробки мікроелектронних частотних перетворювачів здійснювався в науковій школі Вінницького національного технічного університету.

Дана робота присвячена розробці та дослідженню радіовимірювальних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур з від’ємним опором, дія яких ґрунтується на використанні функціональної залежності реактивної складової повного опору транзисторної структури від тиску, що представляє теоретичний та практичний інтерес, а тому дозволяє вважати актуальною.

Розробка чутливих перетворювачів тиску з високими метрологічними параметрами і характеристиками та вихідним частотним сигналом, який характеризується можливістю перетворення в цифровий код зі значною простотою та наявністю мінімальної похибки, виконаних на основі стандартної групової інтегральної технології та сумісних з цифровими системами обробки інформації, являється актуальним питанням в галузі створення первинних вимірювальних перетворювачів механічних величин. Альтернативним шляхом розв’язання даного питання є розробка частотних перетворювачів тиску на основі використання тензореактивних властивостей напівпровідникових структур з від’ємним опором.

Метою роботи є розробка та дослідження радіовимірювальних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур з від'ємним опором, дія яких ґрунтується на використанні функціональної залежності реактивної складової повного опору транзисторної структури від тиску.

Для досягнення поставленої мети в магістерській кваліфікаційній роботі необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати існуючі перетворювачі тиску та обґрунтувати переваги частотних перетворювачів тиску на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором по відношенню до існуючих;

- удосконалити фізико–математичну модель деформаційних ефектів в напівпровідниковому матеріалі тензочутливих елементів;

- розробити математичні моделі радіовимірювальних перетворювачів тиску на основі біполярних та МОН–транзисторних структур з врахуванням впливу тиску на чутливі елементи та дослідити їх характеристики;

- виконати експериментальну перевірку залежностей електричних параметрів та характеристик розроблених математичних моделей частотних перетворювачів на основі транзисторних структур від тиску та дослідити їх властивості в широкому діапазоні частот;

- розробити мікропроцесорну систему контролю тиску вологості та температури з використанням розроблених радіовимірювальних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур з від'ємним опором;

- здійснити метрологічну оцінку похибок виміру тиску.

Об'єктом дослідження є процес перетворення тиску у частотний сигнал у чутливих напівпровідникових структурах, що породжує задачу розбудови радіовимірювальних сенсорів тиску з покращеними метрологічними показниками.

Предмет дослідження – характеристики радіовимірювальних сенсорів тиску на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні:

- рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей перетворювачів тиску;

- основних положень теорії функції комплексної змінної для визначення функції перетворення та рівняння чутливості;

- диференціального та інтегрального числення для створення математичних моделей тензочутливих біполярних та МОН–транзисторів;

- теорії розрахунку нелінійних електричних кіл з використанням законів Кірхгофа для визначення повного опору частотних перетворювачів тиску на основі тензочутливих біполярних та МОН–транзисторних структур;

- теорії ймовірності для оцінки похибок виміру.

Наукова новизна одержаних результатів

1) Розглянуто можливість використання двоколекторних та двостокових тензочувливих транзисторів в радіовимірювальних перетворювачах тиску на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором, що працюють по принципу “тиск–частота”;

2) Розглянута математична модель деформаційних ефектів в напівпровіднику, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховані залежності основних електрофізичних параметрів кремнію від тиску, що є підставою для аналітичного визначення впливу тиску на напівпровідникові прилади, зокрема, на біполярні та МОН–транзистори;

3) Розглянуті математичні моделі тензочувливих біполярних та МОН–транзисторів, які відрізняються від існуючих тим, що в них враховані залежності електричних параметрів та характеристик транзисторів від тиску, що обумовило розробку автогенераторних вимірювальних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур;

Практичне значення одержаних результатів

1) в результаті математичного моделювання деформаційних ефектів в біполярних та МОН–транзисторах отримані аналітичні вирази для визначення впливу тиску на їх електричні параметри та характеристики, які можуть бути використані з метою розробки та дослідження первинних перетворювачів тиску на їх основі;

2) отримані аналітичні вирази для функції перетворення та чутливості розроблених частотних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур з від’ємним опором, які можуть бути використані для інженерного розрахунку первинних перетворювачів тиску;

Особистий внесок здобувача

Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором самостійно.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТИСКУ

Перетворювач тиску – це пристрій, який вимірює тиск і перетворює його в аналоговий чи цифровий електричний сигнал, величина якого залежить від прикладеного тиску [2]. Оскільки вони перетворюють тиск в електричний сигнал, вони також називаються перетворювачами тиску.

Перетворювачі тиску можуть прямо або неопосередковано вимірювати значну кількість параметрів, які використовуються при автоматичному керуванні та управлінні. Перетворювачі тиску початково з'явилися на ринку автомобільної і авіаційної промисловості, але на даний час почали використовуватися в різноманітних галузях науки і техніки, а також побуту.

Розглянемо основні галузі застосування перетворювачів тиску [2], [3].

- Комп'ютерна техніка: Touch Screen Devices – комп'ютерні пристрої і смартфони з сенсорним дисплеєм поставляються з перетворювачами тиску.
- Автоелектроніка: виміру рівня палива; системи ABS; виміру та контроль тиску в шинах; виміру потоку палива; виміру тиску в колекторі; контроль форсажу; індикатор швидкості повітря.
- Медична електроніка: тонометри; насоси для ін'єкцій; апарати вентиляції легенів; прилади життєзабезпечення в реанімаціях; лікарняні ліжка.
- Будівництво та міське господарство: контроль щільності ґрунту при будівництві; контроль засмічення фільтрів; контроль потоку повітря в приміщенні; контроль тиску в вентиляційних шахтах; пристрої автоматики для котлів.
- Автоматизація: автоматичні лічильники предметів; тактильні сенсори для роботів; пневмоінструмент; доїльні агрегати; технологічне обладнання; високовакуумні системи; прилади контролю розрізу нафтової свердловини; монітори ударної хвилі; динамометри для двигунів.
- Метеорологія: барометри; метеостанції; метеозонд.
- Побутова техніка: ваги, контроль тиску в пилососах; системи вентиляції; контроль рівня води в пральних машинах.

1.1 Методика виміру тиску у текучих середовищах

Найпоширеніше використання перетворювачів тиску це виміру тиску в рідких чи газоподібних середовищах. Загальна назва для цих двох середовищ – текучі середовища, підкреслює малий опір їхньої деформації [12]. Теорія механіки текучих середовищ досить складна, але основні концепції можна

викласти без складних математичних виразів у доступних термінах, не втрачаючи при цьому необхідної технічної точності і рівня деталізації.

Розглянемо види вимірюваного тиску. Тиск у текучому середовищі може бути визначений як міра сили, що приходить на одиницю площі, переданою текучим середовищем, у напрямку перпендикулярному будь-якій поверхні, що входить з нею в контакт. Стандартна одиниця для виміру тиску в системі СІ – Паскаль (Па), він дорівнює силі в один Ньютон, прикладеній на один квадратний метр (Н/м^2). В англійській системі одиниць тиск вимірюється у фунтах на квадратний дюйм (psi). Тиск може бути виражено у деяких інших одиницях, включаючи: бар, висота ртутного чи водяного стовпа, атмосфера, кгс/см^2 . Є три різних види тиску: абсолютний тиск, відносний тиск і диференціальний тиск. Абсолютний тиск – це абсолютне значення сили, віднесене до одиниці поверхні. Тому абсолютний тиск – це різниця між тиском у даній точці середовища й абсолютним нулем тиску, що відповідає тиску в повному вакуумі. Відносний тиск – різниця між абсолютним тиском і місцевим атмосферним тиском. Місцевий атмосферний тиск може змінюватися в залежності від навколишньої температури, висоти над рівнем моря і місцевих погодних умов.

Для інших одиниць важливо визначити: відносний чи абсолютний тиск вимірюється. Відносний тиск відповідно до угоди завжди позитивний. “Від’ємний” відносний тиск визначається як вакуумний. Вакуумним називається тиск менший місцевого абсолютного атмосферного тиску. Рисунок 1.1 показує співвідношення між абсолютним, відносним і вакуумним тисками. Диференціальний тиск – це різниця між двома невідомими тисками. Цей тип виміру тиску використовується для отримання значення падіння тиску в системі подачі потоку середовища. При вимірюванні різниці тисків не важливо, яке з них вважати опорним.

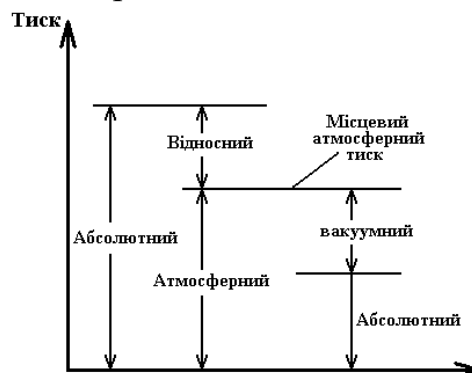


Рисунок 1.1 – Співвідношення між абсолютним і відносним тиском [2]

Крім трьох типів вимірюваного тиску, є два типи систем з текучими середовищами – це статичні і динамічні системи.

Динамічні системи більш складні для аналізу, ніж статичні системи і відповідно більш складною є методика проведення вимірювань у них. У динамічній системі тиск визначається за допомогою трьох різних термінів. По–перше, динамічний тиск вимірюється так само, як і в статичній системі. Динамічний тиск не залежить від руху середовища. Як і в статичних системах, динамічний тиск діє однаково у всіх напрямках. По–друге, динамічний тиск, зв'язаний зі швидкістю потоку в середовищі і по–третє, повний тиск є сумою статичного і динамічного тисків.

Для динамічної системи в сталих станах точний статичний тиск може бути виміряний в напрямку, перпендикулярному до потоку середовища. Сталим вважається стан динамічної системи, при якому не змінюються такі параметри, як тиск, швидкість потоку і т.п.

При протіканні потоку через трубу поля швидкостей, повний і динамічний тиск неоднорідні. Біля стінки будь–якої труби внаслідок тертя існує ділянка з нульовою швидкістю потоку. Форма розподілу буде залежати від стану середовища, потоку і тиску. Щоб точно визначити середній динамічний тиск у перетині труби, необхідно одержати ряд значень повного тиску в її перетині. Ці виміру тиску повинні бути проведені при різних радіусах і кутах у полярній системі чи різній ширині і висоті в декартовій системі координат для перетину. Ця методика також використовується, щоб визначити швидкісний профіль у середині труби.

Перехідні режими в динамічних системах. У перехідних режимах змінюються різні параметри системи: тиск, швидкість потоку і т.д. Виміру в цьому випадку є найбільш складними. Якщо швидкість реакції вимірювальної системи вище, ніж швидкість змін у системі, тоді із системою можна звертатися як із квазістатичною. Тобто виміру будуть настільки ж точні, як у сталому стані.

1.2 Тензорезистивні перетворювачі

Тензорезистивні перетворювачі використовуються для виміру деформації в твердих тілах. На їх основі будують перетворювачі маси, тиску, сили, переміщення, моменту, прискорення, вібрації, натягу, крутного моменту, залишкових напружень в механічних конструкціях і деталях машин. Принцип дії тензорезистивного перетворювача заснований на зміні електричного опору твердого тіла при його деформації прикладеною силою [11].

Конструкція металевого тензорезистивного перетворювача складається з тонкого дроту або металеві фольги, сформованої у вигляді меандру (рисунок

1.2) яку нанесеною на підкладку. Довжина тензорезистивного перетворювача лежить в діапазоні від 0,2 мм до 15 см [7].

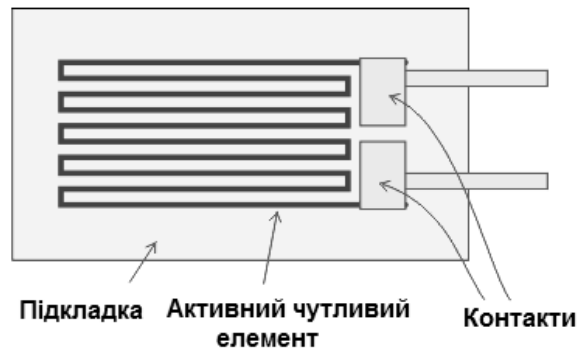


Рисунок 1.2 – Схематична конструкція тензорезистивного перетворювача

Промислові тензорезистивні перетворювачі володіють опором від 30 Ом до 3 кОм при типових значеннях 120 Ом, 350 Ом і 1 кОм. Матеріалом для виготовлення тензорезистивних перетворювачів слугує константан (45% Ni, 55% Cu), платина і її сплави, ніхром (80% Ni, 20% Cr), манганин (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni), нікель і інші сплави [9].

Виміри за допомогою тензорезистивного перетворювача вимагають реєстрації дуже малих змін опору приблизно від 0,1 до 0,05 Ом. Для того щоб вимірювати настільки малу зміну опору і компенсувати температурну нестабільність, тензорезистивні перетворювачі практично завжди використовують в мостовій схемі (міст Уїтстона, рисунок 1.3), підключеної до джерела напруги або струму [7], [8].

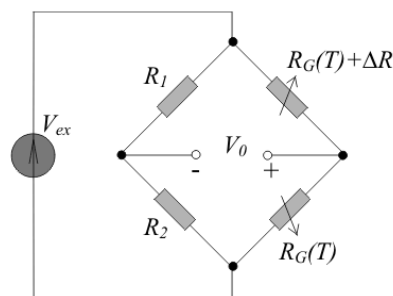


Рисунок 1.3 – Напівмостова схема включення тензорезистивного перетворювача для компенсації температурної похибки

У напівмостовій схемі можна використовувати також два включення тензорезистивних перетворювачів з некомпенсованою температурною похибкою, якщо один з них працює на розтяг, а другий працює на стиск [7], [8]. Це дозволяє підвищити чутливість схеми виміру в 2 рази і одночасно компенсувати температурну похибку. Подальше підвищення чутливості схеми вимірювань можна досягти, якщо використовувати чотири тензорезистивних перетворювача, два з яких працюють на розтягнення, і два – на стиснення.

За використання низькоомних тензорезистивних перетворювачів вони можуть досягати одиниць і десятків Ом, що вносить значну похибку в результати виміру. Для вирішення цієї проблеми весь вимірювальний міст розташовують поряд з перетворювачем, а сигнали з виходу моста вимірюють за допомогою високоомних прицезійних операційних підсилювачів (рисунок 1.4) [8].

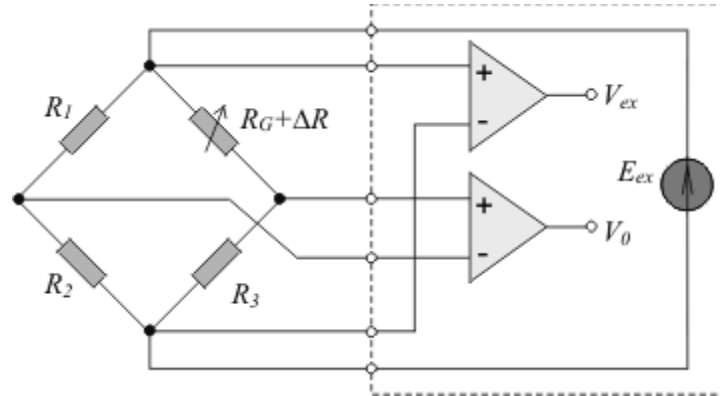


Рисунок 1.4 – Шестипровідне підключення вимірювального моста з тензорезистивним перетворювачем [9]

1.3 Мікроелектронні перетворювачі тиску

Переваги мікроелектронних сенсорів перед традиційними обумовлені, насамперед, застосуванням у них як чутливого елемента напівпровідникового матеріалу, групових методів його обробки і формування в ньому вимірювальних й інших схем підсилення й обробки сигналу методами мікроелектронної технології.

П'єзоелектричні властивості кремнію обумовили його широке розповсюдження при виробництві перетворювачів тиску. Кремній володіє високою чутливістю провідності до змін механічного навантаження та доброю відтворюваністю характеристик. Перевагами перетворювачів такого типу є: висока чутливість; достатня лінійність; незначні гістерезисні явища; малий час спрацювання; компактна конструкція; економічна планарна технологія виготовлення.

Одним з простих тензоперетворювачів є тензорезистор, який представляє собою пластину або стержень напівпровідника з омичними контактами на кінцях. Один кінець пластини закріплюється на нерухомій основі, а на інший діє сила F . Для характеристики зміни опору при деформації користуються коефіцієнтом тензочутливості m , який являє собою відношення відносної зміни опору до відносної деформації у даному напрямку (l – розмір напівпровідника у напрямку деформації). Оскільки при стисненні $\Delta l < 0$, то знак зміни рухливості у цьому випадку співпадає зі знаком m . Коефіцієнт тензочутливості для германія та кремнію має найбільше значення порядку 150...175 [11], [22].

Розглянемо напівпровідникові тензорезистивні сенсори. Напівпровідниковий тензорезистор [23] включас сформований на підкладці ізоляційний шар, розташований на ньому шар напівпровідника у вигляді стрічки товщиною 0,1–1,0 мкм, забезпечений на кінцях контактами, виконаними у вигляді шару металу, розташованого на частини поверхні шару напівпровідника і ізоляційному шарі, при цьому контакти виконані тришаровими, а перший шар, розташований на частині поверхні напівпровідника і ізоляційному шарі, виконаний з алюмінію, серединний шар виконаний зі сплаву алюмінію з нікелем або кобальтом, зовнішній шар виконаний з нікелю або кобальту (рисунок 1.5). Запропонований авторами [23] тензорезистор забезпечує збільшення чутливості, зниження величини похибки вимірювань, більш низький рівень власних шумів напівпровідникового тензорезистора, стабільність електричних параметрів і підвищення стійкості до дії агресивних середовищ.

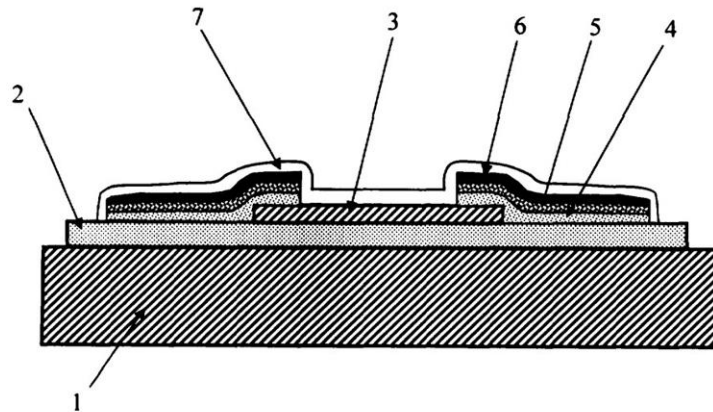


Рисунок 1.5 – Напівпровідниковий тензорезистор: 1 – підкладка; 2 – ізоляційний шар; 3 – шар напівпровідника; 4 – перший шар з алюмінію; 5 – серединний шар зі сплаву алюмінію з нікелем або кобальтом; 6 – зовнішній шар з нікелю або кобальту; 7 – зовнішнє захисне покриття [13]

Розглянемо ще один різновид напівпровідникового тензорезистора. У роботі [14] запропонований тензорезистор, який містить полімерну підкладку 1, носій 2, виконаний з тонкої від 3 мкм до 10 мкм константанової фольги, сформованої на підкладці 2, діелектричну розділову плівку 3 (SiO) і виконану на плівці 3 тензочутливу плівку 4 з моносольфиду самарію (SmS) товщиною від 0,5 мкм до 1 мкм (рисунок 1.6).

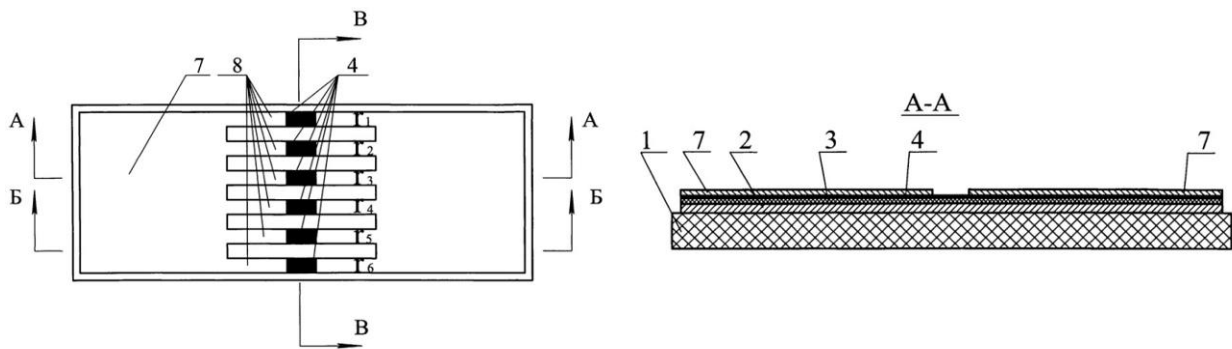


Рисунок 1.6 – Конструкція та розріз напівпровідникового тензорезистора [14]

Підкладка 2 являє собою два майданчики 5, з'єднані нитками 6 шириною $50 \div 200$ мкм кожна (форма решітки). Нанесені на підкладку 2 послідовно діелектрична 3 і тензочутливі 4 плівки також повторюють його форму. Контакти 7 виконані, наприклад, з нікелю товщиною від 1 мкм до 2 мкм і сформовані частково на майданчиках 5 і частково на нитках 7 тензочутливі плівки 4, шунтуючи її. Незашунтовані частини ниток 6 тензочутливої плівки 4, будучи, власне, резисторами, електрично-з'єднані між собою паралельно. Полімерна підкладка 1 (лак ВЛ-931 товщиною від 20 до 30 мкм сформована на зворотному боці підкладки 2. Довжина ділянок 8 металевих контактів 7, розташованих на нитках 6, однакова або різна і від однієї до іншої змінюється по нелінійному закону. Розглянутий тензорезистивний елемент дозволяє збільшити осьову чутливість до деформації, зменшити поперечну чутливість та забезпечити можливість зменшення електричного опору тензорезистора, а також заміни його після наклепки шляхом обриву ниток.

В останній час в якості сенсорів тиску використовують тензометричні перетворювачі. Особливо перспективними є напівпровідникові тензометричні перетворювачі дифузійного типу. Дифузійні тензометричні перетворювачі на кремнієвій підкладці володіють високою чутливістю, малими розмірами та легко інтегруються з необхідними периферійними схемами [15]–[17].

За допомогою перетворювачів тиску контролюють як абсолютний, так і надлишковий тиск, вимірюють перепад та відношення тисків, отримують інформацію про деформації, вібрації та витрати у різних системах. Це найбільш поширений клас вимірювальних перетворювачів [18]–[19]. Виготовляють їх з кремнієвої пластини, частину якої витравлюють до створення тонкої мембрани. Методом іонної імплантації на мембрані виконують резистивні елементи з між'єднаннями. При вимірюванні тиску мембрана прогинається, та під дією п'єзоелектричного ефекту відбувається зміна опору резистивних елементів. Товщина мембрани визначається областю допустимих тисків.

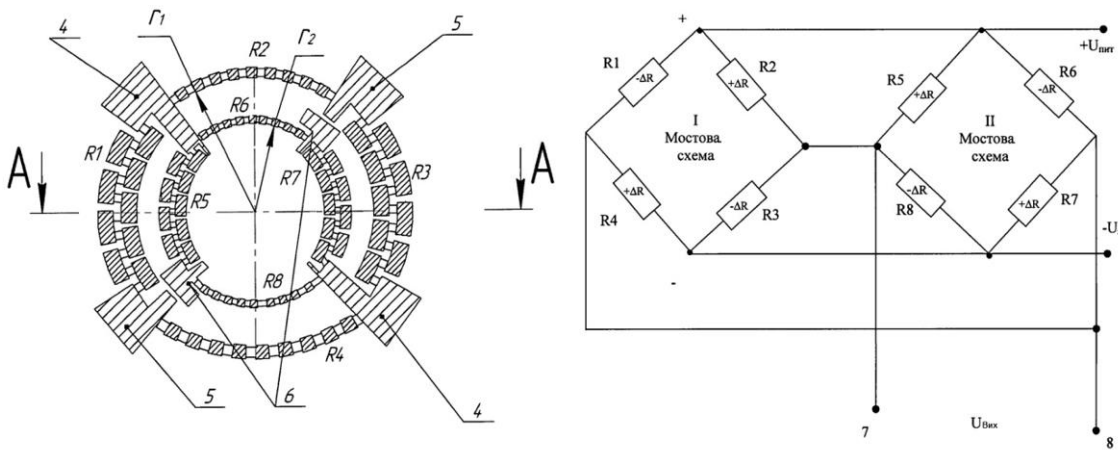


Рисунок 1.7 – Спрощений зовнішній вигляд перетворювача тиску [19]

Спрощений зовнішній вигляд сенсора тиску показано на рисунку 1.7. В основу роботи сенсора покладено тензорезистивний ефект у напівпровідниковому чутливому елементі. В перетворювачі тиску, який містить корпус, мембрану радіуса r_1 , виконану з жорстким центром радіуса r_2 і потовщеною периферійною підкладкою, виконаною за одне ціле з корпусом, розміщені по планарній поверхні мембрани контактні площадки і тензорезистори, виконані у вигляді великої кількості ідентичних тензоелементів, при цьому частина тензорезисторів з'єднані низькоомними перемичками в радіальному напрямку, а частина – з'єднана низькоомними перемичками в окружному напрямку, розміщені по периферії мембрани і по периметру жорсткого центру. Тензорезистори з'єднані в дві мостові схеми, при цьому одна схема розташована по периметру потовщеної периферійної підкладки, а друга – по периметру жорсткого центру. Тензорезистори першої мостової схеми, з'єднані в радіальному напрямку і розташовані навпроти з'єднаних в радіальному напрямку тензорезисторів другої мостової схеми. Дане технічне рішення дозволяє вимірювати тиск в широкому температурному діапазоні з високою точністю.

Тензочутливий MEMS елемент перетворювача являє собою мембрану, сформовану в пластині з монокристалічного кремнію методом хімічного анізотропного травлення (рисунок 1.8) [19].

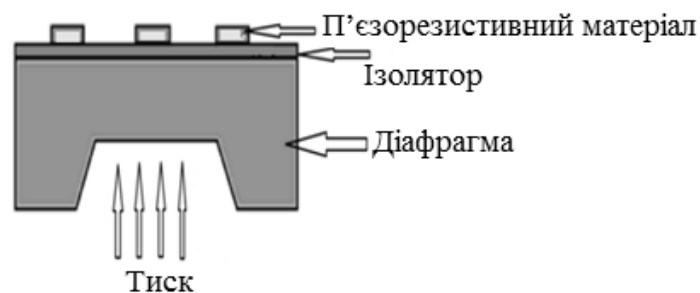


Рисунок 1.8 – MEMS тензочутливий елемент

На поверхні чутливого елемента, у місцях найбільших механічних напруг, методом введення бора в кремній n-типу провідності сформовані тензорезистори, що складають вимірювальну схему. Чутливі елементи характеризуються часовою стабільністю і відсутністю гістерезису. Конфігурація мембрани залежить від конфігурації вікна травлення і може відрізнятися від круглої форми [19].

Як показано в [11], квадратна мембрана практично має такі ж деформаційні характеристики, що і кругла. Топологія перетворювача визначає електричні характеристики перетворювача, габаритні розміри і форму мембрани, а також надійність роботи перетворювача в цілому і є одним з важливих етапів його проектування.

Тензорезистори розміщені на краях мембрани і спрямовані уздовж кристалографічних напрямків $\langle 110 \rangle$ таким чином, що при деформації мембрани в двох з них виникають позитивні збільшення напруги ($+\Delta U_1$) внаслідок подовжнього тензоефекту, а в двох інших – ($-\Delta U_2$) внаслідок поперечного тензоефекту, причому $|\Delta U_1| = |\Delta U_2|$. Як показують виміру на макетних зразках, номінали тензорезисторів можуть мати розкид до 5 %. Розкид по номіналах тензорезисторів приводить до початкового розбалансу моста, а також до погіршення температурних характеристик перетворювача. Тому для балансування нуля моста застосовують два методи підгону номіналів тензорезисторів: включають у плечі моста додатковий опір на кристалі чи включають додатковий опір поза межами кристала (навісний елемент).

Перший метод допускає автоматизацію процесу підгону, а також, при правильному розрахунку електричних параметрів сенсора дозволяє вирішити проблему термокомпенсації моста без ускладнення технології виготовлення. Важливим етапом проектування подібних перетворювачів є вибір і розрахунок компонентів електричної схеми. Відомо, що в напівпровідникових тензорезисторах залежність питомого опору і коефіцієнта тензочутливості від температури сильніша, ніж в інших тензорезисторах (фольгових, дровових).

Відомо з [11], що з підвищенням рівня легування зменшується вплив температури на тензочутливість напівпровідника. Однак зі збільшенням концентрації легованих домішок зменшується як коефіцієнт тензочутливості π , так і номінал резистора. При кімнатній температурі $\pi = 160$ для концентрації $N = 10^{17} \text{ (см}^{-3}\text{)}$ і $\pi = 75$ при $N = 10^{20} \text{ (см}^{-3}\text{)}$.

Другим параметром, що залежить від температури, є опір тензорезистора. Як відомо з роботи [11], залежність температурного коефіцієнта опору (ТКС) з підвищенням рівня легування від температури менш виражена і при $N = 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ТКС кремнію дорівнює $0,96 \cdot 10^{-3}$, тобто кожному градусу зміни температури

відповідає $0,96 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \% = 0,1 \%$ зміни опору плеча моста. Звідси випливає, що підвищення рівня легування ($N = 10^{20} \text{ см}^{-3}$) є одним з оптимальних шляхів одержання перетворювача із широким температурним діапазоном.

1.4 Ємнісні перетворювачі тиску

Розглянемо ємнісні сенсори тиску. У сенсори для перетворення тиску в електричний сигнал, зображеному на рисунку 1.9, та наведено в додатку Б.1., мембрана сформована на кремнієвій підкладці, а конденсатор, який містить п'єзоелектричну тонку плівку, сформований на кремнієвій мембрані. Крім того, всі елементи: резистор, діод та транзистор також сформовані на головній поверхні кремнієвої підкладки. Вихідний сигнал з конденсатора оброблюється схемою, яка також розташована на кремнієвій підкладці [21].

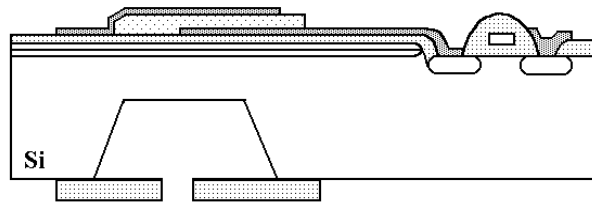


Рисунок 1.9 – Ємнісний сенсор тиску

Авторами у роботі [22] запропонований ємнісний сенсор тиску (рисунку 1.10). Механічна частина перетворювача тиску складається з чутливого до зміни тиску пружного елемента (мембрани) 1, закріпленого на опорному елементі 2. Мембрана виготовлена з монокристалічного кремнію методом рідинного анізотропного травлення. Опорний елемент 2 виготовлений зі скла марки ОФ7.

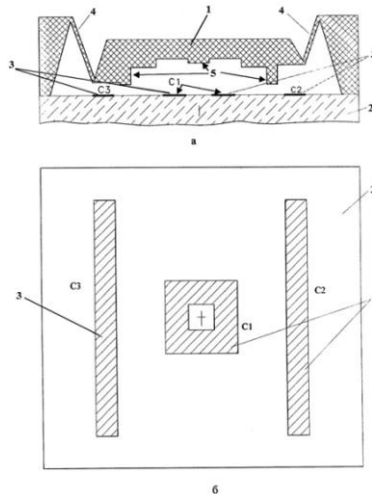


Рисунок 1.10 – Ємнісний сенсор тиску: 1 – пружний елемент (мембрана); 2 – опорний елемент; 3 – ємнісні сенсори переміщення (C1, C2, C3); 4 – перемичка пружного елемента; 5 – упор пружного елемента

Кріплення мембрани на опорному елементі здійснено пайкою склом. У мембрані витравлені спеціальні пружні перемички 4 – розв'язки між робочою частиною мембрани і місцями її кріплення до опорного елементу. Перемички мають малу жорсткість в напрямку, ортогональному напрямку робочого переміщення мембрани. Це забезпечує зниження деформації мембрани при зміні температури приладу, а також від релаксації внутрішніх напружень в місцях кріплення при тривалій експлуатації.

Для покращення чутливості ємнісного сенсора тиску, авторами у роботі [23] запропонований ємнісний перетворювач тиску на основі на структурі Si/CaF₂/Si (рисунок 1.11), та наведено в додатку Б.2. Перетворювач містить кремнієву підкладку (1), в якій сформована мембрана (2) і на якій послідовно розташовуються епітаксціальний шар фториду кальцію (3), епітаксціальний шар кремнію (4), шар металізації (5) і друга пластина кремнію (6).

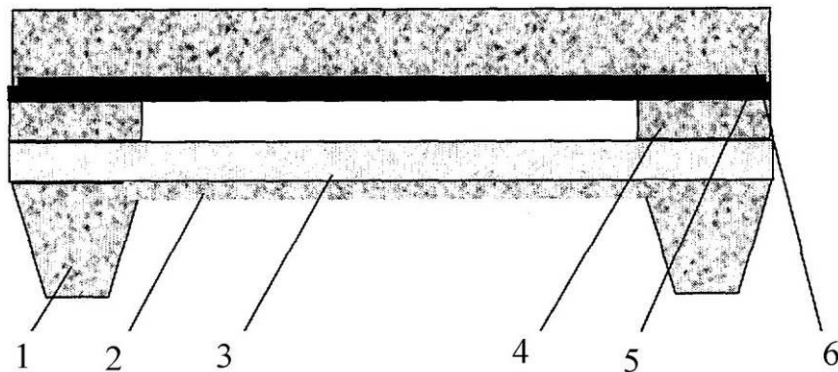


Рисунок 1.11 – Ємнісний перетворювач тиску

У роботі [24] розглянуто комп'ютерне моделювання та аналітичне рішення для мікроелектромеханічних систем (MEMS) на базі ємнісного сенсора диференціального тиску для альтиметрів літака. Автори розглянули принцип дії та структуру запропонованого ними MEMS ємнісного перетворювача тиску, та дослідили чутливість для різних формфакторів мембрани: кругової, квадратної та прямокутної. Проведений чисельний аналіз та моделювання на прогин і ємнісну чутливість для діапазону тиску від 100 mBar до 1100 mBar. Проведені дослідження для різних матеріалів мембрани: золото, кремній та рідинний полімер (LCP). Аналіз і результати моделювання показали, що для застосування в літальних альтиметрах використання діафрагми мембрани із золота найбільш придатний.

В рамках розробки інноваційних MEMS перетворювачів тиску, авторами у роботі [25], були розроблені та дослідженні високочутливі (до 14 pF/Bar) та з низькотемпературною залежністю і високим ємнісним вихідним сигналом (більше ніж 100 pF) ємнісні MEMS перетворювачі тиску (рисунок 1.12),

та наведено в додатку В. Запропоновані перетворювачі тиску стійкі до електромагнітних перешкод та агресивних середовищ.

Виміри тиску повітря та газового середовища за допомогою ємнісного сенсора тиску є надійною і достатньо точною методикою. Крім того, системи, які використовують такі сенсори є низькими в споживанні енергії і цілком придатні для використання як вузли в бездротових системах виміру [26].

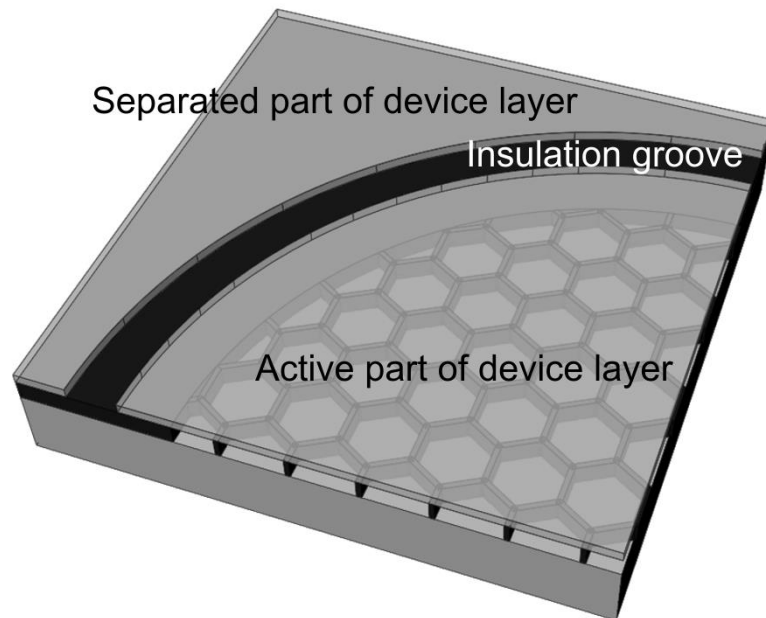


Рисунок 1.12 – MEMS сенсор тиску [26]

Авторами у роботі [26] запропоновано високо чутливий ємнісний сенсор тиску з еліптичною діафрагмою (рисунок 1.13). Ця конструкція була порівняна з круглою діафрагмою з точки зору термічного напруження і тиску та температурної чутливості. Запропонований сенсор призначений для застосування в системах контролю тиску в шинах автомобілів з бездротовою реалізацією. Авторами у роботі [26] також розглянуто зміну зони перекриття між конденсаторними пластинами шляхом зменшення ефективною площі ємності для поліпшення загальної чутливості перетворювача, температурної чутливості та впливу напруги живлення.

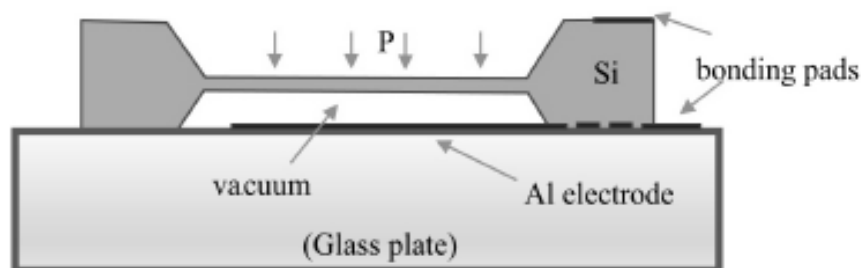


Рисунок 1.13 – Схематичне зображення ємнісного перетворювача тиску [26]

На рисунок 1.14 наведена схема генератора з від'ємним опором в системі бездротового виміру тиску на основі ємнісних перетворювачів.

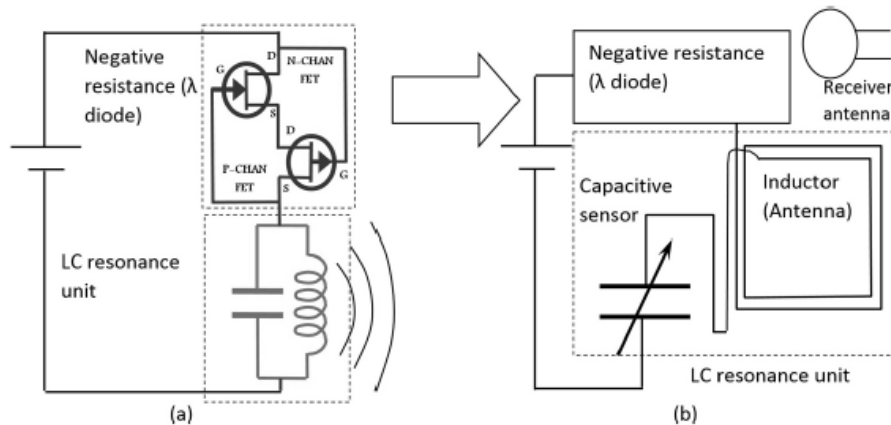


Рисунок 1.14 – Схема генератора з від'ємним диференційним опором в системі бездротового виміру тиску; а) структурна схема; (б) схема зчитування та передачі з ємнісних перетворювачів [26]

Авторами у роботі [27] запропонований MEMS перетворювач малих тисків високотемпературних середовищ, який може бути використаний при розробці та виготовленні малогабаритних напівпровідникових перетворювачів тиску які здатні працювати при підвищених температурах (рисунок 1.15). Напівпровідниковий перетворювач тиску містить мембрану з потовщеною периферійною підкладкою. Мембрана має товщину, рівну товщині тензорезисторів, сформованих на закріпленому на мембрані шарі. Напівпровідниковий перетворювач тиску містить мембрану (1) з потовщеною периферійною підкладкою (2). Мембрана має товщину, рівну товщині тензорезисторів (3), сформованих на закріпленому на мембрані шарі (4). Тензорезистори об'єднані за допомогою комутаційних шин (5), що мають з'єднані з ними металізовані контактні площадки (6). Мембрана містить профіль з концентраторами механічної напружки (7) в місцях розташування тензорезисторів, які являють собою поєднання витончених ділянок і жорстких центрів.

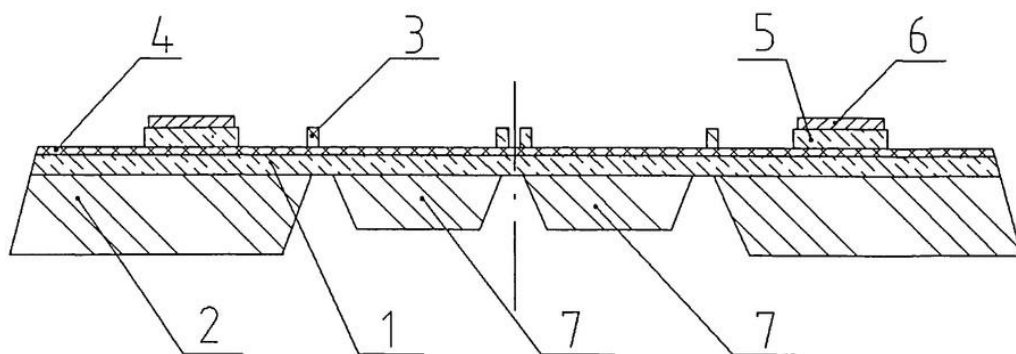


Рисунок 1.15 – MEMS сенсор малих тисків

Мембрана і тензорезистори виконані з полікристалічного алмаза одного типу провідності, а закріплені на мембрані шар виконаний з полікристалічного алмаза іншого типу провідності. Полікристалічний алмаз, дозволяє розширити температурний діапазон вимірювань в частині підвищення верхньої межі вимірювань до 600 °С за рахунок того, що полікристалічний алмаз, який є напівпровідниковим широкозонним матеріалом, володіє рядом унікальних властивостей, в тому числі стійкістю до дії підвищеної температури. Зміна опору мостової схеми, викликане впливом температури для запропонованої конструкції дорівнюватиме $-4,4 \cdot 10^{-2}\% / ^\circ\text{C}$.

1.5 Висновки до розділу

1. Аналіз публікацій, присвячених теоретичним і експериментальним дослідженням деформаційних ефектів в кремнії і конструкціям перетворювачів механічних величин на їх основі показує, що розробка радіовимірювальних сенсорів тиску є перспективним напрямком у розвитку апаратурних засобів виміру тиску для сучасних мікропроцесорних систем контролю і керування. Подібні перетворювачі тиску представляють високі метрологічні показники поряд з тенденцією до мінімізації, поліпшенням вартісних характеристик, можливістю їх інтелектуалізації на основі конструктивної та технологічної сумісності з цифровими пристроями обробки вимірюваної інформації.

2. Аналіз сучасного рівня розробок конструкцій перетворювачів тиску дозволив визначити можливі шляхи поліпшення їх параметрів: чутливості, температурної стабільності, стабільності електричних характеристик перетворювачів, надійності, собівартості тощо.

2 МЕХАНІЗМ ДІЇ ТИСКУ НА НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ МАТЕРІАЛ

Розвиток радіовимірювальної техніки характеризується різноманітністю методів перетворення первинної величини, що вимірюється в інформативний електричний сигнал. Застосування частотного сигналу в якості інформативного параметру первинних вимірювальних пристроїв, зокрема параметричних перетворювачів тиску, супроводжується високою завадостійкістю передачі, простотою та значною точністю перетворення в цифровий код, а також зручністю комутації в багатоканальних радіовимірювальних інформаційних системах, що дає можливість відмовитися від застосування аналого–цифрових перетворювачів для обробки вихідного сигналу і поліпшує економічні показники вимірювальних пристроїв радіоконтролю та радіокерування [18, 21]. Перспективним напрямком розв’язання задачі є розробка частотних перетворювачів на основі транзисторних структур, в яких за рахунок позитивних зворотних зв’язків виникає диференційний від’ємний опір [19, 20].

2.1 Фізичний механізм дії тиску на напівпровідниковий матеріал

Фізична основа деформаційних ефектів полягає у зміщенні енергетичних рівнів у напівпровідниковому матеріалі під час дії деформації і зв’язана з цим зміна енергетичного спектру електронів і дірок в залежності від деформації, а це приводить до зміни електричних характеристик напівпровідникового матеріалу [21, 23]. В однорідних напівпровідникових матеріалах зміщення енергетичних рівнів приводить до залежності опору від деформації, тобто виникає тензорезистивний ефект [5, 24, 25]. Під час дії деформації на р–п перехід або на інший напівпровідниковий пристрій електричні характеристики пристрою виявляються функціями тиску [21, 23]. При розгляді зонної структури такого напівпровідникового матеріалу, як кремій, необхідно відзначити, що зона провідності має шість еквівалентних мінімумів, де Δ_1 – набір мінімумів, які розташовані в кристалографічному напрямку $\langle 100 \rangle$. Валентна зона має максимум при $\vec{K} = 0$, де \vec{K} хвильовий вектор електрона, причому біля вершини валентної зони існує двократне виродження по енергії. Якщо напівпровідниковий матеріал підлягає дії деформації, то його симетрія у загальному випадку зменшується і змінюється спектр електронів. При цьому відбувається повне або часткове виродження спектру [23].

Для визначення спектру електронів у деформованому кристалі використовується теорія збудження [23]. Зміна енергії з малими деформаціями описується виразом [23]

$$\Delta E^{(n)}(\vec{K}, \varepsilon_{ik}) = E_n^{(n)}(\vec{K}, \varepsilon_{ik}) - E_0^n(\vec{K}) = \sum_{i,j} D_{ij}^{(n)} \varepsilon_{ij}, \quad (2.1)$$

де ε_{ik} – тензор деформації

$$\varepsilon_{ik} = 1/2 \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right), \quad (2.2)$$

де $E_n^{(n)}(\vec{K}, \varepsilon_{ik})$ і $E_0^n(\vec{K}, \varepsilon_{ik})$ – енергії електрона в n-й зоні в деформованому і недеформованому кристалі, відповідно; U_i – складова вектора зміщення точки кристалічної ґратки при деформації; $D_{ij}^{(n)}$ – константи деформаційного потенціалу. В системі координат з головними осями тензора $D_{ij}^{(n)}$, зміщення кожного екстремуму енергетичної зони провідності описується формулою [23]

$$\Delta E(\varepsilon) = D_{11}\varepsilon_{11} + D_{22}\varepsilon_{22} + D_{33}\varepsilon_{33} = \Xi_d(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + \Xi_u\varepsilon_{33}, \quad (2.3)$$

де $\Xi_u = D_{33} - D_{11}$ – вплив одноосної деформації на напівпровідниковий матеріал; $\Xi_d = D_{11} = D_{22}$ – константа, що характеризує вплив всебічного стиснення. В кремнії енергетичні мінімуми зони провідності розташовані за напрямками $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$, $\langle 001 \rangle$ і зворотному рівні (типу Δ_1), тоді зміщення рівнів при деформації для перших трьох мінімумів буде описуватись виразами [23]

$$\Delta E_{11}[100] = \Xi_d\Delta + \Xi_u\varepsilon_{11}; \quad \Delta E_{22}[010] = \Xi_d\Delta + \Xi_u\varepsilon_{22}; \quad \Delta E_{33}[001] = \Xi_d\Delta + \Xi_u\varepsilon_{33}, \quad (2.4)$$

де Δ – зміна об'єму при деформації, яка дорівнює $\Delta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$.

В загальному випадку вираз (2.4) можна описати рівнянням

$$\Delta E_{ii} = \Xi_d\Delta + \Xi_u\varepsilon_{ii}, \quad (2.5)$$

де i – константа, яка набуває значень – 1, 2, 3. При значних деформаціях зсуву в деяких випадках мінімуми зони провідності можуть зміститись до краю зони Брілюена і тоді деформаційна зміна енергії екстремумів буде описуватись виразами [23]

$$\begin{aligned} \Delta E_1 &= \Xi_d\Delta + \Xi_u\varepsilon_{11} + \Delta E/4 - 2|\Xi'_u\varepsilon_{23}|; & \Delta E_2 &= \Xi_d\Delta + \Xi_u\varepsilon_{22} + \Delta E/4 - 2|\Xi'_u\varepsilon_{13}|; \\ \Delta E_3 &= \Xi_d\Delta + \Xi_u\varepsilon_{33} + \Delta E/4 - 2|\Xi'_u\varepsilon_{12}|, \end{aligned} \quad (2.6)$$

де Ξ'_u – стала деформаційного потенціалу, яка характеризує вплив зсуву; ΔE – різниця енергій між тими рівнями, які є нижніми, якщо відсутня деформація. Це означає, що деформація зсуву ε_{23} викликає розщеплення екстремуму, який знаходиться у напрямку $\langle 100 \rangle$. Оскільки вершина валентної зони в недеформованому стані вироджена у точці $\vec{K}=0$, то деформаційна зміна валентної зони має складніший характер. Енергія дірок за відсутності деформації описується формулою [23]

$$E_{1,2}(\vec{K}) = AK^2 \pm \sqrt{\xi_K} \quad , \quad (2.7)$$

а у деформованому напівпровідниковому матеріалі [23]

$$E_{1,2}(\vec{K}\varepsilon) = AK^2 + a\Delta \pm \sqrt{\xi_K + \xi_\varepsilon + \xi_{\varepsilon K}} \quad , \quad (2.8)$$

де

$$\xi_K = B^2 K^4 + C^2 (K_1^2 K_2^2 + K_1^2 K_3^2 + K_2^2 K_3^2) \quad , \quad K^2 = K_1^2 + K_2^2 + K_3^2 \quad ,$$

$$\xi_\varepsilon = b^2 \left((\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 \right) + d^2 (\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2 + \varepsilon_{23}^2) \quad ,$$

$$\xi_{\varepsilon K} = Bb \left(3(K_1^2 \varepsilon_{11} + K_2^2 \varepsilon_{22} + K_3^2 \varepsilon_{33}) - K^2 \Delta \right) + 2Dd (K_1 K_2 \varepsilon_{12} + K_1 K_3 \varepsilon_{13} + K_2 K_3 \varepsilon_{23}) \quad ,$$

де a, b, d – сталі деформаційного потенціалу для валентної зони; A, B, C – параметри валентної зони, які характеризують ефективні маси дірок; $D^2 = C^2 + 3B^2$; $a\Delta$ – ізотропна деформація (наприклад, всебічне стиснення), яка приводить до зміщення енергетичної зони. Анізотропна деформація дає розщеплення енергетичних зон і описується виразом

$$E_{v^+} - E_{v^-} = 2\sqrt{\xi_\varepsilon} \quad , \quad (2.9)$$

де E_{v^+} – розташування вершини верхньої валентної зони при деформації; E_{v^-} – розташування вершини нижньої валентної зони при деформації. Зміщення і розщеплення вершини валентної зони можна показати у вигляді $\Delta E_v = a\Delta \pm \sqrt{\xi_\varepsilon}$.

При умові коли деформації достатньо великі, $\Delta E \gg kT$ (k – стала Больцмана, T – абсолютна температура у градусах Кельвіна), нижні мінімуми зони провідності збагачені електронами, а стеля валентної зони – дірками, тоді можна визначити відстань між найближчими рівнями валентної зони і зони

провідності, тобто ширину забороненої зони у деформованому напівпровідниковому матеріалі [24]

$$E_{g^{(ef)}}(\varepsilon) = E_{g0} + \Delta E_{g^{(ef)}} , \quad \Delta E_{g^{(ef)}} = \Delta E_{c\min} - \Delta E_{v\max} , \quad (2.10)$$

де $\Delta E_{v\max} = \Delta E_v$ – деформаційне зміщення верхнього рівня валентної зони; $\Delta E_{c\min} = \Delta E_c$ – деформаційне зміщення нижнього мінімуму зони провідності. У загальному випадку положення рівня Фермі під час дії деформації визначається виразом

$$E_F = \Delta E_F + E_{F0} , \quad (2.11)$$

де ΔE_F – деформаційна зміна положення рівня Фермі. Деформаційна зміна рівня Фермі ΔE_F у напівпровідниковому матеріалі n -типу провідності у випадку невиродженого напівпровідника (високі температури, малі концентрації легувальних домішок) визначається виразом [23]

$$\Delta E_F = kT \ln \left[1/n_0 \sum_{j=1}^N n_{0j} \exp(-\Delta E_j/kT) \right] , \quad (2.12)$$

де n_{0j} – концентрація електронів у j – мінімумі; n_0 – повна концентрація електронів у недеформованому напівпровіднику; ΔE_j – деформаційне зміщення j – мінімуму; N – кількість енергетичних мінімумів,. Для однотипних мінімумів при малій дії деформації $\Delta E_j \ll kT$ можна записати вираз [23]

$$\Delta E_F = 1/N \sum_{j=1}^N \Delta E_j . \quad (2.13)$$

Для деформацій, які призводять до однакового зміщення усіх мінімумів зони провідності, рівень Фермі зміщується разом з краєм зони $\Delta E_F = \Delta E_c$. Для випадку сильного виродження електронів, коли деформації малі, зміщення рівня Фермі описується виразом [23]

$$\Delta E_F = \sum_{j=1}^N m_{ej} n_{0j}^{1/3} \Delta E_j / \sum_{j=1}^N m_{ej} n_{0j}^{1/3} . \quad (2.14)$$

Для однотипних рівнів зміщення рівня Фермі визначається виразом (2.13). Деформаційна зміна рівня Фермі в напівпровідниковому матеріалі р-типу відбувається при ізотропній деформації. Деформаційне зміщення валентних зон як цілого і зміщення рівня Фермі співпадають $\Delta E_F = \Delta E_v = a\varepsilon$. Дія анізотропної деформації на напівпровідниковий матеріал р-типу рівень Фермі не змінює.

В деформованому напівпровідниковому матеріалі перерозподіл електронів між енергетичними рівнями приводить до зміни концентрації носіїв заряду у зоні. Концентрація у власному напівпровіднику при дії деформації описується виразом [23]

$$n_i = n_{i0} \exp(-\Delta E_{g(ef)} / kT) . \quad (2.15)$$

Концентрація носіїв заряду у напівпровіднику n-типу ($N_d \gg n_i$) описуються формулою[23]

$$n_n = N_d + n_{i0}^2 / N_d \exp(-\Delta E_{g(ef)} / kT) , \quad n_p = n_{i0}^2 / N_d \exp(-\Delta E_{g(ef)} / kT) , \quad (2.16)$$

де N_d – концентрація донорної домішки. Аналогічні формули для розрахунку можна записати для напівпровідникового матеріалу р-типу ($N_A \gg n_i$) з акцепторними домішками N_A [23]

$$p_p = N_A + n_{i0}^2 / N_A \exp(-\Delta E_{g(ef)} / kT) , \quad p_n = n_{i0}^2 / N_A \exp(-\Delta E_{g(ef)} / kT) , \quad (2.17)$$

Якщо величина дії тиски велика, умови ($N_d \gg n_i$) і ($N_A \gg n_i$) порушуються, і в цьому випадку концентрацію носіїв заряду потрібно розраховувати згідно виразів [23]

$$n = 1/2N_d \left[(1 + 4n_i^2 / N_d^2)^{1/2} + 1 \right] , \quad p = 1/2N_A \left[(1 + 4n_i^2 / N_A^2)^{1/2} - 1 \right] . \quad (2.18)$$

Врахування складної зонної структури напівпровідникового матеріалу необхідно у тому випадку, коли при деформації зона розщеплюється і в процесі провідності бере участь тільки частка рівнів. Для цього випадку концентрації носіїв заряду визначаються виразами [23]

$$n = 2 / h^3 (kT / 2\pi)^{3/2} \sum_{i=1}^N m_{ei}^{3/2} \exp[-(E_{ci} - E_F / kT)] , \quad (2.19)$$

$$p = 2/h^3 (kT/2\pi)^{3/2} \sum_{j=1}^N m_{hj}^{3/2} \exp\left[-(E_F - E_{v0} - \Delta E_{vj}/kT)\right]. \quad (2.20)$$

Для сильно виродженого напівпровідникового матеріалу зміна концентрації носіїв заряду значно менша в порівнянні з невиродженим, що пов'язано із зменшенням ефекту п'єзоопору зі збільшенням концентрації легуючої домішки. Причиною появи домішкових рівнів у забороненій зоні може бути як атоми домішок, які проникли у напівпровідниковий матеріал, так і різні дефекти: порушення структури, дислокації, тощо. Зміна спектру електронів під час деформації напівпровідникового матеріалу приводить до зміщення домішкових рівнів. При деформаційному розщепленні зони кожний з екстремумів супроводжується своїм мілким домішковим рівнем. Швидкість зміщення такого рівня відносно відповідної зони на два порядки менша, ніж швидкість зміщення країв зони і зміщення ширини забороненої зони. Швидкість зміщення глибокого рівня при деформації звичайно більша, причому, як правило, кожний із глибоких рівнів характеризується своєю швидкістю зміщення. Якщо положення домішкового рівня у зоні змінюється з тиском

$$E_i = E_{i0} + \Delta E_i, \quad (2.21)$$

де ΔE_i – зміна енергії іонізації, то в середньому для оцінок глибоких рівнів можна вважати $\Delta E_i \approx 1/2 \Delta E_{g(ef)}$.

Перерозподіл носіїв заряду між зміщеними рівнями у деформованому напівпровідниковому матеріалі і зміщення домішкових центрів, які є центрами рекомбінації, приводить до зміни рухливості неосновних носіїв заряду. При малих тисках, зміна рухливості зв'язана з п'єзорезистивним ефектом. Тензорезистивний ефект – це зміна електричного опору напівпровідникового матеріалу внаслідок дії навантаження, яке створюється деформацією. Опис тензорезистивного ефекту проводиться з використанням понять з теорії пружності. При дії великих тисків, залежність рухливості має складний характер. Рухливість носіїв заряду зв'язана з його масою m формулою

$$\mu = \tau q / m, \quad (2.22)$$

де τ – середній час релаксації, який вважається незалежним від тиску. Поверхні постійної енергії електронів поблизу мінімумів у відповідних енергетичних зонах є еліпсоїди обертання з осями симетрії, які орієнтовані в

кремнію по осі <100>. Кожний еліпсоїд постійної енергії характеризується двома різними масами – уздовж осі еліпсоїда m_{\parallel} і перпендикулярно до неї m_{\perp} , яким відповідають різні рухливості – μ_{\parallel} і μ_{\perp} . Відношення рухливостей K отримало назву фактора анізотропії рухливості $K = \mu_{\perp} / \mu_{\parallel}$.

Перерозподіл носіїв заряду між енергетичними рівнями при деформації приводить до зміни внеску цих двох компонентів у загальну рухливість по відношенню до недеформованого напівпровідникового матеріалу. Ефективна рухливість електронів описується виразом [23]

$$\mu_n = \sum_{i=1}^N (n_{pi} / n_p) \mu_i, \quad (2.23)$$

де μ_i – рухливість електрона в i – мінімумі уздовж напрямку струму. Величину μ_i можна визначити через μ_{\parallel} і μ_{\perp} . У недеформованому напівпровідниковому матеріалі, зокрема кремнію р-типу, рухливість електронів уздовж вісі <100> описується виразом [23]

$$\mu_{n0} = 1/3\mu_{\parallel} + 2/3\mu_{\perp}, \quad (2.24)$$

оскільки долини <010> і <001> мають в напрямку <100> рухливість μ_{\perp} . При дії деформації вклад різних долин змінюється. При одноосному стисненні кремнію уздовж вісі <100> рухливість описується виразом [23]

$$\mu_{n0} = \frac{1/3\mu_n \exp(-\Delta E_1 / kT) + 2/3\mu_1 \exp(-\Delta E_2 / kT)}{\sum_{i=1}^N \exp(-\Delta E_{g(ef)} / kT)}. \quad (2.25)$$

Рухливість дірок у недеформованому кремнію описується виразом [23]

$$\mu_p = \tau q / m_M^{3/2} (m_L^{1/2} + m_T^{1/2}), \quad (2.26)$$

де m_L і m_T – ефективні маси легких і важких дірок у недеформованому кремнію. При деформації рухливість дірок описується виразом [23]

$$\mu_p = (p_1\mu_1 + p_2\mu_2) / (p_1 + p_2) = (\tau q m_L^{1/2} m_V^{3/2}) \frac{1 + (m_T / m_L)^{1/2} K^{3/2} \exp[(\Delta E_{v1} - \Delta E_{v2}) / kT]}{1 + K^{3/2} \exp[(\Delta E_{v1} - \Delta E_{v2}) / kT]}, \quad (2.27)$$

де μ_1 і μ_2 – відповідні рухливості; p_1 і p_2 – концентрація дірок у верхній і нижній зонах, які розщепилися; $K = m_1/m_2$, $(\Delta E_{v_1} - \Delta E_{v_2})$ – розщеплення вершини валентної зони.

В кремнії р-типу практично відсутня анізотропія рухливості дірок. Дія анізотропної деформації порушує симетрію поля ґратки, що приводить до зникнення виродження, тому що стеля валентної зони легких і важких дірок зміщується на різну величину у протилежних напрямках. Це викликає перерозподіл дірок між підзонами [26]. Перерозподіл концентрації легких і важких дірок внаслідок різниці їх рухливостей приводить до зміни провідності і опору. Зміна провідності описується виразом [23]

$$\Delta\sigma = q(\Delta p_1\mu_1 + \Delta p_2\mu_2) = q\Delta p(\mu_1 - \mu_2), \quad (2.28)$$

де $\Delta p_1 = \Delta p_2 = \Delta p$ – деформаційна зміна концентрації дірок у верхній і нижній зонах, які розщепилися, $\Delta p_1 + \Delta p_2 = \Delta p$. Відносна зміна провідності описується виразом [23]

$$\Delta\sigma/\sigma_0 = \Delta p(\mu_1 - \mu_2)(p_1\mu_1 + p_2\mu_2). \quad (2.29)$$

У випадку впливу деформації (розтягуючої напруженості ξ_{11}) на напівпровідниковий матеріал n-типу у напрямку $\langle 100 \rangle$ дно зони провідності у цьому напрямку опуститься, а в напрямку $\langle 010 \rangle$ підніметься, внаслідок чого відбудеться перерозподіл електронів між мінімумами і зміниться їх концентрація. Якщо позначити кількість електронів, які перейшли із одного мінімуму в другий через Δn , то вираз для провідності деформованого напівпровідника n-типу описується виразом

$$\sigma_g = q[(n_0 + \Delta n)\mu_{\perp} + (n_0 + \Delta n)\mu_{\parallel}]/2 = \sigma_0 + q\Delta n(\mu_{\perp} - \mu_{\parallel})/2. \quad (2.30)$$

Оскільки $\mu_{\parallel} < \mu_{\perp}$, то електрична провідність деформованого напівпровідника зменшиться. Відносна зміна електропровідності описується виразом

$$\Delta\sigma/\sigma_0 = (\Delta n/n_0)(\mu_{\perp} - \mu_{\parallel})/(\mu_{\perp} + \mu_{\parallel}) = (\Delta n/n_0)(K - 1)/(K + 1). \quad (2.31)$$

Ефект зміни електропровідності при деформації визначається зміною концентрації електронів і анізотропією ефективних мас. Якщо енергетичні рівні

у паралельних долинах $\langle 100 \rangle$ зросли під час дії розтягуючої напруженості ξ_{11} уздовж цього напрямку на величину $\alpha_1 \xi_{11}$, а в долинах, які розташовані уздовж осі $\langle 010 \rangle$ зменшились на величину $\alpha_2 \xi_{11}$, то відношення кількості електронів у двох типах долин у відповідності до закону Больцмана для слабо легованих напівпровідників описується виразом [23]

$$\begin{aligned} n_{\langle 010 \rangle} / n_{\langle 100 \rangle} &= \exp[(E_0 + \alpha_1 \xi_{11}) / (RT)] / \exp[(E_0 - \alpha_2 \xi_{11}) / (RT)] = \\ &= \exp[(\alpha_1 + \alpha_2) \xi_{11} / (RT)], \end{aligned} \quad (2.32)$$

де $R = 2$ кал/моль/°К – газова стала; E_0 – енергетичний рівень при $\xi_{11} = 0$; T – абсолютна температура. Загальна кількість електронів у долині залишається постійною і визначається формулою [23]

$$n_0 = 2n_{\langle 100 \rangle} + 4n_{\langle 010 \rangle}, \quad (2.33)$$

тоді електропровідність можна записати у вигляді

$$\sigma = q(2n_{\langle 100 \rangle} + 4n_{\langle 010 \rangle}). \quad (2.34)$$

Рішення рівнянь (2.32) – (2.34) дозволяє отримати значення

$$\rho = 1 / \sigma \left(1 + 2 \exp[(\alpha_1 + \alpha_2) \xi_{11} / (RT)] \right) / n_0 q \left[\mu_{\parallel} + 2 \mu_{\perp} \exp[(\alpha_1 + \alpha_2) \xi_{11} / (RT)] \right], \quad (2.35)$$

Відносна зміна опору під дією напруженості ξ_{11} визначається виразом [23]

$$\Delta \rho / \rho_0 = \frac{2/3(\mu_{\perp} - \mu_{\parallel})(1 - \exp[(\alpha_1 + \alpha_2) \xi_{11} / (RT)])}{\left[\mu_{\parallel} + 2 \mu_{\perp} \exp[(\alpha_1 + \alpha_2) \xi_{11} / (RT)] \right]}. \quad (2.36)$$

За умови анізотропії електропровідності, яка виникає під дією одноосного розтягу або стиснення, зв'язок між напруженістю поля і густиною струму описується системою рівнянь

$$\begin{aligned} E_1 / \rho_0 &= j_1 [1 + \Pi_{11} \xi_{11} + \Pi_{12} (\xi_{22} + \xi_{33})] + \Pi_{44} (j_2 \xi_{12} + j_3 \xi_{13}), \\ E_2 / \rho_0 &= j_2 [1 + \Pi_{11} \xi_{22} + \Pi_{12} (\xi_{11} + \xi_{33})] + \Pi_{44} (j_1 \xi_{12} + j_3 \xi_{23}), \\ E_3 / \rho_0 &= j_3 [1 + \Pi_{11} \xi_{33} + \Pi_{12} (\xi_{11} + \xi_{22})] + \Pi_{44} (j_1 \xi_{12} + j_2 \xi_{13}), \end{aligned} \quad (2.37)$$

де ρ_0 – питомий опір матеріалу при $\xi = 0$. Для випадку, коли $\xi_{11} = 0$,

$$\rho_0 = 3 / \left[n_0 q (\mu_{\parallel} + 2\mu_{\perp}) \right] , \quad (2.38)$$

$\xi_{11}, \xi_{22}, \xi_{33}$ – нормальні компоненти напруги; E_1, E_2, E_3 – компоненти вектору напруженості електричного поля; $\xi_{12}, \xi_{23}, \xi_{13}$ – зсувові компоненти напруги (позначки 1,2,3 відповідають кристалографічним осям ОХ1, ОХ2, ОХ3); j_1, j_2, j_3 – компоненти вектору густини струму; $\Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{44}$ – коефіцієнти п’єзоопору, тобто коефіцієнти пропорційності між зміною питомого опору і деформацією, які залежать від властивостей матеріалу.

При умові коли електричне поле E , густина струму і механічна напруга ξ мають напрямок уздовж однієї осі, то [23]

$$E / \rho_0 = j(1 + \Pi_1 \xi) , \quad (2.39)$$

де Π_1 – повздовжній коефіцієнт п’єзоопору, який залежить від кристалографічного напрямку у матеріалі. Коефіцієнт Π_1 кристалів з кубічною ґраткою має вигляд [23]

$$\Pi_1 = \Pi_{11} + 2(\Pi_{44} + \Pi_{12} - \Pi_{11})(l^2 m^2 + l^2 n^2 + m^2 n^2) , \quad (2.40)$$

де l, m, n – направляючі косинуси кутів між напрямком деформації і осями ОХ1, ОХ2, ОХ3, відповідно. Повздовжній опір з повздовжньою напругою ξ

$$E / j = \rho_0 + \Delta\rho , \quad (2.41)$$

В цьому випадку зміна опору з напругою ξ описується виразом

$$\Delta\rho / \rho_0 = \Pi_1 \xi . \quad (2.42)$$

Визначивши у формулі (2.42) прикладену механічну напругу ξ через відносну деформацію ε і модуль Юнга E_1 , отримаємо формулу [23]

$$\Delta\rho / \rho_0 = \Pi_1 E_1 \varepsilon = m_1 \varepsilon , \quad (2.43)$$

де $m_1 = \Pi_1 E_1$ – коефіцієнт еластоопору, який залежить від кристалографічних напрямків, температури і деформації. Величина модуля Юнга E_1 залежить від кристалографічного напрямку [23]

$$1/E_1 = S_{11} + (S_{44} + 2S_{12} - 2S_{11})(l^2 m^2 + l^2 n^2 + m^2 n^2), \quad (2.44)$$

де S_{11}, S_{12}, S_{44} – модулі пружності, які зв'язані з пружними сталими кубічного кристалу формулами [23]

$$C_{11} = (S_{11} + S_{12}) / [(S_{11} - S_{12})(S_{11} + 2S_{12})], \quad C_{12} = -S_{12} / [(S_{11} - S_{12})(S_{11} + 2S_{12})], \quad (2.44)$$

В кремнії n-типу найбільший тензоефект має місце в напрямку $\langle 100 \rangle$, а кремнію p-типу – у напрямку $\langle 111 \rangle$. Наведена вище математична модель є основою розрахунків впливу тиску на конкретні напівпровідникові пристрої, оскільки основними факторами, які викликають зміну характеристик пристроїв під дією тиском, є зміщення енергетичних рівнів напівпровідника, зміна ефективних мас, часу життя і рухливості носіїв заряду. До характеристик напівпровідникових пристроїв, які залежить від тиску, можна віднести вольт-амперні характеристики p-n переходів, транзисторів, їх ємність, напругу пробою, коефіцієнт підсилення транзисторів тощо. Слід відзначити, що існує два діапазони тисків, які визначають характер змін параметрів напівпровідникових пристроїв. Це великі тиски, при яких $\Delta E_{g(ef)} > kT$, і малі тиски, коли $\Delta E_{g(ef)} < kT$ ($\Delta E_{g(ef)}$ – зміна ширини забороненої зони, kT – теплова енергія). При великих тисках відбувається розщеплення зон, перерозподіл між екстремумами носіїв заряду. В цьому випадку головним фактором, який змінює параметри напівпровідника, є деформаційна зміна ширини забороненої зони. Якщо тиски малі, значний внесок у зміну струму, який проходить через напівпровідник, вносить зміна ефективних мас, часу життя і рухливості носіїв заряду від тиску. Іноді вагомий внесок може давати зміщення домішкових рівнів під дією тиску, якщо рекомбінація і генерація носіїв заряду на цих рівнях або тунелювання через них суттєво впливають на струм.

2.2 Математична модель деформаційного ефекту в МОН-транзисторах

На основі визначених деформаційних приростів електрофізичних параметрів напівпровідникового матеріалу при дії тиску знаходяться

деформаційні прирости електричних параметрів та характеристики МОН–транзистора.

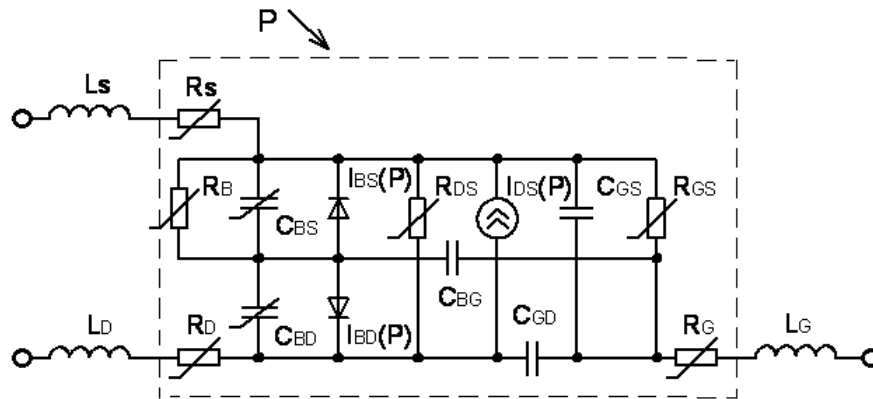


Рисунок 2.1 – Еквівалентна схема МОН–транзистору з врахуванням впливу тиску

Деформаційні прирости електричних параметрів $G_i = f(F_i(P))$ еквівалентної схеми МОН–транзистора, зображеної на рисунку 2.1, визначаються на основі загального виразу

$$\Delta G_i(P) = \frac{\partial G_i}{\partial F_i} \Delta F_i(P), \quad (2.45)$$

де F_i – електрофізичні параметри напівпровідникового матеріалу, або електричні параметри напівпровідникової структури.

В якості параметрів G_i у виразі (2.45) виступають наступні елементи еквівалентної схеми МОН–транзистора: R_s – опір витоку; R_D – опір стоку; R_{DS} – опір стік–витік; R_G – опір затвору; R_B – опір підкладки; R_{GS} – опір затвор–виток; C_{BS}, C_{BD} – ємності стік–підкладка, витік–підкладка, відповідно.

Струм переходу підкладка–стік описується виразом [30]

$$I_{BD} = I_{DS} \left[\exp\left(\frac{V_{BD}}{V_t}\right) - 1 \right], \quad (2.46)$$

де V_{BD} – напруга підкладка–стік; I_{DS} – струм насичення р–п переходу підкладки; V_t – температурний потенціал.

Струм насичення р–п переходу підкладки I_{DS} описується виразом

$$I_{DS} = A_D J_s + P_D J_{ssw}, \quad (2.47)$$

де A_D – площа дифузійної області стоку; J_s – щільність струму насичення; P_D – периметр дифузійної області стоку; J_{ssw} – питома щільність струму насичення.

Вираз для щільності струму насичення J_s записується у вигляді [37]

$$J_s = qZN_{A(D)}/\tau, \quad (2.48)$$

де q – заряд електрону; Z – дифузійна довжина електронів або дірок; $N_{A(D)}$ – рівноважна концентрація неосновних носіїв заряду в областях; τ – їх час життя.

Дифузійна довжина носіїв заряду може бути визначена з виразу [33]

$$Z^2 = D\tau, \quad (2.49)$$

де D – коефіцієнт дифузії електронів або дірок

$$D = kT\mu/q. \quad (2.50)$$

T – температура; k – константа Больцмана; μ – рухливість носіїв заряду.

Вирази для щільності струму насичення та питомої щільності струму насичення матимуть вигляд

$$J_s = N_{A(D)} \left(\frac{qkT\mu}{\tau} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.51)$$

$$J_{ssw} = P_{LD} N_{A(D)} \left(\frac{qkT\mu}{\tau} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.52)$$

де P_{LD} – довжина периметру дифузійної області стоку.

Отже, деформаційний приріст струму стік–витік буде описуватися виразом

$$\frac{dI_{DS}}{dP} = I_{DS} \left(\frac{\Delta N_{A(D)}(P)}{N_{A(D)}} + \frac{\Delta\mu(P)}{\mu} \right). \quad (2.53)$$

Тоді, деформаційний приріст струму переходу підкладка–стік визначається за виразом

$$\frac{dI_{BD}}{dP} = I_{BD} \left(\frac{\Delta N_{A(D)}(P)}{N_{A(D)}} + \frac{\Delta \mu(P)}{\mu} \right). \quad (2.54)$$

Струм переходу підкладка–виток визначається за виразом [37]

$$I_{BS} = I_{SS} \left[\exp\left(\frac{V_{BS}}{V_t}\right) - 1 \right]. \quad (2.55)$$

де V_{BS} – напруга підкладка–виток; I_{SS} – струм насичення р–n переходу підкладки

$$I_{SS} = A_S J_s + P_S J_{ssw}, \quad (2.56)$$

A_S – площа дифузійної області витоку, P_S – периметр дифузійної області витоку.

Деформаційний приріст струму переходу підкладка–виток визначається за рівнянням

$$\frac{dI_{BS}}{dP} = I_{BS} \left(\frac{\Delta N_{A(D)}(P)}{N_{A(D)}} + \frac{\Delta \mu(P)}{\mu} \right). \quad (2.57)$$

Струм стоку містить дві складові [37] і визначається виразом

$$I_D = I_{drain} - I_{BD}. \quad (2.58)$$

Деформаційний приріст струму стоку описується виразом

$$\frac{dI_D}{dP} = \frac{dI_{drain}}{dP} - \frac{dI_{BD}}{dP}. \quad (2.59)$$

Струм витоку також містить дві складові [30]

$$I_S = -I_{drain} - I_{BS}. \quad (2.60)$$

Тоді, деформаційний приріст струму витоку матиме вигляд

$$\frac{dI_S}{dP} = -\frac{dI_{drain}}{dP} - \frac{dI_{BS}}{dP}. \quad (2.61)$$

Струм I_{drain} в області відсічки дорівнює 0 ($V_{GS} - V_{to} < 0$), а в лінійній області ($V_{DS} < V_{GS} - V_{to}$) та в області насичення ($0 < V_{GS} - V_{to} < V_{DS}$) описується виразом [22]

$$I_{drain} = \frac{\beta V_{DS} [V_{GS} - V_{to} - 0,5(1 + F_b)V_{DS}]}{\left[1 + V_{DS}\mu_{eff} / (L_{eff}V_{max})\right]}. \quad (2.62)$$

Його деформаційний приріст, в свою чергу визначається за загальним виразом

$$\begin{aligned} \Delta I_{drain}(P) = & \frac{\partial I_{drain}}{\partial V_{to}} \Delta V_{to}(P) + \frac{\partial I_{drain}}{\partial F_b} \Delta F_b(P) + \frac{\partial I_{drain}}{\partial V_{GS}} \Delta V_{GS}(P) + \\ & + \frac{\partial I_{drain}}{\partial \mu_{eff}} \Delta \mu_{eff}(P) + \frac{\partial I_{drain}}{\partial \beta} \Delta \beta(P) + \frac{\partial I_{drain}}{\partial L_{eff}} \Delta L_{eff}(P), \end{aligned} \quad (2.63)$$

де

$$\frac{\partial I_{drain}}{\partial V_{to}} \Delta V_{to}(P) = - \frac{\beta V_{DS}}{\left[1 + V_{DS}\mu_{eff} / (L_{eff}V_{max})\right]} \Delta V_{to}(P); \quad (2.64)$$

$$\frac{\partial I_{drain}}{\partial F_b} \Delta F_b(P) = - \frac{0,5\beta V_{DS}^2}{\left[1 + V_{DS}\mu_{eff} / (L_{eff}V_{max})\right]} \Delta F_b(P); \quad (2.65)$$

$$\frac{\partial I_{drain}}{\partial V_{gs}} \Delta V_{GS}(P) = \frac{\beta V_{DS}}{\left[1 + V_{DS}\mu_{eff} / (L_{eff}V_{max})\right]} \Delta V_{GS}(P); \quad (2.66)$$

$$\frac{\partial I_{drain}}{\partial \mu_{eff}} \Delta \mu_{eff}(P) = - \frac{\beta V_{DS}^2 L_{eff} V_{max}}{\left[1 + V_{DS}\mu_{eff}\right]^2} \Delta \mu_{eff}(P); \quad (2.67)$$

$$\frac{\partial I_{drain}}{\partial \beta} \Delta \beta(P) = \frac{V_{DS} [V_{GS} - V_{to} - 0,5(1 + F_b)V_{DS}]}{\left[1 + V_{DS}\mu_{eff} / (L_{eff}V_{max})\right]} \Delta \beta(P); \quad (2.68)$$

$$\frac{\partial I_{drain}}{\partial L_{eff}} \Delta L_{eff}(P) = \frac{\beta \mu_{eff} V_{DS}^2 [V_{GS} - V_{to} - 0,5(1 + F_b)V_{DS}]}{L_{eff}^2 V_{max} \left[1 + V_{DS}\mu_{eff} / (L_{eff}V_{max})\right]^2} \Delta L_{eff}(P), \quad (2.69)$$

Де F_b – параметр; β – крутизна прохідної характеристики МОН–транзистора; V_{to} – порогова напруга; L_{eff} – ефективна довжина каналу транзистора; μ_{eff} – ефективна рухливість носіїв заряду; V_{max} – обмеження швидкості руху носіїв заряду.

Крутизна прохідної характеристики МОН–транзистора β описується виразом [30]

$$\beta = \frac{0,5K_p W}{L}, \quad (2.70)$$

де W – ширина каналу МОН–транзистора; L – довжина каналу МОН–транзистора; K_p – крутизна керування по затвору

$$K_p = u_0 C_{ox}, \quad (2.71)$$

u_0 – поверхнева рухливість носіїв заряду; C_{ox} – питома ємність окису

$$C_{ox} = e_{ox} / T_{ox}, \quad (2.72)$$

e_{ox} – діелектрична проникливість окису; T_{ox} – товщина окису.

Таким чином

$$\beta = \frac{0,5u_0 e_{ox} W}{T_{ox} L}. \quad (2.73)$$

Деформаційний приріст крутизни прохідної характеристики МОН транзистору описується виразом

$$\Delta\beta(P) = \frac{0,5e_{ox} W}{T_{ox} L} \cdot \Delta u_0(P), \quad (2.74)$$

де $\Delta u_0(P)$ – деформаційний приріст поверхневої рухливості носіїв заряду.

Напруга затвор–витік V_{GS} містить дві складові [22]

$$V_{GS} = \phi_{GS} + V_{GS0}, \quad (2.75)$$

де V_{GS} – напруга, що подається на затвор від зовнішнього джерела; ϕ_{GS} – контактна різниця потенціалів р–n переходу затвор–витік.

Деформаційний приріст напруги V_{GS} описується виразом

$$\frac{dV_{GS}}{dP} = \frac{d\phi_{GS}}{dP}. \quad (2.76)$$

Оскільки

$$\phi_{GS} = V_t \ln \frac{p_p n_n}{n_i^2}, \quad (2.77)$$

де $V_t = kT/q$ – температурний потенціал, то вираз (2.76) прийме вид:

$$\Delta V_{GS}(P) = \phi_{GS} \left(\frac{\Delta p_p(P)}{p_p} + \frac{\Delta n_n(P)}{n_n} - \frac{2\Delta n_i(P)}{n_i} \right). \quad (2.78)$$

Величина порогової напруги V_{to} описується виразом [30]

$$V_{to} = V_{to0} - \delta V_{DS} + \gamma F_s (\phi - V_{BS})^{1/2} + F_n (\phi - V_{BS}) + V_t x_N, \quad (2.79)$$

де V_{DS} – напруга між стоком та витком; V_{to0} – порогова напруга при нульовому зміщенні; δ – коефіцієнт статичного зворотного зв'язку; ϕ – контактна різниця потенціалів переходу діелектрик–напівпровідник; F_n – коефіцієнт, який враховує вплив ширини каналу на порогову напругу; γ – коефіцієнт впливу підкладки на порогову напругу; F_s – коефіцієнт, який враховує вплив геометрії приладу на вкорочення каналу; V_{BS} – напруга підкладка–стік; x_N – коефіцієнт, який визначає температурну залежність напруги порогоу.

З врахуванням виразу (2.79) деформаційний приріст порогової напруги V_{to} описується виразом

$$\begin{aligned} \Delta V_{to}(P) = & \frac{\partial V_{to}}{\partial E_g} \Delta E_g(P) + \frac{\partial V_{to}}{\partial F_p} \Delta F_p(P) + \frac{\partial V_{to}}{\partial N_{sub}} \Delta N_{sub}(P) + \\ & + \frac{\partial V_{to}}{\partial e_{sil}} \Delta e_{sil}(P) + \frac{\partial V_{to}}{\partial n_i} \Delta n_i(P) + \frac{\partial V_{to}}{\partial N_{ss}} \Delta N_{ss}(P) \end{aligned}, \quad (2.80)$$

де складові деформаційного приросту порогової напруги описуються виразами

$$\frac{\partial V_{to}}{\partial E_g} \Delta E_g(P) = -\frac{1}{2} \Delta E_g(P); \quad (2.81)$$

$$\frac{\partial V_{to}}{\partial F_p} \Delta F_p(P) = -\Delta F_p(P); \quad (2.82)$$

$$\frac{\partial V_{to}}{\partial N_{sub}} \Delta N_{sub} = \frac{\gamma}{2N_{sub}} \left[F_s (\phi - V_{BS})^{1/2} \left(1 + \frac{V_t}{2(\phi - V_{BS})} \right) \pm \phi^{1/2} \right] \Delta N_{sub}(P); \quad (2.83)$$

$$\frac{\partial V_{to}}{\partial n_i} \Delta n_i(P) = -\frac{V_t}{n_i} \left(\frac{\gamma F_s}{(\phi - V_{BS})^{1/2}} + 2F_n \pm \frac{\gamma}{\phi^{1/2}} - \frac{\gamma F_s V_t}{2(\phi - V_{BS})^{3/2}} \right) \Delta n_i(P); \quad (2.84)$$

$$\frac{\partial V_{to}}{\partial e_{sil}} \Delta e_{sil}(P) = \frac{1}{e_{sil}} \left(\frac{\gamma F_s}{2(\phi - V_{BS})^{1/2}} - \frac{\delta(\eta - e_{sil})}{\eta} + F_n(\phi - V_{BS}) + \frac{V_t}{2} \left(\frac{\gamma F_s V_t}{2(\phi - V_{BS})} + F_n \right) \right) \Delta e_{sil}(P). \quad (2.85)$$

$$\frac{\partial V_{to}}{\partial N_{ss}} \Delta N_{ss} = \left(\frac{V_t}{N_{ss}} \left[\left(\frac{\gamma F_s}{(\phi - V_{BS})^{1/2}} \pm \frac{\gamma}{\phi^{1/2}} + 2F_n + \frac{V_t}{(\phi - V_{BS})^2} \right) \times \left(\frac{\gamma F_s}{2(\phi - V_{BS})^{1/2}} + F_n \right) (\phi - V_{BS}) - \left[-\gamma F_s (\phi - V_{BS})^{1/2} - F_n (\phi - V_{DS}) \right] \right] - \frac{10^4 q}{C_{ox}} \right) \Delta N_{ss}(P); \quad (2.86)$$

Параметр F_b визначається за виразом [30]

$$F_b = F_n + \frac{\gamma F_s}{2(\phi - V_{BS})^{1/2}}, \quad (2.87)$$

а його деформаційний приріст

$$\Delta F_b(P) = \frac{\partial F_b}{\partial e_{sil}} \Delta e_{sil}(P) + \frac{\partial F_b}{\partial N_{sub}} \Delta N_{sub}(P) + \frac{\partial F_b}{\partial n_i} \Delta n_i(P) + \frac{\partial F_b}{\partial N_{ss}} \Delta N_{ss}(P). \quad (2.88)$$

Ефективна рухливість носіїв з врахуванням напруженості поля в каналі МОН–транзистору дорівнює [30]

$$\mu_{eff} = u_0 \mu_{fact}, \quad (2.89)$$

де u_0 – поверхнева рухливість носіїв струму; μ_{fact} – фактична рухливість носіїв

$$\mu_{fact} = \frac{1}{(1 + \theta(V_{GS} - V_{to}))}, \quad (2.90)$$

де θ – коефіцієнт модуляції рухливості носіїв струму.

З врахуванням виразу (2.89) формула для визначення ефективної рухливості носіїв заряду матиме вигляд

$$\mu_{eff} = u_0 / (1 + \theta(V_{GS} - V_{to})). \quad (2.91)$$

Деформаційний приріст ефективної рухливості носіїв заряду $\Delta\mu_{eff}(P)$ визначається виразом

$$\Delta\mu_{eff}(P) = \mu_{eff} \left(\frac{\Delta u_0(P)}{u_0} - \frac{\theta \Delta V_{GS}(P)}{(1 + \theta(V_{GS} - V_{to}))} + \frac{\theta \Delta V_{to}(P)}{(1 + \theta(V_{GS} - V_{to}))} \right). \quad (2.92)$$

При умові $V_{DS} \leq V_{DSSat}$ ефективна довжина каналу транзистору L_{eff} має значення $L_{eff} = L$, отже $\Delta L_{eff}(P) = 0$ [30]. При $V_{DS} > V_{DSSat}$ [30].

Деформаційний приріст напруги насичення V_{dsat} визначається за виразом

$$\begin{aligned} \Delta V_{DSSat}(P) = & \frac{(V_a \Delta F_b(P) + \Delta V_{to}(P) - \Delta V_{GS}(P))}{(1 + F_b)} \left(\frac{V_a}{(V_a^2 + V_b^2)^{1/2}} - 1 \right) + \\ & + V_b \left(\frac{\Delta \mu_{eff}(P)}{\mu_{eff}} - \frac{\Delta L_{eff}(P)}{L_{eff}} \right) \left(\frac{V_b}{(V_a^2 + V_b^2)^{1/2}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (2.93)$$

Розрахунок вихідної характеристики МОН–тензотранзистору проводився на основі математичного пакету "MatLab 9.3" за загальним виразом для струму стоку I_D в умовах дії тиску $P=10^8$ Па

$$I_D(P) = I_{BD}(P) - I_{drain}(P). \quad (2.94)$$

Результати проведених розрахунків наведені на рисунок 2.2.

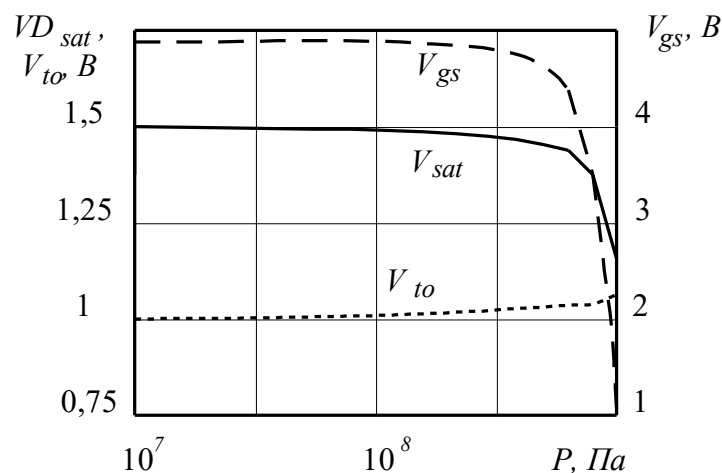


Рисунок 2.2 – Залежності напруги насичення V_{DSSat} , порогової напруги V_{to} , та напруги затвор–витік V_{GS} від тиску

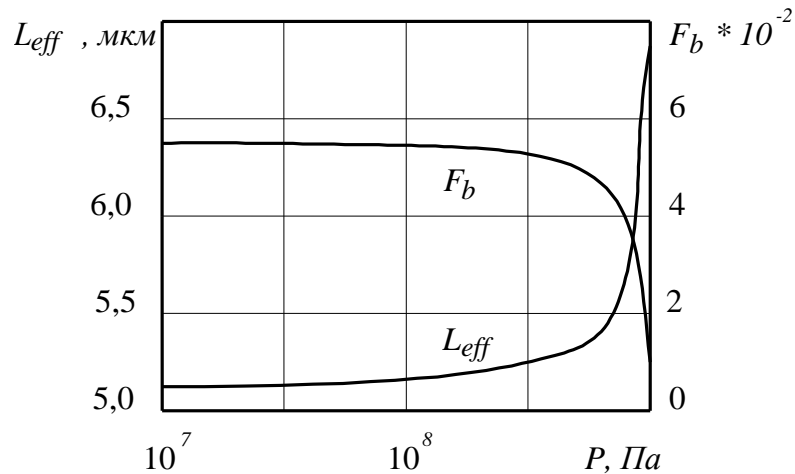


Рисунок 2.3 – Залежності ефективної довжини каналу L_{eff} , та коефіцієнту F_b від дії тиску

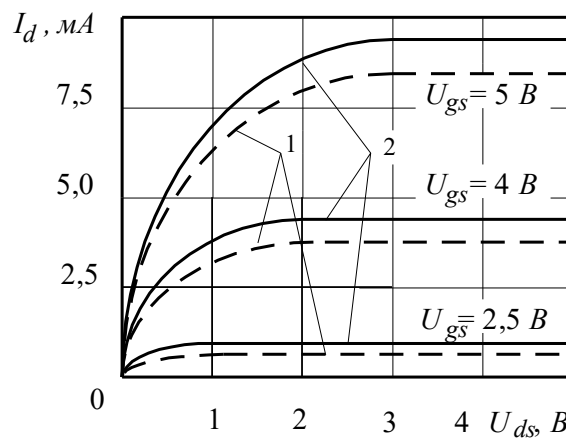


Рисунок 2.4 – Теоретичні вихідні характеристики МОН–тензотранзистора у відсутність деформації (1) та при її наявності (2)

2.3 Висновки до розділу

На основі розглянутої математичної моделі деформаційних ефектів у МОН–транзисторі показано, що порогова напруга, напруга насичення, напруга затвор–виток, вихідні характеристики залежать від тиску при його високих значеннях, починаючи з 10^8 Па. Найбільша залежність цих параметрів від дії тиску має місце при роботі МОН–транзистора у режимі насичення.

Використання МОН–транзистора як тензочутливого елемента є ефективним при високих тисках (10^8 Па) при його роботі у режимі насичення.

3 РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ СЕНСОРИ ТИСКУ НА ОСНОВІ РЕАКТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

Вдосконалення систем комп'ютеризованого автоматичного радіоконтролю і радіокерування різними об'єктами і процесами багато в чому визначається досягненнями в області радіовимірювальних перетворювачів. Проблема створення системи уніфікованих твердотільних перетворювачів з високими метрологічними характеристиками і вихідним сигналом, перетвореним у форму коду з незначними похибками, наразі, дуже актуальна. Одним із закономірних шляхів вирішення даної проблеми є використання реактивних властивостей напівпровідникових структур для побудови радіовимірювальних частотних перетворювачів різних фізичних величин, в нашому випадку – тиску [20, 29].

3.1 Сенсор тиску з частотним виходом на основі біполярного тензочутливого транзистора

Мікроелектронні перетворювачі механічних величин визначають точність і надійність систем моніторингу процесів, безпеки експлуатації ядерних, теплових, хімічних установок, літальних апаратів, морських об'єктів і т.д [20].

Одним з перспективних наукових напрямків, що дозволяє розв'язати комплекс завдань це використання залежності реактивних властивостей і від'ємного диференційного опору напівпровідникових пристроїв від впливу тиску і розробити на цій основі нового класу радіовимірювальних мікроелектронних перетворювачів [20]. У пристроях такого типу відбувається перетворення тиску в частотний сигнал, що дозволяє виготовити сенсори за інтегрованою технологією і дозволяє підвищити швидкодію, точність і чутливість, підвищити надійність, завадостійкість, а також довгострокову стабільність параметрів [20, 29].

Схема радіовимірювального частотного перетворювача тиску представлена на рисунку 3.1, та наведена в додатку Д.

Схема радіовимірювального перетворювача тиску містить біполярний і МОН транзистори, причому емітер біполярного транзистора з'єднаний з витоком МОН транзистора. Тензочутливим елементом виступає чутливий до тиску біполярний транзистор.

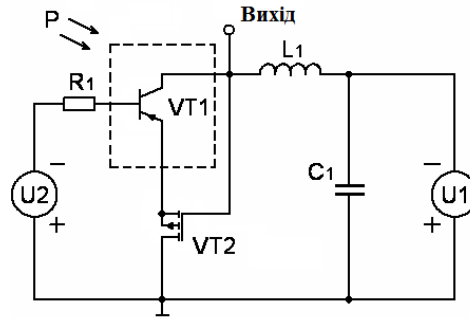


Рисунок 3.1 – Схема радіовимірювального перетворювача тиску на основі біполярно–польової транзисторної структури

Генератор електричних коливань утворений на основі структури транзисторів з від'ємним диференційним опором. Наявність диференційного від'ємного опору дозволяє компенсувати втрати енергії в коливальному контурі автогенератора. Коливальний контур пристрою утворений на основі еквівалентної ємності повного опору на електродах стоку польового транзистора VT2 і емітера тензочутливого біполярного транзистора VT1. Однією з основних характеристик перетворювача є залежність його функції перетворення. Функція перетворення радіовимірювального перетворювача тиску описується виразом

$$F = \frac{1}{2\pi |R_g^-(P)| C_{EKV}(P)} \left[\frac{R_g^2(P) C_{EKV}(P)}{L} - 1 \right]^{1/2}, \quad (3.1)$$

Де $C_{EKV}(P)$ – еквівалентна ємність перетворювача; $R_g^{(-)}(P)$ – динамічний диференціальний від'ємний опір генератора; L – індуктивність коливального контуру.

Чутливість радіовимірювального перетворювача тиску визначається на основі виразу (3.1) і описується формулою

$$S_F^P = \frac{R_g(P) C_{EKV}(P) \frac{dR_g(P)}{dP} + R_g^2(P) \frac{dC_{EKV}(P)}{dP}}{L} - \frac{L}{4\pi R_g(P) C_{EKV}(P) \sqrt{\frac{R_g^2(P) C_{EKV}(P)}{L} - 1}} - \frac{\sqrt{\frac{R_g^2(P) C_{EKV}(P)}{L} - 1} \frac{dR_g(P)}{dP}}{2\pi R_g^2(P) C_{EKV}(P)} - \frac{\sqrt{\frac{R_g^2(P) C_{EKV}(P)}{L} - 1} \frac{dC_{EKV}(P)}{dP}}{2\pi R_g(P) C_{EKV}^2(P)}. \quad (3.2)$$

Графічна залежність функції перетворення радіовимірювального перетворювача представлений на рисунку 3.2, а графічна залежність чутливості

на рисунку 3.2. Як видно з даного рисунку, чутливість радіовимірювального перетворювача змінюється від $4,25 \text{ кГц} / \text{Па} \cdot 10^5$ до $2,0 \text{ кГц} / \text{Па} \cdot 10^5$ в діапазоні від 0 Па до $12 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

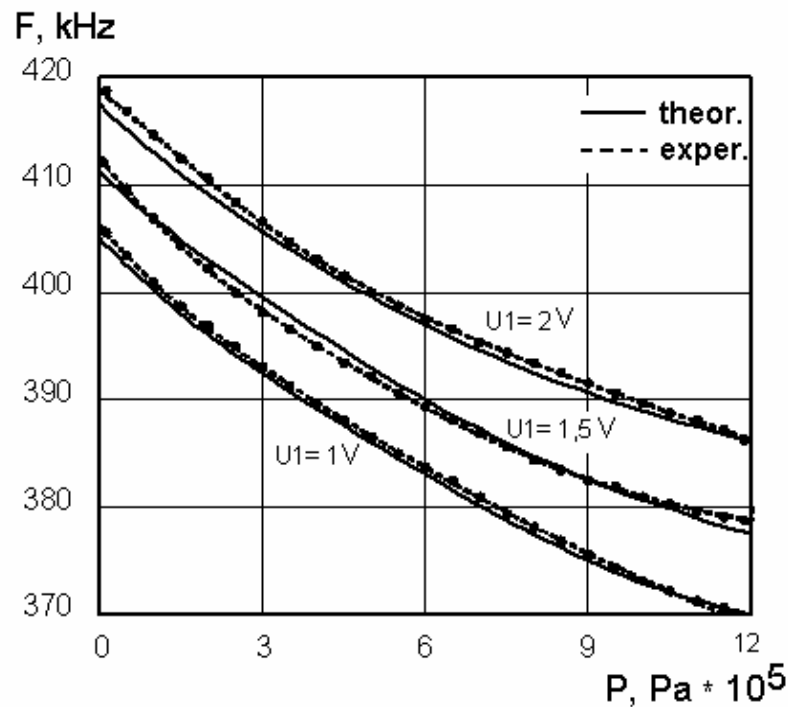


Рисунок 3.2 – Теоретичні та експериментальні залежності частоти генерації радіовимірювального перетворювача від зміни тиску

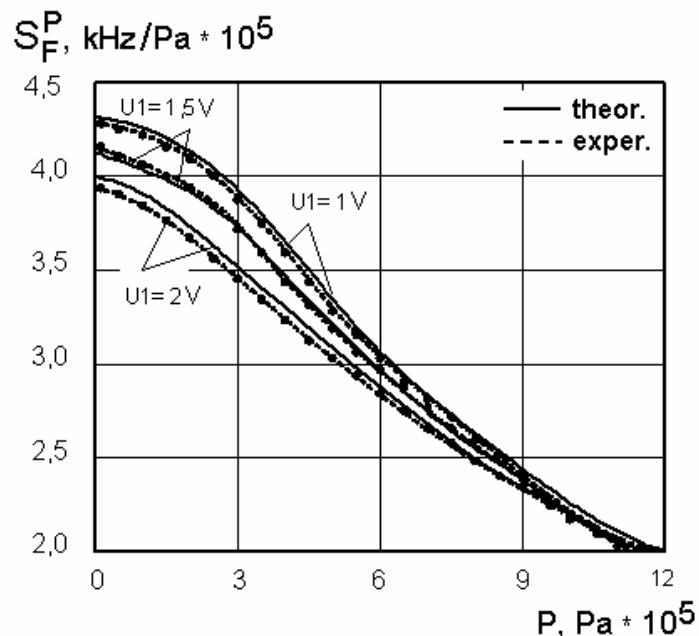


Рисунок 3.3 – Залежність чутливості радіовимірювального перетворювача від зміни тиску

Як видно з графіка, найбільша чутливість радіовимірювального перетворювача лежить у діапазоні від $0,1 \text{ Па} \cdot 10^5$ до $3 \text{ Па} \cdot 10^5$ і складає від $4,25$

до 3,5 кГц / Па·10⁵. Розбіжність теоретичних і експериментальних досліджень складає ±5%.

3.2 Радіовимірювальний мікроелектронний сенсор тиску на основі біполярно–польової транзисторної структури з тензочутливим резистивним мостом

Розроблений радіовимірювальний перетворювач тиску, схема перетворювача складається з МОН та біполярного транзисторів. Активна складова повного опору на електродах стік–колектор транзисторів VT1 і VT2 має від'ємне значення, а реактивна складова має ємнісний характер. Підключення зовнішньої індуктивності до електродів стік–колектор транзисторів VT1 і VT2 дозволяє створити автогенератор електричних коливань, частота генерації якого залежить від зміни тиску (рисунок 3.4) та наведена в додатку Е [38].

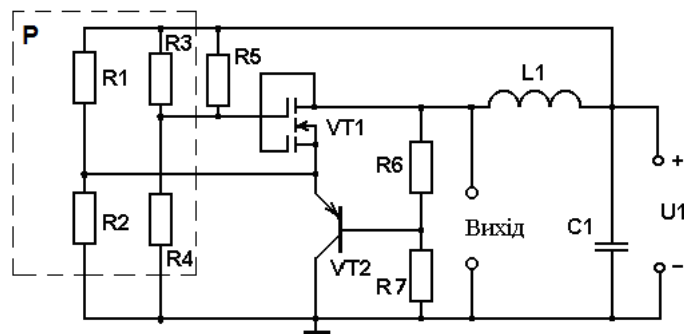


Рисунок 3.4 – Схема радіовимірювального перетворювача тиску

У цьому перетворювачі в якості чутливого елемента використаний напівпровідниковий сенсор тиску MPXA4115A який розташований на кремнійовій мембрані. В такому сенсорі на мембрані розміщені тензочутливі резистори, під дією тиску їхній опір змінюється. З чутливим елементом на основі тензочутливих резисторів були проведені експериментальні дослідження, які дали можливість отримати залежність частоти генерації радіовимірювального перетворювача від зміни тиску.

Аналітичну залежність функції перетворення радіовимірювального перетворювача тиску можна отримати на основі еквівалентної схеми пристрою. Функція перетворення радіовимірювального перетворювача тиску має вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{B_1 + \sqrt{B_1 + 4L_1C_{GD}(C_{CE}R_1(P)R_4(P))^2}}{2L_1C_{GD}(R_1(P)R_4(P)C_{CE})^2}}, \quad (3.3)$$

де

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

C_{CE} – прохідна ємність колектор–емітер VT2; L_1 – зовнішня пасивна індуктивність; C_{GD} – ємність затвор–стік польового транзистора VT1.

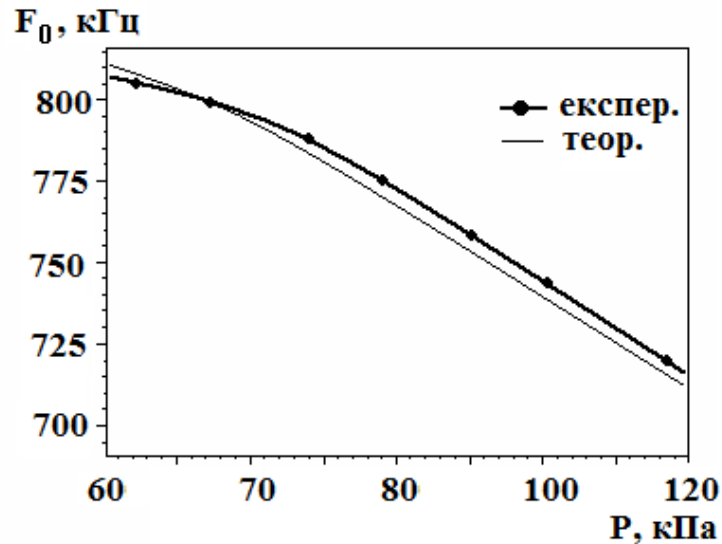


Рисунок 3.5 – Теоретична та експериментальна залежності частоти генерації радіовимірювального перетворювача тиску від зміни тиску

На основі експериментальних досліджень радіовимірювального перетворювача тиску встановлено, що частота генерації змінювалась від 807 кГц до 722 кГц при зміні тиску від 60 кПа до 120 кПа. Чутливість радіовимірювального перетворювача тиску складає 1,42 кГц/кПа.

3.3 Радіовимірювальний перетворювач тиску з активним індуктивним елементом і тензочутливим резистивним мостом

Радіовимірювальні перетворювачі з частотним виходом мають ряд переваг перед аналоговими, які складаються в значному підвищенні завадостійкості, що дозволяє збільшити точність вимірювань, а також у можливості отримання великих вихідних сигналів, що створює передумови відмови від підсилювальних пристроїв у наступній обробці сигналів. Використання частотного сигналу в якості інформативного дозволяє відмовитися від АЦП, що підвищує економічність радіовимірювальної апаратури.

Схема радіовимірювального перетворювача тиску подана на рисунку 3.6, та наведена в додатку Ж. Вона представляє собою гібридну інтегральну схему, яка складається з біполярного і польового транзисторів, опорів R5–R10, а також тензочутливого моста на мембрані (R1–R4), що дозволяє створити

автогенераторний пристрій. Коливальний контур пристрою утворений па основі еквівалентної ємності повного опору на електродах стоку польового транзистора VT1 і емітера біполярного транзистора VT2, а також активної індуктивності на основі транзистора VT3 з фазозсуваючою ланкою на основі R11C1 [41].

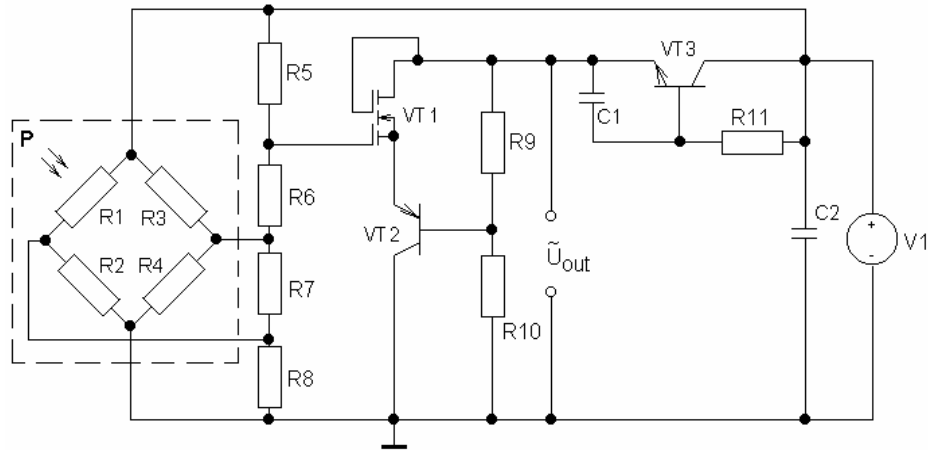


Рисунок 3.6 – Електрична схема радіовимірювального перетворювача тиску

На електродах стік–колектор транзисторів VT1 і VT2 існує повний опір, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна – ємнісний характер. Підключення активної індуктивності на основі транзистора VT3 і послідовної C_1R_{11} – ланцюга до стоку VT1 створює коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються від'ємним опором. Таким чином, резонансна частота коливального контуру залежить від зміни тиску на тензочутливий резистивний міст на мембрані (R1–R4). Виникнення індуктивних властивостей у біполярних структурах пов'язане з кінцевою швидкістю руху носіїв заряду в базовій області. Сигнал, прикладений до емітеру, не може з'явитися на колекторному переході, поки носії заряду проходять базу, у результаті чого виникає затримка в часі, що одержала назву часу прольоту. Струм колектора відстає в часі від напруги на емітері, що викликало цей струм, це відповідає індуктивній реакції на електродах емітер–колектор біполярного транзистора. Величина індуктивності та добротності визначається на основі нелінійної моделі індуктивного транзистора, заснованої на моделі Еберса–Молла, що отримана із загальної математичної моделі транзистора. Вихідними даними для даної моделі є система нелінійних рівнянь, які описують поведження носіїв заряду в напівпровідниковому матеріалі, а також математичні співвідношення, які характеризують поведження p–n переходів. Індуктивність теоретичної моделі залежить від електрофізичних параметрів напівпровідникового матеріалу бази, режиму живлення транзистора по постійній і змінній напругах, а також від геометричних розмірів транзистора, що дозволяє управляти її величиною як

електричним, так і технологічним шляхами. Зовнішні параметри транзистора, які безпосередньо не пов'язані із процесами переносу носіїв заряду, такі як бар'єрні ємності емітерного й колекторного переходів, омичний опір базової області, індуктивності виводів істотно впливають на величину індуктивності, що виникає в процесі переносу носіїв заряду в базовій області. Включення зовнішньої $R_{11}C_1$ – кола до транзистора VT3 дозволяє збільшити як індуктивність, так і добротність активного елемента з одного боку, а з іншого боку – повністю реалізувати як активний індуктивний елемент, так і весь пристрій за інтегральною груповою технологією [19].

Значення еквівалентної індуктивності на основі біполярного транзистора з RC– колом описується виразом

$$L = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{A_4 A_1 - A_3 A_2}{A_1^2 + A_2^2}, \quad (3.4)$$

$$\text{де } A_1 = \omega C \left[(r_{\bar{o}} - R\alpha_1)^2 - (R\alpha_2)^2 + \frac{1}{(\omega C)^2} \right], \quad A_2 = \omega C [2R\alpha_2(r_{\bar{o}} - R\alpha_1)],$$

$$A_3 = \left[R\alpha_1(r_{\bar{o}} - R) + r_{\bar{o}} \frac{R^2}{r_K} - 2 \frac{R^3}{r_K} \alpha_1 + \frac{R^2 \alpha_2^2}{(\omega C)^2} \right],$$

$$A_4 = \left[2R^2 \alpha_1 \alpha_2 - r_{\bar{o}} R \alpha_2 + \frac{2R^3}{r_K} \alpha_2 \right],$$

$\alpha_1 = \frac{\alpha_0}{1 + (f/f_{\alpha})^2}$ – дійсна складова коефіцієнта передачі струму у схемі із загальною базою;

$\alpha_2 = \frac{\alpha_0 f / f_{\alpha}}{1 + (f/f_{\alpha})^2}$ – уявна складова коефіцієнта передачі струму у схемі із загальною базою;

f – робоча частота;

f_{α} – гранична частота біполярного транзистора у схемі із загальною базою.

Добротність еквівалентної індуктивності визначається виразом

$$Q = \frac{(A_4 A_1 - A_3 A_2) \omega C}{\omega C (A_3 A_1 + A_4 A_2) - (A_1^2 + A_2^2)}. \quad (3.5)$$

Вирази (3.4) і (3.5) отримані за умови коли $r_K \gg R$, $R \gg r_{\bar{o}}$, $r_{\bar{o}} \gg r_e$. Вплив температури на еквівалентну індуктивність і добротність визначається через

залежність $r_{\bar{o}}, \alpha_1, \alpha_2, r_K$. Залежність опору R і ємності C , які утворюють коло зворотного зв'язку у біполярному транзисторі VT3, також необхідно враховувати.

Розглянемо принцип роботи і деякі конструктивні особливості тензочутливого моста R1–R3. Чутливий елемент перетворювача є мембрана, утворена в пластині з монокристалічного кремнію методом хімічного анізотропного травлення. На поверхні чутливого елемента, в місцях найбільших механічних напруг, методом введення бору в кремнії, такі як *p*-типу провідності формуються тензочутливі резистори, які формують вимірювальний контур. Чутливий елемент характеризується часовою стабільністю і відсутність гістерезису. Конфігурація мембрани залежить від конфігурації вікна травлення і має квадратну форму.

На підставі еквівалентної нелінійної схеми відповідно до методу стійкості Ляпунов [42]. Функція перетворення радіовимірювального перетворювача тиску визначається як залежність частоти генерації від зміни тиску. Аналітична залежність функції перетворення радіовимірювального перетворювача тиску має вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{B_1 + \sqrt{B_1 + 4LC_{GD}(C_B(P)R_B(P))^2}}{2LC_{GD}(R_B(P)C_B(P))^2}}, \quad (3.6)$$

де

$$B_1 = LC_{GD} - (C_B(P)R_B(P))^2 - C_{GD}C_B(P)R_B^2(P),$$

C_B, R_B – відповідно ємність і опір на електродах колектор–база VT2; L – еквівалентна індуктивність активного елемента; C_{GD} – ємність затвор–витік польового транзистора VT1.

Графічна залежність функції перетворення радіовимірювального перетворювача тиску представлена на рисунку 3.7. Чутливість радіовимірювального перетворювача тиску з частотним виходом визначається на основі виразу (3.6) і описується виразом

$$\begin{aligned}
S_P^{F_0} = & -0.0198 \left(-2C_B(P)R_B^3(P)C_{GD} \left(\frac{\partial C_B(P)}{\partial P} \right) \sqrt{B_1 + 2B_2} - 2C_B^2(P)R_B^3(P) \left(\frac{\partial C_B(P)}{\partial P} \right) - \right. \\
& - 2C_B^3(P)R_B^2(P) \left(\frac{\partial R_B(P)}{\partial P} \right) - 3C_B(P)R_B^3(P)C_{GD} \left(\frac{\partial C_B(P)}{\partial P} \right) - 2C_{GD}C_B^2(P)R_B^2(P) \times \\
& \times \left(\frac{\partial R_B(P)}{\partial P} \right) + 8C_B^2(P)R_B^3(P)LC_{GD} \left(\frac{\partial C_B(P)}{\partial P} \right) + 8LC_{GD}C_B^2(P)R_B^2(P) \left(\frac{\partial R_B(P)}{\partial P} \right) + \\
& + 4LC_{GD}R_B(P) \left(\frac{\partial C_B(P)}{\partial P} \right) \sqrt{B_1 + 2B_2} + 4R_B(P) \left(\frac{\partial C_B(P)}{\partial P} \right) LC_{GD} + 4C_B(P)LC_{GD} \times \\
& \times \left(\frac{\partial R_B(P)}{\partial P} \right) \sqrt{B_1 + 2B_2} + 4LC_{GD}C_B(P) \left(\frac{\partial R_B(P)}{\partial P} \right) \left. \right) / \left(\left(2\sqrt{B_1 + \sqrt{B_1 + 2B_2}} / B_2 \right) \times \right. \\
& \left. \times LC_{GD}C_B^3(P)R_B^3(P)\sqrt{B_1 + 2B_2} \right),
\end{aligned} \tag{3.7}$$

де $B_2 = 2LC_{GD}(C_B(P)R_B(P))^2$.

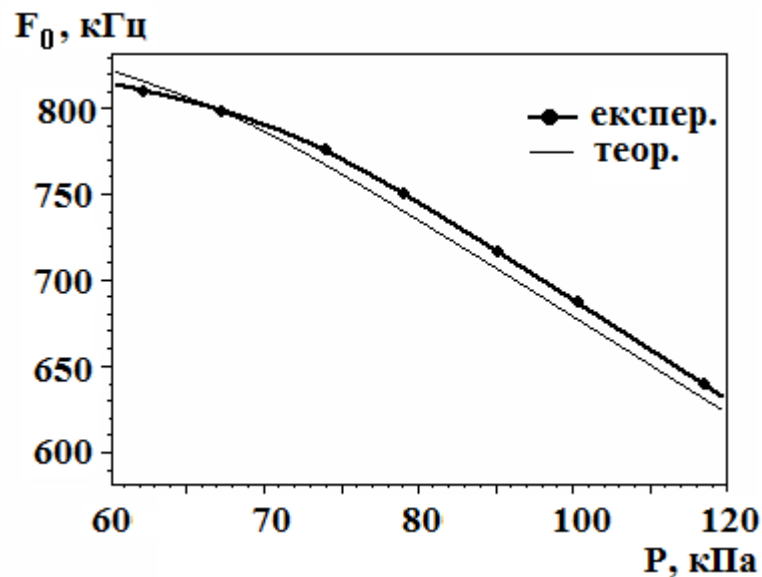


Рисунок 3.7 – Теоретична та експериментальна залежності частоти генерації радіовимірювального перетворювача тиску від зміни тиску

Графік залежності чутливості радіовимірювального перетворювача тиску з частотним виходом представлена на рисунку 3.7. Як видно з графіка, найбільша чутливість радіовимірювального перетворювача тиску лежить в діапазоні від 75 кПа до 120 кПа. На основі експериментальних досліджень встановлено, що частота генерації змінювалась від 807 кГц до 648 кГц при зміні тиску від 60 кПа до 120 кПа. Чутливість радіовимірювального перетворювача тиску складає 2,65 кГц/кПа.

3.4 Радіовимірювальний перетворювач тиску на основі двоколекторного тензотранзистора

Більшість сенсорів тиску є аналоговими, за допомогою яких зміна тиску перетворюється в електричний сигнал у вигляді напруги або струму. Сенсори тиску з частотним виходом мають ряд переваг перед аналоговими, це полягає у значному підвищенні завадостійкості, що дозволяє збільшити точність вимірювання, а також у можливості одержання значних вихідних сигналів. Використання тензочутливого двоколекторного біполярного транзистора як у якості чутливого, так і в якості підсилювального елемента дозволило значно спростити схему пристрою.

Електрична схема радіовимірювального перетворювача тиску наведена на рисунку 3.8. Вона представляє собою гібридну інтегральну схему, що складається із двоколекторного тензочутливого транзистора і польового двозатворного транзистора, які разом з індуктивністю і джерелом постійної напруги, утворюють автогенераторний пристрій, частота генерації якого залежить від зміни тиску.

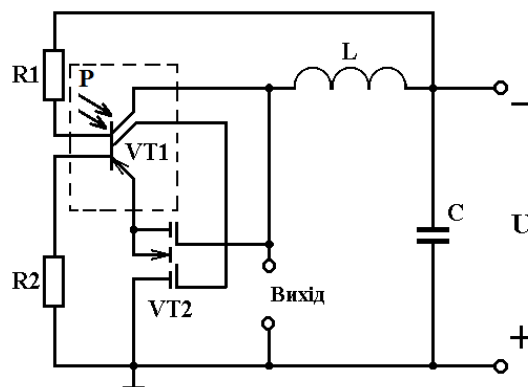


Рисунок 3.8 – Електрична схема радіовимірювального перетворювача тиску

На електродах першого колектора тензочутливого біполярного транзистора VT1 і стоці польового двозатворного транзистора VT2 існує повний опір, активна складова якого має від'ємне значення, а реактивна – ємнісний характер. Підключення зовнішньої індуктивності L до першого колектора тензочутливого транзистора VT1 і стоку польового транзистора VT2 через блокуючу ємність C створює коливальний контур автогенератора. Втрати енергії в коливальному контурі компенсуються від'ємним опором. Резистори R1 і R2, а також джерело постійної напруги U забезпечують режим живлення з постійного струму досліджуваної схеми. При дії тиску на транзистор VT1 відбувається зміна еквівалентної ємності коливального контуру, що викликає зміну резонансної частоти.

Еквівалентна схема, радіовимірювального перетворювача тиску представлена на рисунку 3.9, та наведена в додатку К. Вона побудована на основі малосигнальних лінійних еквівалентних схем біполярного і польового транзисторів.

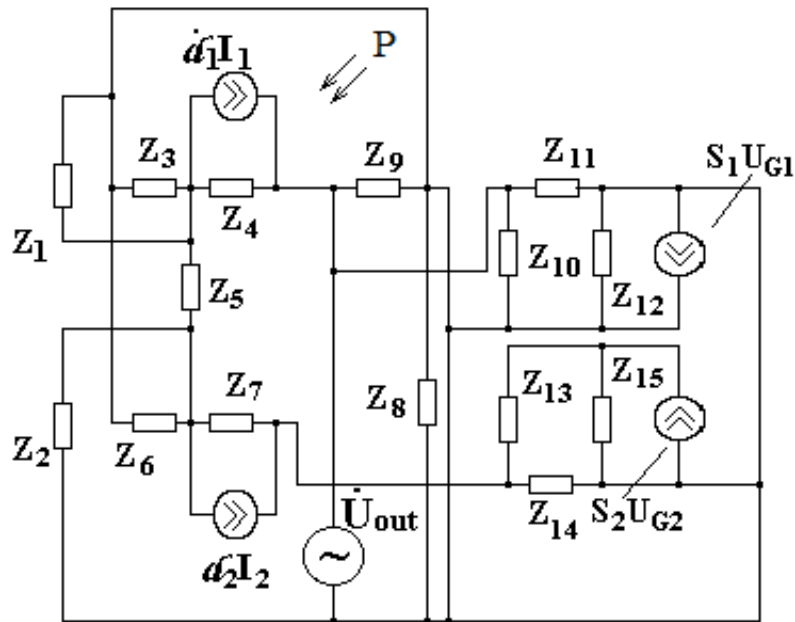


Рисунок 3.9 – Еквівалентна схема радіовимірювального перетворювача тиску

$$Z_1 = R_1, \quad Z_2 = R_2, \quad Z_3 = \frac{R_{E1}}{1 + \omega^2 R_{E1}^2 C_{E1}^2} - j \frac{R_{E1}^2 \omega C_{E1}}{1 + \omega R_{E1}^2 C_{E1}^2},$$

$$Z_4 = \frac{R_{K1}}{1 + \omega^2 R_{K1}^2 C_{K1}^2} - j \frac{R_{K1}^2 \omega C_{K1}}{1 + \omega R_{K1}^2 C_{K1}^2}, \quad Z_5 = R_B,$$

$$Z_6 = \frac{R_{E2}}{1 + \omega^2 R_{E2}^2 C_{E2}^2} - j \frac{R_{E2}^2 \omega C_{E2}}{1 + \omega R_{E2}^2 C_{E2}^2}, \quad Z_7 = \frac{R_{K2}}{1 + \omega^2 R_{K2}^2 C_{K2}^2} - j \frac{R_{K2}^2 \omega C_{K2}}{1 + \omega R_{K2}^2 C_{K2}^2},$$

$$Z_8 = -j / (\omega C), \quad Z_9 = j\omega L,$$

$$Z_{10} = \frac{R_{GS1}}{1 + \omega^2 R_{GS1}^2 C_{GS1}^2} - j \frac{R_{GS1}^2 \omega C_{GS1}}{1 + \omega R_{GS1}^2 C_{GS1}^2}, \quad Z_{11} = -j / (\omega C_{GD1}),$$

$$Z_{12} = \frac{R_{DS1}}{1 + \omega^2 R_{DS1}^2 C_{DS1}^2} - j \frac{R_{DS1}^2 \omega C_{DS1}}{1 + \omega R_{DS1}^2 C_{DS1}^2}, \quad Z_{14} = -j / (\omega C_{GD2}),$$

$$Z_{13} = \frac{R_{GS2}}{1 + \omega^2 R_{GS2}^2 C_{GS2}^2} - j \frac{R_{GS2}^2 \omega C_{GS2}}{1 + \omega R_{GS2}^2 C_{GS2}^2}, \quad Z_{15} = \frac{R_{DS2}}{1 + \omega^2 R_{DS2}^2 C_{DS2}^2} - j \frac{R_{DS2}^2 \omega C_{DS2}}{1 + \omega R_{DS2}^2 C_{DS2}^2}.$$

Залежність елементів еквівалентної схеми тензочутливого двоколекторного транзистора від дії тиску буде представлена нижче. Виходячи з аналітичних залежностей параметрів еквівалентної схеми [22] визначаються їх залежність від дії тиску.

Деформаційні прирости параметрів $G_i = f(E_g, n_n, n_p, p_n, n_i, m_n, r)$ еквівалентної схеми біполярного тензотранзистору, зображеної на рисунку 3.9, визначаються на основі загального виразу

$$\begin{aligned} \Delta G_i(P) = & \frac{\partial G_i}{\partial E_g} \Delta E_g(P) + \frac{\partial G_i}{\partial n_n} \Delta n_n(P) + \frac{\partial G_i}{\partial n_p} \Delta n_p(P) + \frac{\partial G_i}{\partial p_n} \Delta p_n(P) + \\ & + \frac{\partial G_i}{\partial n_i} \Delta n_i(P) + \frac{\partial G_i}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(P) + \frac{\partial G_i}{\partial \rho} \Delta \rho(P) \end{aligned} \quad (3.8)$$

В якості параметрів G_i у виразі (3.8) виступають наступні параметри та елементи еквівалентної схеми: R_e – опір емітера; C_{be} – ємність емітерного переходу; R_b – опір базової області; C_{bc} – ємність колекторного переходу; R_c – опір колектора; a_N та a_I – відповідно прямий та інверсний коефіцієнти підсилення струму в схемі з загальною базою. Формула (3.8) дозволяє визначити деформаційний приріст параметру еквівалентної схеми G_i шляхом визначення суми часткових похідних даного параметру від електрофізичних параметрів напівпровідникового матеріалу, що в свою чергу залежать від дії тиску.

Визначивши залежності елементів еквівалентної схеми тензочутливого транзистора від дії тиску, можна перейти до визначення функції перетворення та рівняння чутливості. На основі нелінійної еквівалентної схеми (рисунк 3.9) розрахуємо повний опір на електродах першого колектора транзистора VT1 і стоку польового транзистора VT2, на основі якого визначається еквівалентна ємність коливального контуру частотного перетворювача тиску, що визначає функцію перетворення.

У відповідності із схемою (рисунк 3.9) на основі методу стійкості Ляпунова [42] визначаємо функцію перетворення радіовимірювального перетворювача тиску, яка являє собою залежність частоти генерації від дії тиску. Аналітична залежність функції перетворення радіовимірювального перетворювача тиску має вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A_1 + \sqrt{A_1^2 + LC_{GD}(C_B(P)R_B(P))^2}}{2LC_{GD}(R_B(P)C_B(P))^2}}, \quad (3.9)$$

де

$$A_1 = LC_{GD} - (C_B(P)R_B(P))^2 - C_{GD}C_B(P)R_B^2(P),$$

C_B, R_B – еквівалентна ємність й опір базової області тензочутливого транзистора; L – зовнішня індуктивність; C_{GD} – ємність затвор–стік польового транзистора.

Графічна залежність функції перетворення радіовимірювального перетворювача тиску представлена на рисунку 3.10. Чутливість радіовимірювального перетворювача тиску визначається на основі виразу (3.9) і описується рівнянням

$$\begin{aligned}
 S_B^{F_0} = & -0.0198 \left(-2C_B(P)R_B^3(P)C_{GD} \left(\frac{\partial C_B(P)}{\partial P} \right) \times \sqrt{A_1 + 2A_2} - 2C_B^2(P)R_B^3(P) \times \right. \\
 & \times \left(\frac{\partial C_B(P)}{\partial P} \right) - 2C_B^3(P)R_B^2(P) \left(\frac{\partial R_B(P)}{\partial P} \right) - 3C_B(P)R_B^3(P)C_{GD} \left(\frac{\partial C_B(P)}{\partial P} \right) - \\
 & - 2C_{GD}C_B^2(P)R_B^2(P) \left(\frac{\partial R_B(P)}{\partial P} \right) + 8C_B^2(P)R_B^3(P)LC_{GD} \left(\frac{\partial C_B(P)}{\partial P} \right) + 8LC_{GD} \times \\
 & \times C_B^2(P)R_B^2(P) \left(\frac{\partial R_B(P)}{\partial P} \right) + 4LC_{GD}R_B(P) \left(\frac{\partial C_B(P)}{\partial P} \right) \sqrt{A_1 + 2A_2} + 4R_B(P) \times \\
 & \times \left(\frac{\partial C_B(P)}{\partial P} \right) LC_{GD} + 4C_B(P)LC_{GD} \left(\frac{\partial R_B(P)}{\partial P} \right) \times \sqrt{A_1 + 2A_2} + 4LC_{GD}C_B(P) \times \\
 & \left. \times \left(\frac{\partial R_B(P)}{\partial P} \right) \right) / \left(\left(2\sqrt{A_1 + \sqrt{A_1 + 2A_2}} / A_2 \right) LC_{GD} C_B^3(P) R_B^3(P) \sqrt{A_1 + 2A_2} \right),
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

де

$$A_2 = 2LC_{GD}(C_B(P)R_B(P))^2.$$

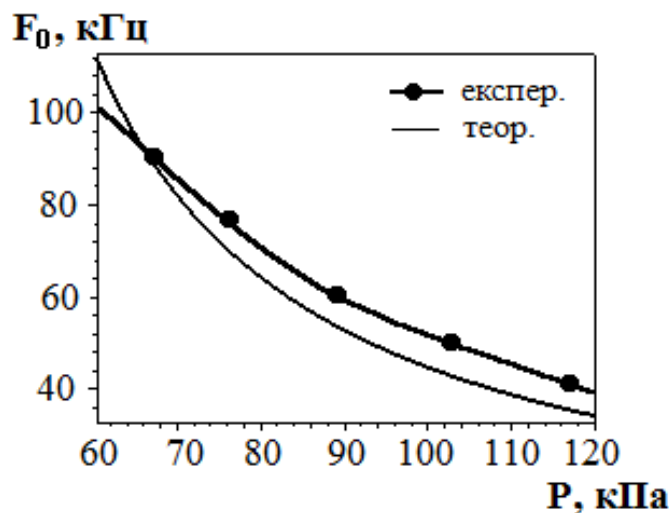


Рисунок 3.10 – Залежність частоти генерації радіовимірювального перетворювача тиску від зміни тиску

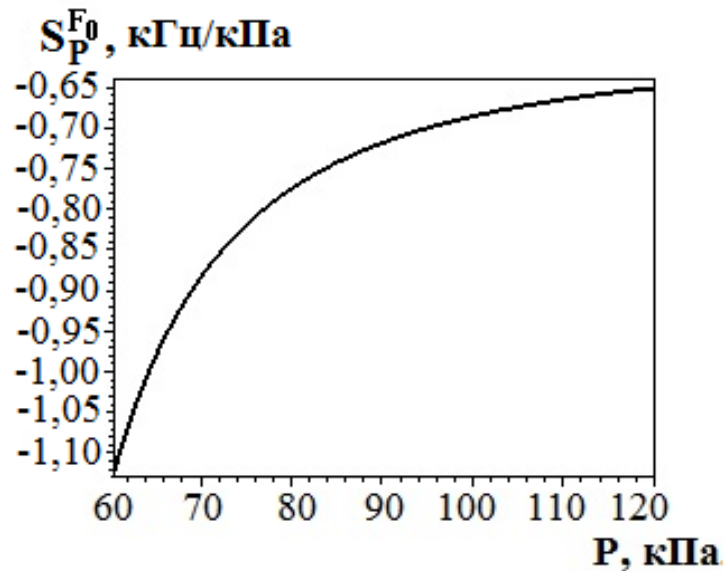


Рисунок 3.11 – Залежність чутливості радіовимірювального перетворювача тиску від зміни тиску

Графік залежності чутливості радіовимірювального перетворювача тиску від зміни тиску подано на рисунку 3.11. Як видно із графіка найбільша чутливість радіовимірювального перетворювача тиску лежить у діапазоні від 60 кПа до 120 кПа і становить 0,65–1,1 кГц/кПа.

3.5 Радіовимірювальний перетворювач тиску на основі двохстокового МОН тензотранзистора

Транзистори зі структурою МОН широко застосовуються в мікроелектроніці завдяки своїм перевагам: мають добрі електричні характеристики, підвищену надійність, відсутність додаткової ізоляції. У даний час недостатньо вивчені фізичні механізми, що протікають в транзисторній структурі з від'ємним диференціальним опором. Ці питання мають актуальність для розвитку напівпровідникових радіовимірювальних перетворювачів “тиск–частота” на транзисторних структурах з від'ємним диференціальним опором.

Розроблено радіовимірювальний перетворювач тиску. Схема перетворювача складається з двохстокового МОН тензотранзистора та двозатворного МОН транзистора. Активна складова повного опору на електродах стік–стік транзисторів VT1 і VT2 має від'ємне значення, а реактивна складова має ємнісний характер. Підключення зовнішньої індуктивності до електродів стік–стік транзисторів VT1 і VT2 дозволяє створити генератор електричних коливань, частота генерації якого залежить від зміни тиску (рисунок 3.12) [43].

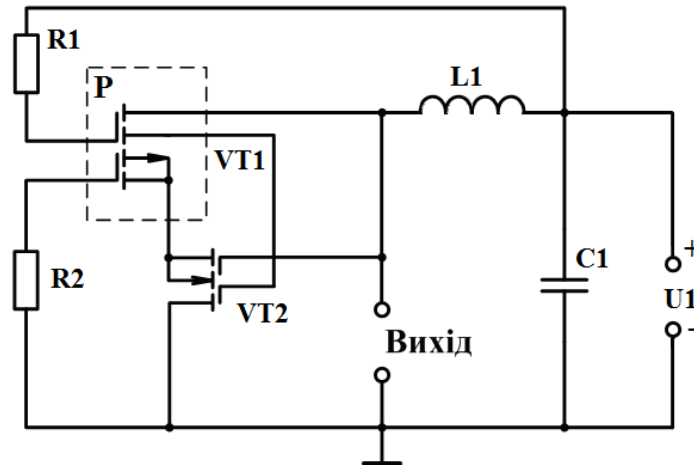


Рисунок 3.12 – Схема радіовимірювального перетворювача тиску

У даному перетворювачі в якості чутливого елемента використано двостоковий тензочутливий МОН транзистор, який розміщений на кремнійовій мембрані. Двостоковий МОН тензотранзистор розташовується на згині профільованої кремнієвої мембрани, що перетворює рівномірно розподілене по поверхні мембрани навантаження в одноосьову пружну деформацію розтягнення (стиску) її центральної частини в кристалографічному напрямку $\langle 110 \rangle$. З чутливим елементом на основі двостокового тензочутливого МОН транзистора було проведено експериментальні дослідження, що дали можливість отримати залежність частоти генерації перетворювача від зміни тиску.

Функція перетворення радіовимірювального перетворювача тиску, тобто залежність частоти генерації від зміни тиску, визначається на основі нелінійної еквівалентної схеми радіовимірювального перетворювача. Спочатку визначається реактивна складова повного опору на електродах стік–стік транзисторної структури, а потім з реактивної складової визначається еквівалентна ємність, яка залежить від зміни тиску. Зміна еквівалентної ємності визначає залежність частоти генерації від тиску. Аналітичний вираз функції перетворення має вигляд

$$F_0 = \frac{\sqrt{2} \sqrt{A_1 - \sqrt{A_1^2 + 4L_1 C_{GD}(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P)}}}{4\pi L_1 C_{GD}(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P)}, \quad (3.11)$$

де $A_1 = R_{DS}^2(P) C_{GD}(P) C_{GS}(P) + R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P) - L_1 C_{GD}(P)$,

R_{DS} – опір витік–стік тензочутливого транзистора VT1; C_{GS} – ємність затвор–витік тензочутливого транзистора VT1; L_1 – зовнішня пасивна індуктивність; C_{GD} – ємність затвор–стік тензочутливого транзистора VT1; P – тиск.

Числові розрахунки на персональному комп'ютері дозволяють отримати функцію перетворення радіовимірювального перетворювача тиску у вигляді графіка (рисунок 3.13), та наведена в додатку Л.1. Функція чутливості радіовимірювального перетворювача тиску описується рівнянням:

$$\begin{aligned}
 S_{F_0}^P = & -\frac{\sqrt{2}}{8} \left(R_{DS}^5(P) C_{GS}^5(P) \left(\frac{\partial C_{GD}(P)}{\partial P} \right) + R_{DS}^3(P) C_{GD}^2(P) C_{GS}(P) \left(\frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) \sqrt{A_2} + C_{GD}^3(P) R_{DS}^5(P) \times \right. \\
 & \times C_{GS}^2(P) \left(\frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) + C_{GD}^2(P) R_{DS}^5(P) C_{GS}^3(P) \left(\frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) + C_{GD}(P) R_{DS}^5(P) C_{GS}^4(P) \left(\frac{\partial C_{GD}(P)}{\partial P} \right) + \\
 & + C_{GD}(P) R_{DS}^3(P) C_{GS}^3(P) L_1 \left(\frac{\partial C_{GD}(P)}{\partial P} \right) - 2 C_{GD}^3(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P) L_1 \left(\frac{\partial R_{DS}(P)}{\partial P} \right) - 3 C_{GD}^3(P) R_{DS}^2(P) \times \\
 & \times C_{GS}(P) L_1 \left(\frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) + 2 C_{GD}^2(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^3(P) L_1 \left(\frac{\partial R_{DS}(P)}{\partial P} \right) + 2 C_{GD}^2(P) R_{DS}^3(P) C_{GS}^2(P) L_1 \left(\frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) + \\
 & + R_{DS}^3(P) C_{GS}^3(P) \sqrt{A_2} \left(\frac{\partial C_{GD}(P)}{\partial P} \right) - 2 \left(\frac{\partial R_{DS}(P)}{\partial P} \right) \sqrt{A_2} C_{GD}^2(P) C_{GS}(P) L_1 - 2 \left(\frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) R_{DS}(P) C_{GD}^2(P) \sqrt{A_2} + \\
 & + 2 \left(\frac{\partial R_{DS}(P)}{\partial P} \right) \sqrt{A_2} C_{GD}^3(P) C_{GS}(P) L_1^2 + 2 \left(\frac{\partial C_{GS}(P)}{\partial P} \right) C_{GD}^3(P) C_{DS}(P) L_1^2 \left. \right) / \left(\pi \sqrt{A_2} L_1 \times \right. \\
 & \left. \times C_{GD}^2(P) R_{DS}^3(P) C_{GS}^3(P) \sqrt{\frac{-R_{DS}^2(P) C_{GS}(P) C_{GD}(P) - R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P) + L_1 C_{GD}(P) - \sqrt{A_2}}{L_1 C_{GD}(P) R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P)}} \right), \tag{3.12}
 \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned}
 A_2 = & R_{DS}^4(P) C_{GS}^2(P) C_{GD}^2(P) + 2 R_{DS}^4(P) C_{GS}^3(P) C_{GD}(P) - 2 R_{DS}^2(P) \times \\
 & \times C_{GS}(P) C_{GD}^2(P) L_1 + R_{DS}^4(P) C_{GS}^4(P) + 2 L_1 R_{DS}^2(P) C_{GS}^2(P) + L_1^2 C_{GD}^2(P).
 \end{aligned}$$

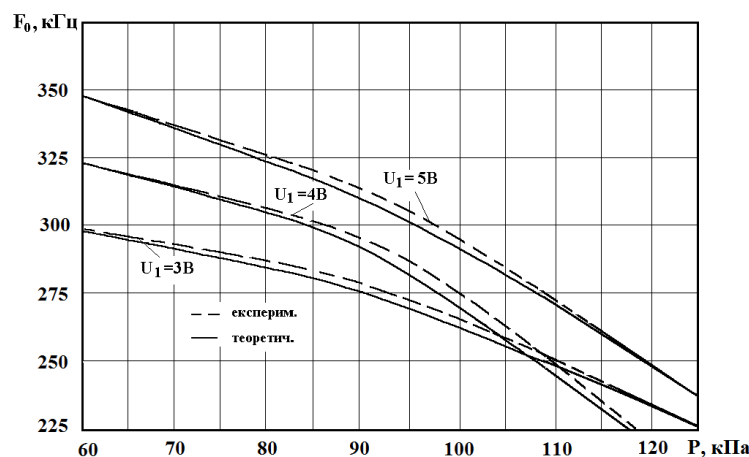


Рисунок 3.13 – Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації радіовимірювального перетворювача тиску від зміни тиску

Як видно з графіка, чутливість і лінійність функції перетворення зростають з підвищенням напруги живлення, який представлено на рис.3.14, та наведено в додатку Л.2. Існують оптимальна величина напруги живлення, яка складає 5 В. Адекватність розробленої моделі в порівнянні з експериментом визначається у вигляді відносної похибки і не перевищує $\pm 2,5\%$. Чутливість перетворювача на частоті 300 кГц при напрузі живлення 5 В складає 2,1 кГц/кПа.

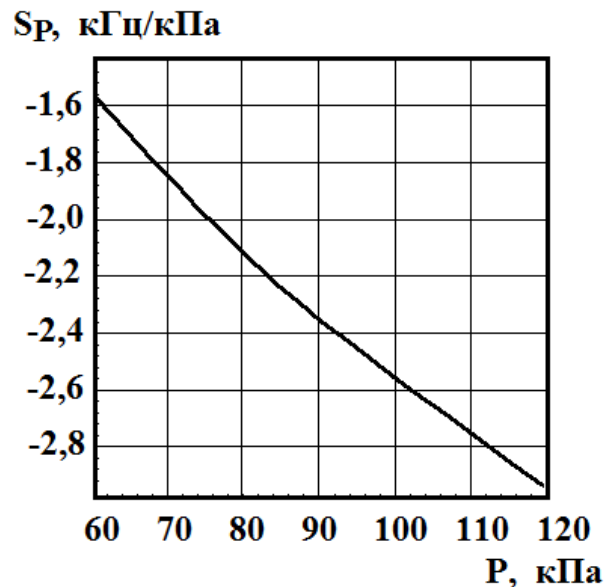


Рисунок 3.14 – Залежність чутливості від тиску

На основі експериментальних досліджень встановлено, що частота генерації радіовимірювального перетворювача тиску змінювалась від 350 кГц до 328 кГц при зміні тиску від 60 кПа до 120 кПа. Чутливість радіовимірювального перетворювача тиску складає від 1,6 кГц/кПа до 2,8 кГц/кПа.

3.6 Оцінювання метрологічних параметрів радіовимірювальних перетворювачів тиску

Вірогідність інформації про властивості досліджуваного об'єкта визначаються як вибором величин, які характеризують об'єкт, так і похибкою, яка існує при вимірюванні цих величин.

Вибір величин, які необхідно виміряти, здійснюється на основі знань про досліджуваний об'єкт, які отримуються у результаті проведених раніш досліджень. Дійсно, при вимірюванні параметрів сигналів необхідно заздалегідь встановити чи є даний сигнал імпульсним або неперервним, детермінованим або випадковим. Результатом такого дослідження є віднесення сигналу до одного із класів, після чого стає відомою сукупність величин, які

характеризують цей клас. Числові значення цих параметрів і підлягають вимірюванню.

Якщо сигнал детермінований (наприклад, періодичний), то за допомогою вольтметрів різного типу можна виміряти середнє, середньо випрямлене, ефективне або пікове значення цього сигналу, за допомогою частотомера – частоту, за допомогою відповідних аналізаторів – амплітудно–частотний, фазочастотний спектр тощо [48].

Якщо сигнал є випадковим, то він описується за допомогою таких характеристик, як закони розподілу ймовірності його миттєвих значень, кореляційною функцією або енергетичним спектром. Вимірювання кожного із цих параметрів потребує застосування спеціальних пристроїв.

Наведені міркування свідчать про важливість знань про особливості досліджуваного об'єкта у виборі методів і засобів вимірювання і про необхідність узгодження властивостей об'єкта із властивостями використаних при його дослідженні пристроїв. Недотримання цієї умови є причиною зниження вірогідності отриманої при вимірюванні інформації [48].

Другою важливою причиною, яка впливає на вірогідність цієї інформації є існування похибок вимірювання. Похибки існують при будь–якому вимірюванні. Виходячи з практичних потреб, вирішують яку точність необхідно отримати. З цього можна зробити висновок, що вимірювання характеризуються не тільки результатом, який є числовим значенням вимірюваної величини, а також похибкою, яка при цьому отримана. Причини появи похибок є багаточисленними і мають різноманітну природу [48]:

- 1) із самим вимірюваним об'єктом – недостатніми знаннями властивостей об'єкта, існуванням перешкоджаючих компонентів (шуми, завади) у складі досліджуваного сигналу тощо;
- 2) з недосконалістю методів і засобів вимірювання (так звані методичні і апаратні або інструментальні похибки) – відхиленням параметрів схем від номіналу за рахунок старіння, прогріву тощо, існуванням шумів, які виникають в самих приладах;
- 3) з впливом умов проведення вимірів і зміною невимірюваних параметрів об'єкта (температура, тиск, вологість в приміщенні, існування вібрації, зовнішніх електромагнітних і магнітних полів, нестабільність джерел живлення);
- 4) з суб'єктивними (особистими) якостями експериментатора, які виникають з послабленням уваги, які також залежать від його тренуваності, ступенем стомлення тощо. До цього відносяться причини, які приводять до появи грубих помилок (промахів);

5) з недосконалістю систем передачі розміру одиниці вимірювання від еталона до робочого приладу.

Перейдемо до визначення повної похибки в процесі вимірювання температури за допомогою радіовимірювального температурного перетворювача. Методичні часткові похибки, які виникають при даному методі вимірювання, мають таку природу:

δ_1 – похибка вимірювання, яка виникає у результаті нестабільності частоти генератора;

δ_2 – похибка через установку режиму живлення транзисторної структури.

Часткові похибки пристроїв, які використовуються в процесі вимірювання:

δ_3 – похибка у результаті нелінійності амплітудної характеристики електронного частотоміра;

δ_4 – похибка через власні шуми і зовнішні наводки на вхідне коло електронного частотоміра;

δ_5 – похибка, яка виникає у результаті неточного калібрування і неточного визначення результату вимірювання по шкалі електронного частотоміра.

Оцінка величини δ_1 визначається на основі формули

$$\delta_1 = \frac{\rho^2 V_0}{(R_g')^2} \left[\frac{1}{3} Q d_1 d_2 + \frac{V_0}{192} (27 Q d_1 d_3 - 32 d_2^2) + \right. \\ \left. + \frac{V_0^2}{20} (8 Q d_1 d_4 + 5 d_2 d_3) + \frac{V_0^3}{24} (5 Q d_1 d_3 - 8 d_2 d_4) \right], \quad (3.13)$$

де Q – добротність коливального контуру, ρ – характеристичний опір контуру, V_0 – напруга зміщення, $d_1 - d_6$ – коефіцієнти полінома який апроксимує вольт–амперну характеристику

Оцінка похибки δ_2 , яка зв'язана з неточною установкою режиму живлення по постійному струму досліджуваного перетворювача потребує знання типової залежності температури від напруги живлення. Ця залежність отримується експериментально. Точність установки постійного значення напруги визначається класом точності електровимірювальних пристроїв, які використовуються. Оскільки клас точності l виражає собою допустиме значення відносної похибки, яка приведена до номіналу шкали, то середньоквадратична похибка σ_U розраховується згідно умови рівновірного закону розподілу похибки в інтервалі допуску

$$\sigma_U = \frac{U_{НОМ}}{U_P} \cdot \frac{l_U}{\sqrt{3}} , \quad (3.14)$$

де U_P – напруга, яка подається на перетворювач, $U_{НОМ}$ – номінальна напруга, яка відповідає відхиленню приладу на всю шкалу, l_U – величина допустимої, відносної похибки, яка відповідає класу точності вольтметра.

Значення середньоквадратичної похибки при вимірюванні частоти у результаті неточної установки режиму живлення розраховується за формулою

$$\delta_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{T} \cdot \frac{\partial T}{\partial U} U_{НОМ} \cdot l_U \right)^2} , \quad (3.15)$$

де U – напруга живлення на виході перетворювача.

Похибка за рахунок нелінійності амплітудної характеристики електронного частотоміра δ_3 подана у вигляді приведеної похибки $\pm l_3$ у тих випадках, коли використовують стандартний вимірювальний прилад. Якщо вважати розподіл похибки рівновірогідним, то середньоквадратичну похибку при визначенні температури визначають

$$\delta_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{l_3}{|T|} . \quad (3.16)$$

Похибку, яка виникає у результаті власних шумів і сторонніх наводок δ_4 оцінюють експериментальним шляхом. При використанні в електронному частотомірі середньовипрямленого значення задовільну точність для оцінки систематичної складової похибки δ_4 дає формула [82]:

$$M_4 = \left(\frac{M_{An}}{A_{КЛ}} \right)^2 , \quad (3.17)$$

де A_n – показник вихідного приладу за рахунок шумів і наводок, $A_{КЛ}$ – показник вихідного приладу в процесі калібрування.

Розподіл випадкової величини A_n дозволяє визначити математичне сподівання M_{An} і середньоквадратичне відхилення σ_{An} , отже

$$\delta_4 = \frac{M_{An}}{A_{KL}^2} \cdot \sigma_{An} \quad . \quad (3.18)$$

Похибка δ_5 визначається дискретним характером шкали відлікового приладу. Граничне значення похибки визначається половиною інтервалу між сусідніми поділами шкали. Відносну граничну похибку визначають таким чином:

$$\delta_{5ГРАН} = \pm \frac{1}{2A(\text{поділ})} \quad , \quad (3.19)$$

де $A(\text{поділ})$ – вимірне значення, яке визначається в поділах шкали.

Наприклад, якщо шкала розділена на 50 поділів і вимірне значення складає 0,7 від повної шкали, то $A=35$ поділів. Якщо вважати закон розподілу в межах $\pm\delta_{5ГРАН}$ рівновірогідним, то середньоквадратичне значення похибки має вигляд

$$\delta_5 = \frac{1}{2\sqrt{3}A(\text{поділ})} \quad . \quad (3.20)$$

Математичне сподівання цієї складової похибки дорівнює нулю.

Визначимо похибку, яка виникає за рахунок нелінійності характеристики перетворювача. Незалежно від способу аналітичного виразу характеристики перетворення розрахунки нелінійності усіх перетворювачів з малою девіацією частоти (20–30%) виконується шляхом розкладу характеристики у степеневий ряд. Таким чином, на робочій ділянці характеристика перетворювача записується у вигляді [42]

$$f = f_0(1 + \alpha x + \beta x^2 + \gamma x^3) \quad , \quad (3.21)$$

де

$$\alpha = \frac{1}{n} \quad , \quad \beta = -\frac{n-1}{2n^2} \quad , \quad \gamma = \frac{(n-1)(2n-1)}{6n^2} \quad .$$

У випадку LC – генератора, в якому використовуються біполярні транзистори $n=4$, тоді вираз (3.32) приймає вигляд:

$$f = f_0\left(1 + \frac{1}{4}x - \frac{3}{32}x^2 + \frac{21}{96}x^3\right) \quad . \quad (3.22)$$

При апроксимації січної мінімальна похибка визначається [82]:

$$\delta_6 = 0,26 \frac{\Delta f}{f_H} . \quad (3.23)$$

Виконаємо розрахунки повної похибки вимірювання тиску, при цьому числові значення параметрів такі:

$$T=20^\circ\text{C}, f_0=1,2 \cdot 10^6 \text{ Гц}, U=3\text{В}, l_U=\pm 1\%, l_4=\pm 2\%, M_{An}=0,01,$$

$$l_{An}=\pm 3\%, \frac{dP_0}{dU} = 0,125 \text{ кг/мм}^2/\text{В}, \frac{\Delta F_0}{F_H} = 0,38\% .$$

Розрахунки дають такі значення часткових похибок:

$$\delta_1 = 0,4\% , \quad \delta_2 = 0,32\% , \quad \delta_3 = 0,1\% , \quad \delta_4 = 0,0081\% , \quad M_5 = 10^{-4}\% ,$$

$$\delta_5 = 10^{-4}\% , \quad \delta_6 = 0,2\% ,$$

$$\delta = \sqrt{(0,4)^2 + (0,32)^2 + (0,1)^2 + (0,0081)^2 + (10^{-4})^2 + (0,2)^2} = \pm 0,56\%$$

Граничне значення випадкової похибки: $\pm 3\delta = \pm 1,68\% .$

Повна похибка дорівнює

$$\delta_{\text{ПОВ}} = 0,0001 \pm 1,68 \approx \pm 1,68\% .$$

Формули для розрахунків статичних метрологічних характеристик перетворювачів тиску, які складаються з швидкості зміни чутливості \dot{S} , прискорення зміни чутливості \ddot{S} , коефіцієнта впливу впливових величин на вихідний параметр $\dot{\beta}$, коефіцієнта впливу впливової величини на номінальну чутливість α , номінальної функції перетворення Y_H , похибки нелінійності Δ_H , мультиплікативної Δ_m та адитивної Δ_a похибок подані у таблиці 3.1 [83–85]. Розрахунки мультиплікативної та адитивної похибок для тензочувливих перетворювачів представлені на рисунок 3.15.

Таблиця 3.1 - Вихідні рівняння статичних метрологічних характеристик

Найменування метрологічних характеристик	Вихідні рівняння
1. Швидкість зміни чутливості	$\dot{S} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right]$
2. Прискорення зміни чутливості	$\ddot{S} = \frac{1}{6} \left[\frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \right]$
3. Коефіцієнти впливу впливових величин на вихідний параметр	$\dot{\beta} = \left[\frac{\partial y}{\partial k} \right]$
4. Коефіцієнт впливу впливової величини на номінальну чутливість	$\alpha = \left[\frac{\partial^2 y}{\partial x \partial k} \right]$
5. Номінальна функція перетворення	$Y_H = Sx + \dot{S} x^2 + \ddot{S} x^3$
6. Похибка нелінійності	$\Delta_H = \dot{S} x^2 + \ddot{S} x^3$
7. Мультиплікативна похибка	$\Delta_m = \alpha x (k - k_n)$
8. Адитивна похибка	$\Delta_a = \beta (k - k_n) + \dot{\beta} (k - k_n)^2$

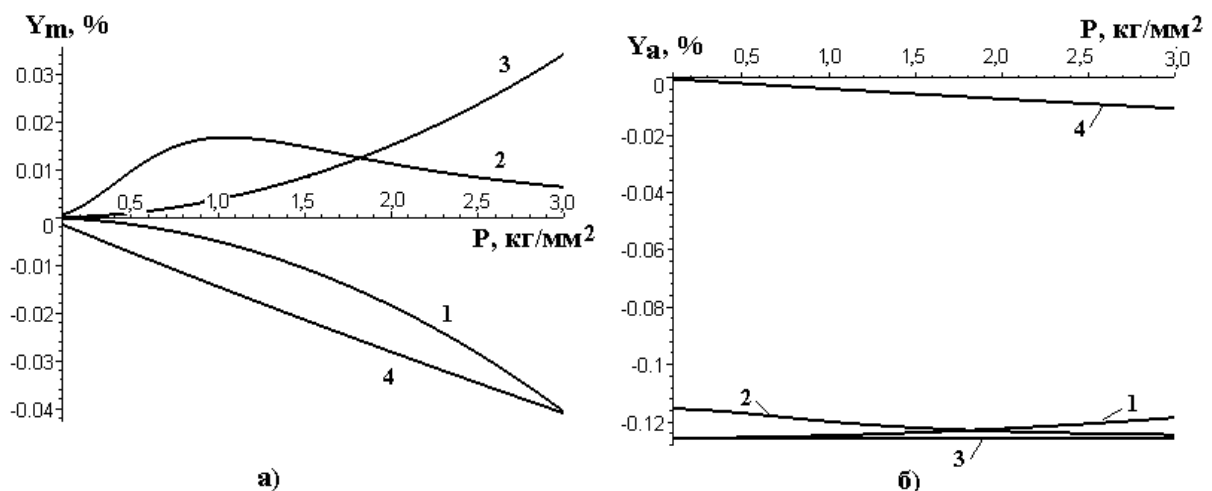


Рисунок 3.15 – Залежність мультиплікативної (а) та адитивної (б) похибок від тиску для різних конструкцій перетворювачів: 1 – перетворювач на основі біполярного і МОН транзисторів; 2 – перетворювач на основі біполярного і МОН транзисторів з тензочутливим резистивним мостом; 3 – перетворювач на основі біполярного тензотранзистора і МОН транзистора; 4 – перетворювач на основі МОН транзисторів з активною індуктивністю

Як видно з графіків, найменше значення мультиплікативної похибки має конструкція на основі біполярного і МОН–транзисторів з тензочутливим резистивним мостом, а кращою конструкцією з точки зору менших значень адитивної похибки є конструкція на основі МОН–транзисторів з активним індуктивним елементом.

4 АНАЛІЗ КОМЕРЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ РОЗРОБКИ (ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АУДИТ РОЗРОБКИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

4.1 Визначення рівня комерційного потенціалу розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором

Метою проведення технологічного аудиту є оцінювання комерційного потенціалу розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором, створеної в результаті науково-технічної діяльності. В результаті оцінювання можна буде зробити висновок щодо напрямів (особливостей) організації подальшого її впровадження з врахуванням встановленого рейтингу.

Для проведення технологічного аудиту залучимо 3-х незалежних експертів. У нашому випадку такими експертами будуть керівник магістерської роботи та провідні викладачі випускової та споріднених кафедр.

Оцінювання комерційного потенціалу розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором будемо здійснювати за 12-ю критеріями згідно рекомендацій.

Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором заносимо до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Результати оцінювання комерційного успіху розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором

Критерії	Експерти		
	д.т.н., професор Семенов А.О.	д.т.н., професор Осадчук О.В.	к.т.н., доцент Гаврілов Д.В.
	Бали, виставлені експертами		
1	1	2	1
2	2	2	3
3	2	2	2
4	1	2	1
5	3	3	2
6	2	2	2

Продовження таблиці 4.1.

7	4	3	3
8	2	3	4
9	1	2	1
10	3	3	2
11	4	3	3
12	2	2	2
Сума балів	27	29	26
Середньоарифметична сума балів, СБ	27		

За даними таблиці 4.1 робимо висновок щодо рівня комерційного потенціалу розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором. При цьому користуємося рекомендаціями, наведеними в таблиці 4.2. [50]

Таблиця 4.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0 – 10	Низький
11 – 20	Нижче середнього
21 – 30	Середній
31 – 40	Вище середнього
41 – 50	Високий

Таким чином, робимо висновок, щодо рівня комерційного потенціалу нашої розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором – середній.

4.2 Визначення рівня якості розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором

Оцінювання рівня якості розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором проводиться з метою порівняльного аналізу і визначення найбільш ефективного, з технічної точки зору, варіанта інженерного рішення.

Рівень якості – це кількісна характеристика міри придатності певного виду продукції для задоволення конкретного попиту на неї при порівнянні з відповідними базовими показниками за фіксованих умов споживання.

Абсолютний рівень якості розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від’ємним опором знаходимо обчисленням вибраних для її вимірювання показників, не порівнюючи їх із відповідними показниками аналогічних виробів. Для цього необхідно визначити зміст основних функцій, які повинні реалізовувати розробка, вимоги замовника до неї, а також умови, які характеризують експлуатацію, визначають основні параметри, які будуть використані для розрахунку коефіцієнта технічного рівня виробу. Система параметрів, прийнята до розрахунків, повинна достатньо повно характеризувати споживчі властивості інноваційного товару (його призначення, надійність, економічне використання ресурсів, стандартизація тощо).

Далі визначаємо величину параметрів якості в балах та встановлюємо граничні його значення (кращі, гірші, середні). Всі ці дані для кожного параметра заносимо в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні параметри та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від’ємним опором

Параметри	Абсолютне значення параметра			Коефіцієнт вагомості параметра
	Краще +5...+4	Середнє +3	Гірше +1...+2	
Точність вимірювання тиску	5			0,1
Кількість вимірювальних каналів	4			0,1
Діапазон вимірювання	5			0,7
Відносна похибка	5			0,1

Із врахуванням коефіцієнтів вагомості відповідних параметрів можна визначити абсолютний рівень якості інноваційного рішення за формулою:

$$K_{я.а.} = \sum_{i=1}^n R_{ні} \cdot a_i, \quad (4.1)$$

де $R_{ні}$ – числове значення i -го параметра інноваційного рішення, n – кількість параметрів інноваційного рішення, що прийняті для оцінювання, a_i – коефіцієнт

вагомості відповідного параметра (сума коефіцієнтів вагомості всіх параметрів повинна дорівнювати 1).

Отже, абсолютний рівень якості та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором становитиме – 4,9 бали.

Одночасно визначаємо відносний рівень якості та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором, що виробляється (проекується), порівнюючи її показники з абсолютними показниками якості найліпших вітчизняних та зарубіжних аналогів (товарів-конкурентів) (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Основні параметри та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором та товару-конкурента

Параметри	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (конкурент)	Новий		
Точність вимірювання тиску	3	6	2	0,1
Кількість вимірювальних каналів	4	5	1,25	0,1
Діапазон вимірювання	7	20	2,8	0,7
Відносна похибка	5	7	0,7	0,1

Відносний рівень якості та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором визначаємо за формулою:

$$K_{\text{я.в.}} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot a_i, \quad (4.2)$$

За розрахунками відносний рівень якості та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором становитиме – 2,35. Це означає, що наша розробка краща за якістю на 135% від товару-аналога. [51].

4.3 Визначення конкурентоспроможності розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором

У найширшому розумінні конкурентоспроможність товару – це можливість його успішного продажу на певному ринку і в певний проміжок часу. Водночас конкурентоспроможною можна вважати лише однорідну продукцію з технічними параметрами і техніко-економічними показниками, що ідентичні аналогічним показникам уже проданого товару. Для того, щоб високоякісний товар був одночасно і конкурентоспроможним, він має відповідати критеріям оцінювання споживачів конкретного ринку в конкретний час.

Дані для розрахунку загального показника конкурентоспроможності розробки необхідно занести до таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Нормативні, технічні та економічні параметри та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором і товару-конкурента

Параметри	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (конкурент)	Новий		
Точність вимірювання тиску	3	6	2	0,1
Кількість вимірювальних каналів	4	5	1,25	0,1
Діапазон вимірювання	7	20	2,8	0,7
Відносна похибка	5	7	0,7	0,1
Ціна за продукт, тис. грн.	12000	8300	0,69	-

Загальний показник конкурентоспроможності розробки (К) з урахуванням вищезазначених груп показників визначаємо за формулою:

$$K = \frac{I_{т.п.}}{I_{е.п.}} = \frac{2,35}{0,69} = 3,4, \quad (4.3)$$

де $I_{т.п.}$ – індекс технічних параметрів (відносний рівень якості інноваційного рішення); $I_{е.п.}$ – індекс економічних параметрів.

$$I_{e. п.} = \frac{P_{Hei}}{P_{Bei}} = \frac{8300}{12000} = 0,69, \quad (4.4)$$

де P_{Hei} , P_{Bei} – економічні параметри (ціна придбання та споживання товару) відповідно нового та базового товарів.

Згідно розрахунків загальний показник конкурентоспроможності – 3,4. Це означає, що наша розробка та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від’ємним опором більш конкурентна майже в 3,5 рази від товару-аналога.

4.4 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної, дослідно-конструкторської та конструкторсько-технологічної роботи

Розрахунок витрат, що стосуються виконавців розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від’ємним опором. Основна заробітна плата кожного із розробників (дослідників) Z_0 , якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери:

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} \cdot t, \quad (4.5)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.

У 2019 році величини окладів (разом з встановленими доплатами і надбавками) рекомендується брати в межах (5000...10000) грн. за місяць; T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p = (21...23)$ дні; t – число робочих днів роботи розробника (дослідника).

Зроблені розрахунки зводимо до таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Заробітна плата розробників

Посада	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник	10000	455	5	2275
Інженер-програміст	5000	227	5	1135
Консультанти	5000	227	5	1135
Всього:				4545

Основна заробітна плата робітників Z_p , якщо вони беруть участь у виконанні даного етапу роботи і виконують роботи за робочими професіями у випадку, коли вони працюють в наукових установах бюджетної сфери, розраховується за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n t_i \cdot C_i, \quad (4.6)$$

де t_i – норма часу (трудомісткість) на виконання конкретної роботи, годин; n – число робіт по видах та розрядах; C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує дану роботу. C_i визначається за формулою:

$$C_i = \frac{M_m \cdot K_i}{T_p \cdot T_{zm}}, \quad (4.7)$$

де M_m – розмір мінімальної заробітної плати за місяць, грн.; в 2019 році мінімальна заробітна плата становить – 4173 грн., K_i – тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду, T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p = 21 \dots 23$ дні; T_{zm} – тривалість зміни, зазвичай $T_{zm} = 8$ годин.

Величина чинних тарифних коефіцієнтів робітників відповідних розрядів для бюджетної сфери наведена в таблиці 4.6.1

Таблиця 4.6.1 - Величина тарифних коефіцієнтів робітників

Розряд	1	2	3	4	5	6	7	8
K_i	1,00	1,09	1,18	1,27	1,36	1,45	1,54	1,64

Таблиця 4.7 – Заробітна плата робітників

Найменування робіт	Трудомісткість, н-год.	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка	Тариф. коеф.	Величина, грн.
Налагоджувальні	3	4	30	1,27	90
Складальні	2	4	30	1,27	60
Механічні	1	3	28	1,18	28
Заготівельні	4	2	26	1,09	104
Всього					252

Додаткова заробітна плата Z_d всіх розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховується як (10...12)% від суми основної заробітної плати всіх розробників та робітників, тобто:

$$Зд = 0,1 \cdot (Зр + Зо) = 0,1 \cdot (4545 + 252) = 480 \text{ грн.} \quad (4.8)$$

Нарахування на заробітну плату Нзп розробників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою: де $Зо$ – основна заробітна плата розробників, грн.; $Зр$ – основна заробітна плата робітників, грн.; $Зд$ – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.; β – ставка єдиного внеску на загальнообов’язкове державне соціальне страхування, % (приймаємо для 1-го класу професійності ризику 22%).

$$\begin{aligned} \text{Нзп} &= 0,22 \cdot (Зр + Зо + Зд) = 0,22 \cdot (4545 + 252 + 480) = \\ &= 1161 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Амортизація обладнання, комп’ютерів та приміщень А, які використовувались під час (чи для) виконання даного етапу роботи.

Дані відрахування розраховують по кожному виду обладнання, приміщенням тощо.

У спрощеному вигляді амортизаційні відрахування А в цілому бути розраховані за формулою [52]:

$$A = \frac{Ц \cdot \text{На}}{100} \cdot \frac{T}{12}$$

де $Ц$ – загальна балансова вартість всього обладнання, комп’ютерів, приміщень тощо, що використовувались для виконання даного етапу роботи, грн.; На – річна норма амортизаційних відрахувань. Для нашого випадку можна прийняти, що $\text{На} = (10...25)\%$; T – термін, використання обладнання, приміщень тощо, місяці.

Таблиця 4.8 - Амортизаційні відрахування

Найменування	Ціна, грн.	Норма амортизації, %	Термін використання, м.	Сума амортизації
ПК +панель оператора	7000	20	2	233
ПЛК	7000	20	2	233
Інше обладнання	10000	20	1	167
Всього				633

Витрати на матеріали М, що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$M = \sum_1^n N_i \cdot C_i \cdot K_i, \text{ грн}$$

де N_i – кількість матеріалу i -го виду, шт.; C_i – ціна матеріалу i -го виду, грн.; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$; n – кількість видів матеріалів.

Таблиця 4.9 - Матеріали, що використані на розробку

Флюс ФКСН	4	0,05	0,2
Каніфоль	11	0,3	3,3
Припій ПОС-61	500	0,1	50
Всього, з урахуванням коефіцієнта транспортних витрат	58,85		

Витрати на комплектуючі К, що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$K = \sum_1^n N_i \cdot C_i \cdot K_i, \text{ грн}$$

де N_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.; C_i – ціна комплектуючих i -го виду, грн.; K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$; n – кількість видів комплектуючих.

Таблиця 4.10 - Комплектуючі, що використані на розробку

Найменування матеріалу	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість, грн.
Датчик тиску	1	800	800
Корпус	1	200	200
Тумблер	1	15	15
Діоди стану	2	2	4
Інтерфейс	2	2000	4000
Джерело напруги	1	170	170
Всього, з урахуванням коефіцієнта транспортних витрат	5708		

Витрати на силову електроенергію Ve , якщо ця стаття має суттєве значення для виконання даного етапу роботи, розраховуються за формулою:

$$Ve = V \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot Kп, \text{ грн}$$

V – вартість 1 кВт-год. електроенергії, в 2019 р. $V \approx 8,45$ грн./кВт; Π – установлена потужність обладнання, кВт; Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, годин, $Kп$ – коефіцієнт використання потужності; $Kп < 1$.

Потужність обладнання складає – 0,5 кВт.

Кількість годин роботи складає – 700 годин.

Коефіцієнт викор. потужності -0,9.

$Ve=2662$ грн.

Інші витрати $V_{ін}$ охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо.

Інші витрати $Iв$ можна прийняти як (100...300)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які були виконували дану роботу, тобто:

$$Iв = 2 \cdot (Zо + Zр) = 2 \cdot (4545 + 98,5) = 9287 \text{ грн.} \quad (4.10)$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати на виконання даної частини (розділу, етапу) роботи – V .

$$V = 24786 \text{ грн.}$$

4.5 Розрахунок загальних витрат на розробку та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором

Загальна вартість всієї наукової роботи визначається за $V_{заг}$ формулою:

$$V_{заг} = \frac{Iв}{\alpha} = \frac{9287}{0,6} = 15478 \text{ грн,} \quad (4.11)$$

де α – частка витрат, які безпосередньо здійснює виконавець даного етапу роботи, у відн. одиницях.

4.6 Прогнозування витрат на виконання та впровадження та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором

Прогнозування загальних витрат ЗВ на виконання та впровадження та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором здійснюється за формулою [54]:

$$ЗВ = \frac{Взаг}{\beta} = \frac{15478}{0,5} = 30957 \text{ грн,} \quad (4.12)$$

де β – коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання даної роботи.

Так, якщо розробка знаходиться: на стадії науково-дослідних робіт, то $\beta \approx 0,1$; на стадії технічного проектування, то $\beta \approx 0,2$; на стадії розробки конструкторської документації, то $\beta \approx 0,3$; на стадії розробки технологій, то $\beta \approx 0,4$; на стадії розробки дослідного зразка, то $\beta \approx 0,5$; на стадії розробки промислового зразка, $\beta \approx 0,7$; на стадії впровадження, то $\beta \approx 0,9$.

4.7 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором

З метою прогнозування комерційних ефектів від реалізації та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором складемо таблицю вихідних показників, за рахунок яких і відбуватиметься отримання комерційного ефекту.

Таблиця 4.11 – Вихідні дані для прогнозування комерційного ефекту від реалізації та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором

Рік реалізації розробки	1	2	3
Кількість од. реалізації, шт.	200	1500	7000

Величина зростання ціни реалізації та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором, грн. – 3700 грн.

Кількість продукції, що випускалась до впровадження та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором – 1500 шт.

Збільшення чистого прибутку підприємства Π_i для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, розраховується за формулою:

$$\Delta \Pi_i = \sum_1^n (\Delta \text{Ц}0 \cdot N + \text{Ц}0 \cdot \Delta N) i \cdot \rho \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{v}{100}\right) \quad (4.13)$$

де $\Delta \Pi_0$ – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році. Зазвичай таким показником може бути ціна одиниці нової розробки; N – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки; ΔN – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки; $\text{Ц}0$ – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки; n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки; λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. У 2018 р. ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт – 0,8333. З 2014 року ставка податку на додану вартість встановлена на рівні 17%, а коефіцієнт – 0,8547; ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. Рекомендується приймати – 0,2...0,3; v – ставка податку на прибуток. У 2018 році – 21%, у 2013 році – 19%, а з 2014 року – 16%.

Збільшення чистого прибутку підприємства Π_i протягом першого року складе:

$$\Delta \Pi_1 = 94496,2 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку підприємства Π_i протягом другого року (відносно базового року, тобто року до впровадження результатів наукової розробки) складе:

$$\Delta \Pi_2 = 562172 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку підприємства протягом третього року (відносно базового року, тобто року до впровадження результатів наукової розробки) складе:

$$\Delta \Pi_3 = 591702 \text{ грн.}$$

4.8 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та період їх окупності

Визначення абсолютної ефективності вкладених інвестицій у розробку та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором/

Для цього користуються формулою:

$$E_{абс} = (ПП - PV), \quad (4.14)$$

де ПП – приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство (організація) від реалізації результатів наукової розробки, грн.; PV – теперішня вартість інвестицій $PV = ЗВ$, грн.

У свою чергу, приведена вартість всіх чистих прибутків ПП розраховується за формулою:

$$ПП = \sum_1^t \frac{\Delta\Pi_i}{(1+\tau)^t} \quad (4.15)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДДКР, грн.; t – період часу, протягом якого виявляються результати впровадженої НДДКР, роки; τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,1; t – період часу (в роках) від моменту отримання чистого прибутку до точки „0”.

$$\begin{aligned} ПП &= 747524 \text{ грн.}, \\ E_{абс} &= 747524 - 30957 = 716567 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Оскільки $E_{абс} > 0$, то результат від проведення наукових досліджень та їх впровадження принесе прибуток, але це також ще не свідчить про те, що інвестор буде зацікавлений у фінансуванні розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором.

4.9 Розрахунок відносної ефективності вкладених коштів в НДДКР та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором

Для цього користуються формулою:

$$E_B = \sqrt[t]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1 \quad (4.16)$$

де $E_{абс}$ – абсолютна ефективність вкладених інвестицій, грн.; PV – теперішня вартість інвестицій $PV = ZB$, грн.; $T_{ж}$ – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_{в} = 1,8$$

Далі, розрахована величина $E_{в}$ порівнюється з мінімальною (бар'єрною) ставкою дисконтування, що дорівнює [55]:

$$\tau = d + f, \quad (4.17)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2018 році в Україні $d = (0,14...0,2)$; f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина $f = (0,05...0,1)$, але може бути і значно більше.

$$E_{в} = 1,8 \geq \tau = 0,2 + 0,1 = 0,3.$$

Оскільки величина $E_{в} > \tau_{мін}$, то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

4.10 Розрахунок терміну окупності коштів, вкладених в наукову розробку та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором

Термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій $T_{ок}$ можна розрахувати за формулою:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_{в}} = \frac{1}{1,8} = 0,55 \text{ року.} \quad (4.18)$$

Оскільки $T_{ок} < 3...5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором є доцільним.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Головна задача охорони праці – мінімізація імовірності виникнення виробничого травматизму та захворювань при забезпеченні регламентованих параметрів умов праці.

В цьому розділі проводиться розгляд небезпечних, шкідливих та уражаючих для людини і навколишнього довкілля чинників, що утворюються при проведенні розробки параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором. В ньому розглядаються, зокрема, технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці, визначення безпечної відстані від джерела електричного поля, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки, безпека в надзвичайних ситуаціях.

В процесі розробки даного пристрою на працівників діють ті чи інші небезпечні і шкідливі виробничі фактори (НШВФ) фізичної та психофізіологічної груп згідно [55].

Фізичні небезпечні і шкідливі виробничі фактори: понижена або підвищена температура повітря робочої зони, підвищений рівень шуму на робочому місці, підвищений рівень статичної електрики, відсутність або недостатність природного освітлення, недостатня освітленість робочої зони, підвищена яскравість світла, відбита або пряма блискучість.

Психофізіологічні НШВФ: нервово-психічні перевантаження: розумове перенапруження, монотонність праці, перенапруження аналізаторів.

5.1 Технічні рішення з виробничої санітарії та гігієни праці

5.1.1 Мікроклімат та склад повітря робочої зони

Вибираємо для приміщення, в якому проводяться роботи з розробки параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором, категорію важкості робіт за фізичним навантаженням – легка Іб.

Відповідно до [56] допустимі показники мікроклімату у робочій зоні для холодного та теплого періодів року приведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Нормовані допустимі показники мікроклімату [56]

Період року	Категорія робіт	Температура повітря, °С для робочих місць		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
		постійних	непостійних		
Холодний	Іб	20-24	17-25	75	0,2
Теплий	Іб	21-28	19-30	60 при 27°С	0,1-0,3

Розкид значень температури повітря за висотою робочої зони для всіх категорій робіт допускається до 3°С. При опроміненні менше 25% поверхні тіла людини, допустима інтенсивність теплового опромінення – 100 Вт/м².

Вміст шкідливих речовин в повітрі робочої зони не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій (ГДК), які використовуються при проектуванні виробничих приміщень (будівель), обладнання, технологічних процесів, вентиляцій, для контролю за якістю виробничого середовища. ГДК шкідливих речовин, які використовуються у даному виробничому приміщенні наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин в повітрі робочої зони

Назва речовини	Параметр	Значення	Клас небезпеки
Пил нетоксичний	ГДК, мг/м ³	0,15	4
Іони n ⁺ , n ⁻	число іонів в 1 см ³ повітря	50000	–

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату і чистоти повітря робочої зони запропоновано:

1) в приміщенні має бути розміщена система кондиціонування для теплового і опалення для холодного періодів року;

2) для підвищення вологості повітря слід використовувати зволожувачі або розташовувати місткості з водою за типом акваріумів поблизу опалювальних приладів;

3) застосування витяжної вентиляції, яка видаляє забруднення або нагріте повітря з приміщення, а також за допомогою неї контролюється швидкість руху повітря і вологість.

5.1.2 Виробниче освітлення

З метою створення раціональних гігієнічних умов на робочих місцях значні вимоги пред'являються щодо якісних та кількісних параметрів освітлення.

З точки зору задач зорової роботи в приміщенні, в якому проводяться роботи з розробки параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором, згідно [57] визначаємо, що вони відповідають III розряду зорових робіт. Приймаємо контраст об'єкта з фоном – великий та характеристику фону – середню, яким відповідає підрозряд зорових робіт Γ .

Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення (КПО) та мінімальні значення освітленості при штучному освітленні приведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Нормативні значення коефіцієнта природного освітлення і мінімальні освітленості при штучному освітленні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізн., мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізн. з фоном	Характеристика фону	Освітленість при штучному освітленні, лк			КПО, %	
						комбіноване		загальне	Природне освітлення (бокове)	Суміщене освітлення (бокове)
						всього	у т. ч. від загального			
Високої точності	0,3-0,5	III	Γ	великий	середній	400	200	200	2	1,2

Оскільки приміщення знаходиться у м. Вінниця (2-га група забезпеченості природним світлом), а світлові проєми розташовані за азимутом 135° , то для таких умов КЕО визначатиметься за формулою [57,584]

$$e_N = e_n m_N [\%], \quad (5.1)$$

де e_n – табличне значення КЕО, %;

m_N – коефіцієнт світлового клімату;

N – порядковий номер групи забезпеченості природним світлом.

За відомими значеннями одержимо нормовані значення КПО для бокового та суміщеного освітлення:

$$e_{N.6} = 2 \cdot 0,85 = 1,7 (\%);$$

$$e_{N.c} = 1,2 \cdot 0,85 = 1,02 (\%).$$

З метою встановлення нормативних значень параметрів освітлення передбачено:

1) при недостатньому природному освітлені в світлу пору доби доповнення штучним завдяки використанню газорозрядних ламп з утворенням системи суміщеного освітлення;

2) використання штучного освітлення у темну пору доби.

5.1.3 Виробничі віброакустичні коливання

Зважаючи на те, що під час експлуатації пристроїв крім усього іншого обладнання використовується устаткування, робота якого супроводжується шумом та вібрацією, необхідно передбачити захист від шуму та вібрації.

Встановлено, що приміщення, в якому проводиться робота з розробки параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором може містити робочі місця із шумом та вібрацією, який виходить від сусідніх виробничих приміщень.

З метою запобігання травмуванню працюючих від дії шуму та вібрації вони підпадає під нормування. Основним нормативом з питань виробничого шуму, діючим в нашій країні, є [59], у відповідності з яким нормовані рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні шуму на робочих місцях у промислових приміщеннях не повинні бути більшими ніж значення, що наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Допустимі рівні шуму і еквівалентні рівні звуку

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

Норми виробничих вібрацій наведені в таблиці 5.5 для 3-ї категорії (технологічна) типу "в".

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні вібрації [60]

Гранично допустимі рівні віброприскорення, дБ, в октавних полосах із середньо-геометричними частотами, Гц						Коректовані рівні віброприскорення, дБА
2	4	8	16	31,5	63	
36	33	33	39	45	51	33

З метою встановлення нормованих показників віброакустичних коливань в приміщенні передбачено:

- 1) постійне змащування підшипників вентиляторів системи вентиляції;
- 2) проведення перевірки рівнів шуму та вібрації.

5.1.4 Виробничі випромінювання

Аналіз умов праці показав, що приміщення, де проводиться робота з розробки може містити електромагнітні випромінювання.

Гранично допустимі рівні електромагнітних полів наведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Гранично допустимі значення електромагнітних полів на робочих місцях згідно [68]

Параметри та одиниці вимірювання	Граничні значення в діапазонах частот					
	1-10 кГц	10-60 кГц	0,06-3 МГц	3-30 МГц	30-50 МГц	50-300 МГц
$E_{Гд}$, В/м	1000	700	500	300	80	
$E_{H_{Гд}}$, $(В/м)^2 \cdot год$	120000	40000	20000	7000	800	
$H_{Гд}$, А/м	75	57	50	–	3,0	–
$E_{H_{H_{Гд}}}$, $(А/м)^2 \cdot год$	675	390	200	–	0,72	–

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

Виконати розрахунок безпечної відстані від джерела електричного поля, якщо сила струму в провіднику (антені) $I = 4,3$ А, а частота поля $f = 24$ МГц. Довжина провідника (антени) $L = 5,2$ м.

Біля джерела ЕМВ виділяють ближню зону (зону індукції), що знаходиться на відстані $r \leq \lambda / 2\pi$, і далеку зону (зону випромінювання), для якої $r > \lambda / 2\pi$, де λ – довжина хвилі, м.

Безпечну відстань від джерела електричного поля для ближньої зони можна визначити за формулою

$$E_{\text{бл}} = \frac{IL}{4\pi^2 f \epsilon r^3} \text{ [В/м]}, \quad (5.2)$$

звідки

$$r = \sqrt[3]{\frac{IL}{4\pi^2 f \epsilon E_{\text{бл}}}} \text{ [м]}, \quad (5.3)$$

де $E_{\text{бл}}$ – напруженість електричного поля дальньої зони, В/м;

I – сила струму в провіднику (антені), А;

L – довжина провідника (антени), м;

f – частота електромагнітного поля, Гц;

ϵ – діелектрична проникність середовища, Ф/м (для повітря $\epsilon = 1$ Ф/м).

Для діапазону частот 3...30 МГц $E_{\text{бл}} = 300$ В/м.

Підставляючи відомі значення у формулу (5.3), отримаємо:

$$r = \sqrt[3]{\frac{4,3 \cdot 5,2}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 24 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 300}} = 0,00043 \text{ (м)}.$$

5.2 Технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором

5.2.1 Безпека щодо організації робочих місць

Конструкція робочого місця, його розміри і взаємне розташування його елементів повинні відповідати антропометричним, фізіологічним та психофізіологічним властивостям людини, а також характеру роботи [61].

Площа одного робочого місця повинна складати не менше 6,0 м², об'єм приміщення – не менше як 20 м³, висота – не менше 3,2 м [62].

Інтер'єр приміщень потрібно оздоблювати дифузно-віддзеркалювальними матеріалами з коефіцієнтом відбиття: стелі 0,7-0,8; стін 0,4-0,5; підлоги 0,2-0,3. Поверхня підлоги повинна бути рівною, без вибоїн, не слизькою, зручною для

вологого прибирання, мати антистатичні властивості. Забороняється застосовувати для оздоблення інтер'єру полімери, що виділяють у повітря шкідливі хімічні речовини.

5.2.2 Електробезпека

Причинами ураження електричним струмом в даному приміщенні можуть бути: робота під напругою при ремонтних роботах, несправність устаткування, випадкове торкання до струмоведучих частин або металевих частин, що опинилися під напругою. Згідно [63] дане приміщення відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом в наслідок наявності значної (більше 75 %) вологості. Тому безпека експлуатації електрообладнання повинна забезпечуватись комплексом заходів, які включають використання ізоляції струмоведучих елементів, захисного заземлення, захисних блокувань тощо [64].

5.2.3 Пожежна безпека

Відповідно до [65] приміщення, де проводиться робота з розробки параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором, відноситься до категорії пожежної небезпеки В. Це приміщення відноситься до 3-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1, Г2. До елементів покриттів не висовуються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горючого покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку.

Мінімальні межі вогнестійкості конструкцій розглядуваного приміщення наведені в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Значення мінімальних меж вогнестійкості приміщення [65]

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

Примітка. R – втрати несучої здатності; E – втрати цілісності; I – втрати теплоізолювальної спроможності; M – показник здатності будівельної конструкції поширювати вогонь (межа поширення вогню); M0 – межа поширення вогню дорівнює 0 см; M1 – M δ 25 см – для горизонтальних конструкцій; M δ 40 см – для вертикальних і похилих конструкцій; M2 – M > 25 см – для горизонтальних конструкцій; M > 40 см – для вертикальних і похилих конструкцій, нн – не нормується.

В таблиці 5.8 приведено протипожежні норми проектування будівель і споруд. Вибираємо, що приміщення, в якому проводиться робота з розробки, має бути оснащено двома вогнегасниками, пожежним щитом, ємністю з піском [66].

Таблиця 5.8 – Протипожежні норми проектування будівель і споруд [67]

Об'єм приміщення, тис. м ³	Категорія пожежної небезпеки	Ступінь вогнестійкості	Відстань, м, при щільності людського потоку в загальному проході, осіб/м ²			Кількість людей на 1 м ширини евакуйоводу	Протипожежні розриви, м, для ступеня їх вогнестійкості			Найбільша кількість поверхів	Максимально допустима площа поверху, м ² , для кількості поверхів		
			до 1	2-3	4-5		I,II	III	IV,V		1	2	3 і більше
до 15	B	3	100	60	40	110	9	12	15	3	5200	3500	2600

Примітки: н.о. – не обмежується, н.н. – не нормується.

5.5 Безпека у надзвичайних ситуаціях

Дослідження стійкості роботи параметричного перетворювача тиску в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій.

Підсилювачі зустрічаються повсюди, де застосовується звук: в аеропортах, вокзалах, літаках, тому їх функціонування є надзвичайно важливим при НС. Вихід з ладу приладів військового призначення може збільшити кількість жертв в разі і призведе до дезорієнтації. Також вихід з ладу таких пристроїв не дозволить вчасно сповістити людей про небезпеку.

Пристрої параметричного перетворювача тиску є пристроями подвійного застосування. В умовах НС вони повинні працювати без перебоїв, тому розробка заходів щодо покращення роботи таких блоків і пристроїв в умовах ЕМІ та дії іонізуючих випромінювань є актуальною.

Дія електромагнітного імпульсу також може призвести до загоряння чутливих електричних та електронних елементів, а також до серйозних порушень в цифрових і контрольних пристроях. Електромагнітний імпульс пробиває ізоляцію, випалює елементи мікросхем, викликає коротке замикання. Саме тому є необхідність запобіганню при дії цього фактору на електричне та електронне обладнання.

5.3.1 Дослідження стійкості роботи параметричного перетворювача тиску в умовах дії іонізуючих випромінювань

За критерій безпеки роботи параметричного перетворювача тиску в цих умовах приймається таке максимальне значення дози опромінення елементної бази, при якому в елементній базі можуть виникнути зміни, але параметричного перетворювача тиску ще буде працювати з необхідною якістю.

Визначаємо граничні значення дози опромінення $D_{грі}$, для елементної бази системи, при яких виникають незворотні зміни. Отримані дані заносимо в таблицю 5.9.

Таблиця 5.9 – Граничні значення експозиційних доз параметричного перетворювача тиску

Блоки елементів	Елементи РЕС	$D_{гр1}, P$	$D_{гр}, P$
1 Основний пристрій	Резистори	10^5	10^5
	Конденсатори	10^6	
	Транзистори 2SC2500	10^6	
	Транзистори 2SC1815	10^6	
	Транзистори 2SB1116	10^6	
2 Блок живлення	LM 2902	10^2	10^2
	LM 672F	10^5	
3 Система керування	Діоди Д161	10^5	10^4
	Діоди Д20	10^5	
	Кнопки ВП 170	10^5	

Час наробки на відмову кожного елемента : транзистори та діоди- 5 років(43829 год), мікросхеми - 2 роки(17531 год), блок живлення - 3 роки (26297 год), конденсатори та резистори -4 роки (35063 год).

Проаналізувавши дані таблиці 5.1, визначили, що самим уразливим елементом системи з мінімальною дозою $D_{ср1} = 10^5 P$ та 10^2 є такі резистори та мікросхеми. Визначаємо можливу дозу опромінення за формулою [66]:

$$D_M = \frac{2 \cdot P_1 (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_{п}})}{K_{осл}}, \quad (5.4)$$

де P_1 – максимальне значення рівня радіації ($P_1 = 3,67 P/\text{год}$);

t_k – час кінця опромінення;

$t_{п}$ – час початку опромінення ($t_{п} = 1 \text{ год}$).

$K_{осл}$ – коефіцієнт послаблення радіації ($K_{осл} = 4$).

Для транзисторів та діодів:

$$D_{м1} = \frac{2 \cdot 9,1 (\sqrt{43829} - \sqrt{1})}{4} = 948 (P);$$

Для мікросхем:

$$D_{м2} = \frac{2 \cdot 9,1 (\sqrt{17531} - \sqrt{1})}{4} = 597,4 (P);$$

Для блоку живлення:

$$D_{м3} = \frac{2 \cdot 9.1 (\sqrt{26297} - \sqrt{1})}{4} = 733 (P);$$

Для конденсаторів та резисторів:

$$D_{м4} = \frac{2 \cdot 9.1 (\sqrt{35063} - \sqrt{1})}{4} = 847 (P).$$

Допустимий час роботи РЕА в заданих умовах:

$$t_d = \frac{D_{гр} \cdot K_{осл} + 2 \cdot P_1 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot P_1}, \quad (5.5)$$

$$t_d = \frac{10^2 \cdot 4 + 2 \cdot 9.1 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 9.1} = 22,97 \text{ (год)}.$$

$$D_{м1} = 948(P) < 10^5 \quad D_{м2} = 597,4(P) > 10^2$$

$$D_{м3} = 733(P) < 10^5 \quad D_{м4} = 847(P) < 10^5$$

Так як $D_{гр} > D_m$, то параметричний перетворювач тиску не буде працювати стійко в умовах іонізуючих випромінювань. Тому варто підвищити $K_{осл}$, або змінити місце розташування апаратури.

5.3.2 Дослідження стійкості роботи параметричного перетворювача тиску в умовах дії електромагнітного імпульсу

Визначимо горизонтальну складову напруженості електромагнітного поля:

$$E_z = 9,87 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} = 9,87 \text{ (В/м)}.$$

Максимальні довжини струмопровідних частин:

Блок живлення $l_r = 0,16(\text{м})$, $l_b = 0,35(\text{м})$;

Основний пристрій $l_r = 0,29(\text{м})$, $l_b = 0,65(\text{м})$;

Визначимо напругу наведення у вертикальній і горизонтальній струмопровідних частинах:

$$U_{вi} = E_r \cdot L_{вi} \quad (5.3)$$

$$U_{rи} = E_b \cdot L_{rи} \quad (5.4)$$

$$U_{1вi} = 0,35 \cdot 9,87 = 0,276(\text{кВ})$$

$$U_{1rи} = 0,16 \cdot 9,87 = 0,092(\text{кВ})$$

$$U_{2вi} = 0,65 \cdot 9,87 = 1,84$$

$$U_{2rи} = 0,29 \cdot 9,87 = 2,76(\text{кВ})$$

Визначаємо допустимі коливання напруги живлення для різних блоків [67]:

$$U_{\text{д}} = U_{\text{ж}} + \frac{U_{\text{ж}}}{100} \cdot N, \quad (5.6)$$

де N – відсоток допуску.

$$U_{\text{д1}} = 220 + \frac{220}{100} \cdot 5 = 230.1 \text{ (В)}.$$

$$U_{\text{д2}} = 5 + \frac{5}{100} \cdot 5 = 5.25$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки для кожної ділянки:

Горизонтальної:

$$K\sigma_{\text{г1}} = 20 \cdot \lg \frac{230.1}{0.092} = 67.96 \text{ (дБ)},$$

$$K\sigma_{\text{г2}} = 20 \cdot \lg \frac{5.25}{1.84} = 9.1 \text{ (дБ)},$$

Вертикальної:

$$K\sigma_{\text{в1}} = 20 \cdot \lg \frac{230.1}{0.276} = 58.42 \text{ (дБ)},$$

$$K\sigma_{\text{в2}} = 20 \cdot \lg \frac{5.25}{2.76} = 5.58 \text{ (дБ)},$$

Отримані дані заносимо в таблицю 5.10.

Таблиця 5.10 – Значення коефіцієнтів безпеки елементів параметричного перетворювача тиску

№	Найменування блоків	$K\sigma_{\text{г}}$, дБ	$K\sigma_{\text{в}}$, дБ	Результат дії
1	Блок живлення, 220 В	67,96	58,42	Стійкий
2	Основний пристрій, 5 В	9,1	5,58	Нестійкий

Границя стійкості системи керування $K\sigma_{\text{мін}} = 5.58$ дБ, а $K\sigma_{\text{сп}} = 67.96$. Отже, параметричний перетворювач тиску є нестійким в умовах дії електромагнітного імпульсу.

5.4 Розробка заходів по підвищенню стійкості роботи параметричного перетворювача тиску в умовах надзвичайних ситуацій

Дія підвищення стійкості необхідно використовувати екранування РЕА.

Визначимо перехідне гасіння енергії електричного поля сталевим екраном.

Розрахуємо товщини захисних екранів:

$$t = \frac{A}{5,2 \cdot \sqrt{f}}, \quad (5.7)$$

де f - найбільш характерна частота, ($f = 15$ кГц).

Для системи радіодоступу:

$$t_1 = \frac{40 - 38,72}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,0025 \text{ (см)};$$

Обираємо товщину стінки на порядок вище, для того щоб забезпечити необхідний захист обладнання. Прийmemo $t=0,1$ см.

$$A = 5,2 * 0,1 * \sqrt{15000} = 63 \text{ (дБ)}$$

Отже нам потрібно взяти сталевий екран товщиною 0,1 см, який забезпечує згасання енергії електричного поля 63 дБ.

Висновки. Також в результаті проведених розрахунків визначено, що стійкість роботи параметричного перетворювача тиску не стійка при заданому рівні радіації 3,67 Р/год. До дії ЕМП підсилювач низької частоти виявився нестійким, на відміну від блоку живлення. Застосування екранування РЕА суттєво підвищує її стійкість в умовах дії електромагнітного імпульсу.

В результаті застосування екранів в параметричному перетворювачі тиску пристрій буде працювати стійко аж до значення напруженості вертикальної складової 9,87 кВ/м. Ще одним варіантом підвищення стійкості апаратури до дії випромінювання є зменшення струмопровідних провідників (їх довжини) шляхом вдосконалення схемоустаткування пристрою. Крім цього необхідно екранувати кабелі живлення, а також застосувати прилади, які б вимикали радіотехнічні схеми на період впливу радіації.

Висновки до розділу

В результаті виконання цього розділу було розглянуто такі питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення безпечної відстані від джерела електричного поля, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором, безпека в надзвичайних ситуаціях.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз публікацій, присвячених теоретичним і експериментальним дослідженням деформаційних ефектів в кремнії і конструкціям перетворювачів механічних величин на їх основі показує, що розробка мікроелектронних частотних перетворювачів тиску є перспективним напрямком у розвитку апаратурних засобів виміру тиску для сучасних мікропроцесорних систем контролю і керування. Подібні перетворювачі тиску представляють високі метрологічні показники поряд з тенденцією до мінітюаризації, поліпшенням вартісних характеристик, можливістю їх інтелектуалізації на основі конструктивної та технологічної сумісності з цифровими пристроями обробки вимірюваної інформації.
2. Аналіз сучасного рівня розробок конструкцій перетворювачів тиску дозволив визначити можливі шляхи поліпшення їх параметрів: чутливості, температурної стабільності, стабільності електричних характеристик перетворювачів, надійності, собівартості тощо.
3. Використання генеруючого принципу реалізації електричної схеми радіовимірювального перетворювача тиску на основі напівпровідникових структур з від'ємним опором дозволяє одержувати в якості інформативного параметра частоту, що виключає застосування аналого–цифрових перетворювачів з вхідними підсилювачами для суміщення цих напівпровідникових перетворювачів з цифровими пристроями обробки інформації, підвищує чутливість перетворювача, елементно спрощує електричну схему індикації деформаційних ефектів. Створення математичних моделей частотних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур з від'ємним опором з врахуванням їх тензореактивних властивостей, яке обумовлене наступною розробкою і промисловою реалізацією таких перетворювачів, базується на з'ясуванні характеру залежності електричних параметрів та характеристик напівпровідникових пристроїв, зокрема транзисторів, від тиску.
4. Удосконалена фізико–математична модель деформаційних ефектів в напівпровіднику (кремнії), а також математична модель деформаційних ефектів в МОН–тензотранзисторах, яка містить однозначні аналітичні залежності електричних параметрів та характеристик від прикладеного тиску, яка відрізняється від існуючих тим, що аналітично визначає залежності основних електрофізичних параметрів кремнію (ширини забороненої зони, ефективних мас, рухливостей та концентрацій носіїв заряду) від прикладеного до кристалу тиску.

5. В результаті математичного моделювання отримані аналітичні вирази, які використовуються для визначення функції перетворення та чутливості мікроелектронних частотних перетворювачів тиску на основі біполярних транзисторних структур з від'ємним опором.
6. Розроблені економічні частотні перетворювачі тиску на основі тензочутливих біполярних транзисторних структур з від'ємним опором з ємнісним характером реактивної складової повного опору структури, які можуть бути виготовлені на основі стандартної групової інтегральної технології у вигляді автогенераторних вимірювальних перетворювачів тиску з вихідним частотним сигналом.
7. Проведені експериментальні дослідження, які показали, що чутливість частотного перетворювача тиску на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором складає 0,5 – 3,0 кГц/кПа в діапазоні тиску 60 кПа – 125 кПа. За узагальненими показниками технічної досконалості, розроблені мікроелектронні частотні перетворювачі тиску кращі в 2,5 рази в порівнянні з існуючими. Аналіз проведених теоретичних і експериментальних досліджень показав, що математична модель перетворювача тиску на основі тензочутливих біполярних та МОН транзисторних структур описує поведінку перетворювачів з похибкою $\pm 5\%$.

Розрахунки на економічність приладу показали, що його впровадження у виробництво є економічно ефективним. Оскільки Ток < 3...5-ти років, то фінансування даної наукової розробки та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором є доцільним.

В розділу охорони праці було розглянуто як безпеки в надзвичайних ситуаціях, як технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії, визначення безпечної відстані від джерела електричного поля, технічні рішення з промислової та пожежної безпеки під час проведення розробки параметричного перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від'ємним опором, безпека в надзвичайних ситуаціях.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Датчики фирмы MOTOROLA. Обзор продукции фирмы MOTOROLA. –М.: ОДЭКА, 1998. – 75 с.
2. Зейферт К. Измерительные преобразователи механических величин для систем автоматизации // Экспресс–информация: Контрольно–измерительная техника. – М.: ВИНТИ. – 1990. – №39. – С. 1 – 10.
3. Како Н., Яманэ Я. Датчики и микро–ЭВМ: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 120 с.
4. Бабаян Р.Р. Преобразователи неэлектрических величин с частотным выходом // Приборы и системы управления. – 1996. – №11. – С. 24 – 27.
5. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. –М.: Энергоатомиздат, 1982. – 136 с.
6. Микроэлектронный механоэлектрический датчик: А.с. 1385951 А1 СССР, МКИ Н 01 L 29/84 / Ваганов В.И., Случак И.И. (СССР). –№3995169/24–25; Заявлено 05.11.85; Опубл. 1988. – 3 с.
7. Преобразователь механического воздействия в электрический сигнал: А.с. 1387812 А1 СССР, МКИ Н 01 L 29/84 / Бритвин С.О., Ваганов В.И., Эрглис И.К. –№3974251/31–25; Заявлено 05.11.85; Опубл. 1988. – 6 с.
8. Пат. №11226 С1 України, МКИ G 01 L 21/12. Датчик тиску / С.С. Варшава, В.О. Воронін, А.С. Островська, К.С. Щербай. –№94321814; Заявлено 15.10.90; Опубл. 25.12.96. Бюл. №3. –3 с.
9. Патент №5405786 США, МКИ H01 L021/03. Stress sensitive p–n junction devices formed from porous silicon and methods for producing the same: Патент №5405786 США, МКИ H01 L021/04 / Kurtz, Anthony D. (США). –№ 237011; Заявлено 29.03.94; Опубл. 11.03.95. – 6 с.
10. Schubert D., Schwabe F., Uhlig T. Drucksensor mit piezoresistiven Widerstanden aus polykristallinem Silizium // msr, Berlin 31. –1988. – P.341–343.
11. Егизарян Э.Л. Проектирование микродатчиков давления // Микроэлектроника. №6, 1981. –С. 20–22.
12. Датчик давления: РСТ (WO). МКИ G01 L 9/08 / Seiko Epson Corporation, JP (Япония). Заявлено 06.08.91; Опубл. 20.02.92. №5 (РЖ ИСМ 82–09–93).
13. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. –М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
14. Ваганов В.И., Поливанов П.П. Интегральный транзисторный преобразователь давления // Электронная техника. Серия 11. Вып.3. – С.89–92.
15. Бабичев Г.Г., Гузь В.И., Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А. Исследование биполярного двухколлекторного тензотранзистора с ускоряющим электрическим полем в базе// Физика и техника полупроводников. –1992. –Т.26. Вып.7. – С.1244–1250.

16. Гузь В.И., Жадько И.П., Козловский С.И., Романов В.А. Перераспределение электрического потенциала в искусственно анизотропной полупроводниковой пластине с кольцевыми электродами // Физика и техника полупроводников. – 1990. –Т.24, №2. –С.409–412.
17. Тензочувствительный интегральный преобразователь: А.с. 1393265 А1 СССР, МКИ Н 01 L 29/83. / Беклемишев В.В., Бритвин С.О., Ваганов В.И. (СССР). №4030218/31–25; Заявлено 07.01.86; Опубл. 1988. – 3 с.
18. Датчики (перспективные направления развития) / Под ред. М.П. Цапенко. – Новосибирск: Изд.–во НГТУ, 2001. 176 с.
19. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. –Вінниця: «УНІВЕРСУМ–Вінниця», 1999. – 275с.
20. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від’ємним опором. –Вінниця: «УНІВЕРСУМ–Вінниця», 2000. – 303 с.
21. Викулин И.М., Стафеев В.И. Полупроводниковые датчики. –М.: Сов. радио, 1975. –104 с.
22. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. –М.: Радио и связь, 1990. –264 с.
23. Полякова А.Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. –М.: Энергия, 1979. –168 с.
24. Багдасарян А.В., Шермегор Г.Д., Захаров Н.П., Сергеев В.С. Оценка влияния напряженно деформированного состояния кремниевых пластин на смещение экстремумов энергетических зон // Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы. Вып.5 (184), 1986. С.21–30.
25. Poppinger M. Silicon diaphragm pressure sensors // Solid State Devices, 1985. –Р.53–70.
26. Киреев П.С. Физика полупроводников. –М.: Высшая школа, 1975. –583 с.
27. Шмидт Н. Измерительные преобразователи давления и температуры / Н. Шмидт // Экспресс–информация: Контрольно–измерительная техника. – М.: ВИНТИ. – 1990. – № 22. – С. 5–10.
28. Верчутский Р. Состояние и тенденции развития пьезорезисторных преобразователей давления / Р. Верчутский // Экспресс–информация: Контрольно–измерительная техника. – М.: ВИНТИ. – 1990. – № 30. – С. 13–17.
29. Осадчук В.С. Дослідження тензочутливого елемента на основі біполярного транзистора / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук // Вісник технологічного університету Поділля. – 2003. – №2. – С. 115–121.
30. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В2–х книгах. Кн.1 / С Зи. – М. : Мир, 1983. – 456 с.
31. Блейкмор Дж. Физика твёрдого тела: Пер. с англ. – М. : Мир, 1988. –608 с.

32. Маделунг О. Теория твёрдого тела: Пер. с нем. / Под ред. А.И. Ансельма. М.: Наука, Главная редакция физико–математической литературы, 1980. – 416 с.
33. Полякова А.Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов / Л.А. Полякова. – М. : Энергия, 1979. – 168 с.
34. Захаров Н.П. Механические явления в интегральных структурах / Н.П. Захаров, А.В. Багдасарян. – М. : Радио и связь, 1992. – 144 с.
35. Оценка влияния напряжённо деформированного состояния кремниевых пластин на смещение экстремумов энергетических зон / [Багдасарян А.В., Шермергор Г.Д., Захаров Н.П., Сергеев В.С.] // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1986. – Вып. 5 (184). – С. 21 – 30.
36. Пат. №83354 України, МПК Н01R 19/00. Сенсор тиску з активним індуктивним елементом / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Осадчук Я.О. Вінницький національний технічний університет. Заявка №u201300303; Заяв. 09.01.2013; Опубл.10.09.12. Бюл.17.
37. Разевиг В.Д. Применение программ P–CAD и P–Spice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. В 4–х выпусках. – Вып. 2. Модели компонентов аналоговых устройств / В.Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – 72 с.
38. Осадчук Я.О. Радіовимірювальний перетворювач тиску // Збірник тез доповідей ХІІ регіональної науково–технічної конференції професорсько–викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково–дослідних організацій та інженерно–технічних працівників підприємств м. Вінниці та області 15–16 березня 2012. м.Вінниця. – С.3.
39. Новицкий П.В., Кноринг В.Г., Гутников В.С. Цифровые приборы с частотными датчиками. –Л.: Энергия, 1970. – 424 с.
40. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. За редакцією З.Ю.Готри. В 3 томах. – Львів: Ліга–Прес, 2002.Т.2. –595с.
41. Osadchuk A.V., Osadchuk Y.A. TRANSDUCER OF PRESSURE WITH A FREQUENCY OUTPUT // Proceedings of the III–th International Scientific–Practical Conference PREDT–2013 "Physical and Technological Problems of Radio Engineering Devices, Telecommunication, Nano– and Microelectronics. October 24–26, 2013 Chernivtsi, Ukraine. –P.49–50.
42. Каяцкас А.А. Основы радиоэлектроники. –М.: Высшая школа, 1988. – 464с.
43. Патент на корисну модель №87762 України, МПК Н01R 19/00. Мікроелектронний сенсор тиску / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Осадчук Я.О. Заявка на винахід №u201214140 від 11.12.12 Пр. 26.02.12. Опубл.25.02.14 Бюл.3.
44. Викулина Л.Ф. Глауберман М.А. Физика сенсоров температуры и

магнітного поля. – Одеса: Маяк, 2000. –156 с.

45. Бабичев Г.Г., Козловский С.И., Романов В.А., Шаран Н.Н. Кремниевые двухстоковые полевые тензотранзисторы // Журнал технической физики. –2000. –Т.70, №10. – С.45–49.

46. Патент на корисну модель №83356 України, МПК G01R 31/315. Вимірювач тиску з активним індуктивним елементом / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Осадчук Я.О. Заявка № u201300303; Заяв. 09.01.2013; Пр. 18.03.12. Опубл.10.09.13 Бюл.17.

47. Осадчук О.В., Осадчук Я.О. Сенсор тиску на основі оптичного тунельного ефекту // VI International Conference on Optoelectronic Information Technologies “PHOTONICS–ODS 2012”, 1–4 October 2012, Ukraine, Vinnytsia, 2012. –P.140.

48. Осадчук О.В., Осадчук Я.О. Деформаційні ефекти у напівпровідникових структурах // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. –№2, 2013. –С.146–150.

49. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Осадчук Я.О. Частотний перетворювач тиску на основі двоколекторного тензотранзистора // Збірник наукових праць. III Всеукраїнська НТК "Інтелектуальні технології в системному програмуванні". Хмельницький 23–25 квітня 2014 р. –С.176–182.

50. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 1. / В. О. Козловський – Вінниця: ВНТУ, 2005. – 196 с.

51. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 2 / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 184 с.

52. Козловський В. О. Інноваційний менеджмент: Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 210 с.

53. Козловський В. О., Лесько О. Й. Бізнес-планування: Навчальний посібник / В. О. Козловський, О. Й. Лесько [2-е вид., доп. та переробл.] – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, ВНТУ, 2008. – 241 с.

54. Козловський В. О., Лесько О. Й. Інноваційний менеджмент: Практикум / В. О. Козловський, О. Й. Лесько. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 166 с.

55. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

56. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

57. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.

58. Пособие по расчету и проектированию, естественного, искусственного и совмещенного освещения НИИСФ – М.: Стройиздат. 1985. – 384 с.

59. ДСН 3.3.6-037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

60. ДСН 3.3.6.03999. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.

61. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
62. Методичні вказівки до опрацювання розділу "Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях" в дипломних проектах і роботах студентів спеціальностей, що пов'язані з функціональною електронікою, автоматизацією та управлінням / Уклад. О. В. Березюк, М. С. Лемешев. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 64 с.
63. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1998. – 382 с.
64. ДБН В.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд.
65. ДБН В.1.1.7-2002. Пожежна безпека об'єктів будівництва.
66. НАПБ Б.03.001-2004. Типові норми належності вогнегасників.
67. СНиП 2.09.02-85. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений.
68. ДСанПіН 3.3.6-096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів.

Додаток А
(обов'язковий)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри РТ ВНТУ,
д.т.н., професор
_____ О.В. Осадчук
“ ____ ” _____ 2019 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
Розробка та дослідження параметричного перетворювача тиску на основі
транзисторної структури з від'ємним опором
08–36.МКР.004.00.000 ТЗ

Керівник роботи:
_____ к. т. н., доцент Осадчук Я.О.
“ ____ ” _____ 2019 р.

Розробив студент гр. РТ–18м д/в
_____ Кравецький М.В.
“ ____ ” _____ 2019 р.

Вінниця ВНТУ 2019

1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету № 254 « 02 » 10 2019 р. та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: “ 02 ” вересня 2019 р.

Дата закінчення: “ 17 ” грудня 2019 р.

2. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою роботи є розробка та дослідження радіовимірювальних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур з від’ємним опором, дія яких ґрунтується на використанні функціональної залежності реактивної складової повного опору транзисторної структури від тиску.

Об’єктом дослідження є процес перетворення тиску у частотний сигнал у чутливих напівпровідникових структурах, що породжує задачу розбудови радіовимірювальних сенсорів тиску з покращеними метрологічними показниками.

Предмет дослідження – характеристики радіовимірювальних сенсорів тиску на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором.

Основними завданнями роботи є:

- проаналізувати існуючі перетворювачі тиску та обґрунтувати переваги частотних перетворювачів тиску на основі напівпровідникових структур з від’ємним опором по відношенню до існуючих;
- удосконалити фізико–математичну модель деформаційних ефектів в напівпровідниковому матеріалі тензочутливих елементів;
- розробити математичні моделі радіовимірювальних перетворювачів тиску на основі біполярних та МОН–транзисторних структур з врахуванням впливу тиску на чутливі елементи та дослідити їх характеристики;
- виконати експериментальну перевірку залежностей електричних параметрів та характеристик розроблених математичних моделей частотних перетворювачів на основі транзисторних структур від тиску та дослідити їх властивості в широкому діапазоні частот;
- розробити мікропроцесорну систему контролю тиску вологості та температури з використанням розроблених радіовимірювальних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур з від’ємним опором;
- дослідження питань охорони праці.

3. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

1. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. –Вінниця: «УНІВЕРСУМ–Вінниця», 1999. – 275с.
2. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від’ємним опором. –Вінниця: «УНІВЕРСУМ–Вінниця», 2000. – 303 с.
3. Викулин И.М., Стафеев В.И. Полупроводниковые датчики. –М.: Сов. радио, 1975. –104 с.
4. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 1. / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 196 с.
5. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 2 / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 184 с.
6. ДСН 3.3.6.042–99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
7. ДБН В.2.5–28–2006. Природне і штучне освітлення.
8. ДСН 3.3.6–037–99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

4. ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра радіотехніки,
студент групи РТ–18м д/в Кравецький Микола Васильович

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

- розглянуто можливість використання двоколекторних та двостокових тензочутливих транзисторів в радіовимірювальних перетворювачах тиску на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від’ємним опором, що працюють по принципу “тиск–частота”;
- розглянута математична модель деформаційних ефектів в напівпровіднику, яка відрізняється від існуючих тим, що в ній враховані залежності основних електрофізичних параметрів кремнію від тиску, що є підставою для аналітичного визначення впливу тиску на напівпровідникові прилади, зокрема, на біполярні та МОН–транзистори;
- розглянуті математичні моделі тензочутливих біполярних та МОН–транзисторів, які відрізняються від існуючих тим, що в них враховані залежності електричних параметрів та характеристик транзисторів від тиску, що обумовило розробку автогенераторних вимірювальних перетворювачів тиску на основі транзисторних структур.

6. ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
1.	Огляд літературних джерел. Вибір та узгодження теми МКР	02.09.2019	15.09.2019	Проведено огляд літературних джерел. Вибрана тема	Узгодження теми МКР по кафедрі
2.	Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	16.09.2019	22.09.2019	Проведений аналіз літературних джерел по даній тематиці. Підготовлений матеріал основних розділів	Вступ
3.	Затвердження теми. Розробка технічного завдання	23.09.2019	02.10.2019	Розроблене ТЗ	Наказ ВНТУ про затвердження теми. Додаток А
4.	Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми	03.10.2019	20.10.2019	Проведений аналіз. Розроблені схеми пристрою	Вступ Розділ 1-2 Звіт по переддипломній практиці
5.	Електричні розрахунки. Експериментальне дослідження	21.10.2019	29.10.2019	Проведені розрахунки та дослідження	Розділ 3
6.	Розділ моделювання	30.10.2019	03.11.2019	Проведено моделювання	Результати моделювання
7.	Розробка графічної частини МКР	04.11.2019	10.11.2019	Плакати. Структурні та електричні схеми	Графічна частина
8.	Аналіз економічної ефективності розробки	11.11.2019	15.11.2019	Економічна частина	Розділ 4
9.	Охорона праці ОП	16.11.2019	22.11.2019	Частина БЖД	Розділ 5
10.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	23.11.2019	27.11.2019	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
11.	Нормоконтроль	28.11.2019	29.11.2019	Підпис нормоконтроля	Оформлена ПЗ та графічна частина
12.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР	02.12.2019	06.12.2019	Позитивні відзиви	Відзив. Рецензія
13.	Захист МКР ЕК	09.12.2019	17.12.2019	Позитивний захист	Протокол ЕК

7. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи буде зроблено:

- розроблено електричну схему частотного перетворювача тиску;
- розроблено еквівалентну схему МОН–транзистора;
- розроблено схему перетворювача тиску на основі біполярно–польової транзисторної структури;
 - розроблено схему радіовимірювального мікроелектронного сенсора тиску;
 - розроблено електричну схему радіовимірювального перетворювача;
 - проведено результати моделювання перетворювача тиску на основі транзисторної структури з від’ємним опором;
 - очікуваний економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень та розробки очікується покращення характеристик розроблюваного перетворювача тиску.

8. МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

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

9. ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

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

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

10. ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання роботи повинна містити:

- електричну схему частотного перетворювача тиску;
- еквівалентну схему МОН–транзистора;
- схему радіовимірювального мікроелектронного сенсора тиску;
- електричну схему радіовимірювального перетворювача тиску;
- результати комп’ютерного моделювання перетворювача тиску;
- дослідження питань охорони праці.

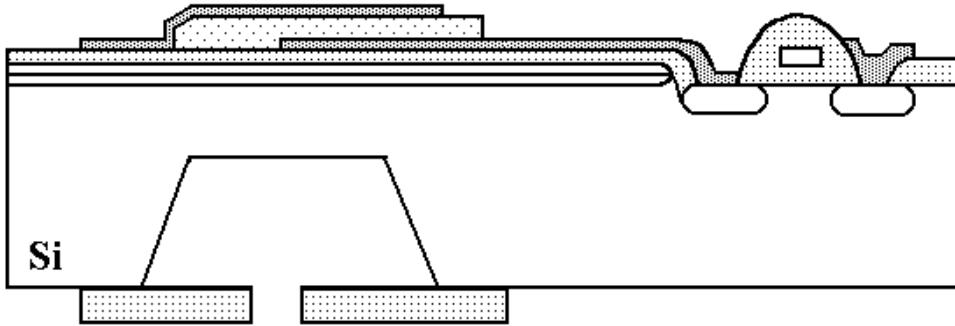
11. ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

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

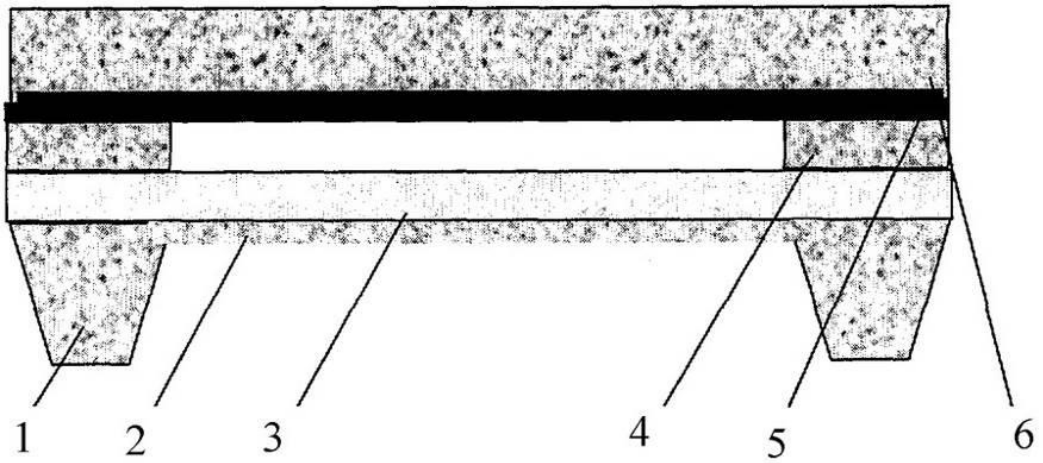
Додаток Б
(обов'язковий)

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ
СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

Ємнісний сенсор та перетворювач тиску



Ємнісний сенсор тиску

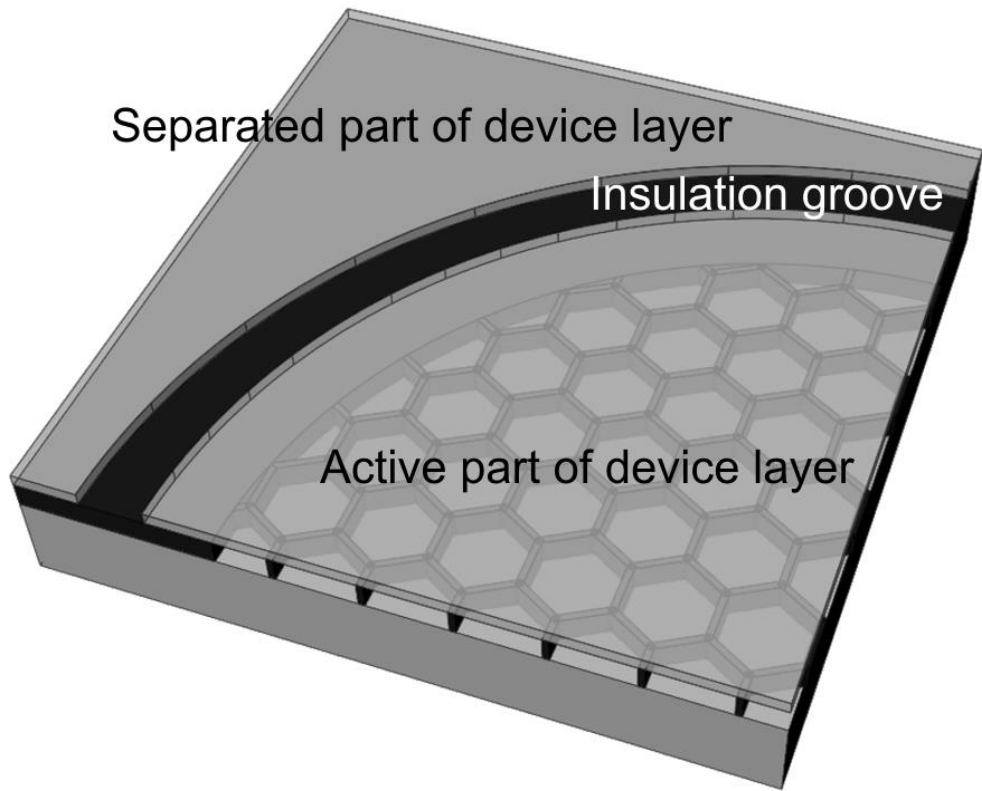


Ємнісний перетворювач тиску

Додаток В
(обов'язковий)

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ
СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

MEMS сенсор тиску



MEMS сенсор тиску

Додаток Д
(обов'язковий)

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ
СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

Схема радіовимірювального перетворювача
тиску на основі біполярно–польової транзисторної структури

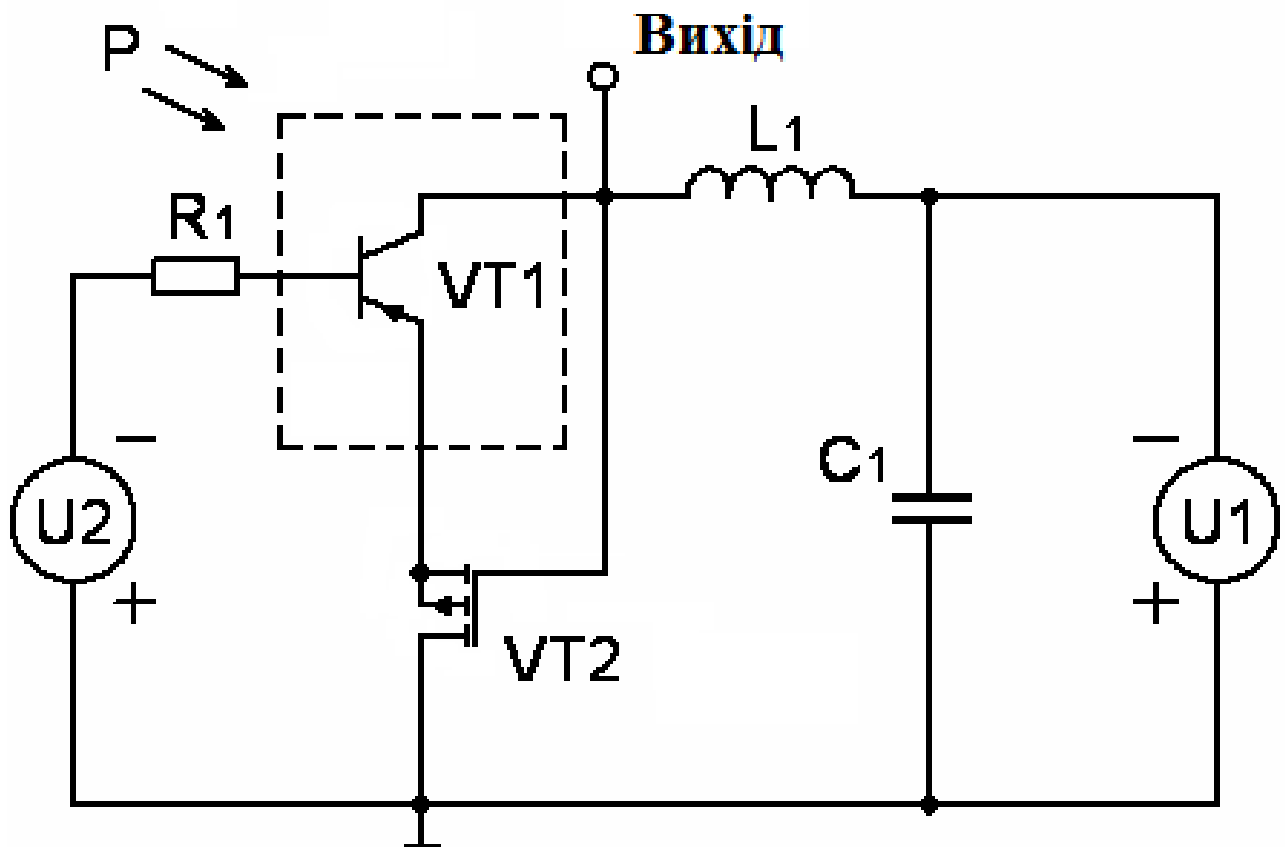


Схема радіовимірювального перетворювача тиску на основі біполярно-польової транзисторної структури

Додаток Е
(обов'язковий)

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ
СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

Схема радіовимірювального перетворювача тиску

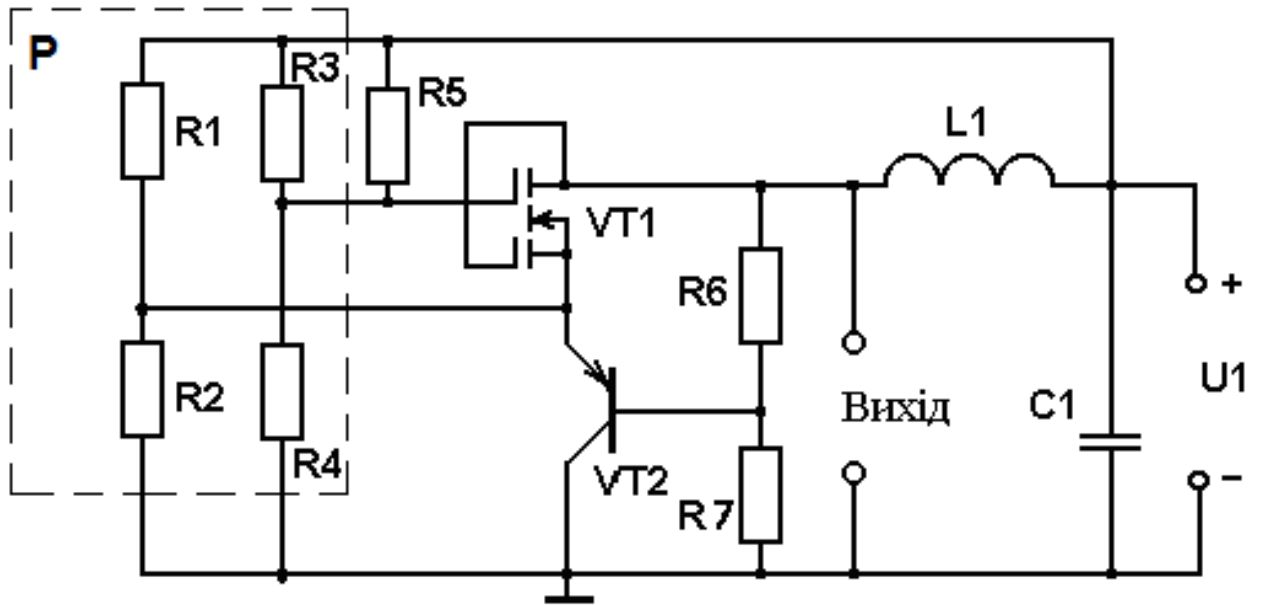
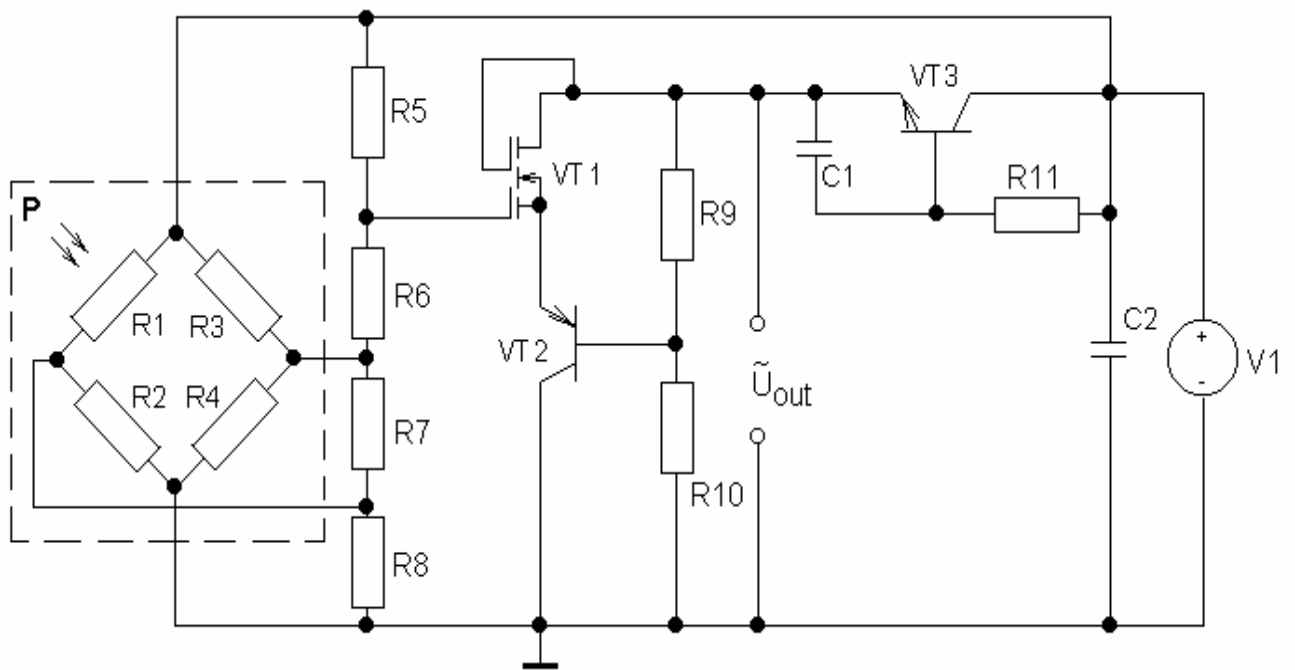


Схема радіовимірювального перетворювача тиску

Додаток Ж
(обов'язковий)

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ
СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

Електрична схема радіовимірювального перетворювача тиску

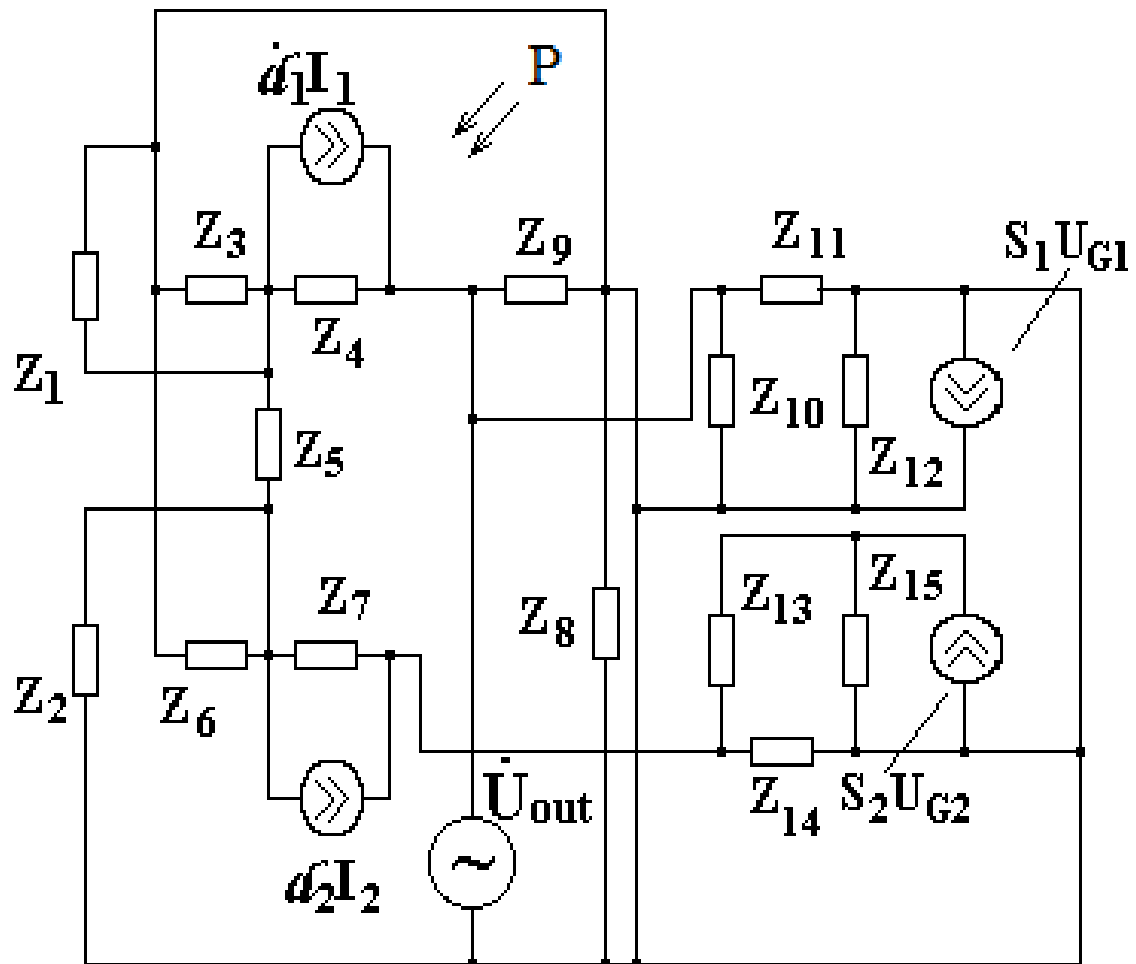


Електрична схема радіовимірювального перетворювача тиску

Додаток К
(обов'язковий)

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ
СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

Еквівалентна схема радіовимірювального перетворювача тиску

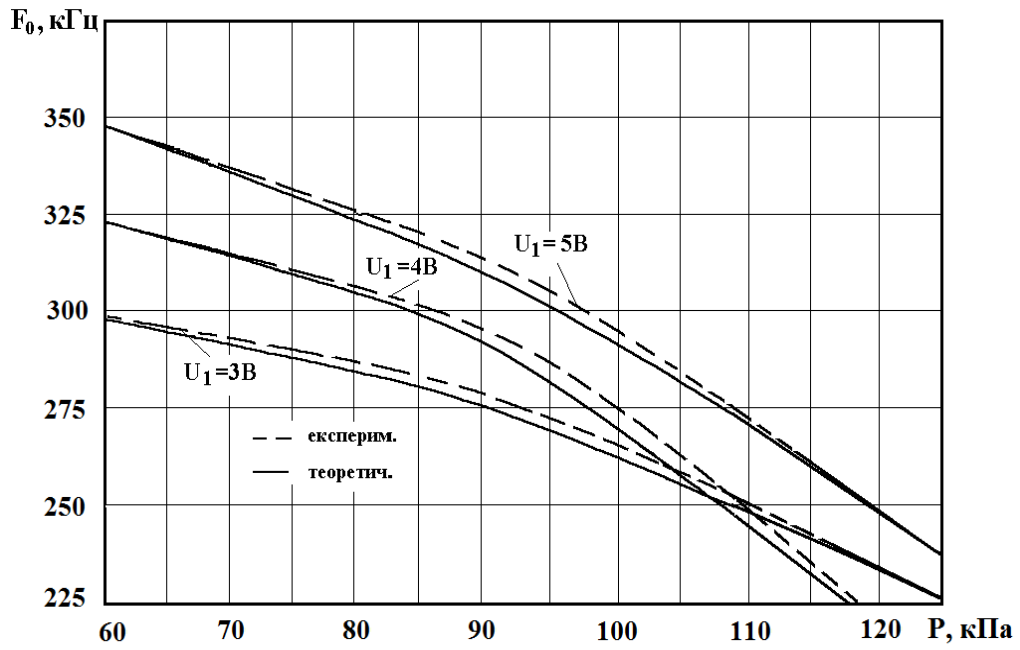


Еквівалентна схема радіовимірювального перетворювача тиску

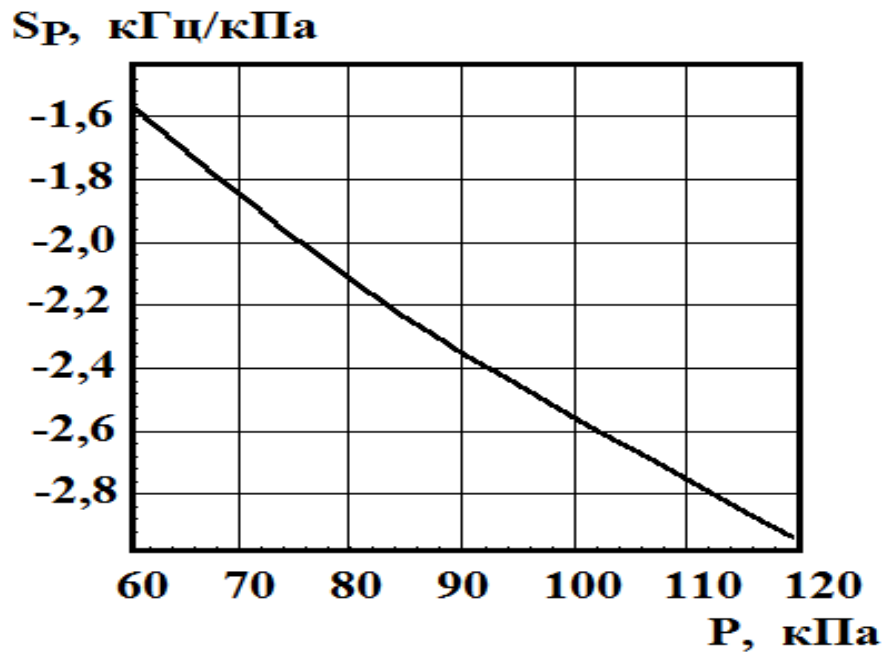
Додаток Л
(обов'язковий)

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ
СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ**

Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації
радіовимірювального перетворювача тиску від зміни тиску



Теоретичні і експериментальні залежності частоти генерації радіовимірювального перетворювача тиску від зміни тиску



Залежність чутливості від тиску

Додаток М

Лістинги програм розрахунку радіовимірювальних перетворювачів тиску

```

clear
echo off
clc
disp(' ');
disp('
disp( зависимость входного сопротивления ');
disp('      от напряжения питания ');
disp(' ');
%
%      константы
%
rri=0.09;  c=299792458;  S2=5e-3;
rrs=0.09;  q=1.602e-19;  S1=25e-3;
rrz=0.09;  l=8e-4;      zz=0.5;
rzi=1e9;   lz=5e-9;     mp=550;
rzs=1e8;   lp=2.3e-2;   tp=1e-5;
czs=1.5e-12; Vfb=-1.25;  bt=0.0258;
ckor=0.1e-12; at=12;     i=sqrt(-1);
czi=3e-12;  ccs=0.707107;
cz=1.28e-12; ni=1.5e10;
cp=8.1e-12; nd=1.1e15;
co=3.45e-8; na=3e16;
%
disp('      введите переменные');
u1 = input(' начальное напряжение питания { В } ');
u2 = input(' конечное напряжение питания { В } ');
if (u2<u1) break
end
du = input(' шаг изменения напряжения питания { В } ');
if (du>(u2-u1)) break
end
f=input(' значение частоты { Гц } ');
uz1=input(' значение напряжения управления { В } ');
clc
disp('expect ...');
j=1;
P1=0.1e-6;
P2=4.51e-3;
dP1=1.5e-3;
for uz2=u1:du:u2,
  P=P1;
  xi=1;

```

```

S1=3e-3*uz2;
S2=1.2e-3*uz2;
for P=P1:dP1:P2,
    ift=(q*(1-0.32)*0.6*P)/(6.6262e-32*c/0.55e-6);
    ei=bt*log(1+ift/2.4e-14);
    ec=ei*75/100;
    ift1=ift*75/100;
    ift2=ift1;
    ift3=ift;
    w=2*pi*f;
    Z1=rrz+i*w*lz;
    qq=1+w*w*czi*czi*rzi*rzi;
    Z2=rzi/qq-i*w*czi*rzi*rzi/qq;
    Z3=-i*1/(w*ckor);
    Z4=-i*1/(w*czs);
    sa=sqrt(1+w*w*tp*tp);
    sa1=ccs*sqrt(sa+1);
    sb1=ccs*sqrt(sa-1);
    pp=sa1*sa1+sb1*sb1;
    lpk=lp/(sqrt(1+i*w*tp));
    ff=2*lpk*bt/(at*co*mp*zz);
    ff1=ff*(nd/ni);
    ps=(uz2+Vfb-at^2*(sqrt(1+0.0278*(bt*uz2-bt*Vfb-1))-1)/(2*bt));
    lj=1/lpk;
    ff2=ff1*sqrt(bt*ps)*exp(-bt*(ps+ei));
    ff3=exp(-lj);
    ff4=exp(bt*(ec-ei))-ff3;
    ff5=(exp(lj)+exp(-lj))/(exp(lj)-exp(-lj));
    ff6=1/(ff4*ff5-ff3);
    Z5=ff2*ff6/10000;
    ssg=bt*ift*pp;
    rs=(sa1/ssg);
    fik=bt*log(na*nd/ni^2);
    gg=sqrt(8.496e-16/(2*(fik-ec)));
    gg1=ssg/(w*sb1);
    csp=1.25e-4*gg+gg1;
    ww=1+w*w*rs*rs*csp*csp;
    Z6=rs/ww-i*w*csp*rs*rs/ww;
    Z7=Z1; Z10=Z1; Z9=Z6; Z8=Z3;
    Z11=rrz+i*w*lz;
    Z12=-i*1/(w*cp);
    Z13=rzi-i*1/(w*czi);
    qw=1+w*w*czs^2*rzs^2;
    Z14=rzs/qw-i*w*czs*rzs^2/qw;
    Z17=Z11;

```

```

Z18=Z11;
Zo=Z12*Z13/(Z12+Z13);
Z15=ff2*ff6/10000;
ri=(sa1/ssg);
gg=sqrt(8.496e-16/(2*(fik-ei)));
cip=1.0e-4*gg+gg1;
ww1=1+w*w*ri*ri*cip*cip;
Z16=ri/ww1-i*w*cip*ri*ri/ww1;
a(1,1)=Z1+Z4+Z6+Z7;
a(1,5)=Z6+Z7;
a(1,6)=-Z4;
a(1,7)=-Z1;
a(2,1)=0;
a(2,2)=Z3+Z15+Z16+Z17+Z18;
a(2,3)=Z15;
a(2,4)=Z17+Z16+Z15*Zo*S1;
a(2,7)=-Z3;
a(3,1)=0;
a(3,2)=Z15;
a(3,3)=Z15+Z14+Zo;
a(3,4)=Z15*Zo*S1-Zo;
a(3,7)=0;
a(4,1)=0;
a(4,2)=Z16+Z17;
a(4,3)=-Zo;
a(4,4)=Z11+Zo+Z16+Z17+Z8;
a(4,5)=-Z8;
a(4,7)=0;
a(5,1)=Z6+Z7;
a(5,4)=-Z8;
a(5,5)=Z5+Z6+Z7+Z8+Z9+Z10;
a(5,6)=Z5;
a(5,7)=Z9+Z10+Z5*Z2*S2;
a(6,1)=-Z4;
a(6,5)=Z5;
a(6,6)=Z2+Z4+Z5;
a(6,7)=Z5*Z2*S2-Z2;
a(7,1)=-Z1;
a(7,2)=-Z3;
a(7,5)=Z9+Z10;
a(7,6)=-Z2;
a(7,7)=Z1+Z2+Z3+Z9+Z10;
b(1,1)=-uz2+Z6*ift1;
b(2,1)=-Z16*ift3;
b(3,1)=0;

```

```

b(4,1)=-uz1-Z16*ift3;
b(5,1)=Z6*ift1-Z9*ift2;
b(6,1)=0;
b(7,1)=-Z9*ift2;
I=a\b;
MZ=uz2/I(1);
R(xi,j)=real(MZ);
XX(xi,j)=imag(MZ);
X(xi,j)=(XX(xi,j)*(uz2-.5)^2)/100;
C(xi,j)=1/(X(xi,j)*w);
L(xi,j)=X(xi,j)/w;
Q(xi,j)=(atan(X(xi,j)/R(xi,j)))*180/pi;
F(xi,j)=1/(2*pi*sqrt(1180e-6*abs(C(xi,j))));
Up(xi,j)=abs(real(I(1)))/(w*16.0e-12);
II(xi,j)=real(I(1));
xi=xi+1;
cla
uz2
P
MZ
end
j=j+1;
end

clear
echo off
clc
disp(' ');
disp('
disp('      зависимость входного сопротивления      ');
disp('      от крутизны и управляющего      ');
disp('      напряжения      ');
disp(' ');
%
%      КОНСТАНТЫ
%
i0=2.4e-14; tp=1e-5;   rri=0.09;
ec=0.05;   lp=2.3e-2;   rrs=0.09;
l=8e-4;   fk=4.1206e12; li=0.1e-9;
z=1.5e-2;  fk1=2.2986e15; ls=0.1e-9;
zz=1e-2;  rzi=1e8;   lz=0.1e-9;
bt=0.02586; czs=1e-12;  ckor=0.5e-12;
Vfb=-1.25; rrz=0.09;   czs=0.091e-12;
czi=3e-12; cs=0.707107; i=sqrt(-1);
%
```

```

disp('          введите переменные');
%
u1 = input(' начальное напряжение { B } ');
%
u2 = input(' конечное напряжение { B } ');
%
if (u2<u1) break
end
%
du = input(' шаг изменения напряжения { B } ');
%
if (du>(u2-u1)) break
end
%
ss1 = input(' начальная крутизна { A/B } ');
%
ss2 = input(' конечная крутизна { A/B } ');
%
if (ss2<ss1) break
end
%
dss1 = input(' шаг изменения крутизны { A/B } ');
%
if (dss1>(ss2-ss1)) break
end
%
ift=input(' значение фототока { A } ');
%
uz2=input(' значение напряжения питания { B } ');
%
f=input(' значение частоты { Гц } ');
%
clc
disp('expect ...');
uz1=u1;
j=1;
%
% формулы
%
for uz1=uz1:du:u2,
    uz1=uz1
    ss=ss1;
    xi=1;
    for ss=ss1:dss1:ss2,
        S1=ss
    end
end

```

```

S2=S1;
ei=bt*log(1+ift/i0);
ec=ei*75/100;
w=2*pi*f;
Z1=rrz-i*w*lz;
qq=(w*czi*rzi)^2;
R2=rzi/(1+qq);
X2=w*czi*rzi*rzi/(1+qq);
Z2=R2-i*X2;
Z3=-i*1/(w*ckor);
Z4=-i*1/(w*czs);
sa=sqrt(1+w*w*tp*tp);
sa1=cs*sqrt(sa+1);
sb1=cs*sqrt(sa-1);
bb1=sb1*1*lp;
aa1=sa1*1*lp;
ck1=exp(-aa1);
ck2=cos(-bb1);
ck=ck1*ck2;
dk1=sin(-bb1);
dk=ck1*dk1;
nk=sin(2*bb1);
nk1=cos(bb1);
nk2=nk1*nk1;
nk3=exp(aa1)/2-exp(-aa1)/2;
nk4=nk3*nk3;
nk5=2*(nk4+nk2);
mk=exp(2*aa1)/2-exp(-2*aa1)/2;
mkk=mk/nk5;
nkk=nk/nk5;
ckd=ck-exp(bt*(ec-ei));
m=mkk*ckd-nkk*dk+ck;
n=nkk*ckd-mkk*dk+dk;
ps=uz1+Vfb-2769.23*(sqrt(1+0.0278*(bt*uz1-bt*Vfb-1))-1);
xxr1=sqrt(bt*ps)*exp(-bt*(ps+ei));
xr=fk*xxr1;
pp=sa1*sa1+sb1*sb1;
xr1=pp*(m*m+n*n);
kl1=(m*sa1-n*sb1)/xr1;
kl2=(n*sa1+m*sb1)/xr1;
RSI=xr*kl1;
XSI=-xr*kl2;
Z5=RSI-i*XSI;
xxr2=fk1*xxr1;
RSSI=xxr2*kl1;

```



```

XSSI=-xxr2*k12;
Z15=RSSI-i*XSSI;
ssg=bt*ift*pp;
rs=sa1/ssg;
gg=sqrt(8.496e-12/(2*(0.8-ec)));
cc1=5.25e-4*gg;
gg1=ssg/(w*sb1);
csp=cc1+gg1;
cc2=3.5e-4*gg;
csp1=cc2+gg1;
ww=(w*rs*csp)^2;
R6=rs/(1+ww);
X6=(w*csp*rs*rs)/(1+ww);
Z6=R6-i*X6;
ww1=(w*rs*csp1)^2;
R16=rs/(1+ww1);
X16=(w*csp1*rs*rs)/(1+ww1);
Z16=R16-i*X16;
Z7=Z1; Z10=Z1; Z9=Z6; Z8=Z3; Z11=Z1; Z12=Z2;
Z14=Z4; Z17=Z7; Z18=Z8; Z19=Z16; Z20=Z10; Z13=Z3;
a12=0; a13=0; a14=0; a15=0; a16=0; a21=0; a23=0; a24=0;
a26=0; a27=0; a29=0; a31=0; a32=0; a35=0; a36=0; a38=0;
a39=0; a41=0; a42=0; a47=0; a48=0; a49=0; a51=0; a53=0;
a57=0; a58=0; a59=0; a61=0; a62=0; a63=0; a67=0; a68=0;
a69=0; a72=0; a74=0; a75=0; a76=0; a83=0; a84=0; a85=0;
a86=0; a92=0; a93=0; a94=0; a95=0; a96=0;
a11=Z17+Z16+Z14+Z11;
a17=-Z17-Z16;
a18=Z11;
a19=-Z14;
a22=Z8+Z13;
a25=-Z8;
a28=-Z13;
a33=Z3+Z18;
a34=Z3;
a37=Z18;
a43=Z3;
a44=Z1+Z2+Z3+Z9+Z10;
a45=Z9+Z10;
a46=Z2;
a52=-Z8;
ZZ1=Z5*S1*Z2;
a54=Z10+Z9-ZZ1;
a55=Z5+Z6+Z7+Z8+Z9+Z10;
a56=-Z5-ZZ1;

```

$a64=Z2+ZZ1;$
 $a65=-Z5;$
 $a66=Z2+Z4+Z5+ZZ1;$
 $a71=-Z16-Z17;$
 $a73=Z18;$
 $a77=Z15+Z16+Z17+Z18+Z19+Z20;$
 $ZZ2=Z15*S2*Z12;$
 $a78=Z20+Z19-ZZ2;$
 $a79=-Z15-ZZ2;$
 $a81=Z11;$
 $a82=-Z13;$
 $a87=Z19+Z20;$
 $a88=Z11+Z12+Z13+Z19+Z20;$
 $a89=Z12;$
 $a91=-Z14;$
 $a97=-Z15;$
 $a98=Z12+ZZ2;$
 $a99=Z12+Z14+Z15+ZZ2;$
 $b1=uz1+Z16*ift;$
 $b2=0; b6=0; b9=0;$
 $b3=uz2;$
 $b4=Z9*ift;$
 $b5=Z9*ift-Z6*ift;$
 $b7=Z19*ift-Z16*ift;$
 $b8=Z19*ift;$
 $DD=[a11 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18 a19;$
 $a21 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28 a29;$
 $a31 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38 a39;$
 $a41 a42 a43 a44 a45 a46 a47 a48 a49;$
 $a51 a52 a53 a54 a55 a56 a57 a58 a59;$
 $a61 a62 a63 a64 a65 a66 a67 a68 a69;$
 $a71 a72 a73 a74 a75 a76 a77 a78 a79;$
 $a81 a82 a83 a84 a85 a86 a87 a88 a89;$
 $a91 a92 a93 a94 a95 a96 a97 a98 a99];$
 $\text{delta}=\text{det}(DD);$
 $DDx=[b1 a12 a13 a14 a15 a16 a17 a18 a19;$
 $b2 a22 a23 a24 a25 a26 a27 a28 a29;$
 $b3 a32 a33 a34 a35 a36 a37 a38 a39;$
 $b4 a42 a43 a44 a45 a46 a47 a48 a49;$
 $b5 a52 a53 a54 a55 a56 a57 a58 a59;$
 $b6 a62 a63 a64 a65 a66 a67 a68 a69;$
 $b7 a72 a73 a74 a75 a76 a77 a78 a79;$
 $b8 a82 a83 a84 a85 a86 a87 a88 a89;$
 $b9 a92 a93 a94 a95 a96 a97 a98 a99];$
 $\text{deltax}=\text{det}(DDx);$

```

I1=deltax/delta;
MZ=uz2/I1
MR(xi,j)=real(MZ);
MX(xi,j)=imag(MZ);
MC(xi,j)=1/(MX(xi,j)*w);
ML(xi,j)=MX(xi,j)/w;
MQ(xi,j)=(atan(MX(xi,j)/MR(xi,j)))*180/pi;
F0(xi,j)=1/(2*pi*sqrt(5.5113e-11*real(ML(xi,j))));
Up(xi,j)=real(I1)/(w*8e-11);
xi=xi+1;
end
j=j+1;
end
disp('Трёхмерные зависимости параметров');
pause
mesh(MR)
title('R = R ( S,U )')
pause
mesh(MX)
title('X = X ( S,U )')
pause
mesh(MC)
title('C = C ( S,U )')
pause
mesh(ML)
title('L = L ( S,U )')
pause
end

```