

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інформаційних електронних систем

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ТЕНЗОМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ»

Виконав: студ. 2-го курсу, групи МНТ-22м
спеціальності 153 Мікро- та наносистемна
техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

В.Ю. Чаленко В.Ю.
(прізвище та ініціали)

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

О.С. Звягін О.С.
(прізвище та ініціали)

«18» 12 2023 р.

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

О.О. Семенова О.О.
(прізвище та ініціали)

«19» 12 2023 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. О.В. Осалчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«20» 12 2023 р.

Вінниця ВНТУ - 2023 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 15 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність – 153 Мікро- та наносистемна техніка
Освітньо-професійна програма – Мікро- та наносистемна техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н. проф. Осадчук О.В.

«16» вересня 2023 року

**ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Чаленку Владиславу Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Мікроелектронний тензометричний перетворювач»

керівник роботи к.т.н., доц., доц. кафедри ІРТС Звягін О.С.

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

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

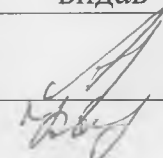
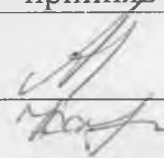
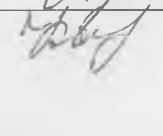
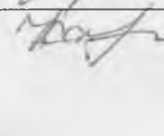


2. Строк подання студентом роботи 15.12.2023р.

3. Вихідні дані до роботи: Напруга живлення 5,0-12,0 В, струм споживання 1-10 мА, діапазон робочих частот 100 кГц – 3,0 МГц, тензочутливість в межах 100 г/см² – 10 кг/см², напруга вихідного сигналу 3,5 – 5,0 В.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Аналіз сучасного стану мікроелектронного тензометричного перетворювача. Математичне моделювання функції перетворення і рівняння чутливості мікроелектронного тензометричного перетворювача тиску з тензочутливим біполярним транзистором. Економічна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Схема тензоперетворювача. Співвідношення між абсолютним і відносним тиском. Статична система. Тиск рідини в судині. Динамічна система. Способи розташування сенсорів тиску. Схематичний розріз мембранного перетворювача тиску з n-p-n транзистором. Схема розташування тензотранзисторів на площині мембрани. Залежність відносної зміни статичного коефіцієнта підсилення транзисторів від тиску. Електрична схема перетворювача тиску. Залежність опору бази від тиску. Залежність опору емітера від тиску. Залежність опору колектора від тиску. Залежність ємності база-колектор від тиску. Еквівалентна схема перетворювача. Теоретична і експериментальна залежність частоти генерації від тиску.

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання 17.09.2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

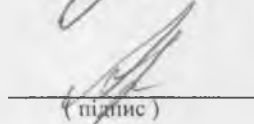
| № з/п | Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | При-мітка |
|-------|--|-------------------------------|-----------|
| 1. | Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі. | 02.09.2023-07.09.2023 | |
| 2. | Огляд та аналіз літературних джерел. | 08.09.2023-17.09.2023 | |
| 3. | Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР. | 18.09.2023-27.09.2023 | |
| 4. | Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень. | 28.09.2023-10.10.2023 | |
| 5. | Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження. | 11.10.2023-26.10.2023 | |
| 6. | Розробка графічної частини МКР. | 27.10.2022-12.11.2022 | |
| 7. | Економічна частина. | 13.11.2023-16.11.2023 | |
| 8. | Охорона праці (ОП). | 17.11.2022-22.11.2022 | |
| 9. | Оформлення пояснювальної записки та графічної частини. | 23.11.2023-28.11.2023 | |
| 10. | Нормоконтроль. | 29.11.2023-30.11.2023 | |
| 11. | Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР. | 01.12.2023 | |
| 12. | Захист МКР ЕК. | 21.12.2023-22.12.2023 | |

Студент


(підпис)

Чаленко В.Ю.

Керівник роботи


(підпис)

Звягін О.С.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.382

Чаленко В.Ю. Мікроелектронний тензометричний перетворювач: магістерська кваліфікаційна робота – Вінниця: ВНТУ 2023 р. – 115 стор., 51 рис., 36 бібл., 17 табл. – українською мовою.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена розробленню та дослідженню мікроелектронного тензометричного перетворювача з частотним поданням вимірювального сигналу. В магістерській кваліфікаційній роботі здійснений аналіз сучасних досягнень в області тензочутливих перетворювачів. Досліджено фізичний механізм дії тиску на напівпровідники. Наведена методика вимірювання тиску у текучих середовищах. Розроблена математична модель функції перетворення і рівняння чутливості радіовимірювального перетворювача тиску з тензочутливим біполярним транзистором. Проведено оцінювання метрологічних параметрів тензочутливих перетворювачів тиску. Оцінені середньоквадратичне значення похибки при вимірюванні частоти інформаційного сигналу.

Економічна частина включає розрахунок кошторису витрат на проведення роботи з даної теми і ефективності отриманих в результаті виконання результатів. Розрахована економічна доцільність і вигідність серійного виготовлення частотних тензометричних перетворювачів.

У розділі охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях проведений аналіз умов праці в приміщенні, в якому виконується робота, а також проведено оцінку безпеки в разі дії електромагнітного випромінювання досліджуваного мікроелектронного тензометричного перетворювача.

Ключові слова: тензочутливість, перетворювач, тиск, вимірювання, транзистор, від'ємний опір, радіовимірювання.

ABSTRACT

Chalenko V.Y. Microelectronic strain gauge transducer: master's thesis - Vinnytsia: VNTU, 2023 - 115 pp., 51 figures, 36 bibliography, 17 tables - in Ukrainian.

The master's qualification work is devoted to the development and research of a microelectronic strain gauge transducer with a frequency measurement signal. The master's thesis analyzes modern achievements in the field of strain gauge transducers. The physical mechanism of pressure action on semiconductors is investigated. The method of pressure measurement in fluid media is presented. A mathematical model of the transformation function and the sensitivity equation of a radio pressure transducer with a strain-sensitive bipolar transistor are developed. The metrological parameters of strain-sensitive pressure transducers were estimated. The root mean square error when measuring the frequency of the information signal is estimated.

The economic part includes the calculation of the cost estimate for carrying out work on this topic and the effectiveness of the results obtained as a result of the implementation. The economic feasibility and profitability of serial production of frequency strain gauges was calculated.

The section on labor protection and safety in emergency situations analyzes the working conditions in the room where the work is performed, as well as assesses the safety in case of electromagnetic radiation of the studied microelectronic strain gauge.

Keywords: strain sensitivity, transducer, pressure, measurement, transistor, negative resistance, radio measurement.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ВСТУП | 4 |
| 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ТЕНЗОМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА | 8 |
| 1.1 Аналіз науково-технічної та патентної літератури | 8 |
| 1.2 Тензоперетворювач по п.1, відмінний тим, що хвилеводи виконані на основі монокристалів сегнетоеластиків..... | 12 |
| 1.3 Фізичний механізм дії тиску на напівпровідники..... | 21 |
| 1.4 Транзисторний перетворювач тиску | 40 |
| 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІЇ ПЕРЕТВОРЕННЯ І РІВНЯННЯ ЧУТЛИВОСТІ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ТЕНЗОМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ З ТЕНЗОЧУТЛИВИМ БІПОЛЯРНИМ ТРАНЗИСТОРОМ | 46 |
| 2.1 Математична модель перетворювача тиску | 46 |
| 2.2 Оцінювання метрологічних параметрів перетворювачів тиску | 57 |
| 3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА | 65 |
| 3.1 Оцінювання наукового ефекту | 65 |
| 3.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи..... | 69 |
| 3.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи..... | 84 |
| 3.4 Висновок до розділу..... | 85 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ | 86 |
| 4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи..... | 87 |
| 4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії | 90 |
| 4.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи РЕС мікроелектронного тензометричного перетворювача в умовах дії загрозливих чинників НС | 97 |
| 4.4 Висновок до розділу..... | 99 |

| | |
|---|-----|
| ВИСНОВКИ | 100 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 102 |
| Додаток А (обов'язковий). Ілюстративна частина..... | 106 |
| Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки магістерської кваліфікаційної роботи | 114 |

ВСТУП

Актуальність теми.

Швидкий розвиток сенсорної техніки на основі мікроелектронної технології вимагає дослідження теоретичних основ і практичних конструкцій радіовимірювальних тензометричних перетворювачів, завдяки яким можна вимірювати тиск. Також удосконалення автоматизованих систем контролю, вимірювань і керування технологічними процесами є одною із необхідних умов нормального функціонування і перспективного розвитку промисловості.

Аналіз стану вітчизняного приладобудування в області мікроелектроніки для виміру тиску дозволяє зробити висновок про значне відставання від продукції ведучих фірм «далекого зарубіжжя». Цей висновок підтверджує актуальність даної теми.

В даний час видатні досягнення технології мікроелектронних схем в основному відображені в обробці інформації та комп'ютерному обладнанні, і значна кількість функціональних компонентів досягла 6-7 рівнів інтеграції з використанням основних процесів. Електронні системи керування також потребують впровадження досягнень мікроелектронної схемотехніки, переважно первинних перетворювачів фізичних величин, електронних пристроїв виконавчих механізмів. [1]

У зв'язку з цим ми вивчаємо характеристики напівпровідникових приладів, які можна використовувати як датчики тиску, при використанні їх для мініатюризації електроніки виконавчих механізмів.

Подальшим розвитком наукових досліджень у напрямку вдосконалення параметрів фізичних перетворювачів інформації є використання реактивних характеристик і негативного опору для побудови інтегруючих перетворювачів частоти. У даному типі датчиків тиск перетворюється в частоту, що дозволяє за допомогою інтегрованих технологій виготовляти датчики, які значно підвищують чутливість,

розширюють діапазон вимірюваних значень, підвищують надійність і тривалу стабільність параметрів. Використання частоти як інформаційного параметра усуває потребу в аналого-цифрових перетворювачах для обробки інформації, тим самим знижуючи вартість систем контролю та управління.

Аналіз сучасного стану

Відомий цілий ряд принципів побудови та схем перетворювачів тиску, які реалізують на аналогово-цифровій базі. Однак всі відомі на даний час методи вимірювання тиску мають ряд недоліків:

- складність конструкції;
- труднощі при настроюванні;
- значну похибку вимірювання;
- малий діапазон вимірювання тиску;
- порівняно вузький діапазон робочих частот;
- низьку швидкодію.

Представлені на українському ринку цифрові вимірювачі індуктивності і ємності закордонного виробництва мають ряд недоліків:

- велика вага;
- порівняно великі габаритні розміри;
- більша споживана потужність;
- низька чутливість;
- порівняно висока вартість пристроїв;
- складність конструкції та невисокий рівень надійності;
- низький рівень ремонтпридатності.

Тому відомі радіовимірювальні перетворювачі мають ряд істотних недоліків. Тому є потреба у розвитку вітчизняного обладнання з кращими технічними характеристиками, виробництво якого створить нові робочі місця та принесе прибуток українським підприємствам.

Сучасний рівень забезпеченості в Україні послугами обліку та населення відповідним обладнанням для контролю тиску значно відстає

від світових стандартів. Вирішенням цієї проблеми є створення нового вітчизняного продукту, який за технічними показниками не тільки не поступається кращим іноземним зразкам, а в деяких випадках навіть перевищує кращі іноземні зразки. Крім того, за цінovими показниками радіовимірювальні прилади, що розробляються, будуть значно дешевшими.

Більшість послідовних перетворювачів мають відносно складні конструкції. Однак складна конструкція приладу знижує його надійність і підвищує ціну, яка наразі є дуже непопулярною серед українських споживачів. Крім того, в цьому випадку скорочується час простою і термін служби такого пристрою.

Радіометричні тензодатчики, що розробляються, мають багато суттєвих переваг перед існуючими аналогами. Створити таку техніку на базі сучасного базового вітчизняного виробництва, забезпечуючи високі техніко-конструкційні показники техніки та відносно невисоку ціну, нескладно.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дана робота виконується згідно з напрямком досліджень спецплану «32К3.3». НДР кафедри радіотехніки Вінницького державного технічного університету «Компоненти та пристрої радіоелектронних та інформаційно-вимірювальних систем» у 2020-2022 рр.

Метою роботи є розроблення та дослідження мікроелектронного тензометричного перетворювача.

Для досягнення поставлених цілей роботи необхідно вирішити наступні **завдання**:

- Аналіз наявного обладнання;
- Проаналізувати використання моделей передачі даних;
- Виконувати розрахунки та комп'ютерне моделювання обладнання;
- Дослідити операційні моделі
- Проаналізувати отримані результати.

Об'єктом дослідження є процес передачі вимірювальної інформації від мікроелектронних тензодатчиків.

Предметом дослідження є електрична схема мікроелектронного тензометричного перетворювача.

Методи дослідження. Теоретичний аналіз, математичне моделювання, електричні розрахунки.

Практичне значення одержаних результатів. Новизна отриманих результатів полягає у підвищенні чутливості та точності вимірювання параметрів навколишнього середовища, а також завдаостійке передавання вимірюваних даних.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ТЕНЗОМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

1.1 Аналіз науково-технічної та патентної літератури

1.1.1 Тензоперетворювач Ю.А. Биковського

Винахід відноситься до вимірювальної техніки, зокрема до пристроїв для вимірювання механічних деформацій. Відомий оптичний пристрій для вимірювання деформацій складається з волоконного світловода, зовнішніх поляризатора і аналізатора.

Недоліком такого пристрою є низька чутливість до механічних деформацій. Найближчим до винаходу по технічній суті є тензоперетворювач для вимірювання деформацій, що містить джерело випромінювання, дві паралельні відображаючі пластини, одна з яких рухома у напрямі до іншої, і фотоприймач.

Основним недоліком такого перетворювача є низька точність вимірювань внаслідок низької чутливості.

Метою винаходу є підвищення чутливості тензоперетворювача. На рисунку 1.1 показана схема тензоперетворювача (та наведена в додатку А рис.1).

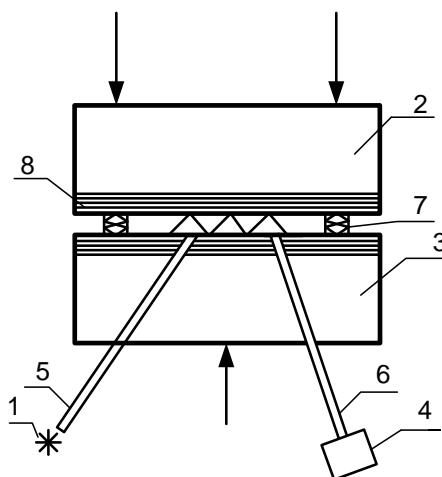


Рисунок 1.1- Схема тензоперетворювача

- 1 - джерело випромінювання;
- 2,3 - дві паралельно відображаючі пластини;
- 4 - фотоприймач;
- 5,6 - волоконні світлодіоди;
- 7- калібровані прокладки;
- 8- відображаючі поверхні.

Тензоперетворювач забезпечений двома волоконними світловодами і прокладками, що калібруються, розташованими між відображаючими пластинами, поверхні яких виконані у вигляді багатошарового діелектричного покриття.

Крім того, діелектричне відображаюче покриття складається з шарів As_2Se_3 зі змінними коефіцієнтами заломлення. Тензодатчик містить джерело випромінювання, дві паралельні відображаючі пластини, одна з яких рухома у напрямі до іншої, фотоприймач, два волоконних світловода і прокладки, що калібруються, розташовані між пластинами, ті, що відображають поверхні яких виконані у вигляді багатошарового діелектричного покриття.

Тензоперетворювач працює таким чином.

Світлове випромінювання від джерела випромінювання через світловід прямує на пластину 2 і багато разів відображається від поверхонь 8 пластин 2 і 3, потім виводиться світловодом 6 на фотоприймач 4. При зміні відстані між пластинами 2 і 3 порушуються умови розповсюдження пучка, що веде до зниження інтенсивності

Формула винаходу:

1. Тензодатчик, що містить джерело випромінювання, дві паралельні пластини, що відображають, одна з яких рухома у напрямі до іншої, і фотоприймач, відмінний тим, що, з метою підвищення його чутливості, він забезпечений двома волоконними світловодами і прокладками, що

калібруються, розташованими між відображаючими пластинами, поверхні яких виконані у вигляді багатошарового діелектричного покриття.

1. Тензодатчик по п. 1, відмінний тим, що діелектричне відображаюче покриття складається з шарів As_2S_3 та As_2Se_3 зі змінними коефіцієнтами заломлення. [4]

1.1.2 Інтегрально-оптичний тензоперетворювач Є.Ф. Дудника

Винахід відноситься до вимірювальної техніки, зокрема до дослідження деформацій оптичними методами.

Відомий інтегрально-оптичний тензоперетворювач, що містить встановлені по ходу оптичного пучка оптичні світловоди і зовнішні поляризатори, в яких характеристики випромінювання залежать від прикладеного навантаження.

Недоліком такого тензоперетворювача є невисока чутливість, обумовлена деполіризацією випромінювання в оптичних хвилеводах.

Найближчим до винаходу по технічній суті є інтегрально-оптичний тензоперетворювач, що містить підкладку зі встановленими на ній вхідним і вихідним хвилеводами і тензочутливим елементом у вигляді хвилеводу.

Проте для цього тензоперетворювача характерна низька чутливість внаслідок великих втрат енергії в тензочутливому елементі і використуванні матеріалу з невеликою величиною фотопружних постійних.

Мета винаходу — підвищення чутливості.

Ця мета досягається тим, що тензодатчик забезпечений оптичними направленими відгалужувачами, вхідними і вихідним узгоджувачами у вигляді рупорів, встановлених на кінцях хвилеводів, а хвилевід виконаний у вигляді кільцевого резонатора, розташований між хвилеводами і сполучений з ними через направлені відгалужувачі.

Крім того, хвилеводи виконані на основі монокристалів сегнетоеластиків.

Тензоперетворювач складається з підкладки зі встановленими на ній вхідним і вихідним хвилеводами, виконаними на основі монокристалів сегнетоеластиків, тензочутливим елементом у вигляді кільцевого резонатора, оптичних направлених відгалужувачів, встановлених між хвилеводами і резонатором, вхідним і вихідним узгоджувачами у вигляді рупорів, і встановлених на кінцях хвилеводів.

Тензодатчик працює таким чином.

Когерентне монохроматичне випромінювання через вхідний узгоджувачий елемент у вигляді рупора, хвилевід і направлений відгалужувач поступає в кільцевий резонатор, в якому встановлюється режим хвилі, що біжить. Одночасно частина випромінювання через направлений відгалужувач проходить у вихідний хвилевід і далі через вихідний узгоджувачий елемент на вихід тензоперетворювача. При дії вимірюваного навантаження режим біжучої хвилі в кільцевому резонаторі порушується, що викликає зменшення інтенсивності випромінювання, що поступає через направлений відгалужувач у вихідний хвилевід, і, отже, зменшення інтенсивності випромінювання на виході тензоперетворювача.

Застосування пропонованого тензоперетворювача дозволяє зменшити габарити і підвищує чутливість при вимірюванні деформацій або механічних напруг зважаючи на високу добротність кільцевого резонатора, обумовленої вибором матеріалу з високими оптичними властивостями.

Формула винаходу

1. Інтегрально-оптичний тензоперетворювач, що містить підкладку зі встановленими на ній вхідним і вихідним хвилеводами і тензочутливим елементом у вигляді хвилеводу, відмінний тим, що, з метою підвищення чутливості, він забезпечений оптичними направленими відгалужувачами, вхідним і вихідним узгоджувачами у вигляді рупорів,

встановлених на кінцях хвилеводів, хвилевід виконаний у вигляді кільцевого резонатора, розташований між вхідним і вихідним хвилеводами і сполучений з ними через хвилеводні відгалужувані.

1.2 Тензоперетворювач по п.1, відмінний тим, що хвилеводи виконані на основі монокристалів сегнетоеластиків [5]

1.2.1 Методики вимірювання тиску у текучих середовищах

Сенсори тиску використовуються в основному для вимірювання тиску в рідких чи газоподібних середовищах. Загальна назва для цих двох середовищ -текучі середовища, підкреслює малий опір їхньої деформації (на відміну від твердих тіл).

Теорія механіки текучих середовищ досить складна. У той же час основні концепції можна викласти без складних математичних виразів у доступних термінах, не втрачаючи при цьому необхідної технічної точності і рівня деталізації.

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. Текучим середовищем може бути газ чи рідина, текуче середовище (fluid) і рідина (liquid) - не синоніми. Стандартна одиниця для виміру тиску в системі СИ - Паскаль (Па), дорівнює силі в один Ньютон, прикладеній на один квадратний метр (Н/м). Частіше застосовується більш велика одиниця кілопаскаль (кПа), рівний 1000 Па. В англійській системі одиниць тиск звичайний виражається у фунтах на квадратний дюйм (psi). Тиск може бути виражено й у деяких інших одиницях, включаючи висоту ртутного чи водяного стовпа.

Таблиця 1.1 - Таблиця переводу одиниць тиску

| | | |
|---------------|--------|-------------------|
| 1 bar \cong | 14,502 | psi |
| | 10,2 | mH ₂ O |
| | 1,02 | at |
| | 1,02 | kg/cm |
| | 750 | mm HG (Torr) |
| | 105 | N/m ² |
| | 100 | kPa |

Існує три типи тиску: абсолютний тиск, відносний тиск і перепад тиску. Абсолютний тиск — це абсолютне значення сили, що припадає на одиницю площі. Таким чином, абсолютний тиск є різницею між тиском у даній точці навколишнього середовища та абсолютним нульовим тиском, який відповідає тиску в повному вакуумі. Відносний тиск — це різниця між абсолютним тиском і місцевим атмосферним тиском. Місцевий атмосферний тиск може змінюватися залежно від температури навколишнього середовища, висоти над рівнем моря та місцевих погодних умов. Стандартний атмосферний тиск США на рівні моря 59 F (20 C) становить 14,696 абсолютних фунтів на квадратний дюйм (psi) або 101,325 кПа абсолютних. При вимірюванні відносного тиску важливий еталонний тиск. В імперській системі існують різні одиниці, які визначають тиск в абсолютних фунтах на квадратний дюйм (psi) або відносних фунтах на квадратний дюйм (psig). Літера в кінці назви одиниці вказує на тип вимірюваного тиску.

Для інших одиниць важливо визначити: відносний чи абсолютний тиск вимірюється. Відносний тиск відповідно до угоди завжди позитивний. Від'ємний відносний тиск визначено як вакуумний. Вакуумним називається тиск менший місцевого абсолютного атмосферного тиску. Рисунок 1.2 (та наведений в додатку А рис.2) показує співвідношення між абсолютним, відносним і вакуумним тисками. Диференціальний тиск - це різниця між двома невідомими тисками. Цей тип виміру тиску звичайно використовується, щоб одержати падіння тиску

в системі подачі потоку середовища. При вимірі різниці тисків не важливо, яке з них вважати опорним.

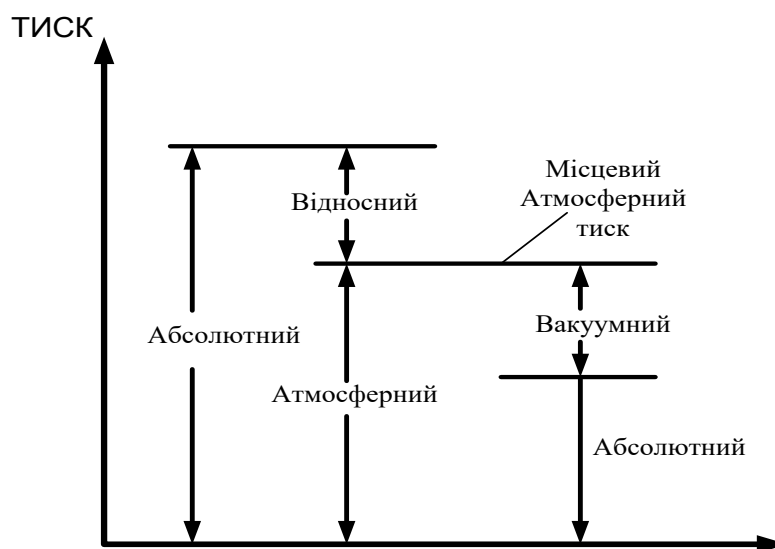


Рисунок 1.2 - Співвідношення між абсолютним і відносним тиском

На додаток до трьох типів вимірюваного тиску, є два типи систем з текучими середовищами, статичні і динамічні системи. Самі назви мають на увазі, що в статичній системі сфера знаходиться в спокої, а в динамічній - рухається.

Статичні системи. Тиск, вимірюваний у статичній системі, називається статичним. У системі, показаній на рисунку 1.3 (та наведена в додатку А рис.3), в однорідному статичному текучому середовищі тиск розподілений рівномірно і змінюється тільки у вертикальному напрямку.

Тиск зберігає те саме значення у всіх точках на даному горизонтальному рівні рідини незалежно від форми судини, але збільшується з глибиною і діє однаково у всіх напрямках. Збільшення тиску з ростом глибини визначається, по суті, впливом ваги рідини, що знаходиться вище даного рівня. На рисунку 1.4 (та наведена в додатку А рис.4) показані дві судини з однаковою рідиною, при одному і тому ж зовнішньому тиску - P .

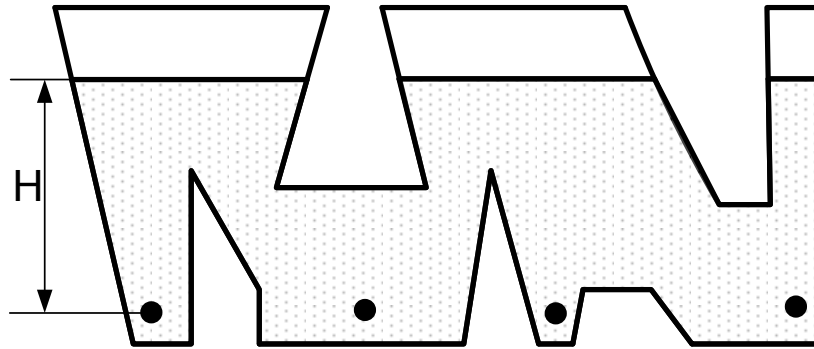


Рисунок 1.3 - Статична система

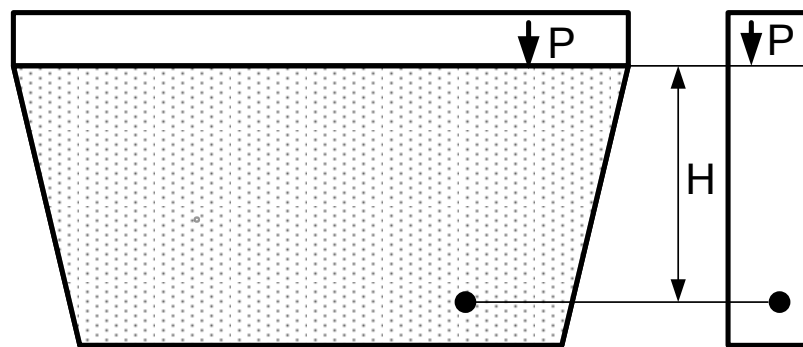


Рисунок 1.4 Тиск рідини в судині

На одній і тій же глибині в кожній із судин тиск буде однаковим. Зверніть увагу на те, що сторони великої судини не вертикальні. Тиск залежить тільки від глибини і зовсім не залежить від форми судини. Якщо робоче середовище - газ, збільшення тиску в середовищі по висоті стовпа в більшості випадків незначне, оскільки щільність і отже вага середовища набагато менша, ніж зовнішній тиск. Однак це стає несправедливим, якщо система досить велика (наприклад, якщо розглядається вся земна атмосфера) чи зовнішній тиск достатньо малий.

Розглянемо, як змінюється атмосферний тиск із висотою. На рівні моря атмосферний тиск по американському стандарту складає 14.696 psia (101.325 кПа). На висоті 10000 футів (3048 м) над рівнем моря - 10.106 psia (69.698 кПа) і на 30000 футах (9144 м) атмосферний тиск - 4.365 psia (30.101 кПа). Тиск у статичній рідині може бути легко розраховано, якщо

відома щільність рідини. Абсолютний тиск на глибині H в текучому середовищі визначається з рівняння [2]

$$P_{ABS} = P + r + g + H$$

де P_{ABS} - абсолютний тиск на глибині H , P - зовнішній тиск на поверхні рідини (для більшості відкритих систем це буде атмосферний тиск), r - щільність рідини, g - гравітаційне прискорення, ($g = 32,174$ фут/с²) ($9,81$ м/с²), H - глибина, на якій визначається тиск.

Тиск у динамічних системах. Динамічні системи більш складні для аналізу, ніж статичні системи і відповідно більш складною є методика проведення вимірів у них. У динамічній системі тиск звичайно 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, нарешті, по-третє, повний тиск, що є просто сумою статичного і динамічного тисків.

Сталі процеси в динамічних системах При вимірах тиску в динамічних системах повинні бути прийняті деякі запобіжні заходи. Для динамічної системи в сталих станах 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. На рисунку 1.5 показана динамічна система з речовиною, що тече через трубку (та наведена в додатку А рис.5).

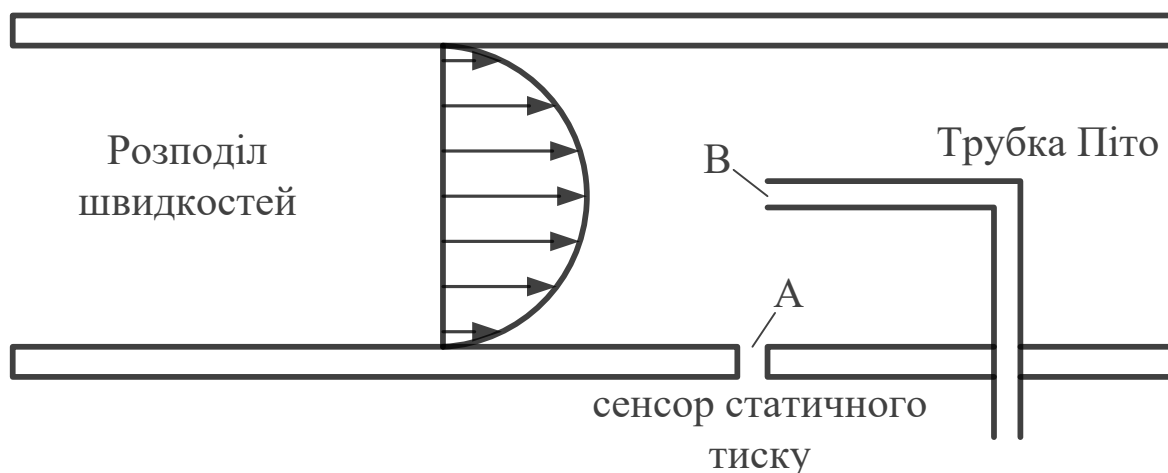


Рисунок 1.5 - Динамічна система

У цьому прикладі статичний тиск вимірюється біля стінки трубки в точці А. Трубка, вставлена в середину потоку, називається трубкою Піто-Прандтля (надалі, для простоти, будемо називати її трубкою Піто). Вона вимірює повний тиск у точці В системи. Повний тиск, вимірюваний у цій точці, називається стагнаційним тиском. Стагнаційний тиск - це значення тиску, отриманого, коли потік середовища сповільнюється до нульової швидкості, у ізентропічному (без тертя) процесі. Цей процес перетворить всю енергію середовища в тиск, що може бути вимірним. Стагнаційний, чи повний тиск, - сума статичного і динамічного тисків. Дуже важко точно виміряти власне динамічні тиски. І коли необхідність такого виміру усе-таки виникає, то вимірюють загальний і статичний тиск і потім обчислюється їхня різниця, щоб одержати динамічний тиск. Динамічний тиск може використовуватися для визначення швидкості середовища і швидкості зміни потоку в динамічних системах. При вимірі тисків у динамічних системах необхідно піклуватися про розташування сенсора. Для виміру статичного тиску розташування сенсора тиску повинний бути обраний так, щоб на вимір не вплинув потік у середовищі. Звичайно, сенсори розташовуються перпендикулярно до напрямку потоку. На рис. 1.5, сенсор статичного тиску розташований у стінці труби перпендикулярно потоку. На рисунках 1.6 а), 1.6 б) і 1.6 в) сенсори

статичного тиску (у точці А) також перпендикулярні потоку (та наведена в додатку А рис.6).

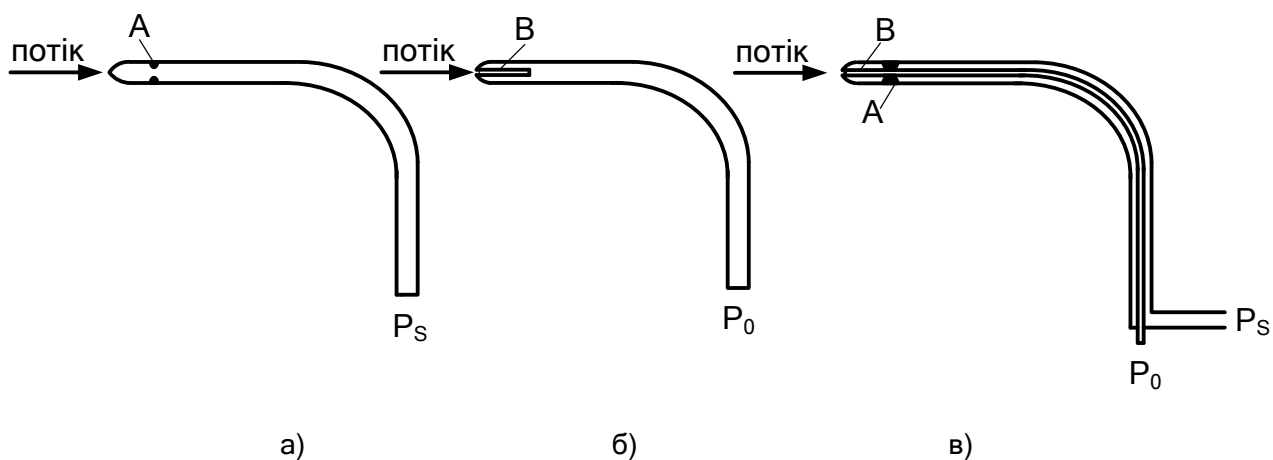


Рисунок 1.6 - Способи розташування сенсорів тиску: а) - вимірювання статичного тиску, б) - вимірювання повного тиску трубкою Піто, в) - комбіноване вимірювання статичного і повного тиску

Для виміру загального чи стагнаційного тиску важливо направити трубку Піто паралельно потоку з отвором, спрямованим безпосередньо в потік (рис.1.7 б і 1.7 в) У той час як статичний тиск не залежить від напрямку, динамічний тиск є вектором і залежить від величини і напрямку загального тиску. Якщо трубка Піто не спрямована по потоку, похибка виміру повного тиску може зрости. Крім того, для точних вимірів тиску отвори сенсорів і вимірювальних трубок не повинні вносити турбулентності в потік. Розташування сенсорів для виміру статичного і повного тиску повинні бути також ретельно підібрані. Не слід розташовувати сенсор у будь-якій точці системи, де може бути порушена ламінарність потоку, як до сенсора, так і після нього. До таких точок відносяться будь-які перешкоди типу клапанів, розгалужувачів потоку, насосів, крильчаток і т.п. Щоб збільшити точність виміру тиску в динамічній системі, варто відступити принаймні на 10 діаметрів труби вниз за течією від перешкоди і принаймні на 2 діаметри труби вверх за

течією. Крім того, діаметр трубки Піто повинний бути набагато (принаймні в 30 разів) менше діаметра труби, що проводить вимірюваний потік. Можуть також використовуватися спрямлювачі потоку, щоб мінімізувати будь-які зміни в напрямку потоку. При використанні трубки Піто рекомендується також вимірювати статичний тиск на тому ж рівні, що і повний тиск.

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. На рисунку 1.5 показано наближений розподіл швидкостей у трубі. 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 виміри тиску повинні бути проведені при різних радіусах і кутах у полярній системі чиї різній ширині і висоті в декартовій системі координат для перетину. Один раз знявши цю характеристику для даної труби, можна легко обчислити кореляцію між значенням повного тиску в центрі труби і загальним середнім тиском. Ця методика також використовується, щоб визначити швидкісний профіль усередині труби.

Перехідні режими в динамічних системах. У перехідних режимах змінюються різні параметри системи: тиск, швидкість потоку і т.д. Вимірювання 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 виміри будуть настільки ж точні, як у сталому стані. Якщо вимірювальна система повинна зняти неначе миттєву картину стану, швидкість виміру повинна бути достатньою, щоб картина не "змазалася" за час виміру. У системі вимірювання тиску є два фактори, що визначають час відгуку системи [2]:

- час відгуку сенсора тиску,
- час відгуку інтерфейсу, що передає тиск від середовища до

сенсора й приєднуючої трубки, екрани і т.п.

При застосуванні сенсорів фірми Motorola саме другий фактор зазвичай визначає повний час відгуку системи вимірювання тиску. Переважна більшість сучасних систем вимірювання тиску є квазістатичними системами, де стани системи змінюються відносно повільно в порівнянні з часом відгуку системи вимірювання чи зміна відбувається миттєво і потім стан стабілізується.

Два приклади перехідних систем являють собою пральні машини і вентиляційні труби в будинках. У пральній машині висота води в баці вимірюється побічно, по тиску на дні бака. У міру того як бак заповнюється, тиск змінюється. Час, за який заповнюється бак і змінюється тиск, набагато більший, ніж час відгуку системи.

У вентиляційних трубах зміна тиску відбувається, коли вентиляційні заслінки відкриваються чи закриваються, регулюючи рух повітря усередині будинку. Тиск системи змінюється в залежності від того, скільки заслінок відкрито і закрито. Зміни тиску практично миттєві. Для більшості промислових і будівельних застосувань, як і в розглянутих випадках, запізнювання в системах вимірювання тиску незначне.

Сенсори тиску фірми Motorola. Як виконуються реальні вимірники тиску? Існує багато типів систем вимірювання тиску: від простої манометричної трубки до п'єзоелектричних кремнієвих сенсорів. Оскільки сьогодні електронні системи керування і виміру заміняють механічні системи, варто зупинити свій вибір на кремнієвих сенсорах. Кремнієві сенсори мають дуже високу точність при низькій вартості і забезпечують зв'язок між механічними пристроями й електричною системою. Фірма Motorola робить широке сімейство кремнієвих сенсорів тиску, що розрізняються по діапазонах вимірюваних тисків і ступенях інтеграції мікросхеми: від некомпенсованих сенсорів до цілком каліброваних сенсорів з температурною компенсацією і погоджувальним підсилювачем, убудованим у мікросхему. Час відгуку кремнієвих сенсорів тиску МРХ

фірми Motorola складає 1 мс або менше. Сенсори тиску фірми Motorola є чудовим рішенням для вимірювання тисків у статичних чи динамічних системах. Таким чином, незважаючи на те, що вимірювання тиску може бути досить складним, при використанні належних методів можна для більшості систем провести точні вимірювання тиску.

1.3 Фізичний механізм дії тиску на напівпровідники

Розробка напівпровідникових тензодатчиків почалася відразу після відкриття Ч.С. У 1953 році Сміт вивчав ефект опору деформації германію та кремнію [6].

На даний час досягнуто значних результатів у теоретичних та експериментальних дослідженнях, які враховують фізичні ефекти, що виникають при деформації напівпровідників, і можливість використання цих ефектів у сенсорах. [7-12]

Фізична причина ефекту деформації полягає в тому, що під дією деформації змінюється рівень енергії напівпровідника, а зі зміною деформації змінюється енергетичний спектр електронів і дірок, що призводить до зміни електричних властивостей напівпровідника. напівпровідників [8, 10]. В однорідних напівпровідниках зсув енергетичних рівнів викликає залежність опору від деформації, тобто ефект опору деформації [7-12]. Коли деформація діє на p-n-переходи або інші напівпровідникові пристрої, електричні характеристики будуть змінюватися. Виявлено продуктивність пристрою як функцію тиску [8-14].

Розглядаючи зонну структуру напівпровідників, таких як кремній, слід зазначити, що існує шість еквівалентних мінімумів у зоні провідності, де є набір мінімумів, розташованих у напрямку кристала $\langle 100 \rangle$. Валентна зона має максимум при $\vec{K} = 0$, де \vec{K} – хвильовий вектор електрона, а поблизу її піку спостерігається подвійне виродження енергії. Якщо напівпровідник деформувати, його симетрія зазвичай знижується і

енергетичний спектр електронів змінюється. У цьому випадку відбувається деградація всього або частини спектру.

Теорія збудження використовується для визначення електронного спектру в деформованих кристалах [10]. Зміну енергії при малій деформації можна виразити у вигляді [10]

$$\Delta E^{(n)}(\vec{K}, \varepsilon_{ik}) = E_n^{(n)}(\vec{K}, \varepsilon_{ik}) - E_0^{(n)}(\vec{K}) = \sum_{i,j} D_y^{(n)} \varepsilon_y, \quad (1.1)$$

де ε_{ik} - тензор деформації.

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} - \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \right), \quad (1.2)$$

де U_i - складова вектора зміщення точки кристалічної решітки при деформації, $E^{(n)}(\vec{K}, \varepsilon_{ik})$ і $E_0^{(n)}(\vec{K}, \varepsilon_{ik})$ це є енергії електрона в n-ій зоні, яка відповідно в деформованому і недеформованому кристалі, $D_y^{(n)}$ - це є константи деформаційного потенціалу. У прямолінійній системі координат, що співпадає з головними вісями тензора $D_y^{(n)}$, зміщення кожного екстремуму зони провідності описане рівнянням [10]

$$\Delta E(\varepsilon) = D_{11}\varepsilon_{11} + D_{22}\varepsilon_{22} + D_{33}\varepsilon_{33} = \Xi_d(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + \Xi_u\varepsilon_{33}, \quad (1.3)$$

де $\Xi_d = D_{11} = D_{22}$ - стала, що характеризує вплив всебічного стиснення, тоді $\Xi_u = D_{33} - D_{11}$ це є вплив одноосної деформації. У матеріалі кремнію енергетичні мінімуми зони провідності розташовані по напрямкам $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$, $\langle 001 \rangle$ і зворотні рівні (типу Δ_1), тому при зміщенні рівнів при деформації для перших трьох мінімумів буде [10]

$$\begin{aligned} \Delta E_{11}[100] &= \Xi_d \Delta + \Xi_u \varepsilon_{11}, \\ \Delta E_{22}[010] &= \Xi_d \Delta + \Xi_u \varepsilon_{22}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\Delta E_{33}[001] = \Xi_d \Delta + \Xi_u \varepsilon_{33}.$$

де Δ - зміна об'єму при деформації, яка дорівнює

$$\Delta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}. \quad (1.5)$$

У загальному вигляді вираз (1.4) можна зобразити рівнянням [13]

$$\Delta E_{ii} = \Xi_d \Delta + \Xi_u \varepsilon_{ii}, \quad (1.6)$$

де i – це є позначка, що набуває значень 1,2,3. При великих деформаціях та значного зсуву в деяких випадках мінімуми зони провідності можуть зміститися до зони Брілюена, а тоді деформаційна зміна енергії екстремумів буде [10]

$$\begin{aligned} \Delta E_1 &= \Xi_d \Delta + \Xi_u \varepsilon_{11} + \Delta E / 4 - 2 \left| \Xi'_u \varepsilon_{23} \right|, \\ \Delta E_2 &= \Xi_d \Delta + \Xi_u \varepsilon_{22} + \Delta E / 4 - 2 \left| \Xi'_u \varepsilon_{13} \right|, \\ \Delta E_3 &= \Xi_d \Delta + \Xi_u \varepsilon_{33} + \Delta E / 4 - 2 \left| \Xi'_u \varepsilon_{12} \right|, \end{aligned} \quad (1.7)$$

де ΔE - різниця енергій між тими рівнями, які є нижніми, якщо відсутня деформація, Ξ'_u - стала деформаційного потенціалу, яка характеризує вплив зсуву. 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 виразом [10]

$$E_{1,2}(\vec{K}) = AK^2 \pm \sqrt{\xi_K}, \quad (1.8)$$

а в деформованому кристалі [10]

$$E_{1,2}(\vec{K}) = AK^2 + a\Delta \pm \sqrt{\xi_K + \xi_\varepsilon + \xi_{\varepsilon K}}, \quad (1.9)$$

де

$$\xi_K = B^2K^4 + C^2(K_1^2K_2^2 + K_1^2K_3^2 + K_2^2K_3^2), \quad (1.10)$$

$$\xi_\varepsilon = b^2\left((\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2\right) + d^2(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{13}^2 + \varepsilon_{23}^2), \quad (1.11)$$

$$\begin{aligned} \xi_{\varepsilon K} = Bb\left(3(K_1^2\varepsilon_{11} + K_2^2\varepsilon_{22} + K_3^2\varepsilon_{33}) - K^2\Delta\right) + \\ + 2Dd(K_1K_2\varepsilon_{12} + K_1K_3\varepsilon_{13} + K_2K_3\varepsilon_{23}) \end{aligned}, \quad (1.13)$$

де A, B, C – це є параметри валентної зони, які характеризують ефективні маси дірок, $D^2 = C^2 + 3B^2$, a, b, d – це є сталі деформаційного потенціалу для валентної зони, $a\Delta$ – це є ізотропна деформація (наприклад, всебічне стиснення), що приводить до зміщення зони як цілого. Тоді анізотропна деформація дає розщеплення зон

$$E_{v^+} - E_{v^-} = 2\sqrt{\xi_\varepsilon}, \quad (1.14)$$

де E_{v^+} – це є розташування вершини верхньої валентної зони при деформації, а E_{v^-} – це є нижньої зони. Отже, зміщення і розщеплення вершини валентної зони можна показати у вигляді [10]

$$\Delta E_v = a\Delta \pm \sqrt{\xi_\varepsilon}. \quad (1.15)$$

Якщо деформації достатньо великі, тобто коли $\Delta E = kT$ (k – це стала Больцмана, T – це абсолютна температура у градусах Кельвіна), нижні мінімуми зони провідності збагачені електронами, а стеля валентної зони збагачена дірками, тоді можна визначити відстань між найближчими рівнями валентної зони і зони провідності, тобто ширину забороненої зони у деформованому напівпровіднику [11]

$$E_{g^{(ef)}}(\varepsilon) = E_{g0} + \Delta E_{g^{(ef)}}, \quad (1.16)$$

$$E_{g(ef)} = \Delta E_{c\min} - \Delta E_{v\max} \quad (1.17)$$

де $\Delta E_{c\min} = \Delta E_c$ - це є деформаційне зміщення нижнього мінімуму зони провідності, $\Delta E_{c\max} = \Delta E_v$ - це є деформаційне зміщення верхнього рівня валентної зони. Положення рівня Фермі під час дії значної деформації у загальному випадку

$$E_F = \Delta E_F + E_{F0}, \quad (1.18)$$

де ΔE_F - це деформаційна зміна положення рівня Фермі. Деформаційна зміна рівня Фермі ΔE_F у напівпровіднику n -типу у випадку невиродженого напівпровідника (високі температури, що малі концентрації легувальних домішок) визначається по формулі [10]

$$\Delta E_F = kT \ln \left[1/n_0 \sum_{j=1}^N n_{0j} \exp(-\Delta E_j / kT) \right], \quad (1.19)$$

де n_0 - це є повна концентрація електронів у недеформованому напівпровіднику, n_{0j} - це є концентрація електронів у j -мінімумі, N - це є кількість енергетичних мінімумів, ΔE_j - це є деформаційне зміщення для j -мінімуму. Для однотипних мінімумів при малих деформаціях для випадку $\Delta E_j = kT$ можна записати [10]

$$\Delta E_F = 1/N \sum_{j=1}^N \Delta E_j. \quad (1.20)$$

Для випадків деформації, що приводять до однакового зміщення усіх мінімумів зони провідності, рівень Фермі зміщується разом з краєм зони

$$\Delta E_F = \Delta E_c. \quad (1.21)$$

Для випадку при сильному виродженні електронів, тобто коли деформації малі, тоді зміщення рівня Фермі описується [10]

$$\Delta E_F = \frac{\sum_{j=1}^N m_{ej} n_{0j}^{1/3} \Delta E_j}{\sum_{j=1}^N m_{ej} n_{0j}^{1/3}}. \quad (1.22)$$

Для однотипного рівня енергії зсув рівня Фермі визначається рівнянням (1.21). Деформаційна зміна рівня Фермі в матеріалах р-типу відбувається при ізотропній деформації. Загальний деформаційний зсув валентної зони узгоджується зі зсувом рівня Фермі.

$$\Delta E_F = \Delta E_v = a\varepsilon. \quad (1.23)$$

Вплив анізотропної деформації на напівпровідники р-типу не змінює рівень Фермі. У деформованому напівпровіднику перерозподіл електронів між енергетичними рівнями призводить до зміни концентрації носіїв заряду в цій області. Концентрація у власному напівпровіднику при деформації дорівнює [10]

$$n_i = n_{i0} \exp(-\Delta E_{g(ef)} / kT). \quad (1.24)$$

Концентрації носіїв заряду у напівпровіднику *n*-типу ($N_d = n_i$) описуються виразами [6]

$$n_n = N_d + n_{i0}^2 / N_d \exp(-\Delta E_{g(ef)} / kT), \quad (1.25)$$

$$n_p = n_{i0}^2 / N_d \exp(-\Delta E_{g(ef)} / kT) \quad (1.26)$$

де N_d - концентрація донорної домішки. Аналогічні вирази можна написати для матеріалу *p* - типу ($N_A = n_i$) з акцепторними домішками N_A [10]

$$p_p = N_A + n_{i0}^2 / N_A \exp(-\Delta E_{g(ef)} / kT), \quad (1.27)$$

$$p_n = n_{i0}^2 / N_A \exp(-\Delta E_{g(ef)} / kT). \quad (1.28)$$

Якщо тиски великі, умови ($N_d = n_i$) і ($N_A = n_i$) порушуються, тоді концентрація носіїв заряду потрібно розраховувати згідно формул [10]

$$n = 1/2N_d[(1 + 4n_i^2 / N_d^2)^{1/2} + 1], \quad (1.29)$$

$$p = 1/2N_A[(1 + 4n_i^2 / N_A^2)^{1/2} - 1]. \quad (1.30)$$

Необхідно розглядати складні доменні структури, коли домени розщеплюються під час деформації і лише невелика частка енергетичних рівнів бере участь у процесі провідності. Для цього випадку визначимо концентрацію носіїв [10]

$$n = 2 / h^3 (kT / 2\pi)^{3/2} \sum_{i=1}^N m_{ei}^{3/2} \exp[-(E_{ci} - E_F / kT)]. \quad (1.31)$$

$$p = 2 / h^3 (kT / 2\pi)^{3/2} \sum_{j=1}^N m_{hj}^{3/2} \exp[-(E_F - E_{v0} - \Delta E_{vj} / kT)]. \quad (1.32)$$

Для сильно вироджених напівпровідників зміна концентрації носіїв значно менша, ніж для невироджених напівпровідників, що пов'язано зі зменшенням п'єзорезистивного ефекту зі збільшенням концентрації легуючих домішок.

Причиною появи домішкових енергетичних рівнів у забороненій зоні можуть бути проникнення домішкових атомів у напівпровідник, а також різноманітні дефекти: дислокації, структурні пошкодження тощо. Зміни в електронному спектрі під час деформації напівпровідника призводять до зміни рівнів домішок. У випадку зонної структури з кількома долинами рівень домішок є таким же виродженим, як і край домену, а деформація

однаково усуває виродження обох. Під час деформації та розщеплення області кожен екстремум супроводжується власним неглибоким домішковим рівнем. Швидкість зміщення цього рівня енергії відносно відповідної області зазвичай на два порядки нижча за швидкість зміщення на краю області та зміщення забороненої зони.

Швидкість зміщення цього рівня енергії відносно відповідної області зазвичай на два порядки нижча за швидкість зміщення на краю області та зміщення забороненої зони. Швидкість зміщення глибинних шарів зазвичай більша при деформації, і зазвичай кожен глибинний шар характеризується своєю швидкістю зміщення. Якщо розташування рівня домішки в області змінюється з тиском

$$E_i = E_{i0} + \Delta E_i, \quad (1.33)$$

де ΔE_i - це зміна енергії іонізації.

То в середньому для оцінок глибоких рівнів можна вважати [10]

$$\Delta E_i \approx 1/2 \Delta E_{g(ef)}. \quad (1.34)$$

Перерозподіл носіїв між зміщеними рівнями енергії в деформованому напівпровіднику та зміщення домішкового центру як центру рекомбінації призводять до зміни рухливості вторинних носіїв. Якщо тиск невеликий, зміни плинності зумовлені п'єзорезистивним ефектом. Ефект опору деформації (п'єзорезистивний) — це зміна опору напівпровідника внаслідок навантаження, що викликає деформацію [13]. Діатонічний ефект описується за допомогою деяких понять з теорії пружності. Якщо тиск високий, залежність від рухливості складна. Рухливість носіїв пов'язана з їх масою і співвідношенням

$$\mu = \tau q / m, \quad (1.35)$$

де τ - це середній час релаксації, що вважається незалежним від тиску. Тоді поверхні постійної енергії електронів біля мінімумів у відповідних енергетичних зонах є еліпсоїдами обертання з вісями симетрії, що орієнтовані в кремнію по осі $\langle 100 \rangle$. Кожен еліпсоїд постійної енергії характеризується двома різними масами – перша вздовж осі еліпсоїда m_0 та і перпендикулярно до неї m_{\perp} , котрим відповідають різні рухливості - μ_0 і μ_{\perp} . Відношення рухливостей \hat{E} має назву фактора анізотропії рухливості

$$K = \mu_{\perp} / \mu_0. \quad (1.36)$$

Перерозподіл носіїв заряду поміж різними енергетичними рівнями при деформації приводить до зміни внесення цих двох компонентів у загальну їхню рухливість по відношенню до недеформованого матеріалу. Тоді ефективна рухливість електронів [10]

$$\mu_n = \sum_{i=1}^N (n_{pi} / n_p) \mu_i, \quad (1.37)$$

де μ_i - це є рухливість електрона в i - мінімумі уздовж напрямку струму. Величину μ_i можна визначити через μ_0 і μ_{\perp} - так для рикладу в недеформованому кремнію р-типу рухливість електронів уздовж осі $\langle 100 \rangle$ має дорівнювати [10]

$$\mu_{n0} = 1/3\mu_0 + 2/3\mu_{\perp}, \quad (1.38)$$

оскільки $\langle 010 \rangle$ і $\langle 001 \rangle$ мають в напрямку $\langle 100 \rangle$ рухливість μ_{\perp} . За дії деформації внесок різних змінюється. Так, наприклад, при одноосному стисненні кремнію уздовж осі $\langle 100 \rangle$ тоді рухливість описує рівняння [10]

$$\mu_{n0} = \frac{1/3\mu_n \exp(-\Delta E_1 / kT) + 2/3\mu_{\perp} \exp(-\Delta E_2 / kT)}{\sum_{i=1}^N \exp(-\Delta E_{g(ef)} / kT)}. \quad (1.39)$$

Рухливість дірок у недеформованому кремнію [10]

$$\mu_p = \tau q / m_M^{3/2} (m_E^{1/2} + m_T^{1/2}), \quad (1.40)$$

де m_E і m_T - це ефективні маси легких і важких дірок у недеформованому кремнію. Тоді при деформації рухливість дірок [10]

$$\begin{aligned} \mu_p &= (p_1 \mu_1 + p_2 \mu_2) / (p_1 + p_2) = \\ &= (\tau q m_E^{1/2} m_V^{3/2}) \frac{1 + (m_T / m_E)^{1/2} K^{3/2} \exp[(\Delta E_{v1} - \Delta E_{v2}) / kT]}{1 + K^{3/2} \exp[(\Delta E_{v1} - \Delta E_{v2}) / kT]}, \end{aligned} \quad (1.41)$$

де p_1 і p_2 - це концентрація дірок у верхній і нижній зонах, які розщепилися, μ_1 і μ_2 - це відповідні рухливості, $K = m_1 / m_2$, $(\Delta E_{v1} - \Delta E_{v2})$ - де розщеплення вершини валентної зони.

У кремнії р-типу практично відсутня анізотропія рухливості дірок. Ефект анізотропної деформації порушує симетрію поля решітки, внаслідок чого виродження зникає через верхню межу валентної зони легких і важких дірок. Переміщуюте різні кількості в протилежних напрямках. Це, у свою чергу, призводить до перерозподілу пор між субрегіонами [10]. Через різницю в рухливості концентрації легких і важких дірок перерозподіляються, в результаті чого змінюється провідність і опір. Зміна провідності описується рівнянням [10]

$$\Delta \sigma = q(\Delta p_1 \mu_1 + \Delta p_2 \mu_2) = q \Delta p (\mu_1 - \mu_2), \quad (1.42)$$

де Δp_1 і Δp_2 - це є деформаційна зміна концентрації дірок у верхній і нижній зонах, що розщепилися, $\Delta p_1 + \Delta p_2 = \Delta p$. Тоді відносна зміна провідності [10]

$$\Delta \sigma / \Delta \sigma_0 = \Delta p (\mu_1 - \mu_2) (p_1 \mu_1 + p_2 \mu_2). \quad (1.43)$$

У випадку впливу деформації (розтягувальна напруженості ξ_{11}) на напівпровідник n-типу у напрямку $\langle 100 \rangle$ дно зони провідності у цьому опуститься, а в $\langle 010 \rangle$ підніметься, унаслідок цього відбудеться перерозподіл електронів між мінімумами та зміниться їхня концентрація. Якщо позначити кількість електронів, що перейшли з одного мінімуму в інший через Δn , тоді вираз для провідності напівпровідника n-типу має вигляд [15]

$$\sigma_g = q[(n_0 + \Delta n)\mu_{\perp} + (n_0 + \Delta n)\mu_0]/2 = \sigma_0 + q\Delta n(\mu_{\perp} - \mu_0)/2. \quad (1.44)$$

Оскільки $\mu_0 < \mu_{\perp}$, тоді електрична провідність деформованого напівпровідника зменшиться. Тоді відносна зміна електропровідності [16]

$$\Delta\sigma/\Delta\sigma_0 = (\Delta n/n_0)(\mu_{\perp} - \mu_0)/(\mu_{\perp} + \mu_0) = (\Delta n/n_0)(K - 1)(K + 1). \quad (1.45)$$

Отже, 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 $a_1\xi_{11}$, а в долинах, які розташовані уздовж осі $\langle 010 \rangle$ зменшились на величину $a_2\xi_{11}$, то відношення кількості електронів у двох типах долин у відповідності до закону Больцмана для слабо легованих напівпровідників дорівнює [10]

$$\begin{aligned} n_{\langle 010 \rangle} / n_{\langle 100 \rangle} &= \exp[(\Delta E_0 - a_1\xi_{11})/(RT)] / \exp[(\Delta E_0 - a_2\xi_{11})/(RT)] = \\ &= \exp[(a_1 - a_2)\xi_{11}/(RT)], \end{aligned} \quad (1.46)$$

де E_0 - це є енергетичний рівень при $\xi_{11} = 0$, $R = 2$ кал/моль/°К – це є газова стала, T – це є абсолютна температура. Тоді загальна кількість електронів залишається постійною [10]

$$n_0 = 2n_{[100]} + 4n_{[010]}, \quad (1.47)$$

тобто електропровідність можна записати

$$\sigma_g = q(2n_{[100]} + 4n_{[010]}). \quad (1.48)$$

Розв'язавши рівняння (1.46) - (1.48) можна отримати значення [12]

$$\rho = \frac{1/\sigma(1 + 2\exp[(a_1 + a_2)\xi_{11}/(RT)])}{n_0q[\mu_0 + 2\mu_{\perp}\exp[(a_1 + a_2)\xi_{11}/(RT)]]}, \quad (1.49)$$

Відносна зміна опору під дією напруженості буде визначена [6]

$$\Delta\rho / \rho_0 = \frac{2/3(\mu_{\perp} - \mu_0)(1 - \exp[(\alpha_1 + \alpha_2)\xi_{11}/(RT)])}{[\mu_0 + \mu_{\perp}\exp[(\alpha_1 + \alpha_2)\xi_{11}/(RT)]]}. \quad (1.50)$$

За умови анізотропії електропровідності, що виникає під дією одноосного розтягування або стиснення, зв'язок між напруженістю поля і густиною струму описаний системою рівнянь [15]

$$\begin{aligned} E_1 / \rho_0 &= j_1[1 + \Pi_{11}\xi_{11} + \Pi_{12}(\xi_{22} + \xi_{33})] + \Pi_{44}(j_2\xi_{12} + j_3\xi_{13}), \\ E_2 / \rho_0 &= j_2[1 + \Pi_{11}\xi_{22} + \Pi_{12}(\xi_{11} + \xi_{33})] + \Pi_{44}(j_1\xi_{12} + j_3\xi_{23}), \\ E_3 / \rho_0 &= j_3[1 + \Pi_{11}\xi_{33} + \Pi_{12}(\xi_{11} + \xi_{22})] + \Pi_{44}(j_1\xi_{12} + j_2\xi_{13}). \end{aligned} \quad (1.51)$$

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

$$\rho_0 = 3/[n_0q(\mu_0 + 2\mu_{\perp})], \quad (1.52)$$

E_1, E_2, E_3 - це є компоненти вектора напруженості електричного поля, j_1, j_2, j_3 - компоненти вектора густини струму, $\xi_{11}, \xi_{22}, \xi_{33}$ - нормальні компоненти напруги, $\xi_{12}, \xi_{23}, \xi_{13}$ зсувові компоненти напруги (позначки 1,2,3 відповідають кристалографічним осям ОХ1, ОХ2, ОХ3), $\Pi_{11}, \Pi_{12}, \Pi_{44}$,- коефіцієнти п'єзоопору, тобто коефіцієнти пропорційності

між зміною питомого опору і деформацією, які залежать від властивостей матеріалу, таких як тип провідності, питомий опір, температура тощо.

Якщо електричне поле E , густина струму і механічна напруга ξ мають напрямок уздовж однієї осі, то [10]

$$E / \rho_0 = j(1 + \Pi_1 \xi), \quad (1.53)$$

де Π_1 - це є повздовжній коефіцієнт п'єзоопору, який залежить від кристалографічного напрямку у матеріалі. Коефіцієнт Π , для кубічних кристалів має вигляд [10]

$$\Pi_1 = \Pi_{11} + 2(\Pi_{44} + \Pi_{12} - \Pi_{11})(l^2 m^2 + l^2 n^2 + m^2 n^2), \quad (1.54)$$

де l, m, n - це є напрямні косинуси кутів між напрямком деформації і вісями OX_1, OX_2, OX_3 , відповідно. Повздовжній опір із повздовжньою напругою ξ

$$E / j = \rho_0 + \Delta\rho, \quad (1.55)$$

тому зміна опору з напругою ξ

$$\Delta\rho / \rho_0 = \Pi_1 \xi \quad (1.56)$$

Визначивши у (1.56) прикладену механічну напругу ξ через відносну деформацію ε і модуль Юнга E_1 , отримаємо [10]

$$\Delta\rho / \rho_0 = \Pi_1 E_1 \varepsilon = m_1 \varepsilon, \quad (1.57)$$

де $m_1 = \Pi_1 E_1$ - це є коефіцієнт еластоопору, що залежить від кристалографічних напрямків, температури та деформації. Величина модуля Юнга E_1 залежить від кристалографічного напрямку [6]

$$1 / E_1 = S_{11} + (S_{44} + S_{12} - S_{11})(l^2 m^2 + l^2 n^2 + m^2 n^2), \quad (1.58)$$

де S_{11}, S_{12}, S_{44} - модулі пружності, що пов'язані з пружними сталими кубічного кристалу [10]

$$\begin{aligned} C_{11} &= (S_{11} + S_{12}) / [(S_{11} - S_{12})(S_{11} - 2S_{12})], \\ C_{12} &= -S_{12} / [(S_{11} - S_{12})(S_{11} + 2S_{12})], \\ C_{44} &= 1 / S_{44}. \end{aligned} \quad (1.59)$$

У кремнію n-типу найбільший тензоефект має місце в напрямку $\langle 100 \rangle$, а для кремнію p - типу - у напрямку $\langle 111 \rangle$.

Наведені твердження та висновки є основою для розрахунку впливу тиску на конкретний напівпровідниковий прилад, оскільки основними факторами, що викликають зміну характеристик приладу під тиском, є зміни рівнів енергії напівпровідника, ефективної маси, часу життя та рухливості носіїв. Характеристики напівпровідникових приладів залежать від тиску, в тому числі р-n переходів, вольт-амперних характеристик транзисторів і їх ємностей, напруги пробою, коефіцієнтів підсилення транзисторів і т.д. Слід зазначити, що існує два діапазони тиску, які визначають характер зміни параметрів напівпровідникових приладів [16]. Це великі тиски, при яких $\Delta E_{g(ef)} > kT$, а малі тиски, коли

$\Delta E_{g(ef)} < kT$ ($\Delta E_{g(ef)}$ - це зміна ширини забороненої зони, kT - це теплова енергія). При високих напругах області розпадаються, і носії заряду перерозподіляються між крайніми. При цьому основним фактором, що змінює параметри напівпровідника, є деформаційна зміна забороненої зони. Якщо тиск невеликий, зміни ефективної маси, часу життя та рухливості носіїв заряду внаслідок тиску суттєво впливають на зміни струму через напівпровідник. Іноді зміщення домішкових енергетичних рівнів під впливом тиску може внести значний внесок, якщо рекомбінація та генерація носіїв заряду на цих енергетичних рівнях або тунелювання через них істотно впливає на струм.

Експериментальні дослідження ефекту деформаційної стійкості напівпровідників численні та різноманітні [7-15]. Серед найбільш вивчених напівпровідникових матеріалів кубічної ґратки найбільшу тензочутливість мають n- і p-Ge, n- і p-Si, n-GaSb, p-PbTe. П'єзореzystивний коефіцієнт об'ємної стисливості n-GaSb, p-PbTe, GaAs, AlGaAs та інших потрійних сполук досить великий. З певною пропорцією інгредієнтів [27]. Значення п'єзореzystивних і пружнореzystивних коефіцієнтів залежать від рівня легування і температури напівпровідника. На рисунку 1.7 показана залежність коефіцієнта від концентрації носіїв заряду в кремнії, побудована за даними багатьох публікацій [7-15].

Коефіцієнт π_{12} у p-Si близький до нуля; у p-Si досить точно виконується співвідношення $\pi_{12} = -\frac{1}{2}\pi_{11}$, де π - це п'єзореzystивний коефіцієнт. У дифузійних чи отриманих іонним легуванням тензорезисторах інтегральних напівпровідникових чутливих елементах (НЧЕ) концентрація носіїв струму змінюється по глибині від значення N біля поверхні НЧЕ до значення N_0 у p-p переході, рівного концентрації носіїв струму у підкладці. Тому середні значення п'єзо- і еласторезистивних коефіцієнтів дифузійних шарів відрізняються від значень для об'ємного кремнію, причому різниця залежить від профілю розподілу домішки при дифузії [6]. Як показує розрахунок [7], середні значення $\bar{\pi}_{44}$ у дифузійних кремнієвих тензорезисторах p- типу з розподілом домішки за законом Гаусса чи по додатковій функції помилок відрізняються від значень $\bar{\pi}_{44}$ в об'ємному кремнію з концентрацією дірок p , рівній p_s , не більше ніж на 5 - 13%. Разом з тим середній питомий опір дифузійного шару в 2 - 7 разів більше питомого опору об'ємного кремнію з $p = p_s$.

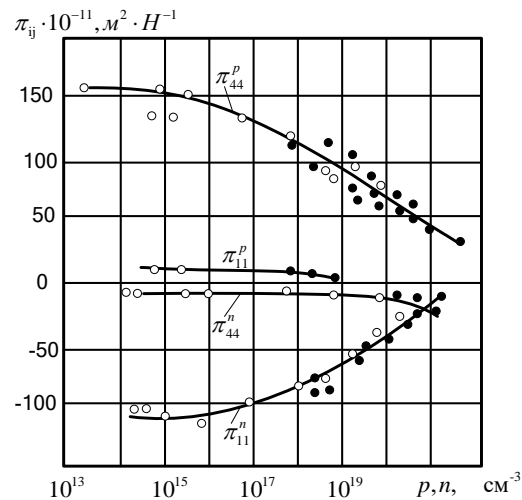


Рисунок 1.7 - Залежності п'єзорезистивних коефіцієнтів в об'ємному кремнію від концентрації носіїв струму (\circ) і в дифузійних шарах кремнію від поверхневої концентрації носіїв

На рисунках 1.8, а і 1.9, а показані експериментальні температурні залежності середніх значень π - коефіцієнтів для дифузійних шарів n - і p - типів провідності в кремнію [7]. Температурна залежність величин π_{11}^p і π_{12}^p більш складна [7], але через малість цих величин практично не представляє інтересу. Складний характер має температурна залежність опору тензорезисторів (рис.1.8, б і 1.9, б). До значень $n_s = 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ у n -Si і $p_s = 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ у p -Si ця залежність немонотонна, що утрудняє компенсацію температурних похибок тензоперетворювачів. Температурна залежність опору характеризується величиною температурного коефіцієнта (ТКС)

$$\alpha_R = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial R}{\partial T} = \alpha_\rho. \quad (1.60)$$

Залежність ТКС при кімнатній температурі від питомого опору в кремнію оказана на рисунку 1.10 [7], зв'язок між питомим опором і концентрацією носіїв струму - на рисунку 1,10.

Поверхнева концентрація електронів

$$n_s : 1 - 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}; 2 - 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}; 3 - 1,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3};$$

$$4 - 3,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}; 5 - 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}; 6 - 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}; 7 - 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$$

У практичних розрахунках температурних і концентраційних залежностей тензочутливості й опору інтегральних тензорезисторів можна використовувати різні емпіричні формули для п'єзорезистивних коефіцієнтів [6-12] і рухливості носіїв струму μ в об'ємному кремнії, що досить добре (з похибкою 3 - 10%) описують експериментальні залежності $\pi(N, T)$ і $\mu(N, T)$.

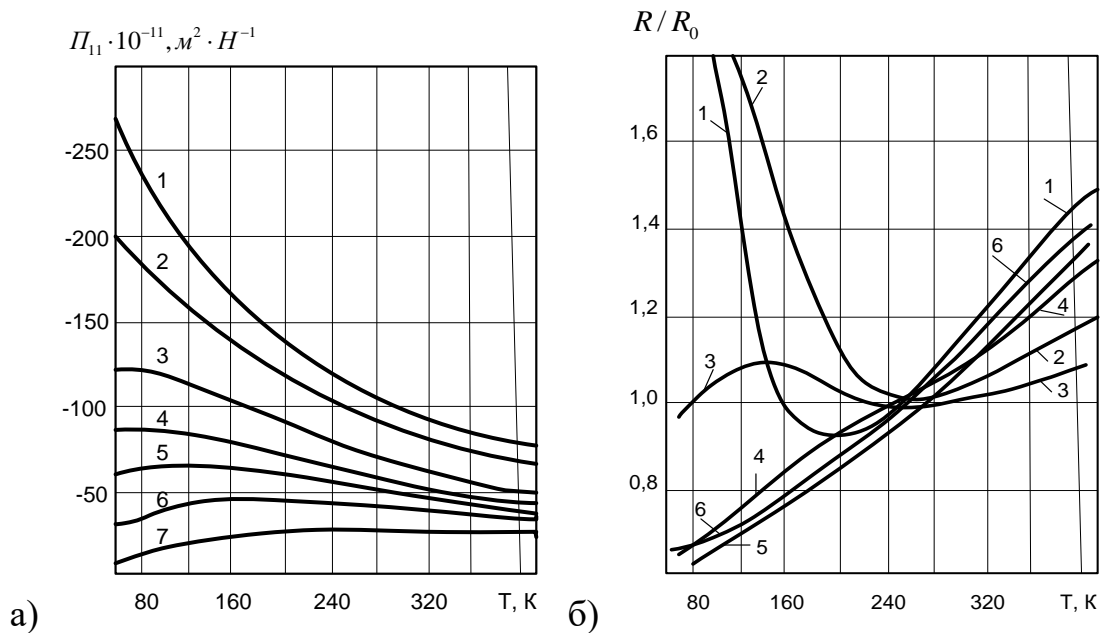


Рисунок 1.8 - Температурні залежності середнього значення коефіцієнта п'єзоопору (а) і відносної зміни опору (б) для дифузійних шарів n -типу в кремнії

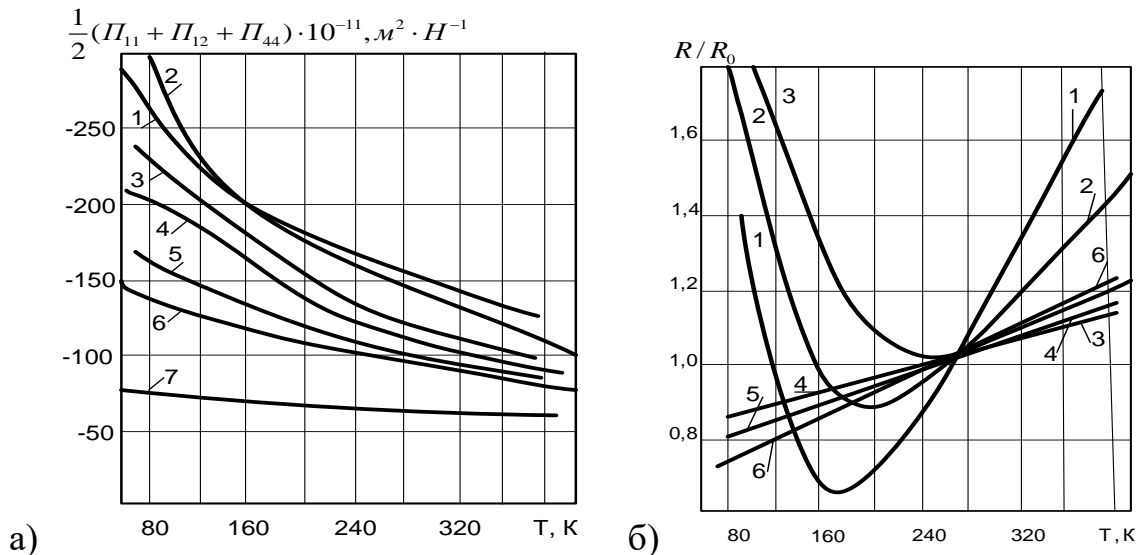


Рисунок 1.9 - Температурні залежності середнього значення коефіцієнта п'єзоопору (а) і відносної зміни опору (б) для дифузійних шарів р-типу вкремнію

Поверхнева концентрація дірок

$$p_s: 1 - 4,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}; 2 - 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}; 3 - 9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}; 4 - 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}; 5 - 5,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}; \\ 6 - 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}; 7 - 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$$

Досвід показує, що зміна опору напівпровідникових матеріалів залежить від деформації нелінійно. Для дискретних кремнієвих тензорезисторів така залежність з гарною точністю може бути описана квадратичним законом [2]

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K\varepsilon + K_1\varepsilon^2, \quad (1.61)$$

де величина K називається коефіцієнтом тензочутливості і може бути зв'язана з п'єзо- чи еласторезистивними коефіцієнтами. Квадратичний коефіцієнт K_1 у принципі може бути розрахований з відомої зонної структури [9]. Він описується тензором 6-го рангу і так само, як і лінійний коефіцієнт, сильно анізотропічний. У кремнію n - типу при деяких

кристалографічних напрямках K_l прямує до нуля [3]. Залежність $\frac{\Delta R}{R_0}(\varepsilon)$

для дифузійних кремнієвих тензорезисторів p - типу складніша, ніж дає рівняння (1.61). Так, наприклад у важливому випадку дифузійних тензорезисторів, орієнтованих по напрямках $\langle 110 \rangle$ у площині (001) кремнію, закони зміни опору поздовжнього і поперечного (щодо напрямку деформації) тензорезисторів істотно розрізняються [6], що необхідно врахувати при конструюванні інтегральних НЧЕ

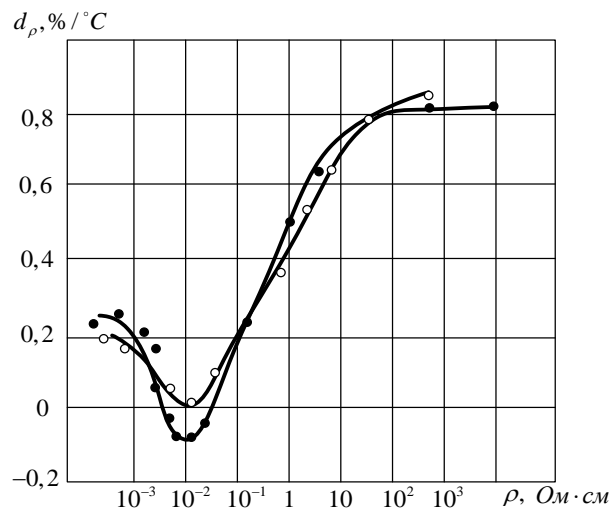


Рисунок 1.10 - Залежність ТКС від, питомого опору в кремнію p - типу (o) і n - типу (•) при 23°C [2]

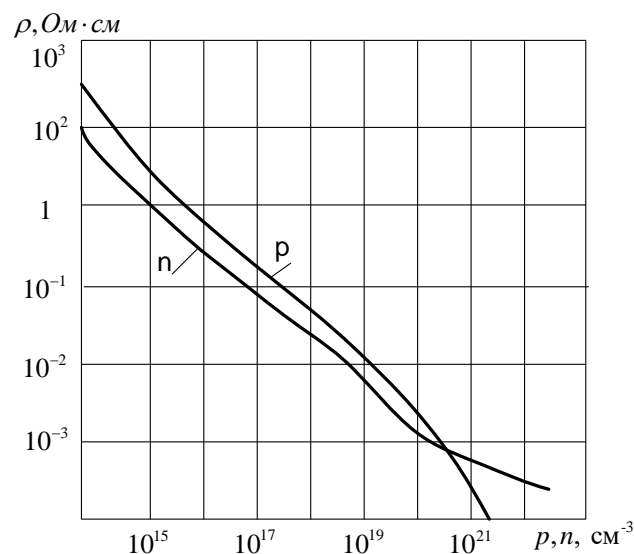


Рисунок 1.11 - Залежність питомого опору кремнію від концентрації носіїв струму [2]

Перераховані властивості напівпровідникових тензорезисторів обумовили вибору матеріалу, оптимального для НЧЕ. Питання це вирішується, загалом, неоднозначно. [2] Для дискретних кремнієвих тензорезисторів деякий компроміс залежністю опору і тензочутливістю, а також лінійністю перетворення досягається при використанні кремнію p -типу $\rho = 3 \cdot 10 \text{ см}^{-3} \text{ см}$ ($\rho = 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). [2] В інтегральних кремнієвих НЧЕ використовують тензорезистори p -типу з приблизно такою ж поверхневою концентрацією дірок. Дифузійні кремнієві тензорезистори n -типу в НЧЕ практично не використовуються через велику температурну залежність характеристик і нелінійності перетворення. У НЧЕ об'ємного стиску малу температурну залежність чутливості в широкому інтервалі температур, при досить високому її значенні можна забезпечити, підбираючи відповідний склад і ступінь легування матеріалу. [2]

1.4 Транзисторний перетворювач тиску

Інтегральні датчики тиску на основі тонких кремнієвих мембран з дифузійними тензорними резисторами [2] використовуються в медичних пристроях для вимірювання артеріального тиску, в тому числі внутрішньопорожнинними методами в універсальних датчиках [2]. [9] Технологія отримання тонких кремнієвих плівок сумісна з технологією інтегральних монолітних схем, що дозволяє таким перетворювачам мати високу надійність і низьку вартість за рахунок групового підходу до виготовлення інтегральних схем, малий розмір, масу, енергоспоживання і високі вимірювальні характеристики. Крім того, сумісність із технологією інтегральних схем відкриває можливість вивчати різні компоненти інтегральних схем (переважно транзистори) як чутливі до деформацій елементи, розташовані на плівці датчика тиску. Результати дослідження тензотранзисторів, при прикладенні до емітерного переходу зосередженого тиску, дозволяють підвищити чутливість таких приладів. [9]

На рисунку 1.12 (та наведена в додатку А рис.7) схематично показаний перетворювач тиску з транзисторною структурою. Він являє собою тонку (10 мкм) кремнієву мембрану квадратної форми, обрамлену товстою (300 мкм) основою, що складає з мембраною єдиний монокристал кремнію. Площина мембрани збігається з кристалографічною площиною (001). Сторони мембрани орієнтовані по напрямках $\langle 110 \rangle$ і $\langle \bar{1}\bar{1}0 \rangle$. Розмір сторони мембрани 1500, сторони всього кристала перетворювача рівним 3250 мкм.

Для дослідження залежності тензочувливих властивостей від положення транзистора на мембрані розроблена спеціальна топологія транзисторної матриці (рис.1.12), що дозволила вирішити поставлену задачу при порівняно невеликій кількості транзисторів на мембрані. При розробці топології використана кристалографічна симетрія властивостей кремнію.

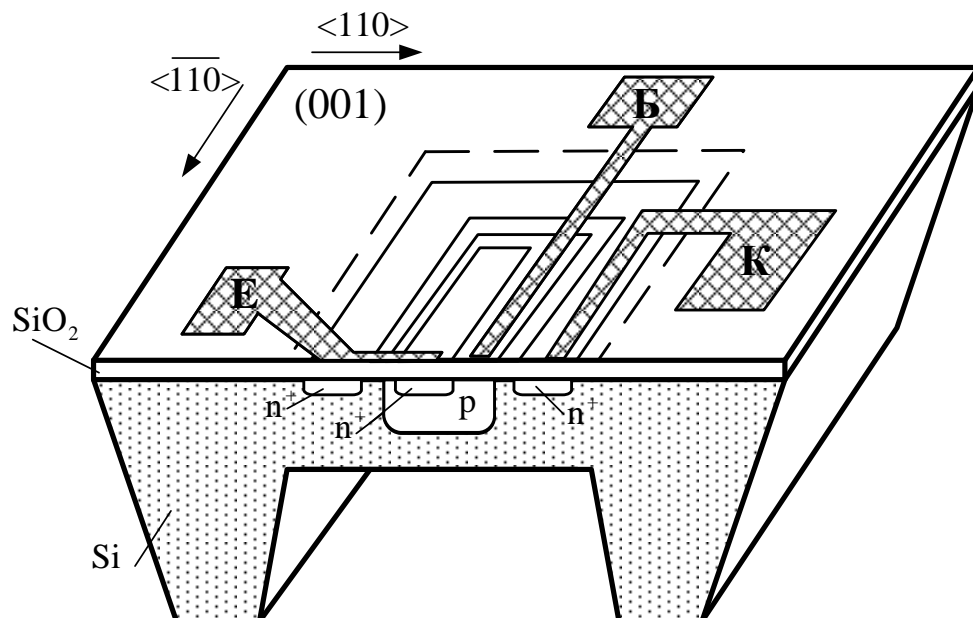


Рисунок 1.12 - Схематичний переріз мембранного перетворювача тиску з *n-p-n* транзистором [3]

Для вивчення тензорних транзисторів по всій поверхні плівки достатньо вивчити ці властивості в заштрихованій області DEF на малюнку 1.13 (і малюнку 8 у додатку А).

Однак навіть фізичне розміщення невеликої кількості транзисторів у певній зоні може спричинити деякі труднощі під час процесу проектування топології металевої маршрутизації.

Базуючись на властивостях симетрії, транзистори можна розташувати по всій мембрані так, щоб вони симетрично переносилися в область DEF, утворюючи матрицю, з якої також можна судити про властивості тензометричних транзисторів у будь-якому місці в даній області, як і вся мембрана. Наприклад, транзистори можна розташувати так, як показано на рисунку 1.14 (та наведено в додатку А, малюнок 9).

При цьому вздовж кожного сегмента зламано ABCDE із зазначеними вище розмірами мембрани без праці можна розмістити по 5 транзисторів.

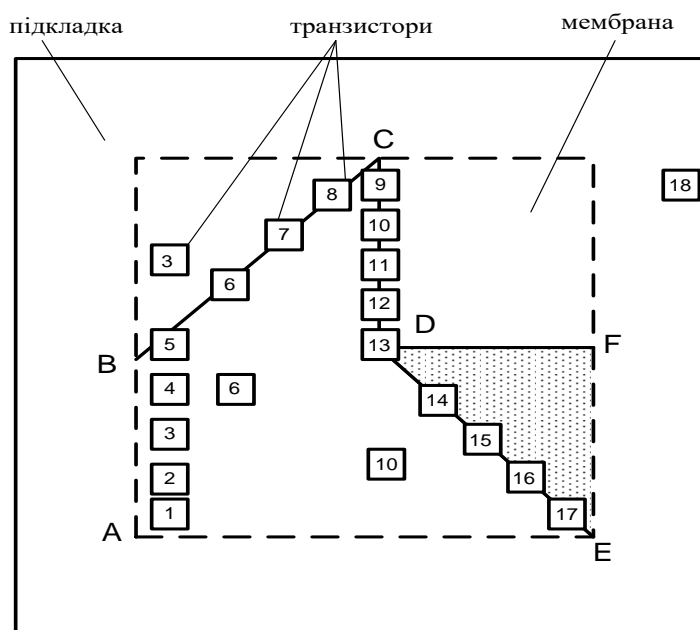


Рисунок 1.13- Схема розташування тензотранзисторів на площині мембрани [3]

Таке розташування транзисторів на тонкій плівці було покладено в основу розробки топології прототипу перетворювача. Керуючий транзистор 18 розташований на підкладці поза плівкою. Для спрощення металізаційної ізоляції транзистори 3, 6 і 10 (див. рис. 1.13) розташовані в симетричних областях. Для забезпечення можливості термічного стиснення зовнішніх виводів на плівковій підкладці розміщені контактні майданчики.

Випробувальні зразки перетворювача були виготовлені з використанням кремнієвих пластин KZF марки 0,3/0,1 товщиною 300 мкм, орієнтованих вздовж площини (100) і полірованих з обох сторін. р-р-р транзистори виготовлені за стандартною технологією подвійної дифузії домішок (бору і фосфору). Після завершення повного технологічного циклу виготовлення транзисторів відбувається формування областей мембрани методом локального анізотропного травлення в гарячому розчині КОН. Товщина плівок, сформованих різними зразками, становила від 8 до 25 мкм. Нерівномірність товщини плівки кожного зразка не перевищує 1 мкм. Нерівномірність товщини плівки вздовж пластини становить 5-10 мкм і визначається неплоскою паралельністю вихідної пластини.

Для того щоб виміряти залежність електричних параметрів транзистора (величини розподіленого тиску, що діє на мембрану), зразок був встановлений в корпусі, що забезпечує надлишковий тиск на різні сторони мембрани. Електричний вихід транзистора Структура транзистора досягається методом термостиску. Була досліджена залежність статичного коефіцієнта підсилення транзисторів B_{ct} від прикладеного тиску. Вимірювання проводились при $U_K = 5$ В і $I_K = 5$ мА.

Залежність відносної зміни статичного коефіцієнта підсилення від прикладеного тиску для зразків з товщиною мембрани 10 мкм у діапазоні - 0,5 до +0,5 атм показано на рис. 1.14. Додатній напрямок осі тиску

відповідає прикладенню надлишкового тиску до мембрани з боку травлення. Для визначення значень лінійного перетворення були проведені вимірювання в діапазоні тисків на мембрану до ± 6 атм, що показали - відносна зміна статичного коефіцієнта підсилення тензотранзистора на виготовлених зразках перетворювачів є лінійною в діапазоні від -1,2 до +1,2 атм.

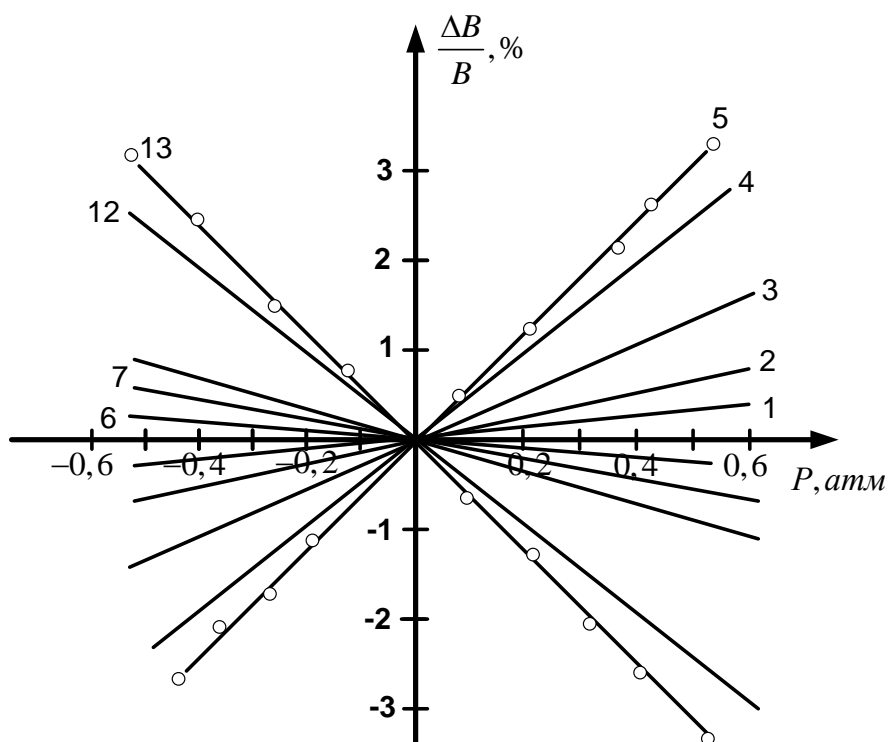


Рисунок 1.14 - Залежність відносної зміни статичного коефіцієнта підсилення транзисторів від тиску

При подальшому збільшенні тиску залежність $\Delta B/B$ стає нелінійною і при тиску 1,5 атм спостерігається горизонтальна ділянка характеристики. При тиску 6 атм руйнування зразка не відбувалося і не спостерігалось гістерезису характеристик, проходження залежності тензочутливості, обумовленої як $\Delta B/B$, від місця розташування транзистора на мембрані показало, що найбільшу тензочутливість мають центральний (VT13) і бічні транзистори (VT5 і VT9), причому тензочутливість цих транзисторів приблизно однакова по величині, але

протилежна за знаком. Тензочутливість кутових транзисторів (VT1 і VT17) для різних зразків була різною як по величині, так і за знаком, що пояснюється складною картиною розподілу механічних напруг у мембрані і розкидом місця розташування транзисторів від зразка до зразка. Проведені вимірювання в діапазоні температур від 0 до +60°C показали, що температурний коефіцієнт тензочутливості перевищує $0,15\% \text{ град}^{-1}$ [9].

Як відомо, чутливість мембранних перетворювачів тиску зростає зі зменшенням товщини мембрани. Однак у випадку розглянутих структур на мінімальну товщину мембрани, крім технологічних обмежень, повинні також накладатися обмеження, зв'язані зі збільшенням послідовного опору колектора при зменшенні товщини мембрани. Це погіршує параметри транзисторів. Таке погіршення параметрів експериментально спостерігалось в зразках перетворювачів, виготовлених на пластинах кремнію марки КЗФ 4,5/0,1, що мали товщину мембран менше 25 мкм. При цьому вимірювалися і порівнювалися характеристики одних і тих же транзисторів до травлення мембрани і після. Електрохімічне осадження тонкої (0,1 мкм) плівки нікелю на мембрану з боку травлення, що виконує в даному випадку функції схованого n^+ - шару, різко зменшувало величину послідовного опору колектора і характеристики транзисторів поверталися до початкових [3].

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІ ПЕРЕТВОРЕННЯ І РІВНЯННЯ ЧУТЛИВОСТІ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО ТЕНЗОМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТИСКУ З ТЕНЗОЧУТЛИВИМ БІПОЛЯРНИМ ТРАНЗИСТОРОМ

2.1 Математична модель перетворювача тиску

Параметри радіометричних датчиків тиску можуть бути додатково збільшені при використанні в якості тензочутливих елементів біполярних транзисторів. Схема датчика тиску показана на рисунку 2.1 (і наведена в додатку А, рисунок 10).

Він складається з біполярних транзисторів і польових транзисторів. Параметри біполярних транзисторів, що змінюються під впливом тиску, включають дифузійну ємність і її опір, бар'єрну ємність і її опір, коефіцієнт передачі струму і опір бази. Зміна цих параметрів під впливом тиску призводить до зміни реактивної складової повного опору, наявного на колекторі біполярного транзистора і стоку польового транзистора. [10] Таким чином, вироблена частота залежить від тиску.

Спочатку визначаємо значення дифузійної здатності. Для цього потрібно розібратися в залежності заряду від напруги. Кількість заряду, інжектowanego в базову область транзистора, визначається величиною напруги на емітерному переході. Для транзистора типу $n-p-n^+$, який має кращі тензочутливі властивості, величина заряду в базовій області визначається

$$Q = S_e q \int_0^{\infty} (n - n_p) dx, \quad (2.1)$$

де S_e - площа емітерного переходу, n - концентрація інжектowanych електронів в базову область, n_p - концентрація неосновних носіїв в базовій області.

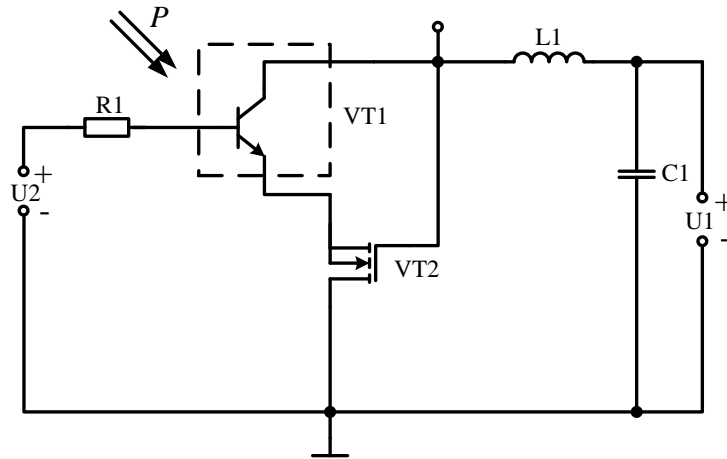


Рисунок 2.1 - Електрична схема перетворювача тиску

Значення $(n - n_p)$ описується виразом [5]:

$$n - n_p = n_p (\exp(qU_e / kT) - 1) \exp(x / L_n), \quad (2.2)$$

де U_e - прикладена напруга до емітерного переходу, L_n - дифузійна довжина електронів.

Підставивши (2.1) в (2.2) і провівши інтегрування, отримаємо

$$Q = S_e q n_p (\exp(qU_e / kT) - 1) L_n. \quad (2.3)$$

Дифузійну ємність визначимо із (2.3), продиференціювавши його по напрузі U_e , отже

$$C_\sigma = \frac{q}{kT} \left(S_e q \frac{D_n n_p}{L_n} \exp(qU_e / kT) \right) \tau_n. \quad (2.4)$$

де D_n - ефіцієнт дифузії електронів, τ_n - час їх життя.

Вираз (2.4) є справедливим для широкої бази транзистора $W \gg L_n$, а для вузької бази $W \ll L_n$, замість τ_n необхідно підставити $W^2 / 2D$ дослідженнях використовувались транзистори з вузькою базою, тому C_σ визначається

$$C_{\sigma} = \frac{q}{kT} \left(S_e q \frac{n_p}{L_n} \exp(qU_e / kT) \right) \frac{W^2}{2}. \quad (2.5)$$

де W - товщина бази біполярного транзистора.

Опір дифузійної частини має вигляд

$$R_{\sigma} = \frac{kTL_n}{q^2 S_e D_n n_p \exp(qu_e / kT)}. \quad (2.6)$$

Величина бар'єрної ємності описується рівнянням

$$C_{\sigma} = S_k \left(\frac{q\epsilon\epsilon_0 N_d}{2(\varphi_k + U)} \right)^{1/2}, \quad (2.7)$$

де φ_k - контактна різниця потенціалів $p-n^+$ переходу, U - зворотна напруга на колекторному переході, N_d - концентрація домішкових атомів в базовій області транзистора, S_k - площа колекторного переходу.

Опір бар'єрної ємності можна записати у вигляді

$$R_{\sigma} = \frac{U\tau_n^{1/2}}{S_k n_p (qkT\mu_n)^{1/2}}, \quad (2.8)$$

де n_p - концентрація неосновних носіїв заряду в базовій області транзистора, μ_n - рухливість електронів, τ_n - час життя електронів.

Від дії тиску також залежить коефіцієнт передачі струму в схемі транзистора із загальним емітером, який визначається формулою [9]

$$\beta = \frac{2kT}{q} \left(\frac{\tau_n}{W^2} \right) \mu_n. \quad (2.9)$$

Для визначення залежності (2.5) - (2.8) від ширини забороненої зони напівпровідникового базового матеріалу транзистора, яка в свою чергу залежить від дії тиску, скористаємося відомим виразом [9]

$$n_p = \frac{n_i^2}{P_p} = \frac{N_c N_v \exp(-E_g / kT)}{P_p}, \quad (2.10)$$

де N_c - ефективна щільність квантових станів на дні зони провідності, N_v - ефективна щільність квантових станів на стелі валентної зони. Враховуючи (2.10), рівняння (2.5) - (2.8) набувають вигляду

$$C_{\delta} = \frac{q^2 S_e N_c N_v \exp(-E_g / kT) W^2 \exp(qU_e / kT)}{kT p_p L_n}, \quad (2.11)$$

$$R_{\delta} = \frac{kT p_p L_n \exp(E_g / kT)}{q^2 S_e D_n N_c N_v \exp(qU_e / kT)}, \quad (2.12)$$

$$C_{\delta} = S_k \left(\frac{q \epsilon \epsilon_0 N_c N_v \exp(-E_g / kT)}{2n_p (\varphi_k + U)} \right)^{1/2}. \quad (2.13)$$

$$R_{\delta} = \frac{U \tau_n^{1/2} p_p \exp(E_g / kT)}{S_k (qkT \mu_n)^{1/2} N_c N_v}, \quad (2.14)$$

Тиск також діє на базовий дифузійний опір транзистора, який визначається виразом [9]

$$R_{\delta\delta} = \frac{kT \tau_n n_n L_n \exp(E_g / kT)}{W^2 q^2 S_e N_c N_v \exp(qU_e / kT)}. \quad (2.15)$$

Залежність дифузійної ємності (2.5) від тиску описується рівнянням

$$\frac{\partial C_{\delta}}{\partial p} = \frac{\partial C_{\delta}}{\partial N_c} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p} + \frac{\partial C_{\delta}}{\partial N_v} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p} + \frac{\partial C_{\delta}}{\partial E_g} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p}. \quad (2.16)$$

Визначимо кожен складову рівняння (2.16), отже:

$$\frac{\partial C_{\partial}}{\partial N_c} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p} = \frac{q^2 S_e N_v \exp(-E_g / kT) W^2 \exp(qU_e / kT)}{kT p_p L_n} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p}, \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial C_{\partial}}{\partial N_v} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p} = \frac{q^2 S_e N_c \exp(-E_g / kT) W^2 \exp(qU_e / kT)}{kT p_p L_n} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p}, \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial C_{\partial}}{\partial E_g} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p} = \frac{q^2 S_e N_v N_c \exp(-E_g / kT) W^2 \exp(qU_e / kT)}{(kT)^2 p_p L_n} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p}. \quad (2.19)$$

Залежність опору дифузійної ємності визначаємо на основі (2.12)

$$\frac{\partial R_{\partial}}{\partial p} = \frac{\partial R_{\partial}}{\partial N_c} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p} + \frac{\partial R_{\partial}}{\partial N_v} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p} + \frac{\partial R_{\partial}}{\partial E_g} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p}. \quad (2.20)$$

В свою чергу складові (2.20) визначаються:

$$\frac{\partial R_{\partial}}{\partial N_c} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p} = \frac{p_p L_n \exp(E_g / kT)}{q^2 S_e N_v N_c D_n \exp(qU_e / kT)} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p}, \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial R_{\partial}}{\partial N_c} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p} = \frac{kT p_p L_n \exp(E_g / kT)}{q^2 S_e N_v N_c^2 D_n \exp(qU_e / kT)} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p}, \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial R_{\partial}}{\partial N_v} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p} = \frac{kT p_p L_n \exp(E_g / kT)}{q^2 S_e N_v^2 N_c D_n \exp(qU_e / kT)} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p}. \quad (2.23)$$

Залежність бар'єрної ємності від тиску знаходимо з виразу (2.13)

$$\frac{\partial C_{\bar{\sigma}}}{\partial p} = \frac{\partial C_{\bar{\sigma}}}{\partial N_c} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p} + \frac{\partial C_{\bar{\sigma}}}{\partial N_v} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p} + \frac{\partial C_{\bar{\sigma}}}{\partial E_g} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p} + \frac{\partial C_{\bar{\sigma}}}{\partial \varphi_k} \cdot \frac{\partial \varphi_k}{\partial p}. \quad (2.24)$$

Визначимо кожен складову рівняння (2.14), отже

$$\frac{\partial C_{\bar{\sigma}}}{\partial N_c} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p} = \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_0 q N_v \exp(-E_g / kT)}{2n_p \varphi_k + U} \right)^{1/2} \frac{\partial S_k}{2N_c^{1/2}} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p}, \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial C_{\bar{\sigma}}}{\partial N_v} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p} = \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_0 q N_c \exp(-E_g / kT)}{2n_p \varphi_k + U} \right)^{1/2} \frac{\partial S_k}{2N_v^{1/2}} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p}, \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial C_{\bar{\sigma}}}{\partial E_g} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p} = \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_0 q N_v N_c \exp(-E_g / kT)}{2n_p \varphi_k + U} \right)^{1/2} \left(-\frac{S_k}{2kT} \right) \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p}, \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial C_{\bar{\sigma}}}{\partial \varphi_k} \cdot \frac{\partial \varphi_k}{\partial p} = \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_0 q N_v N_c \exp(-E_g / kT)}{2n_p} \right)^{1/2} \left(-\frac{S_k}{2} \right) (\varphi_k + U)^{-3/2} \cdot \frac{\partial \varphi_k}{\partial p}. \quad (2.28)$$

Залежність опору бар'єрної ємності від тиску визначається з рівняння (2.14)

$$\frac{\partial R_{\bar{\sigma}}}{\partial p} = \frac{\partial R_{\bar{\sigma}}}{\partial E_g} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p} + \frac{\partial R_{\bar{\sigma}}}{\partial \mu_n} \cdot \frac{\partial \mu_n}{\partial p} + \frac{\partial R_{\bar{\sigma}}}{\partial N_c} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p} + \frac{\partial R_{\bar{\sigma}}}{\partial N_v} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p}. \quad (2.29)$$

Складові рівняння (2.29) мають такі значення

$$\frac{\partial R_{\bar{\sigma}}}{\partial E_g} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p} = \left(\frac{1}{kT} \right) \exp(E_g / kT) \left(\frac{U \tau_n^{1/2} p_p}{S_k (qkT \mu_n)^{1/2} N_c N_v} \right) \cdot \left(\frac{\partial E_g}{\partial p} \right), \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial R_{\delta}}{\partial \mu_n} \cdot \frac{\partial \mu_n}{\partial p} = \left(-\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{1}{qkT}\right)^{1/2} \mu_n^{-3/2} \cdot \left(\frac{U \tau_n^{1/2} p_p \exp(E_g / kT)}{S_k N_c N_v}\right) \cdot \left(\frac{\partial \mu_n}{\partial p}\right), \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial R_{\delta}}{\partial N_c} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p} = \left(\frac{U \tau_n^{1/2} p_p \exp(E_g / kT)}{N_c^2 S_k (qkT \mu_n)^{1/2} N_v}\right) \cdot \left(\frac{\partial N_c}{\partial p}\right), \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial R_{\delta}}{\partial N_v} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p} = \left(\frac{U \tau_n^{1/2} p_p \exp(E_g / kT)}{N_v^2 S_k (qkT \mu_n)^{1/2} N_c}\right) \cdot \left(\frac{\partial N_v}{\partial p}\right). \quad (2.33)$$

Залежність коефіцієнта передачі струму в схемі із загальним емітером від тиску визначається із (2.9)

$$\frac{\partial \beta}{\partial p} = \frac{2kT}{q} \cdot \left(\frac{\tau_n}{W^2}\right) \cdot \frac{\partial \mu_n}{\partial p}. \quad (2.34)$$

Перейдемо до визначення залежності дифузійного опору бази транзистора від тиску, виходячи із виразу (2.15):

$$\frac{\partial R_{\delta\delta}}{\partial p} = \frac{\partial R_{\delta\delta}}{\partial E_g} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p} + \frac{\partial R_{\delta\delta}}{\partial N_c} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p} + \frac{\partial R_{\delta\delta}}{\partial N_v} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p}. \quad (2.35)$$

Складові (2.35) набувають вигляду:

$$\frac{\partial R_{\delta\delta}}{\partial E_g} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p} = \frac{\tau_n n_n L_n \exp(E_g / kT)}{W^2 q^2 S_e N_c N_v \exp(qU_e / kT)} \cdot \frac{\partial E_g}{\partial p}, \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial R_{\delta\delta}}{\partial N_c} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p} = \frac{kT \tau_n n_n L_n \exp(E_g / kT)}{W^2 q^2 S_e N_c^2 N_v \exp(qU_e / kT)} \cdot \frac{\partial N_c}{\partial p}, \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial R_{\delta\delta}}{\partial N_v} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p} = \frac{kT \tau_n n_n L_n \exp(E_g / kT)}{W^2 q^2 S_e N_v^2 N_c \exp(qU_e / kT)} \cdot \frac{\partial N_v}{\partial p}. \quad (2.38)$$

Слід зауважити, що похідні $\frac{\partial N_c}{\partial p}$ і $\frac{\partial N_v}{\partial p}$ відповідають зсуву дна зони провідності і стелі валентної зони, а тиск здійснюється уздовж осі $\langle 110 \rangle$.

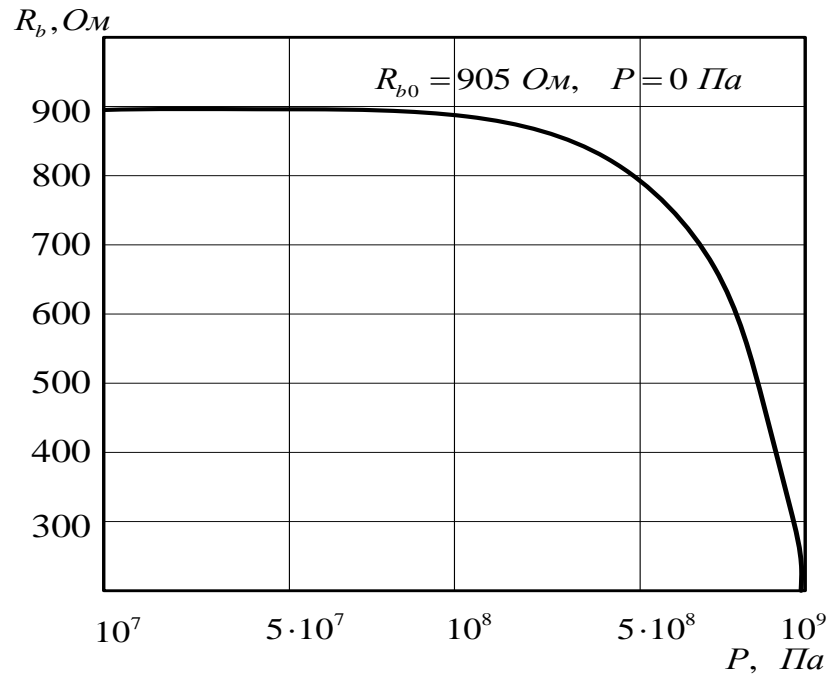


Рисунок 2.2 - Залежність опору бази від тиску

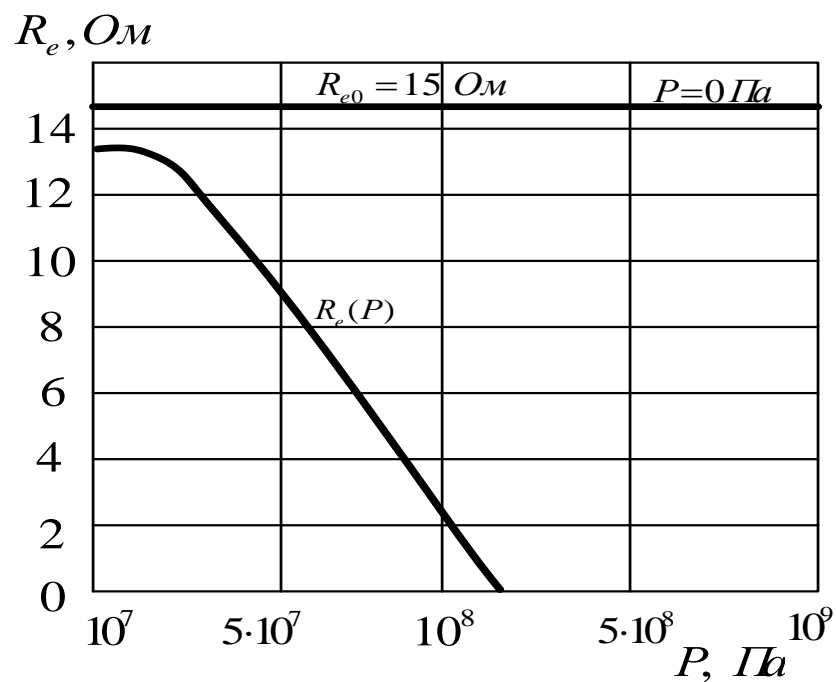


Рисунок 2.3 - Залежність опору емітера від тиску

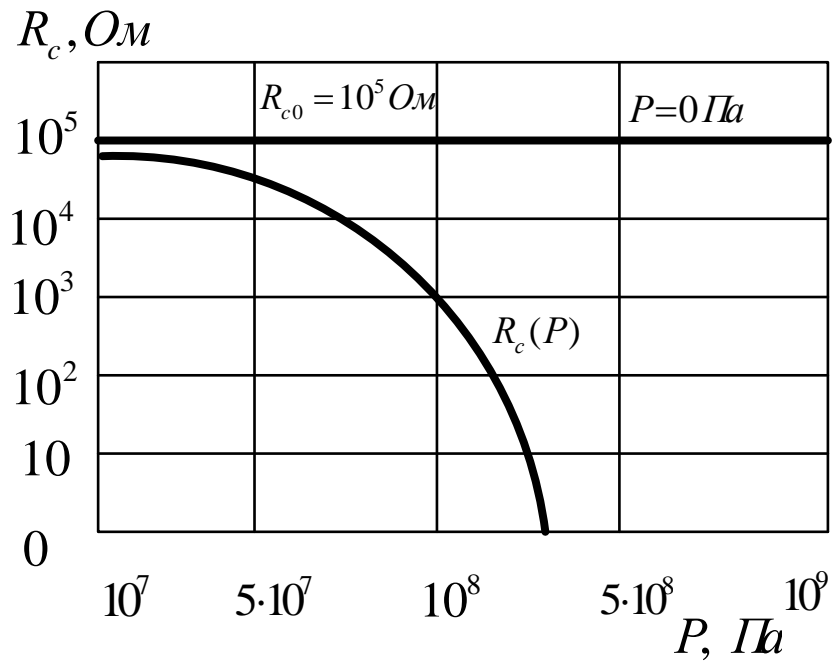


Рисунок 2.4 - Залежність опору колектора від тиску

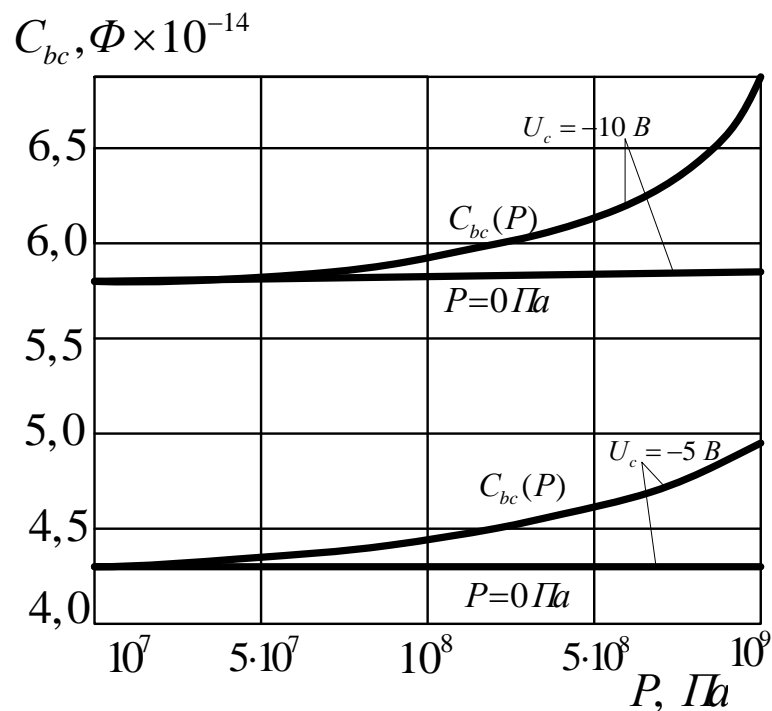


Рисунок 2.5 - Залежність ємності база-колектор від тиску

Тому, визначивши залежність параметрів біполярного транзистора від впливу тиску, переходимо до пошуку повного опору на колекторі

біполярного транзистора і стоку польового транзистора, реактивна складова якого має ємнісні характеристики. а активний елемент - негативний опір. Як реактивна складова, так і негативний опір залежать від зміни параметрів біполярного транзистора під тиском, тому результуюча частота також залежить від тиску. Коливальний контур генератора створюється при підключенні зовнішньої котушки індуктивності до колектора і стоку біполярного польового транзистора.

Повний опір визначимо на основі еквівалентної схеми перетворювача тиску, поданої на рисунку 2.6 (та наведена в додатку А рис.15).

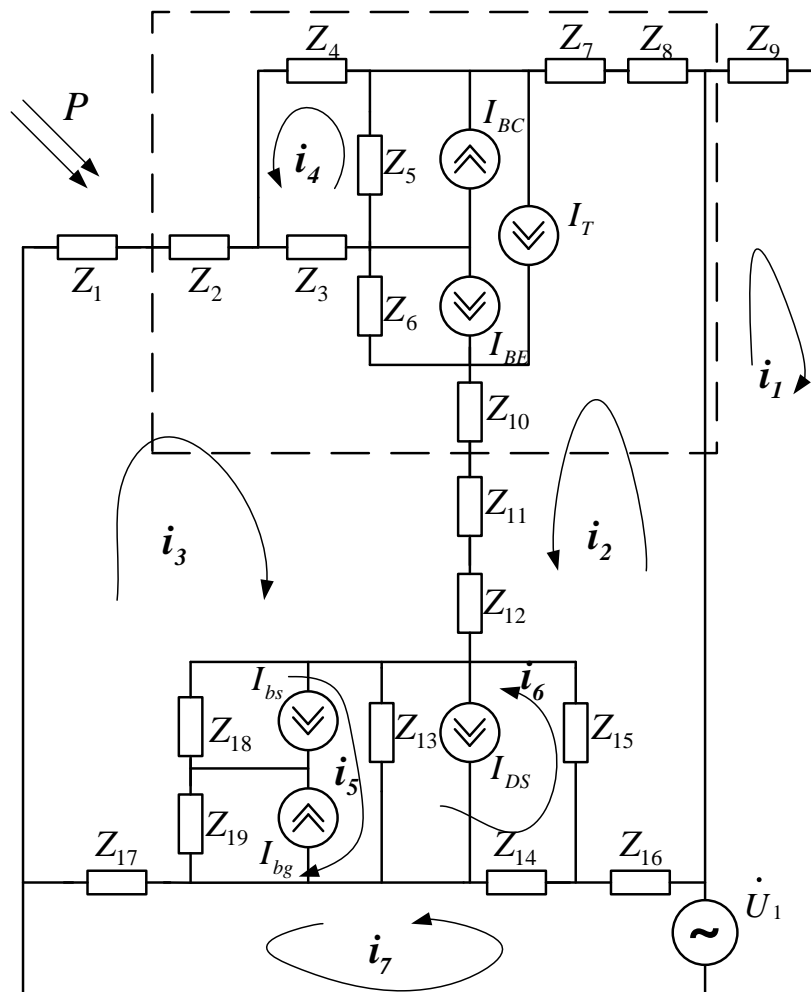


Рисунок 2.6 - Еквівалентна схема перетворювача

Згідно напрямкам контурних струмів система рівнянь Кірхгофа має вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_1 = Z_9 i_1, \\ 0 = (Z_8 + Z_7 + Z_5 + Z_6 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{12} + Z_{15} + Z_{16})i_2 - Z_5 i_4 + Z_3 I_{BC} - Z_5 I_T + \\ + Z_6 (i_3 - I_{BE} - I_T) + (Z_{10} + Z_{11} + Z_{12})i_3 - Z_{15} i_6 - Z_{15} I_{DS} - Z_{16} i_7, \\ 0 = (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_6 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{12} + Z_{18} + Z_{19} + Z_{17})i_3 + Z_3 i_4 + Z_3 I_{BC} + \\ + Z_6 (i_2 - I_{BE} - I_T) + (Z_{10} + Z_{11} + Z_{12})i_2 - Z_{18} i_5 - Z_{18} I_{BS} - Z_{18} I_{DS} + Z_{19} (-i_5 + I_{bg} - I_{DS}) + Z_{17} i_7, \\ 0 = (Z_3 + Z_4 + Z_5)i_4 + Z_3 (i_3 + I_{BC} - I_T) + Z_4 (I_{BC} - I_T) + Z_5 (-i_2 - I_{BC} + I_T), \\ 0 = (Z_{18} + Z_{19} + Z_{13})i_5 + Z_{18} (-i_3 + I_{BS} + I_{DS}) + Z_{19} (-i_3 - I_{bg} + I_{DS}) + Z_{13} i_6 - Z_{13} I_{DS}, \\ 0 = (Z_{13} + Z_{15} + Z_{14})i_6 + Z_{13} (i_5 - I_{DS}) - Z_{14} i_7 + Z_{14} I_{DS} + Z_{15} (-i_2 + I_{DS}), \\ \dot{U}_1 = (Z_{16} + Z_{14} + Z_{17})i_7 - Z_{16} i_2 - Z_{14} i_6 - Z_{14} I_{DS} + Z_{17} i_3, \end{array} \right. \quad (2.39)$$

Розв'язання системи рівнянь (2.39) виконано методом Гауса на пальному комп'ютері за допомогою програми "Matlab 6.0" [30]. На основі розв'язання системи рівнянь отримано значення повного опору. Втрати енергії в контурі генератора компенсуються від'ємним опором. Частота генерації визначається залежністю еквівалентної ємності контуру від тиску. Функція перетворення описується рівнянням.

$$F_0 = \frac{\sqrt{\frac{C_{be}(P)C_1 + C_{bc}(P)C_1 + C_{be}(P)C_{bc}(P)}{L_1 C_{bc}(P)C_{be}(P)C_1}}}{2\pi}. \quad (2.40)$$

Тензочутливість перетворювача визначається на основі (2.40)

$$S_p = \frac{1}{4} \left(\frac{\left(\frac{\partial C_{be}(P)}{\partial P} \right) C_1 + \left(\frac{\partial C_{bc}(P)}{\partial P} \right) C_1 + \left(\frac{\partial C_{be}(P)}{\partial P} \right) C_{bc}(P) + \left(\frac{\partial C_{bc}(P)}{\partial P} \right) C_{be}(P)}{L_1 C_{bc}(P) C_{be}(P) C_1} - \frac{A_1 \left(\frac{\partial C_{bc}(P)}{\partial P} \right)}{L_1 C_{bc}^2(P) C_{be}(P) C_1} - \frac{A_1 \left(\frac{\partial C_{be}(P)}{\partial P} \right)}{L_1 C_{be}^2(P) C_{bc}(P) C_1} \right) / \left(\pi \sqrt{\frac{A_1}{L_1 C_{bc}(P) C_{be}(P) C_1}} \right)$$

$$\text{де } A_1 = C_{be}(P)C_1 + C_{bc}(P)C_1 + C_{be}(P)C_{bc}(P) \quad (2.41)$$

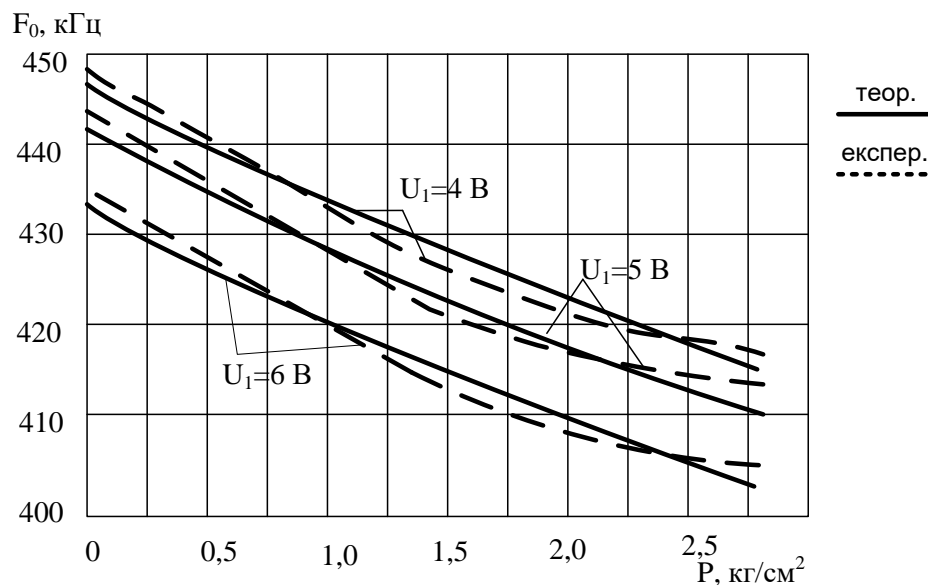


Рисунок 2.7 - Теоретична і експериментальна залежність частоти генерації від тиску

На рисунку 2.7 (та наведена в додатку А рис.16) подана теоретична і експериментальна залежність частоти генерації від тиску на тензочутливий транзистор. Експериментальні дослідження проводились при постійній температурі 20°C. Параметри елементів еквівалентної схеми перетворювача необхідні для розрахунків отримані з робіт [13]

2.2 Оцінювання метрологічних параметрів перетворювачів тиску

Імовірність інформації про властивість досліджуваного об'єкта визначається вибором величин, що характеризують об'єкт, і похибками, які існують при вимірюванні цих величин.

Вибір вимірюваних величин ґрунтується на знаннях про досліджуваний об'єкт, отриманих у результаті попередніх досліджень. Насправді, при вимірюванні параметрів сигналу необхідно заздалегідь визначити, чи є сигнал імпульсним чи безперервним сигналом, детермінованим сигналом чи випадковим сигналом. Результатом такого

дослідження є віднесення сигналу до однієї з категорій, після чого стає відомим набір значень, що характеризують цю категорію. Значення цих параметрів підлягають вимірюванню.

Якщо сигнал детермінований (наприклад, періодичний), то за допомогою різних типів вольтметрів середнє, середнє випрямлене значення, середньоквадратичне значення або пікову частоту цього сигналу можна виміряти за допомогою частотоміра, а за допомогою відповідного аналізу приладо-амплітудно-частотний, фазово-спектральний тощо [13].

Якщо сигнал є випадковим, то він може описувати такі характеристики, як розподіл ймовірностей його миттєвих значень через кореляційну функцію або енергетичний спектр. Вимірювання кожного параметра вимагає використання спеціального обладнання.

Наведені вище міркування демонструють важливість розуміння характеристик досліджуваного об'єкта при виборі методів і засобів вимірювання та необхідність узгодження характеристик об'єкта з характеристиками обладнання, що використовується для його дослідження. Недотримання цієї умови є причиною зниження ймовірності отримання інформації в процесі вимірювання [13].

Другою важливою причиною, що впливає на достовірність цієї інформації, є наявність похибки вимірювання. У будь-якому вимірюванні є похибки. Вони вирішують, яку точність слід отримати, виходячи з реальних потреб. Звідси можна зробити висновок, що вимірювання характеризується не тільки результатом (тобто числовим значенням вимірюваної величини), але й отриманою похибкою. Причини появи похибок є багаточисленними і мають різноманітну природу [13]:

- 1) Пов'язано з об'єктом вимірювання - недостатнє розуміння властивостей об'єкта і наявності в структурі досліджуваного сигналу компонентів перешкод (шуму, перешкод);

- 2) Недосконалість методів і засобів вимірювання (так звані методико-апаратні або приладові похибки) - відхилення параметрів схеми

від номінальних значень внаслідок старіння, нагрівання тощо, а також шумів у самому обладнанні;

3) Впливає зміна умов вимірювання та параметрів об'єктів, що не підлягають вимірюванню (температура в приміщенні, тиск, вологість, наявність вібрації, зовнішнє електромагнітне поле, магнітне поле, нестабільність електропостачання);

4) Пов'язана з суб'єктивною (особистісною) якістю експериментатора, яка проявляється при ослабленні уваги, а також залежить від його підготовки, рівня втоми і т.д. Це включає причини серйозних помилок (упущень);

5) Недосконала система передачі розмірів одиниць вимірювання від еталонів до робочого обладнання.

Переходимо до визначення повної похибки під час вимірювання температури радіометричним перетворювачем температури. Систематичні часткові похибки, створені цим методом вимірювання, мають такі властивості:

δ_1 - це є похибка вимірювання, яка виникає у результаті нестабільності частоти генератора;

δ_2 - це є похибка через установку режиму живлення транзисторної структури. Інструментальні похибки приладів, що використовуються в процесі вимірювання:

δ_3 - це є похибка у результаті нелінійності амплітудної характеристики електронного частотоміра;

δ_4 - це є похибка через власні шуми і зовнішні наводки на вхідне коло електронного частотоміра;

δ_5 - це є похибка, що виникає в результаті неточного калібрування і неточного визначення результату вимірювання по шкалі електронного частотоміра.

Оцінка величини δ_1 визначається на основі формули

$$\delta_1 = \frac{\rho^2 V_0}{(R_g')^2} \left[\frac{1}{3} Q d_1 d_2 + \frac{V_0}{192} (27 Q d_1 d_3 - 32 d_2^2) + \right. \\ \left. + \frac{V_0^2}{20} (8 Q d_1 d_4 + 5 d_2 d_3) + \frac{V_0^3}{24} (5 Q d_1 d_3 - 8 d_2 d_4) \right], \quad (2.42)$$

де Q – це є добротність коливального контуру, ρ - це є характеристичний опір контуру, V_0 - це є напруга зміщення, $d_1 - d_6$ – це є 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 буде отримана експериментально. Точність встановлення постійного значення напруги визначається класом точності електровимірювальних пристроїв, що використані. Оскільки клас точності виражає собою допустиме значення відносної похибки, що приведена до номіналу шкали, то середньоквадратична похибка σ_U розраховується згідно умови рівновірогідного закону розподілу похибки в інтервалі допуску

$$\sigma_U = \frac{U_{НОМ}}{U_P} \cdot \frac{l_U}{\sqrt{3}}, \quad (2.43)$$

де U_R — напруга, що подається на перетворювач, $U_{НОМ}$ — номінальна напруга, що відповідає повній шкалі відхилення приладу, l_U — значення допустимої відносної похибки, що відповідає класу точності вольтметра.

Середньоквадратичне значення похибки при вимірюванні частоти через неточні налаштування режиму живлення розраховується за формулою

$$\delta_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{T} \cdot \frac{\partial T}{\partial U} U_{НОМ} \cdot l_U \right)^2}, \quad (2.44)$$

де U – це є напруга живлення на виході перетворювача.

У разі використання стандартних засобів вимірювання похибки через нелінійність амплітудної характеристики електронного частотоміра представлені у вигляді приведеної похибки $\pm 1_3$. Якщо вважати, що розподіл похибок є рівноімовірним, то середня квадратична похибка визначення температури визначається за

$$\delta_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{l_3}{|T|}. \quad (2.45)$$

Помилки через власний шум і нерелевантні сигнали⁵⁴ оцінюються експериментально. Задовільна точність оцінки компонентів системної похибки при використанні середніх випрямлених значень в електронних частотомірах δ_4 дає формула [12]

$$M_4 = \left(\frac{M_{An}}{A_{КЛ}} \right)^2 \quad (2.46)$$

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

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

$$\delta_4 = \frac{M_{An}}{A_{КЛ}^2} \cdot \sigma_{An}. \quad (2.47)$$

Похибка δ_5 визначена дискретним характером шкали відлікового приладу. Граничне значення похибки визначене половиною інтервалу між сусідніми поділами шкали. Відносну граничну похибку можна визначити таким чином

$$\delta_{5ГРАН} = \pm \frac{1}{2A(\text{поділ})}, \quad (2.48)$$

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

Наприклад, коли шкала розділена на 50 поділів і вимірне значення складає 0,7 від повної шкали, тоді $A=35$ поділів. Коли вважати закон розподілу в межах $\delta_{5ГРАН}$ рівноімовірним, тоді середньоквадратичне значення похибки буде мати вигляд

$$\delta_5 = \frac{1}{2\sqrt{3}A(\text{поділ})}. \quad (2.49)$$

Математичне сподівання цієї складової помилки дорівнює нулю.

Визначимо похибку через нелінійність характеристик перетворювача. Незалежно від методу аналітичного вираження характеристик перетворення, нелінійні розрахунки для всіх перетворювачів з малими відхиленнями частоти (20-30%) виконуються шляхом розкладання характеристик у степеневі ряди. Тому на місці роботи характеристика перетворювача записується за формою [8]

$$f = f_0(1 + \alpha x + \beta x^2 + \gamma x^3), \quad (2.50)$$

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

Для випадку LC-генератора, в якому використовуються біполярні транзистори $n=4$, тоді вираз (2.42) прийме вид

$$f = f_0\left(1 + \frac{1}{4}x - \frac{3}{32}x^2 + \frac{21}{96}x^3\right). \quad (2.51)$$

При апроксимації січної мінімальна похибка [82]

$$\delta_6 = 0,26 \frac{\Delta f}{f_H}. \quad (2.52)$$

Розрахунок повної похибки вимірювання тиску, числові значення параметрів є такими:

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

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

Розрахунки дають такі значення часткових похибок

$$\delta_1 = 0,4\%, \delta_2 = 0,32\%, \delta_3 = 0,1\%, \delta_4 = 0,0081\%, M_5 = 10^{-4}\%, \delta_5 = 10^{-4}\%, \delta_6 = 0,2\%.$$

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

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, що 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 2.1

Таблиця 2.1 - 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 | $\ddot{S} = \frac{1}{6} \left[\frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \right]$ |
| 4. Коефіцієнти впливу впливових величин на вихідний параметр | $\dot{\beta} = \left[\frac{\partial y}{\partial k} \right]$ |
| | $\ddot{\beta} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 y}{\partial k^2} \right]$ |
| 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 | $\Delta_m = \alpha \times (k - k_n)$ |
| 8. Адитивна похибка | $\Delta_a = \beta(k - k_n) + \dot{\beta}(k - k_n)^2$ |

3 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

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

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

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

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

3.1 Оцінювання наукового ефекту

Останнім часом в технічній апаратурі для метрологічних служб використовуються нові технічні рішення, пов'язані зі збільшенням заводо захищеності приладу та покращанням його чутливості. Це потребує використання нових конструкторсько-технологічних рішень та нової, більш сучасної елементної бази, яка має такі переваги:

- як правило, нескладна конструкція;
- простота настроювання та висока стійкість роботи;
- можливість цифрової обробки вхідних сигналів;
- порівняно великий динамічний діапазон вхідних сигналів;
- широкий динамічний діапазон вихідних сигналів;
- висока швидкодія вимірювання та незначний час готовності до роботи;
- незначне енергоспоживання;
- тривалий термін напрацювання на відмову.

На сучасному етапі розвитку апаратури для метрологічних служб постає задача мініатюризації конструкції за рахунок використання новітніх технологій, що приводить до використання багат шарових друкованих плат та останніх досягнень мікроелектроніки.

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Мікроелектронний тензометричний перетворювач» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання. Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

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

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка

суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 3.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

| Характеристика рівня теоретичного опрацювання | Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали | | |
|--|---|----|----|
| | Експерт (ПБ, посада) | | |
| | 1 | 2 | 3 |
| Відкриття закону, розробка теорії | 0 | 0 | 0 |
| Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу | 75 | 75 | 75 |
| Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини | 0 | 0 | 0 |
| Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо | 0 | 0 | 0 |
| Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо | 0 | 0 | 0 |
| Середнє значення балів експертів | 75,0 | | |

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

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [27]

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (3.1)$$

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 55,0, k_{\text{теор}} = 75,0$ балів;

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

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 55,0 + 0,4 \cdot 75,00 = 63,00 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

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

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронний тензометричний перетворювач», даний рівень становить 63,00 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

3.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

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

3.2.1 Витрати на оплату праці

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

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за [27]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (3.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

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

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 14150,00 \cdot 21 / 21 = 14150,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

| Найменування посади | Місячний посадовий оклад, грн | Оплата за робочий день, грн | Число днів роботи | Витрати на заробітну плату, грн |
|--|-------------------------------|-----------------------------|-------------------|---------------------------------|
| Керівник науково-дослідної роботи | 14150,00 | 673,81 | 21 | 14150,00 |
| Старший науковий співробітник | 13500,00 | 642,86 | 20 | 12857,14 |
| Консультант (інженер-метролог вищої категорії) | 12650,00 | 602,38 | 6 | 3614,29 |
| Інженер-дослідник (розробник мікроелектронної апаратури) | 12000,00 | 571,43 | 20 | 11428,57 |
| Технік I-ї категорії | 7120,00 | 339,05 | 18 | 6102,86 |
| Всього | | | | 48152,86 |

Основна заробітна плата робітників

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

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (3.3)$$

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

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

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (3.4)$$

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

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [27];

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

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

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

$$З_{pl} = 59,22 \cdot 8,00 = 473,79 \text{ (грн.)}$$

Таблиця 3.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

| Найменування робіт | Тривалість роботи, год | Розряд роботи | Тарифний коефіцієнт | Погодинна тарифна ставка, грн | Величина оплати на робітника грн |
|---|------------------------|---------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Установка обладнання для проведення досліджень | 8,00 | 2 | 1,10 | 59,22 | 473,79 |
| Підготовка робочого місця дослідника | 4,00 | 3 | 1,35 | 72,68 | 290,73 |
| Інсталяція програмного забезпечення моделювання електронних компонент | 2,50 | 5 | 1,70 | 91,53 | 228,82 |
| Формування бази даних досліджень | 5,40 | 4 | 1,50 | 80,76 | 436,10 |
| Проведення експериментів | 1,20 | 5 | 1,70 | 91,53 | 109,83 |

Продовження таблиці 3.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

| | | | | | |
|---|------|---|------|-------|---------|
| Налагодження компонент досліджуваних блоків | 0,80 | 5 | 1,70 | 91,53 | 73,22 |
| Всього | | | | | 1612,49 |

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (3.5)$$

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

$$Z_{\text{дод}} = (48152,86 + 1612,49) \cdot 10 / 100\% = 4976,53 \text{ (грн.)}$$

3.2.2 Відрахування на соціальні заходи

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

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (3.6)$$

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

$$Z_n = (48152,86 + 1612,49 + 4976,53) \cdot 22 / 100\% = 12043,21 \text{ (грн.)}$$

3.2.3 Сировина та матеріали

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

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

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

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (3.7)$$

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

n – кількість видів матеріалів;

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

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

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

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

$$M_1 = 2,0 \cdot 189,00 \cdot 1,12 - 0 \cdot 0 = 423,36 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Витрати на матеріали

| Найменування матеріалу, марка, тип, сорт | Ціна за 1 кг, грн | Норма витрат, кг | Величина відходів, кг | Ціна відходів, грн/кг | Вартість витраченого матеріалу, грн |
|---|-------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Офісний папір CARBONIX Ultra | 189,00 | 2,0 | 0 | 0 | 423,36 |
| Папір для записів CARBONIX Light A5 | 65,00 | 4,0 | 0 | 0 | 291,20 |
| Органайзер офісний CARBONIX OFFICE | 175,00 | 4,0 | 0 | 0 | 784,00 |
| Канцелярське приладдя (набір офісного працівника) | 205,00 | 4,0 | 0 | 0 | 918,40 |
| Картридж для принтера Canon LBP6000 | 1020,00 | 2,0 | 0 | 0 | 2284,80 |
| Диск оптичний NewVybir CD-R | 13,25 | 4,0 | 0 | 0 | 59,36 |
| Flesh-пам'ять Kingston 32 GB | 225,00 | 1,0 | 0 | 0 | 252,00 |
| Тека для паперів CARBONIX BOX-ZX | 115,00 | 4,0 | 0 | 0 | 515,20 |
| Ситал | 300,00 | 0,02 | 0 | 0 | 6,72 |
| Травник | 275,00 | 0,01 | 0 | 0 | 3,08 |
| Припой ПОС-61 ДЕСТ 21931-86 | 575,00 | 0,02 | 0 | 0 | 9,66 |
| Флюс ФКСП ОСТ | 525,00 | 0,01 | 0 | 0 | 5,88 |
| Лак | 550,00 | 0,01 | 0 | 0 | 6,16 |
| Всього | | | | | 5559,82 |

3.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Мікроелектронний тензометричний перетворювач», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (3.8)$$

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

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

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

$$K_e = 2 \cdot 21,30 \cdot 1,12 = 47,71 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Витрати на комплектуючі

| Найменування комплектуючих | Кількість, шт. | Ціна за штуку, грн | Сума, грн |
|----------------------------|----------------|--------------------|-----------|
| Транзистори | 2 | 21,30 | 47,71 |
| Резистори | 1 | 6,00 | 6,72 |
| Конденсатори безкорпусні | 2 | 11,00 | 24,64 |
| Всього | | | 79,07 |

3.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

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

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{\text{спеу}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (3.9)$$

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

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

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

k – кількість найменувань устаткування.

$$V_{спец} = 6720,00 \cdot 1 \cdot 1,12 = 7526,40 \text{ (грн.)}.$$

Отримані результати зведемо до таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

| Найменування устаткування | Кількість, шт | Ціна за одиницю, грн | Вартість, грн |
|---------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| Вольтметр В7-26 | 1 | 6720,00 | 7526,40 |
| Осцилограф СІ-93 | 1 | 9850,00 | 11032,00 |
| Мультиметр В7-35 | 1 | 7300,00 | 8176,00 |
| Частотомір ЧЗ-34 | 1 | 9520,00 | 10662,40 |
| Блок живлення Б5-43 | 1 | 1800,00 | 2016,00 |
| Всього | | | 39412,80 |

3.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

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

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{inpz} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (3.10)$$

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

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

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

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{npz} = 7486,00 \cdot 1 \cdot 1,12 = 8384,32 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

| Найменування програмного засобу | Кількість, шт | Ціна за одиницю, грн | Вартість, грн |
|--|---------------|----------------------|---------------|
| Прикладне програмне забезпечення проведення моделювання та дослідження | 1 | 7486,00 | 8384,32 |
| Всього | | | 8384,32 |

3.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

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

$$A_{обл} = \frac{C_б}{T_е} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (3.11)$$

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

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

T_6 – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (19860,00 \cdot 1) / (4 \cdot 12) = 413,75 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

| Найменування обладнання | Балансова вартість, грн | Строк корисного використання, років | Термін використання обладнання, місяців | Амортизаційні відрахування, грн |
|---|-------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------|
| Метрологічний комплекс МКВТ-1246 | 19860,00 | 4 | 1 | 413,75 |
| Вольтметр В7-26 | 7526,40 | 5 | 1 | 125,44 |
| Осцилограф СІ-93 | 11032,00 | 5 | 1 | 183,87 |
| Мультиметр В7-35 | 8176,00 | 5 | 1 | 136,27 |
| Частотомір ЧЗ-34 | 10662,40 | 5 | 1 | 177,71 |
| Прикладне програмне забезпечення розробки та моделювання | 7791,00 | 3 | 1 | 216,42 |
| Офісне програмне забезпечення (Windows, Microsoft Office) | 8250,00 | 3 | 1 | 229,17 |
| Персональний комп'ютер інженера-розробника мікроелектронної апаратури | 24650,00 | 4 | 1 | 513,54 |
| Оргтехніка | 8254,00 | 5 | 1 | 137,57 |
| Приміщення дослідної лабораторії | 350000,00 | 25 | 1 | 1166,67 |
| Всього | | | | 3300,39 |

3.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (3.12)$$

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

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, (грн.); (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийємо $C_e = 7,52$ (грн.);

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

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

$$B_e = 0,46 \cdot 160,0 \cdot 7,52 \cdot 0,95 / 0,97 = 553,47 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Витрати на електроенергію

| Найменування обладнання | Встановлена потужність, кВт | Тривалість роботи, год | Сума, грн |
|---|-----------------------------|------------------------|-----------|
| Метрологічний комплекс МКВТ-1246 | 0,46 | 160,0 | 553,47 |
| Вольтметр В7-26 | 0,06 | 50,0 | 22,56 |
| Осцилограф СІ-93 | 0,08 | 50,0 | 30,08 |
| Мультиметр В7-35 | 0,04 | 50,0 | 15,04 |
| Частотомір ЧЗ-34 | 0,12 | 50,0 | 45,12 |
| Персональний комп'ютер інженера-розробника мікроелектронної апаратури | 0,25 | 160,0 | 300,80 |
| Оргтехніка | 0,75 | 4,50 | 25,38 |
| Робоче місце дослідника (проектувальника) | 0,10 | 160,0 | 120,32 |
| Всього | | | 1112,77 |

3.2.9 Службові відрядження

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

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

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (3.13)$$

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

$$B_{cv} = (48152,86 + 1612,49) \cdot 20 / 100\% = 9953,07 \text{ (грн.)}.$$

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

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

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (3.14)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn}=35\%$.

$$B_{cn} = (48152,86 + 1612,49) \cdot 35 / 100\% = 17417,87 \text{ (грн.)}$$

3.2.11 Інші витрати

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

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

$$I_g = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ig}}{100\%}, \quad (3.15)$$

де H_{ig} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ig}=65\%$.

$$I_g = (48152,86 + 1612,49) \cdot 65 / 100\% = 32347,47 \text{ (грн.)}$$

3.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

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

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

$$B_{нзв} = (z_o + z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (3.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 115\%$.

$$B_{нзв} = (48152,86 + 1612,49) \cdot 115 / 100\% = 57230,15 \text{ (грн.)}$$

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

$$B_{заг} = z_o + z_p + z_{доо} + z_n + M + K_г + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{ст} + I_г + B_{нзв}. \quad (3.17)$$

$$B_{заг} = 48152,86 + 1612,49 + 4976,53 + 12043,21 + 5559,82 + 79,07 + 39412,80 + 8384,32 + 3300,39 + 1112,77 + 9953,07 + 17417,87 + 32347,47 + 57230,15 = 241582,82 \text{ (грн.)}$$

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

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (3.18)$$

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

$$ЗВ = 241582,82 / 0,95 = 254297,71 \text{ (грн.)}$$

3.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

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

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

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

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (3.19)$$

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

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

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

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

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 254297,71$ (грн.);

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

Визначення показників I, n, T_C, R, B, t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [27].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 3^3 \cdot 2 \cdot 4 / 254,3 \cdot 0,08 = 10,19.$$

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

3.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронний тензOMETричний перетворювач» складають 254297,71 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Мікроелектронний тензOMETричний перетворювач» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Проблеми забезпечення безпечних умов праці, які є важливою передумовою високої продуктивності, попередження нещасних випадків на виробництві, професійних захворювань та зниження виробничої захворюваності, а також економічних збитків, пов'язаних з цими питаннями, можуть бути успішно вирішені лише через реалізацію узгодженої політики. Забезпечення безпеки праці на підприємстві передбачає, щоб керівники та власники дотримувалися простих норм безпеки для своїх працівників та враховували конкретні особливості виробництва, де вирішуються ці питання.

Розробка мікроелектронного тензометричного перетворювача відбувалася в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На розробника, відповідно до Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [28]:

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

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

Відповідно до визначених факторів формуємо рішення щодо безпечного виконання роботи.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

4.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Сучасний розвиток виробництва включає в себе постійну автоматизацію та оптимізацію виробничих процесів. Практично кожне підприємство в сучасному господарському середовищі використовує комп'ютерну техніку для здійснення своєї діяльності. У зв'язку з широким поширенням робіт, які виконуються за допомогою комп'ютерів, законодавство України чітко регулює норми та вимоги щодо використання комп'ютерної техніки на підприємствах, зокрема, в галузі охорони праці. Це включає в себе такі нормативні документи, як ДСанПіН 3.3.2.007-98, НПАОП 0.00-7.15-18, ДСТУ 8604:2015 та інші.

Перед початком роботи з комп'ютером, ноутбуком, принтером, ксерксом, сканером, плазмовою панеллю, LCD-дисплеєм та іншою офісною технікою на робочому місці допускаються особи, які досягли 18-річного віку, пройшли медичний огляд, ознайомлені з інструкцією з охорони праці при роботі з офісною технікою та не мають жодних медичних протипоказань.

Приміщення, призначені для роботи з комп'ютерами, повинні відповідати проєктній документації будинку, яка була погоджена з відповідними державними органами. Крім того, роботодавець повинен дотримуватися санітарних норм та вимог, які стосуються освітлення, мікроклімату (температури та вологості), вібрації, рівня шуму та пожежної безпеки в приміщенні. Конкретні параметри цих санітарних норм зазначені у вищезазначених нормативних документах.

Організація робочого місця розробника мікроелектронного тензометричного перетворювача були дотримані такі вимоги:

– робочі місця з відеотерміналами й ПК розміщуються на відстані не менш 1 м від стін зі світловими прорізами;

- відстань між бічними поверхнями відеотерміналів повинна бути не менше 1,2 м;
- відстань між тильною поверхнею одного відеотермінала й екраном іншого не повинна бути менше 2,5 м;
- прохід між рядами робочих місць повинен бути не менше 1 м.

Робоче сидіння (крісло) розробника має наступні основні елементи: сидіння, спинку й стаціонарні або знімні підлокітники.

Екран монітора та клавіатура знаходяться на оптимальній відстані від очей користувача, яка не менше 600 мм, з урахуванням розміру алфавітно-цифрових символів. Клавіатура розташована на спеціальній поверхні, яка може регулюватися за висотою, окремо від столу, на відстані 100-300 мм від краю, що найближчий до користувача. Кут нахилу клавіатури регулюється в межах 5-15⁰.

Загальна площа робочого приміщення становить 16,5 м² та об'єм 52,8 м³. Кількість працівників у приміщенні – 3 особи, всі робочі місця комп'ютеризовані. На одного працівника в даному приміщенні припадає в середньому $\frac{16,5}{3} = 5,5$ (м²/ос.) робочої площі. Об'єм повітря на одного працівника припадає $\frac{52,8}{3} = 17,6$ м³.

Згідно з вимогами НПАОП 0.00-7.15-18 [29], площа приміщень, в яких використовують відеотермінали, має бути не менше 6,0 квадратних метрів, а об'єм - не менше 20,0 кубічних метрів на одне робоче місце з відеотерміналом, враховуючи максимальну кількість осіб, які одночасно працюють у зміні. Порівнявши ці вимоги з фактичними розмірами приміщень, було виявлено, що встановлені нормативи не дотримуються. Це може негативно впливати на здоров'я працівників. Тому було запропоновано перенести одне робоче місце з комп'ютером в інше приміщення.

4.1.2 Електробезпека приміщення

Приміщення, де проводилася розробка мікроелектронного тензометричного перетворювача, належить до 1-го класу безпеки, що вказує на відсутність підвищеної електричної небезпеки. В цьому приміщенні переважають безпечні умови: воно сухе, мало заповнене, має нормальну температуру повітря, ізольовані підлоги та обладнання, що має обмежену кількість заземлених приладів.

На робочому місці з усього обладнання є металевий корпус системного блоку комп'ютера. У цьому корпусі передбачено ізоляцію для забезпечення безпеки, а також наявний елемент для заземлення та провід зі заземлюючим проводом для приєднання до джерела живлення.

Електротехнічне устаткування, включаючи апаратури, кабелі, та розподільні пристрої усіх видів та напруг, забезпечує надійну роботу як в нормальних режимах, так і в умовах коротких замикань, перенапруг, та перевантажень.

Для забезпечення безпеки застосовані такі технічні рішення:

- струмопровідні частини недоступні (використовується схована проводка, або кабель прокладений у спеціальних ринвах);
- струмопровідні частини ізольовані за допомогою ізоляції, опір якої не менше 1 кОм/В, і піддаються регулярному контролю та обслуговуванню;
- напруга в системі освітлення становить 220 В та має заземлену нейтраль;
- використання запобіжників та автоматичних вимикачів для захисту від коротких замикань і перевантажень;
- заземлення всіх металевих частин обладнання та електричних систем для ефективного відведення надлишкової напруги та запобігання ураженню електричним струмом;

- застосування високоякісних кабелів, які відповідають стандартам безпеки та електробезпеки;
- постійний нагляд і планова профілактика електротехнічного обладнання та ізоляції для попередження можливих проблем.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат в приміщенні, включаючи температуру, швидкість руху повітря та вологість, грає значущу роль у підтриманні працездатності людини. Щоб організм працював належним чином, важливо, щоб тепло, яке виділяється в процесі роботи в організмі працівника, рівномірно виводилося в навколишнє середовище. Зниження температури в офісному приміщенні призводить до збільшення втрат тепла, що може призвести до переохолодження організму. У високих температурах, організм видає більшість тепла через випаровування поту. Щоб фізіологічні процеси протікали нормально, відносна вологість повітря повинна бути на рівні не вище 60%.

Робота розробника мікроелектронного тензометричного перетворювача згідно Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу за енерговитратами відноситься до категорії 1а. Допустимі параметри мікроклімату для категорії 1а наведені в табл.4.1. [32]

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

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

Для забезпечення оптимальних мікрокліматичних умов у приміщенні використовується система кондиціонування повітря з можливістю індивідуального регулювання температури, система центрального опалення та систематичне вологе прибирання приміщення.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Для забезпечення нормальних умов виробничої діяльності необхідно, крім комфортних метеорологічних умов, також забезпечити відповідну якість повітря. Під час виробничої діяльності в приміщенні повітря можуть потрапляти різноманітні шкідливі речовини, які використовуються в технологічних процесах. Шкідливими вважаються речовини, які, при недотриманні вимог безпеки, можуть спричинити виробничі травми, професійні захворювання або вплинути на стан здоров'я, що можуть проявлятися як під час роботи, так і у майбутньому, як для сучасного працівника, так і для наступних поколінь.

В приміщенні, де здійснюється розробка мікроелектронного тензометричного перетворювача, можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил, озон та вуглекислий газ. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, згідно ДСН 3.3.6.042-99, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

| Назва речовини | ГДК, мг/м ³ | | Клас небезпечності |
|-----------------|------------------------|-----------------|--------------------|
| | Максимально разова | Середньо добова | |
| Пил нетоксичний | 25 | 10 | 4 |
| Озон | 0,1 | 0,03 | 1 |
| Вуглекислий газ | 3 | 1 | 4 |

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл.4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

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

Забезпечення відповідного складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою таких заходів:

- система кондиціонування регулює температуру, вологість та чистоту повітря в робочій зоні;
- регулярне провітрювання видаляє з повітря шкідливі речовини, такі як пил, гази та пари;
- вологе прибирання допомагає видалити з поверхонь пил, бруд та мікроорганізми.

Всі ці заходи необхідні для захисту здоров'я працівників та забезпечення комфортних умов праці.

4.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення виробничих приміщень визначається кількісними і якісними показниками. До основних кількісних параметрів відносяться світловий потік, сила світла, яскравість і освітленість. До ключових якісних показників візуального сприйняття в робочому середовищі включають фон, контраст між об'єктом і фоном, та видимість. Недостатнє або надмірне освітлення, нерівномірність розподілу світла в полі зору, пульсація світла, а також зміна кольорів освітлюваних об'єктів можуть викликати втому зору та загальну втомлюваність. Надмірна яскравість джерел світла може спричинити головний біль, блимання перед очима і розлад гостроти зору. Відблиски від світла можуть тимчасово

засліплювати. Забруднені вікна і світильники знижують якість освітлення. Лампи, що сліплять, або різка тінь можуть призвести до втрати орієнтації працівника. Усі ці аспекти представляють потенційні ризики нещасних випадків та можуть сприяти виникненню професійних захворювань.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та сумісному освітленні (згідно ДБН В.2.5-28:2018) [33] зазначені у таблиці 4.4:

Таблиця 4.4 - Норми освітленості в приміщенні

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

Місце роботи розміщено таким чином, щоб уникнути прямого попадання світла в очі. Для усунення світлових відблисків використовується обладнання з матовою поверхнею. Щоб захистити очі від прямого сонячного світла або штучного освітлення, встановлюють захисні козирки та жалюзі на вікнах. Застосовується система вимікачів, що дозволяє регулювати інтенсивність штучного освітлення по відношенню

до природного освітлення та освітлювати тільки необхідні для роботи зони приміщення.

Для забезпечення належного рівня освіти важливо максимально використовувати доступне природне освітлення, регулярно очищати вікна від бруду та своєчасно замінювати випалені лампи.

4.2.4 Виробничий шум

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99 [34]. Норми шумового навантаження на працівника в процесі розробки мікроелектронного тензометричного перетворювача наведені в табл.4.5.

Таблиця 4.5 - Рівень звукового тиску

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

Основними заходами боротьби з шумом є усунення або ослаблення причин шуму в самому його джерелі у процесі роботи, використання звукопоглинаючих матеріалів, раціональне планування виробничих приміщень.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Сучасна комп'ютерна техніка відзначається високою енергоефективністю, споживаючи приблизно від 200 до 250 Вт електроенергії. Вона включає в себе різні електро- та радіоелектронні пристрої, які працюють на різних фізичних принципах. Ця техніка створює

навколо себе електричні та магнітні поля з широким частотним спектром та різним просторовим розподілом. Крім того, потенційно шкідливими факторами можуть бути також електромагнітне випромінювання радіочастотного діапазону та електромагнітні поля, які генеруються сторонніми джерелами на робочому місці з комп'ютерною технікою. Ці фактори можуть впливати на здоров'я працівників і вимагають відповідних заходів безпеки та контролю. Гранично допустимі рівні електромагнітного поля для працівника становлять наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань [35]

| Види поля | Допустимі параметри поля | | Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/м ² |
|--|-----------------------------------|---------------------------------|---|
| | за електричною складовою (E), В/м | за магнітною складовою (H), А/М | |
| Напруженість електромагнітного поля, 6 кГц...3 МГц | 50 | 5 | |
| 3 МГц...30МГц | 2 | - | |
| 30 МГц...5 ГГц | - | - | 10 |
| Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру: УФ-С (220...280 нм) | | | 0,001 |
| УФ-В (280...320 нм) | | | 0,01 |
| УФ-А (320. ..400 нм) | | | 10,0 |
| в інфрачервоній частині спектру: 0,76... 10,0 мкм | | | 35,0.. .70,0 |
| Напруженість електричного поля ВДТ | | | 20 ВВ/м |

Для обмеження впливу ЕМП на розробника слід використовувати лише якісну техніку із сертифікатом якості і дотримуватися встановленого часу роботи за ПК.

4.2.6 Психофізіологічні фактори

Оцінка психофізіологічних факторів під час розробки мікроелектронного тензометричного перетворювача здійснюється відповідно до Гігієнічної класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу.

Робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаєморозташування різних частин тіла відносно одна одної) до 25% часу зміни;

Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження:

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

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

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

Сенсорні навантаження:

Зосередження (%за зміну) – до 5-75%;

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

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

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

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

Емоційне навантаження:

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

Режим праці:

Тривалість робочого дня – 8 год;

Змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

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

4.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи РЕС мікроелектронного тензометричного перетворювача в умовах дії загрозливих чинників НС

4.3.1 Дія електромагнітних випромінювань на радіоелектронні системи

У елементній базі радіоелектронної системи (РЕС) під дією іонізуючих випромінювань ймовірна зміна ледве не всіх електричних і експлуатаційних характеристик, що залежить від протікання процесів іонізації та порушення структури матеріалів.

Під час електромагнітного імпульсу можуть спостерігатись високі імпульси струмів і напруг в провідниках та кабелях зв'язку, електропередач, систем обчислювальних машин та автоматичних систем управління, антенах радіостанцій тощо [36].

4.3.2 Визначення товщини екрану для забезпечення стійкості приладу в умовах дії електромагнітних випромінювань

Вихідні дані: $E_B = 23$ кВ/м; $U_{Ж} = 5 \pm 5\%$ В; $l_{Г} = 0,15$ м.

Для підвищення стійкості роботи РЕС потрібно екранувати елементи схеми. Визначимо товщина стінки екрану з формули

$$A = \kappa t \sqrt{f} \text{ [дБ]}, \quad (4.1)$$

звідки

$$t = \frac{A}{\kappa\sqrt{f}} \text{ [см]}, \quad (4.2)$$

де A – перехідне гасіння енергії електричного поля для сталюого екрану, дБ;

κ – коефіцієнт, який для сталюого екрану дорівнює 5,2;

f – частота ($f = 120000000$ Гц).

Перехідне гасіння енергії електричного поля для сталюого екрану визначимо за формулою

$$A = 20 \lg \frac{E_B}{E_{Bi}} \text{ [дБ]}, \quad (4.3)$$

де E_B, E_{Bi} – вертикальні напруженості ЕМВ без та з екраном, відповідно, В/м.

В якості критерію стійкості РЕС в умовах дії електромагнітного імпульсу приймається коефіцієнт безпеки, який визначається за формулою [36]

$$K_B = 20 \lg \frac{U_D}{U_r} \geq 40 \text{ [дБ]}. \quad (4.4)$$

Визначаємо допустиме коливання напруги живлення

$$U_D = U_{ж} + \frac{U_{ж}}{100} N \text{ [В]}; \quad (4.5)$$

$$U_D = 5 + \frac{5}{100} 5 = 5,25 \text{ (В)},$$

де $U_{ж}$ – робоча напруга живлення, В;

N – допустимі коливання напруги, %.

З формули (4.5) виразимо горизонтальну складову напруги наведення на струмопровідних частинах РЕС

$$U_{\Gamma} = \frac{U_{\Delta}}{100} \text{ [В];} \quad (4.6)$$

$$U_{\Gamma} = \frac{5,25}{100} = 0,05 \text{ (В)}.$$

Знаходимо допустиму вертикальну складову напруженості електромагнітного поля, при якому коефіцієнт безпеки знаходиться в межах допустимого

$$U_{\Gamma} = E_{Bi} l_{\Gamma} \text{ [В],} \quad (4.7)$$

звідки

$$E_{Bi} = \frac{U_{\Gamma}}{l_{\Gamma}} \text{ [В/м];} \quad (4.8)$$

$$E_{Bi} = \frac{0,05}{0,15} = 0,3333 \text{ (В/м)} = 0,0003 \text{ (кВ/м)}.$$

Підставляючи відомі значення у формули (4.3, 4.2), одержимо:

$$A = 20 \lg \frac{23}{0,0003} = 16960,91 \text{ (дБ);}$$

$$t = \frac{16960,91}{5,2 \sqrt{120000000}} = 0,2978 \text{ (см)}.$$

Таким чином, сталевий екран товщиною 0,2978 см забезпечує стійкість РЕС приладу в умовах дії електромагнітних випромінювань.

4.4 Висновки до розділу

Визначено, що сталевий екран товщиною 0,2978 см забезпечує стійкість РЕС мікроелектронного тензометричного перетворювача в умовах дії електромагнітних випромінювань.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі здійснено огляд методик вимірювання тиску у текучих середовищах, досліджено фізичний механізм дії тиску на напівпровідники, наведено схематичний розріз мембранного перетворювача тиску, проведено математичне моделювання функції перетворення і рівняння чутливості радіовимірювального перетворювача тиску з тензочутливим біполярним транзистором, здійснена оцінка метрологічних параметрів перетворювачів тиску.

Доведено, що підвищення параметрів радіовимірювальних перетворювачів тиску можливо при використанні в якості тензочутливого елемента біполярного транзистора. Наведена схема перетворювача тиску подана, яка складається із біполярного і польового транзисторів. Розраховані параметри біполярного транзистора, які змінюються під дією тиску, а саме дифузійна ємність і її опір, бар'єрна ємність і її опір, коефіцієнт передачі струму та опір бази. Проаналізовані графіки залежностей параметрів транзистора від дії тиску.

Отримано результати математичного моделювання функції перетворення і рівняння чутливості мікроелектронного тензометричного перетворювача тиску з тензочутливим біполярним транзистором. Здійснено оцінювання метрологічних параметрів розробленого мікроелектронного тензометричного перетворювача.

Виконані розрахунки в розділі економіки. Зроблено економічне обґрунтування розробки, розрахована собівартість приладу та економічний ефект, який буде отриманий при виробництві даного приладу. Застосування тензочутливого елемента, а саме тензотранзистору, дозволяє спростити схему і не використовувати дорогий і складний у застосуванні аналогово-цифровий перетворювач. Така розробка необхідна не лише з точки зору покращення технічних характеристик, а й принесе значну економію коштів споживачам і значні прибутки виробникам.

У розділі охорони праці та цивільного захисту виконаний аналіз умов праці при розробці пристрою, наведені рекомендації щодо забезпечення безпечних умов праці і розрахунок комбінованого освітлення в лабораторії, в якій виготовляється даний прилад. Визначена товщина екрану для забезпечення стійкості приладу в умовах дії електромагнітних випромінювань. Встановлено, що сталевий екран товщиною 0,2978 см забезпечує стійкість РЕС мікроелектронного тензометричного перетворювача в умовах дії електромагнітних випромінювань.

Вимоги індивідуального завдання виконані в повному обсязі. Тому в підсумку можна зробити висновок, що запропонований мікроелектронний тензометричний перетворювач є конкурентоспроможним, а розробка даного пристрою є актуальною та економічно вигідною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Напівпровідникові перетворювачі інформації. Навчальний посібник. — Вінниця: ВНТУ, 2004. — 208 с.
2. Smith C.S. Piezoresistance effect in germanium and silicon // Phys. Rev. Vol.54, N1, 1954. - P. 42.
3. Poppinger M. Silicon diaphragm pressure sensors // Solid State Devices, 1985. - P.53-70.
4. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем. -Вінниця: «УШВЕРСУМ-Вінниця», 1999. - 275с.
5. Осадчук О.В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. -Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2000.-303 с.
6. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Фізична нанoeлектроніка: навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 146 с.
7. Осадчук О.В., Барабан С.В., Криночкін Р.В. Вимірювання в системах зв'язку. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 67 с. ISBN 978-966-7690-37-3
8. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Жагловська О.М. Прилади з від'ємним опором: лабораторний практикум. – Вінниця: ВНТУ, 2015. –63с.
9. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Основи нанoeлектроніки: навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2016. - 199 с.
- 10.Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Конструювання і технологія приладів мікро- та нанoeлектроніки" для студентів спеціальності "Мікро- та нанoeлектронні прилади та пристрої"/ Уклад. О.В. Осадчук, Л.В. Крилик. - Вінниця: ВНТУ, 2016. - 58 с.
- 11.Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни "Конструювання і технологія приладів мікро- та нанoeлектроніки"

- для студентів спеціальності "Мікро- та наноелектронні прилади та пристрої"/ Уклад. О.В. Осадчук, Л.В. Крилик. - Вінниця: ВНТУ, 2016. - 30 с.
- 12.Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни "Конструювання і технологія електронних приладів та пристроїв" для студентів спеціальності "Електронні прилади та пристрої"/ Уклад. О.В. Осадчук, Л.В. Крилик. - Вінниця: ВНТУ, 2016. - 30 с.
- 13.Сигнали та процеси в радіотехніці : лабораторний практикум / [Воловик Ю. М., Гаврілов Д. В., Семенов А. О. та ін.]. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 94 с.
- 14.Осадчук В.С., Осадчук О.В. Напівпровідникові прилади з від'ємним опором. –Вінниця: ВНТУ, 2006. – 162 с.
- 15.Осадчук В.С., Осадчук О.В., Семенов А.О., Коваль К.О. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором. –Вінниця: ВНТУ, 2011. – 336 с.
- 16.Осадчук В.С., Осадчук О.В., Семенов А.О. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором. Монографія. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2009. – 182 с.
- 17.Осадчук В.С., Осадчук О.В., Прокопова М.О. Сенсори газу. Монографія. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2008. – 182 с.
- 18.Осадчук В.С., Осадчук О.В., Ющенко Ю.А. Радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі витрат газу з частотним виходом. – Вінниця: ВНТУ, 2012. –140с.
- 19.Мікроелектронні сигнальні перетворювачі теплових сенсорів потоку. / Готра Г.Ю., Павлов С.В., Осадчук О.В., Голяка Р.Л., Вуйцик В., Куленко С.С. –Вінниця: ВНТУ, 2012. – 240 с.
- 20.Осадчук В.С., Осадчук О.В. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом.Монографія. –Вінниця: ВНТУ, 2013. – 261 с.

- 21.Осадчук В.С., Осадчук О.В., Селецька О.О. Радіовимірвальні оптичні перетворювачі для мікроелектронної технології. Монографія.–Вінниця: ВНТУ, 2013.–160с.
- 22.Осадчук В.С., Осадчук О.В., Криночкін Р.В. Радіовимірвальні перетворювачі для визначення товщини плівок на основі пристроїв з від'ємним опором. Монографія. –Вінниця: ВНТУ, 2013. – 136 с.
- 23.Осадчук В.С., Осадчук О.В., Звягін О.С. Частотні перетворювачі для контролю вологості нафтопродуктів. –Вінниця: ВНТУ, 2014. –152с.
- 24.Осадчук В.С., Осадчук О.В., Барабан С.В. Радіовимірвальні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором для неруйнівного теплового контролю. –Вінниця: ВНТУ, 2015.– 212с.
- 25.Осадчук В.С., Осадчук О.В., Савицький А.Ю. Радіовимірвальні перетворювачі вологості на основі МДН-структур. –Вінниця: ВНТУ, 2016. – 152 с.
- 26.Осадчук В.С., Осадчук О.В., Жагловська О.М. Радіовимірвальні мікроелектронні перетворювачі потужності оптичного випромінювання з частотним виходом. –Вінниця: ВНТУ, 2016. – 168с.
- 27.Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
- 28.ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги - [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028
- 29.Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»,

- затверджених [наказом](#) Міністерства охорони здоров'я України від 08 квітня 2014 року № 248.
- 30.ДСанПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derzhavni-sanitarni-pravila-i-normi-roboti-z-vizualnimi-disp-nor4881.html>
- 31.ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>
- 32.ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
- 33.ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://dnop.com.ua/dnaop/act3167.htm>
- 34.НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php
- 35.ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
- 36.Сакевич В. Ф. Основи розробки питань цивільної оборони в дипломних проектах / В. Ф. Сакевич. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 109 с


Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

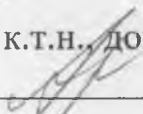
МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ТЕНЗОМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

Виконав: студент 2-го курсу, групи МНТ-22м
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна
техніка»

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)


Чаленко В.Ю.
(прізвище та ініціали)

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


Звягін О.С.
(прізвище та ініціали)

«18» 12 2023 р.

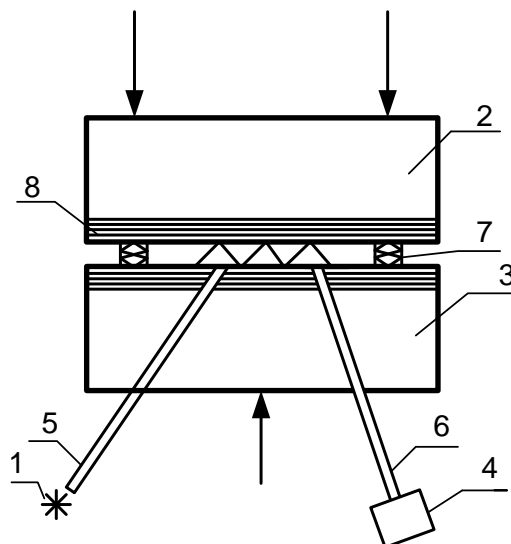


Рисунок 1- Схема тензоперетворювача

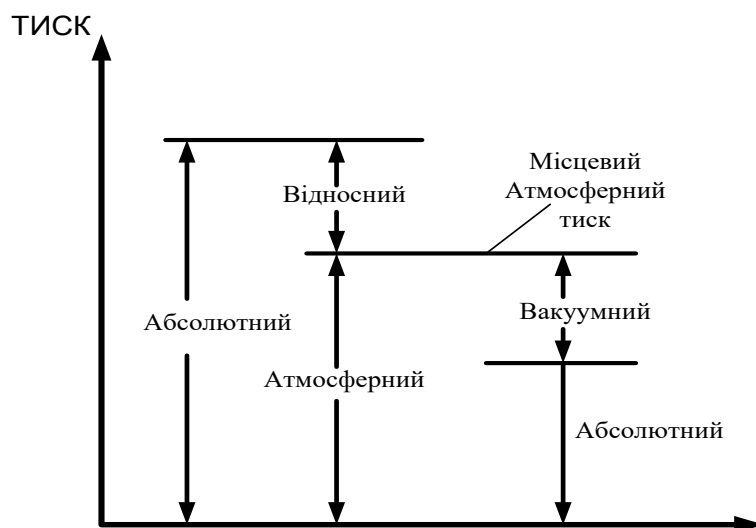


Рисунок 2 - Співвідношення між абсолютним і відносним тиском

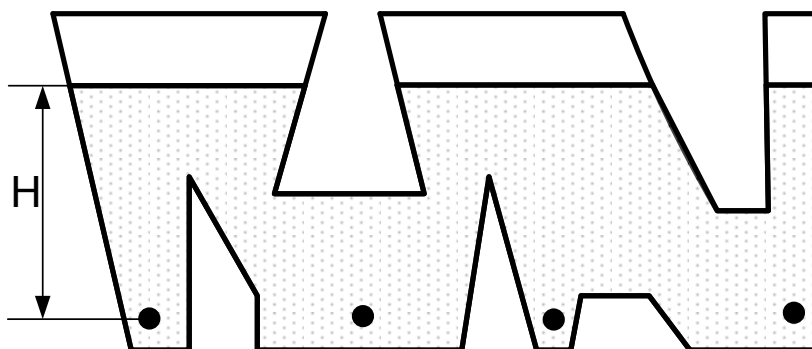


Рисунок 3 - Статична система

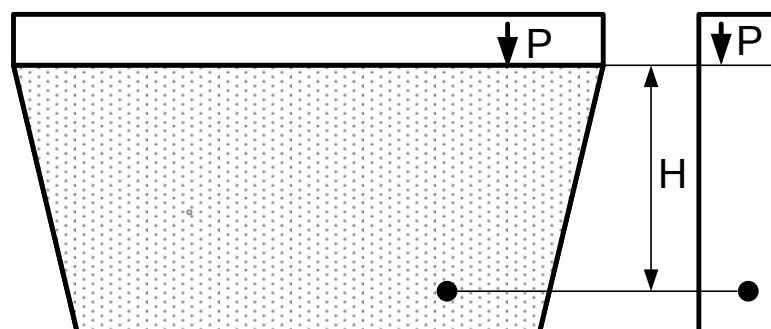


Рисунок 4 Тиск рідини в судині

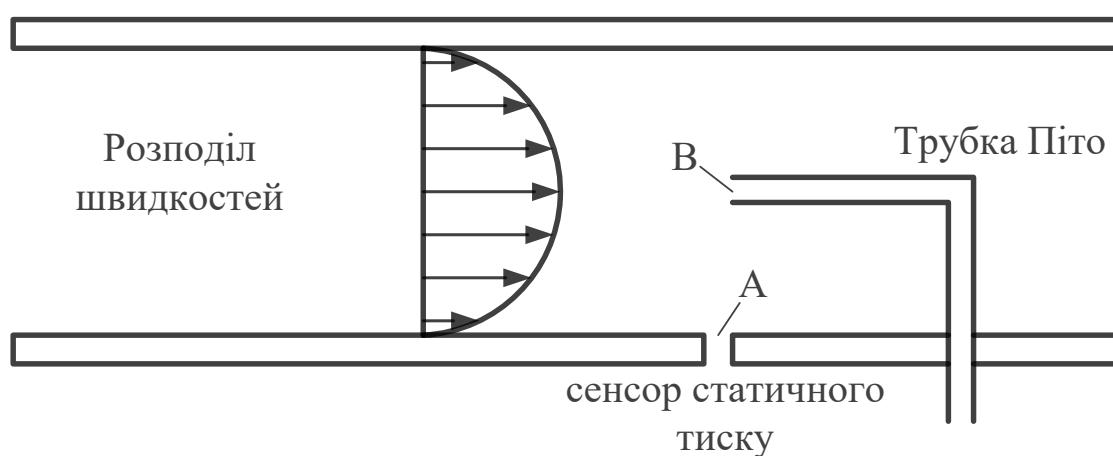


Рисунок 5 - Динамічна система

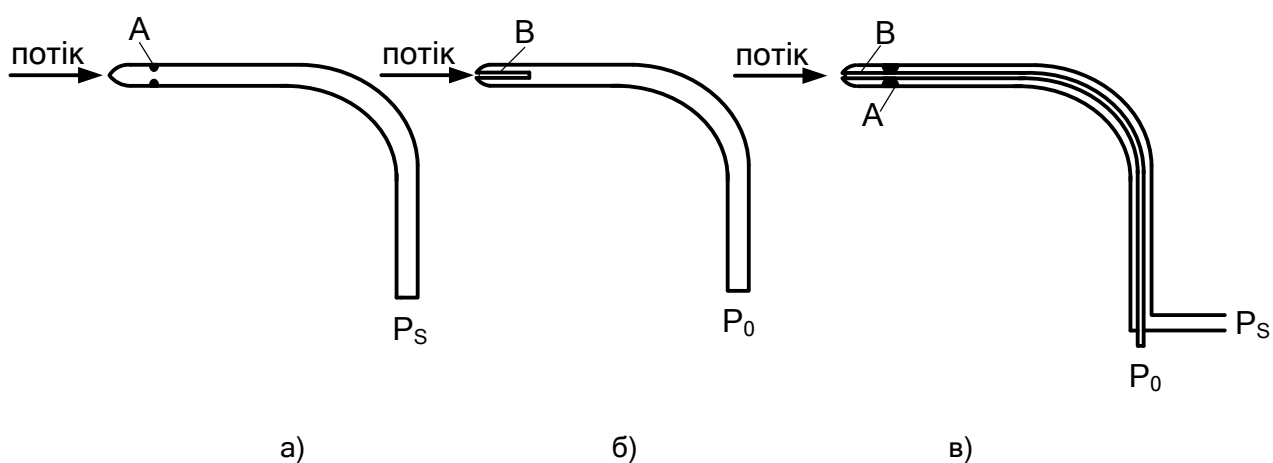


Рисунок 6 - Способи розташування сенсорів тиску: а) - вимірювання статичного тиску, б) - вимірювання повного тиску трубкою Піто, в) - комбіноване вимірювання статичного і повного тиску

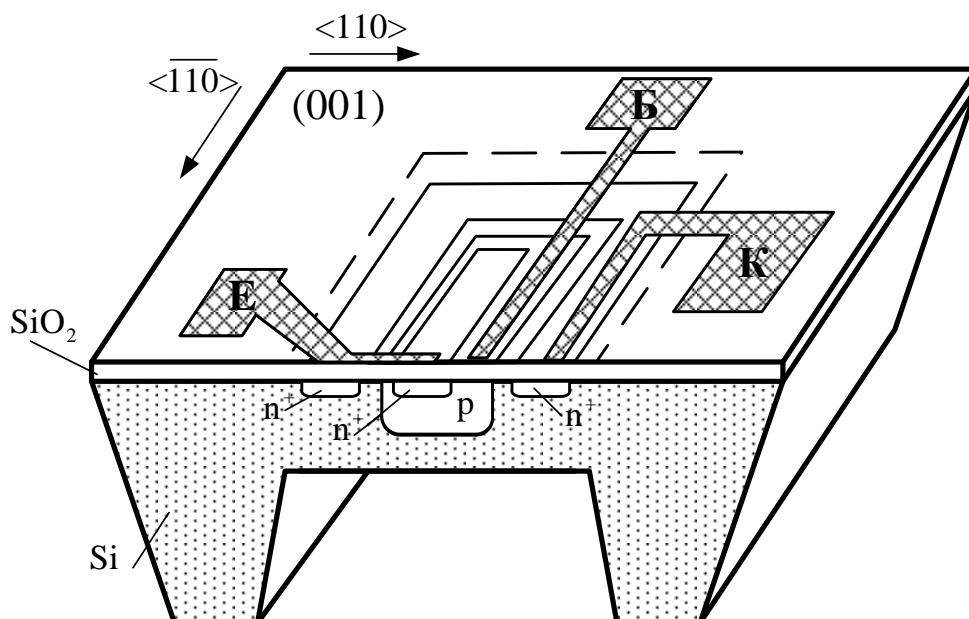


Рисунок 7 - Схематичний розріз мембранного перетворювача тиску з $n-p-n$ транзистором

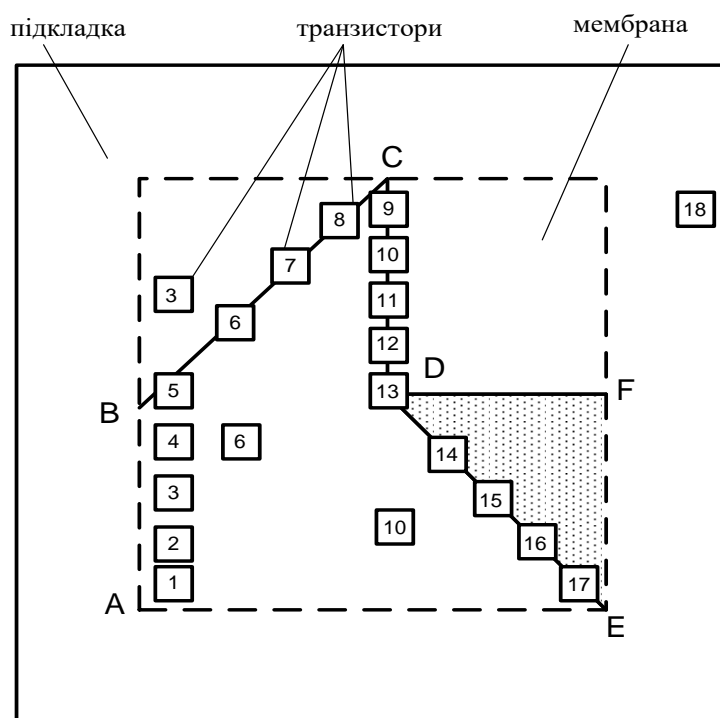


Рисунок 8 - Схема розташування тензотранзисторів на площині мембрани

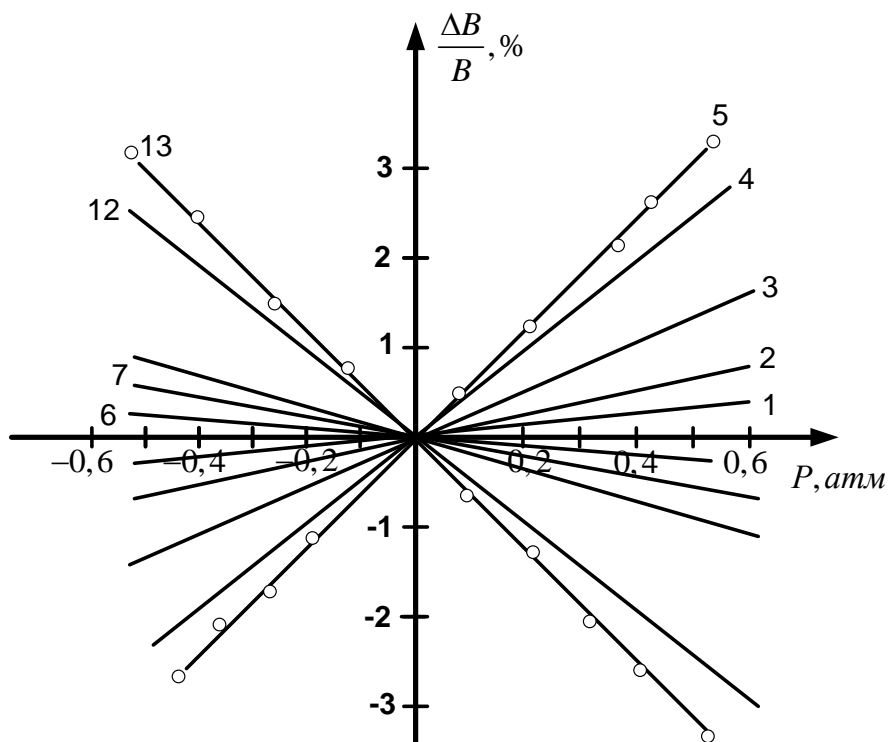


Рисунок 9 - Залежність відносної зміни статичного коефіцієнта підсилення транзисторів від тиску

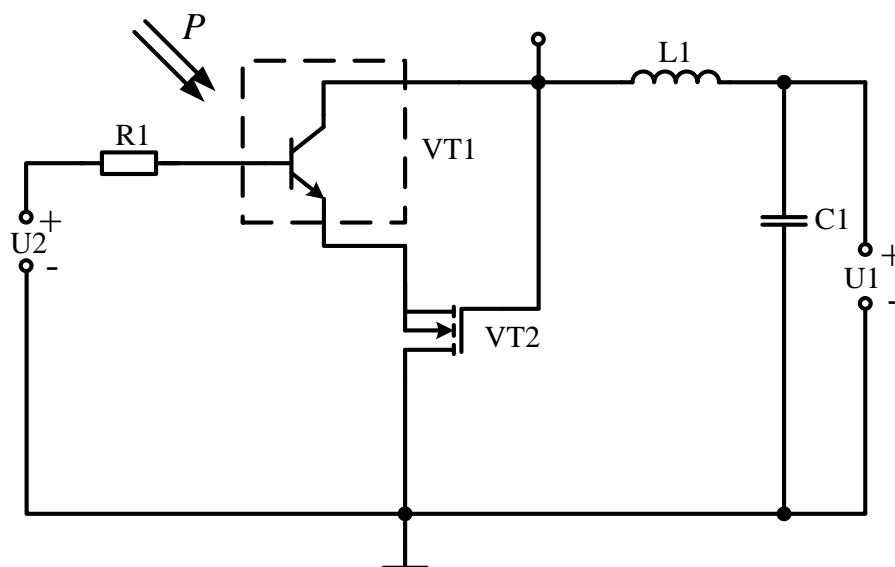


Рисунок 10 - Електрична схема перетворювача тиску

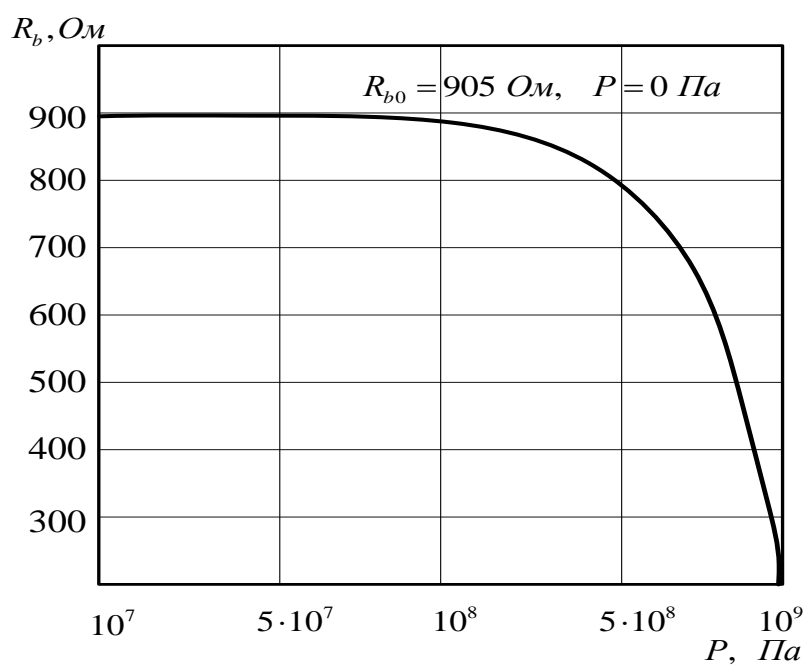


Рисунок 11 - Залежність опору бази від тиску

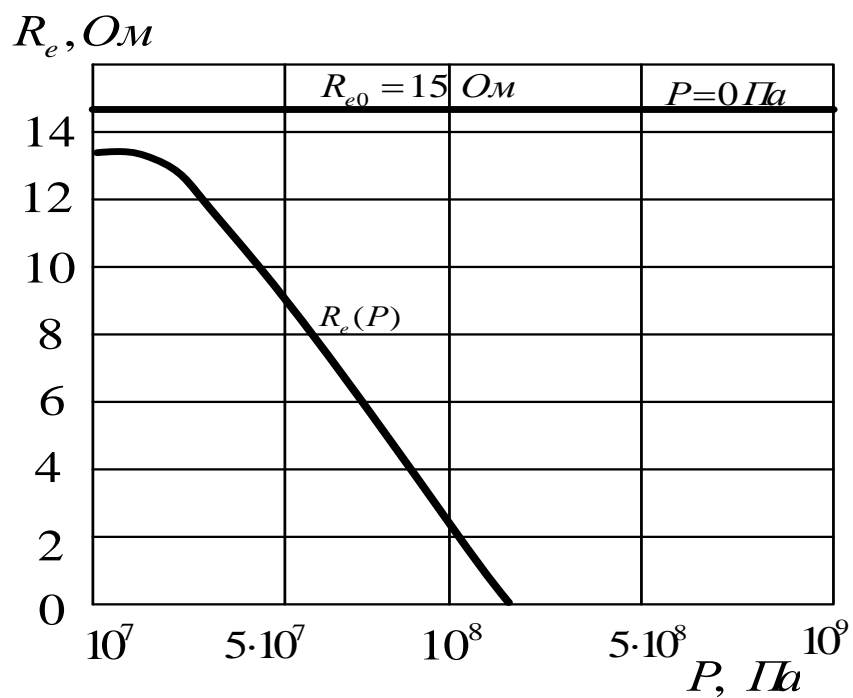


Рисунок 12 - Залежність опору емітера від тиску

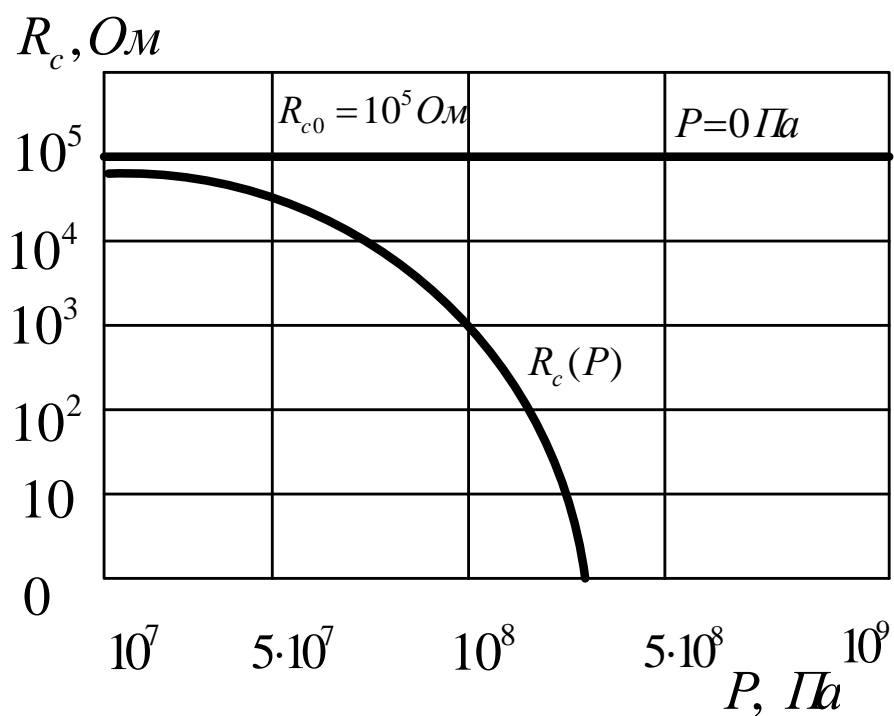


Рисунок 13 - Залежність опору колектора від тиску

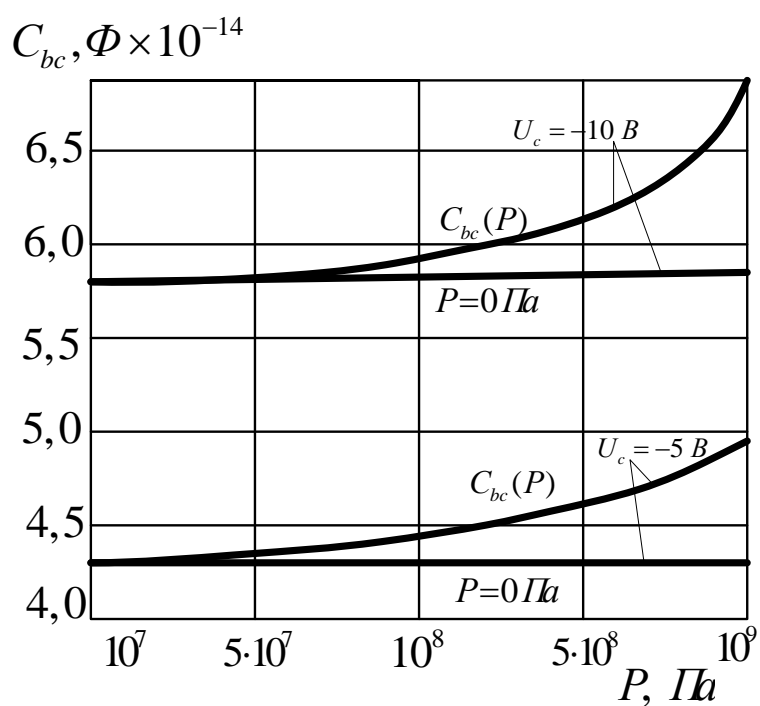


Рисунок 14 - Залежність ємності база-колектор від тиску

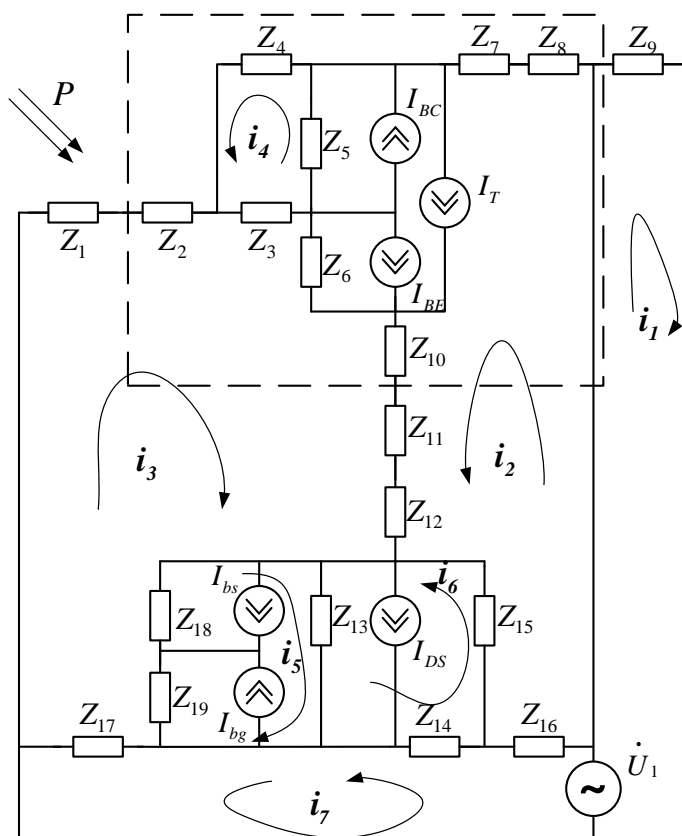


Рисунок 15 - Еквівалентна схема перетворювача

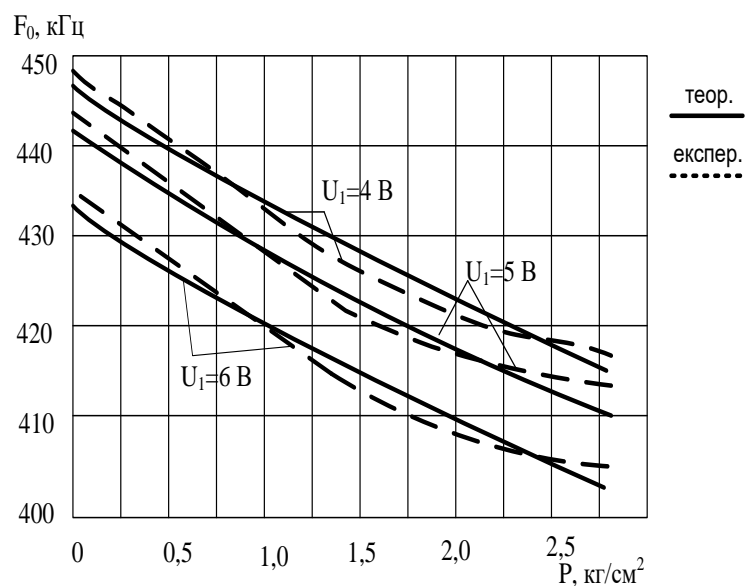


Рисунок 16 - Теоретична і експериментальна залежність частоти генерації від тиску

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ

МІКРОЕЛЕКТРОННИЙ ТЕНЗОМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

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

Назва роботи: «Мікроелектронний тензометричний перетворювач»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

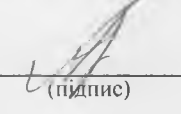
Підрозділ кафедра ІРТС
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 87,6% Схожість 12,4%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

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

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

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

Автор роботи  Чаленко В.Ю.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи  Звягін О.С.
(підпис) (прізвище, ініціали)