

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))

БАКАЛАВРСЬКА ДИПЛОМНА РОБОТА

на тему:

**«РОЗРОБКА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ З
ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ»**

Виконав: студент 4-го курсу, групи КІВТ-206
спеціальності 152 - Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)
Кіт Б.С.
(прізвище та ініціали)

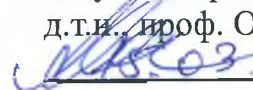
Керівник: к.т.н., доц., доц. каф. ІРТС
Дудатьєв І.А.
(прізвище та ініціали)
«14» 06 2024 р.

Рецензент: доц. каф. БМІОЕС, к.т.н., доц.
Тужанський С.Є.
(прізвище та ініціали)
«14» 06 2024 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІРТС
Осадчук О.В.
(прізвище та ініціали)
«14» 06 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти І-й (бакалаврський)
Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»
Спеціальність 152 - Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІРТС
д.т.н., проф. Осадчук О.В.
 2024 року

З А В Д А Н Н Я **НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Коту Боглану Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка тензорезистивного засобу вимірювання ваги з покращеними метрологічними характеристиками
керівник роботи к. т. н. доц., Дудатьєв І.А.,

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «11» 03 2024 року № 80

2. Строк подання студентом роботи 13.06.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Метод вимірювання – тензорезистивний. Тип тензосенсора - фольговий. Об'єкт контролю – вага. Схема підключення - шестипровідникова.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Особливості тензорезистивних сенсорів як об'єкта дослідження. Розробка тензорезистивного сенсора для засобу вимірювання ваги з покращеними метрологічними характеристиками. Фізико-математичне представлення тензоефекту. Розробка тензорезистивного засобу вимірювання ваги з покращеними метрологічними характеристиками. Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Зміщення долин енергетичної діаграми при одновісній деформації кристалу кремнію. Структурна схема металічних тензорезисторів. Конструкція фольгових металічних тензорезисторів. Схема дослідження деформаційних характеристик тензорезисторів. Схеми включення тензорезисторів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	доцент кафедри ІРТС к.т.н. доц., Дудатьєв ІА.		

7. Дата видачі завдання 14.03.2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/ п	Назва етапів бакалаврської дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітк а
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БДР	14.02.2024-28.02.2024	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2024-23.03.2024	
3.	Затвердження теми. Розробка завдання на БДР.	20.03.2024-31.03.2024	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз шляхів вирішення поставленої задачі.	01.04.2024-15.05.2024	
5.	Математичне моделювання. Розробка структурної схеми.	16.05.2024-20.05.2023	
6.	Розробка графічної частини БДР	21.05.2024-28.05.2024	
7.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	28.05.2024-06.06.2023	
8.	Нормоконтроль	07.06.2024-09.06.2024	
9	Попередній захист БДР, доопрацювання, рецензування БДР	10.06.2024-14.06.2024	
10	Захист БДР ЕК	18.06.2024	

Студент

Керівник роботи


(підпис)


(підпис)

Кіт Б.С.

Дудатьєв І.А.

АНОТАЦІЯ

УДК 629

Кіт Б.С. Розробка тензорезистивного засобу вимірювання ваги з покращеними метрологічними характеристиками. Бакалаврська дипломна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2024. – 63 с. На українській мові. Бібліогр.: 13 назв; табл.: 2; рис. 23.

У цій бакалаврській дипломній роботі представлено розробку тензорезистивного засобу вимірювання ваги з покращеними метрологічними характеристиками. Основна мета роботи полягає у створенні високоточного та надійного вимірювального інструменту, що забезпечує стабільні та точні результати у різних умовах експлуатації.

У процесі дослідження проведено аналіз існуючих тензорезистивних технологій та методів вимірювання ваги, визначено їхні основні переваги та недоліки. Розроблено концепцію та конструкцію нового тензорезистивного датчика, який характеризується підвищеною чутливістю та стабільністю вимірювань. Створено прототип датчика, проведено його калібрування та тестування у лабораторних умовах.

Розроблений тензорезистивний засіб вимірювання ваги може бути використаний у різних галузях промисловості та наукових дослідженнях, де необхідні високоточні вимірювання маси, що сприятиме підвищенню ефективності та якості виробничих процесів.

Ключові слова: тензорезистор, засіб вимірювання, вага, метрологічні характеристики, чутливість.

ABSTRACT

B.S. Kit. Development of a Tensoresistive Weight Measurement Device with Improved Metrological Characteristics. Bachelor's Thesis. – Vinnytsia: VNTU, 2024. – 63 p. In Ukrainian. Bibliography: 13 titles; tables: 2; figures: 23.

This bachelor's thesis presents the development of a strain gauge-based weight measurement device with improved metrological characteristics. The main goal of the work is to create a highly accurate and reliable measuring instrument that ensures stable and precise results under various operating conditions.

The research involved analyzing existing strain gauge technologies and weight measurement methods, identifying their main advantages and disadvantages. A new concept and design for a strain gauge sensor were developed, characterized by enhanced sensitivity and measurement stability. A prototype sensor was created, calibrated, and tested in laboratory conditions.

The developed strain gauge-based weight measurement device can be used in various industrial and scientific applications where high-precision mass measurements are required, contributing to increased efficiency and quality of production processes.

Keywords: strain gauge, measuring device, weight, metrological characteristics, sensitivity

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОСОБЛИВОСТІ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНИХ СЕНСОРІВ ЯК ОБ’ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	10
1.1 Фізичне представлення тензорезистивних сенсорів.....	10
1.2 Принцип роботи тензорезистивного сенсора.....	14
1.3 Висновки до розділу 1.....	21
2 РОЗРОБКА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО СЕНСОРА ДЛЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.....	23
2.1 Розробка структурної схеми тензорезистивного сенсора.....	23
2.2 Розробка рівняння перетворення тензорезистивного сенсора.....	24
2.3 Висновки до розділу 2.....	28
3 ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТЕНЗОЕФЕКТУ.....	30
3.1 Уявлення про тензоефект.....	30
3.2 Аналіз тензодатчиків та обрання оптимального для побудови засобу вимірювання.....	32
3.3 Висновки до розділу 3.....	39
4 РОЗРОБКА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.....	41
4.1 Підключення розробленого тензосенсора у загальній схемі засобу.....	41
4.2 Схема підключення тензодатчиків.....	43
4.3 Застосування тензорезистивного сенсора у сучасних засобах вимірювання.....	47
4.4 Висновки до розділу 4.....	52
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56
Додаток А (обов’язковий) ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА.....	58
Додаток Б (обов’язковий) ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ (БАКАЛАВРСЬКОЇ) РОБОТИ.....	62

ВСТУП

Актуальність.

У даній бакалаврській дипломній роботі представлено розробку тензорезистивного засобу вимірювання ваги з покращеними метрологічними характеристиками. Основною метою роботи є створення високоточного та надійного інструменту для вимірювання ваги, який забезпечує стабільні та точні результати у різних умовах експлуатації.

В рамках дослідження було проведено аналіз існуючих тензорезистивних технологій та методів вимірювання ваги, визначено їхні основні переваги та недоліки. Розроблено концепцію та конструкцію нового тензорезистивного датчика, який характеризується підвищеною чутливістю та стабільністю вимірювань. Створено прототип датчика, проведено його калібрування та тестування у лабораторних умовах.

Розроблений тензорезистивний засіб вимірювання ваги може бути використаний у різних галузях промисловості та наукових дослідженнях, де необхідні високоточні вимірювання маси, що сприятиме підвищенню ефективності та якості виробничих процесів.

Актуальність. Тема розробки тензорезистивного засобу вимірювання ваги з покращеними метрологічними характеристиками є актуальною з кількох причин:

- Потреба в точних вимірюваннях: У багатьох галузях промисловості, наукових дослідженнях та виробничих процесах важливо мати точні дані про масу об'єктів. Наприклад, у виробництві харчових продуктів, медицині, будівництві та інших сферах точне вимірювання ваги є критичним для забезпечення якості продукції та безпеки.

- Розвиток технологій: За останні роки технології в області сенсорів та вимірювальних пристроїв значно покращилися. З'явилися нові матеріали та методи виготовлення, що дозволяють створювати більш точні та чутливі

датчики. Розробка нових технологій вимірювання ваги відповідає цьому напрямку розвитку.

- Підвищення вимог до метрологічних характеристик: У зв'язку з постійним розвитком галузей, де вимірюють вагу, зростають вимоги до метрологічних характеристик вимірювальних пристроїв. Покращені характеристики, такі як висока точність, стабільність та чутливість, стають все більш важливими для досягнення точних результатів.

Отже, розробка тензорезистивного засобу вимірювання ваги з покращеними метрологічними характеристиками відповідає потребам ринку та відповідає сучасним тенденціям у вимірювальній техніці.

Метою роботи є розробка Розробка тензорезистивного засобу вимірювання ваги з покращеними метрологічними характеристиками.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані та вирішені такі задачі:

- метрологічний аналіз тензорезистивного засобів вимірювання ваги;
- класифікація тензорезистивних сенсорів;
- безпосередня розробка тензорезистивного засобу вимірювання ваги з покращеними метрологічними характеристиками.

Об'єктом дослідження в роботі є процес вимірювального контролю метрологічних параметрів тензорезистивного засобу вимірювання ваги.

Предметом дослідження є методи та засоби, які можна застосувати при побудові тензорезистивного засобу вимірювання ваги.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач в роботі були використані методи теорії вимірювального контролю, математичної статистики та теорії випадкових процесів, які були використані для обробки експериментальних результатів, комп'ютерного моделювання, теорії вимірювань, похибок вимірювань та технічного контролю використовувались для визначення вірогідності контролю.

Практичне значення одержаних результатів.

У роботі отримані такі практичні результати:

1. Розроблена конструкція тензорезистивного сенсора з використанням композитних матеріалів, що забезпечують мінімальні механічні деформації та високу довговічність.

2. Після аналізу різних матеріалів для тензорезисторів були обрані металеві фольгові тензорезистори, які забезпечують високу чутливість і стабільність вимірювань.

3. Проведені численні тестування сенсора в умовах, максимально наближених до реальних умов експлуатації, що дозволило підтвердити його високу точність та стабільність роботи.

4. Впроваджено рішення для захисту сенсора від вібрацій та температурних коливань, що дозволило підвищити стабільність показників вимірювань.

Особистий внесок здобувача.

Основні положення та результати, що представлені в роботі, одержані автором самостійно.

1 ОСОБЛИВОСТІ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНИХ СЕНСОРІВ ЯК ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Фізичне представлення тензорезистивних сенсорів

Поняття про датчики та їх класифікація. Фізична величина m , що характеризує об'єкт вимірювання (температура, тиск тощо), називається вимірюваною величиною. Набір операцій, призначених для створення числових значень. Якщо вимірювання використовує електронну обробку сигналу, виміряні параметри спочатку повинні бути якомога точніше перетворені в еквівалентні електричні значення. Це означає, що отримані електричні значення повинні містити всю інформацію про вимірювані параметри.

Датчик — це пристрій, який під час фізичного вимірювання створює еквівалентний сигнал, як правило, електричної природи (заряд, струм, напруга або імпеданс), який є функцією виміряного значення:

$$S=F(m), \quad (1.1)$$

де S — вихідне значення датчика, а m — вхідне значення. Після вимірювання значення S можна визначити значення m .

Відношення $S=F(m)$ виражає в загальній теоретичній формі фізичні закони, які лежать в основі роботи датчика. Ці закони, виражені в числовій формі, визначають вибір конструкції (геометрії та розмірів) і матеріалів виготовлення, допустимі характеристики робочого середовища датчика та умови використання. Для всіх датчиків характеристика перетворення - відношення $S=F(m)$ - визначається експериментально в числовій формі шляхом калібрування, під час якого відповідне значення S вимірюється для ряду точно відомих значень m , що дозволяє побудувати калібрувальну криву.

Датчик — це пристрій, який сприймає зовнішні дії та реагує на них зміною електричних сигналів.

Під зовнішніми ефектами розуміють кількісні характеристики вимірюваного об'єкта, його властивості та якості.

Зовнішніми факторами є різні природні речовини, такі як рідини, повітря, атмосфера, ґрунт тощо.

Датчики, які вимірюють ці зовнішні фактори, поділяються на електричні та неелектричні. Після взаємодії датчика із зовнішніми факторами на його виході формується неоднорідний електричний сигнал. Цей сигнал надходить на головний вимірювальний датчик, який перетворює сигнал, змінюючи його тип. Сигнал проходить від первинного датчика вимірювання до вторинного датчика вимірювання, який масштабує нерівномірний сигнал до однорідного рівня. Як правило, вихід вторинного вимірювального перетворювача підключається до мікроконтролера, програмованого логічного контролера або мікроконтролера. Після того, як контролер перетворить сигнал, він повинен його обчислити і представити в зручному для оператора вигляді.

Усі датчики можна розділити на датчики прямої дії та аналогічні датчики. Датчики прямої дії використовують відповідні фізичні явища (наприклад, оптичні ефекти) для перетворення зовнішніх впливів безпосередньо в електричні сигнали. У датчику порівняння вихідний електричний сигнал виходить після багаторазових перетворень енергії з однієї форми в іншу і, зрештою, в електричну енергію.

У складі вимірювальної системи датчики можуть бути зовнішніми або вбудованими. Зовні реагує на зовнішні впливи та інформує систему про зміни оточуючих умов. Функціональність вбудованої системи моніторингу та вимірювання, яка необхідна для підтримки коректної роботи всього внутрішнього обладнання системи.

Системи класифікації датчиків можуть бути дуже різноманітними, залежно від мети класифікації. Наприклад, одні з найпоширеніших датчиків можна розділити на активні та пасивні. Для роботи активних датчиків потрібен

сигнал електричного збудження від зовнішнього джерела енергії (наприклад, резистивний тензодатчик, який змінює свій опір залежно від величини деформації). Ці датчики ще називають параметричними датчиками. Пасивні датчики не потребують додаткового джерела енергії, і у відповідь на зовнішні впливи або їх зміни на виході такого датчика з'являється електричний сигнал (наприклад, фотодіод).

Залежно від вибору точки відліку датчики можна розділити на абсолютні та відносні. Абсолютні датчики визначають зовнішні сигнали в абсолютних фізичних одиницях незалежно від умов вимірювання. Залежно від умов вимірювання, вихідні сигнали відповідних датчиків у кожному вимірюванні можуть інтерпретуватися по-різному. Наприклад, термістор є абсолютним датчиком, оскільки його опір безпосередньо залежить від абсолютної температури, тоді як термопара є відносним датчиком, оскільки його вихідна напруга залежить від градієнта температури, а не від абсолютного значення.

За типом вхідної (вимірюваної) величини її можна розділити на такі види:

- Механічні датчики руху (лінійні та кутові),
- пневматичний,
- електричні,
- витратомір,
- датчик швидкості,
- прискорення,
- зусилля,
- температура,
- Тиск тощо.

В даний час частка вимірювання різних фізичних величин в промисловості має приблизно такий розподіл:

- Температура – 50%,
- Витрата (маса та об'єм) - 15%,
- Тиск – 10%,

- Рівень – 5%,
- Кількість (маса, об'єм) – 5%,
- Час – 4%,
- Електромагнітне значення - менше 4%.

Датчики також можна класифікувати на основі інших характеристик. Наприклад, за характеристиками, матеріалами, з яких вони виготовлені, засобами перетворення енергії удару в електричні сигнали, механізмами, сферами застосування тощо [2].

Принцип дії тензодатчиків базується на ефекті деформації. Ефект розтягування кабелю — властивість провідникових і напівпровідникових матеріалів змінювати свою електропровідність (опір) при зміні їх об'єму або напруженого стану.

У напівпровідникових матеріалах ефект деформації пов'язаний зі значною зміною питомого опору. Ефект тензорного опору найбільш очевидний у напівпровідникових кристалах германію та кремнію. Для виготовлення напівпровідникових тензорезисторних елементів в основному використовується кремній, тому що порівняно з германієм кремній має більш високу чутливість до деформацій, більшу механічну міцність і може витримувати більш високі температури. Властивості кремнію на розтяг анізотропні і залежать від орієнтації кристала. Найвищу міцність на розрив мають тензорні резистори, які деформуються в тому ж напрямку, що й кристал.

Деформаційні датчики поділяються на декілька типів. Фольгові тензодатчики являють собою тонкі смужки фольги товщиною 0,01...0,02 мм, на яких виділені частини матеріалу (наприклад, травленням) так, щоб залишок утворив плоску сітку з висновками. Сітка фіксується між двома шарами лакової плівки.

Також поширені тонкоплівкові датчики опору деформації, у яких чутливий до деформації елемент наноситься шляхом вакуумної сублімації (дистиляції) і згодом конденсується на тонку плівку. Для виготовлення тонкоплівкових тензодатчиків використовуються як металеві (наприклад,

титано-алюмінієві сплави), так і напівпровідникові (германій, кремній) матеріали.

Тензодатчик що має лінійний тензочутливий елемент у вигляді одного або кількох дротів, натягнутих між двома стрижнями, відносно переміщення яких є вхідним значенням.

Напівпровідникові монокристалічні датчики опору деформації в основному виготовляються з германію та кремнію з кубічною решіткою. Тензочутливість напівпровідникового тензодатчика залежить від орієнтації його чутливого елемента відносно орієнтації кристала.

Особливістю напівпровідникових тензорів є те, що за інших рівних умов характер функції перетворення залежить від питомого опору тензора. Нелінійність передавальної функції найменше виражена в матеріалах з низьким питомим опором.

1.2 Принцип роботи тензорезистивного сенсора

Тензорні датчики опору використовуються в обох напрямках для вимірювання неелектричних величин. Перший напрямок використовує ефект розтягування провідника, який знаходиться в стані об'ємного стиснення, коли природним вхідним значенням для датчика є тиск навколишнього газу або рідини. На цьому принципі побудовані манометри для вимірювання високого і надвисокого тиску, датчиком яких є котушка (зазвичай марганцево-мідна) або напівпровідниковий елемент (найчастіше германієвий або кремнієвий), розміщений у зоні вимірювання тиску (рідина або газ). Вихідною величиною перетворювача є зміна його активного опору.

Другим напрямком є використання ефекту розтягування або стиснення чутливих до розтягування матеріалів. При цьому тензорні резистори використовуються як «вільні» перетворювачі.

У контексті використання тензорезисторів у схемах, термін "вільні" перетворювачі означає, що тензорезистори працюють як окремі, незалежні сенсори, які не є інтегрованими в один жорсткий блок або модуль.

«Вільні» перетворювачі виконуються у вигляді одного або кількох дротів, закріплених своїми кінцями між рухомою частиною та нерухомою частиною, і зазвичай функціонують одночасно як пружні елементи. Природним входом для такого перетворювача є досить невеликі рухи рухомих частин.

Найпоширеніший пристрій датчика опору натягу дроту показано на рисунку 1.1.

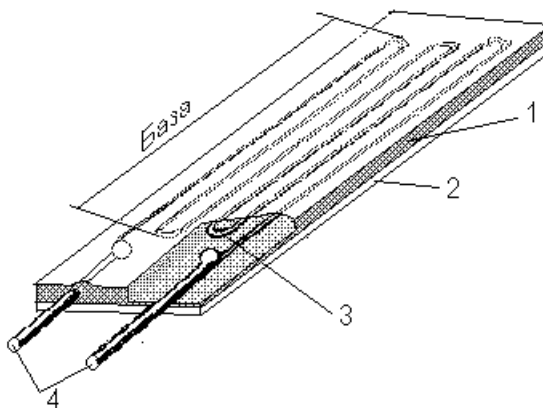


Рисунок 1.1 – Тензорезистивний сенсор дротяного типу

Далі розберемо як працює тензорезистивний сенсор, що представлений на рис. 1.1. На так звану сітку з зигзагоподібних тонких дротів 3 діаметром 0,02-0,05 мм наклеюють смужку цигаркового паперу або плівки фарби 2. Вихідний мідний провідник 4 з'єднується з кінцем дроту (паянням або припоєм). Перетворювач покритий шаром лаку 1. Перетворювач приклеєний до випробовуваного компонента та виявляє деформації в його поверхневому шарі. Отже, природна вхідна величина клеєного тензодатчика - це деформація поверхневого шару компонента, до якого він приклеєний, а вихідна величина - зміна опору датчика, пропорційна цій деформації.

Еталонним вимірюванням датчика є довжина ділянки, зайнятої дротом. Найбільш поширені розміри основи перетворювача 5-20 мм і мають опір 30-500 Ом.

На додаток до найпоширенішої конструкції петлі лінійного тензора існують інші конструкції. Якщо необхідно зменшити вимірювальну базу датчика (до 3-1 мм), це робиться двошаровим способом так званого намотування, при якому навколо датчика намотується спіраль з чутливого до натягу дроту. Оправка круглого поперечного перерізу на трубці з тонкого паперу. Потім труби склеюють і знімають з рами.

"Сильні" дротяні тензорні резистори – це високоточні та чутливі сенсори, стійкі до високих температур і механічних пошкоджень, що забезпечують надійність і довговічність у вимірюванні механічних деформацій.

«Сильні» дротяні тензорні резистори часто використовуються, коли необхідно отримати великі струми від ланцюгів з тензорними резисторами.

Вони складаються з великої кількості (до 30-50) паралельно з'єднаних проводів, мають великі розміри (довжина основи 150-200 мм) і генерують потужність, достатню для вібратора осцилографа без використання підсилювача.

Датчик опору деформації з фольги, показаний на рис. 1.2, являє собою дуже тонку смужку фольги, товщиною 4-12 мкм, з вибраною частиною металу, витравленою так, що залишок утворює форму, показану на рис.1.2

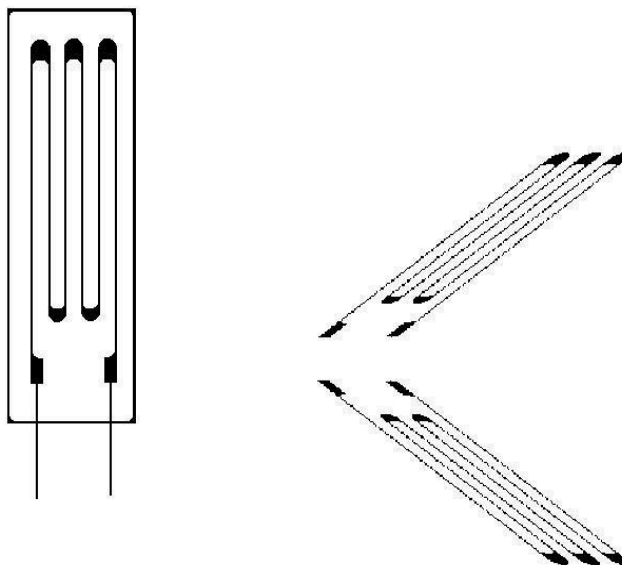


Рисунок 1.2 – Фольгові тензорезистивні сенсори

Останніми роками з'явився ще один метод масового виробництва тензодатчиків, а саме вакуумна сублімація чутливих до деформацій матеріалів і подальша конденсація на підкладці. Такий тензор називається тензором брани.

На додаток до металевих матеріалів (таких як титано-алюмінієвий сплав 48Т-2, який може забезпечити вимірювання деформації до 12% і коефіцієнт чутливості до деформації близько 0,2), багато напівпровідникових матеріалів також використовуються для виготовлення тонкоплівкових тензодатчиків, таких як германій, кремній ($k = 100 \div 120$) та ін.

При виготовленні фольгованих і плівкових конвертерів можливий будь-який малюнок сітки, що є їх істотною перевагою.

Напівпровідникові тензодатчики можна вирізати безпосередньо з напівпровідникових матеріалів. Однак можливі й інші шляхи. Монокристали у формі «вусів» можна виростити за допомогою конденсації парів, але отримані тензори мають широкий діапазон розмірів і властивостей. Зростання дендритів дозволяє отримати більш однорідні тензорні резистори. Таким чином виходить тензорний резистор для наклеювання на пружний елемент. У цьому випадку в ролі утеплювача виступає клей або цемент. Склеєні резистори натягу поки не

мають широкого застосування, тому що склеювання не дозволяє отримати безгістерезисне з'єднання.

Використовують методи дифузії або епітаксії для отримання адгезивних тензорних резисторів. В обох випадках електрична ізоляція тензора забезпечується великим опором рпр-переходу.

Тензорний опір є результатом локальної дифузії домішок у підкладку. Водночас тип провідності тензоррезистивної плівки має бути протилежним типу підкладки. Як правило, маска являє собою оксидну плівку, на якій за допомогою фотолітографії витравлені вікна відповідного розміру.

Температура і тривалість процесу дифузії визначають товщину і опір отриманого тензодатчика.

В якості підкладки використовують сапфір або шпінель. Монокристалічна сапфірова підкладка має чудові еластичні властивості. Сапфір надзвичайно міцний і має високу стійкість до агресивних середовищ. У вакуумі сапфір добре спаюється з металом твердим припоєм.

Тензорезистори зазвичай являють собою спеціальну пружну конструкцію, на якій закріплені тензорезистори та інші допоміжні компоненти. Після калібрування ступінь деформації можна розрахувати на основі зміни опору тензора, який пропорційний силі, прикладеній до конструкції.

Тензорезисторні датчики випускаються наступних типів:

- Датчики сили (вимірювання сили та навантаження);
- Датчик тиску (вимірює тиск у різних середовищах) ;
- Акселерометр (датчик прискорення) ;
- Датчик руху;
- Датчик крутного моменту;

Найбільш типовим застосуванням датчиків опору деформації є ваги. Залежно від конструкції вантажної платформи використовуються різні види тензорезисторних датчиків ваги:

- Консольний тензодатчик (балковий тензодатчик);
- Тензорезистор S-подібний датчик;

- Датчики тензорезистора «шайби» (сенсори тензорезистора тонкоплівкового типу);

- Датчики тензорезистора «ковш» (колонні тензодатчики).

Резистивний датчик являє собою пружний елемент, до якого закріплений тензорезистор, який під дією сили (ваги вантажу) деформується разом з тензорезистором. Ступінь деформації можна розрахувати за зміною тензорного опору, який пропорційний силі, прикладеній до конструкції.

Принцип вимірювання ваги за допомогою тензорезисторного датчика заснований на балансі ваги вантажу, що зважується, і пружної механічної сили тензорезистора і подальшому перетворенні цієї сили в електричний сигнал для подальшої обробки.

Тензорні датчики опору є найбільш уразливими компонентами системи зважування. В процесі експлуатації тензодатчики піддаються таким впливам: агресивні середовища, ударні динамічні навантаження, електростатичні впливи, вібрації та ін. Тому під час обслуговування, перед установкою обладнання та в аварійних ситуаціях необхідно проводити діагностику датчика опору ваги.

Перевіряючи стан датчика опору розтягу, в першу чергу необхідно перевірити загальний технічний стан ваговимірювальної системи:

- чи є ланцюг заземлення (шунт) і чи герметичне різьбове з'єднання;
- перевірити тензодатчик, складальний вузол і підйомний пристрій на наявність слідів корозії та пошкоджень;

- Перевірити сумарний ваговий індикатор на тензодатчику;

- Індикатор тестової ваги, підключений до симулятора тензодатчика;

Перевірити стан кабельного виробу та герметичність кабельного вводу на тензодатчику.

Розглянемо послідовність перевірки тензодатчиків. Перевірка нульового балансу. Вимірювання при нульовому балансі необхідні для перевірки стану тензодатчика в ненавантаженому стані, для чого тензодатчик витягують із зібраного вузла, а все прикладене навантаження знімають з датчика ваги. Потім підключається джерело живлення 10 В до ланцюга резистора напруги, береться

сигнал 10 мВ від вихідного ланцюга та порівнюється зі значенням у калібрувальній таблиці. Наприклад, при чутливості тензодатчика 2 мВ/В і напрузі живлення 10 В напруга нульового балансу відповідає $\pm 0,02$ мВ.

Якщо значення вихідного сигналу суттєво відрізняється від паспортного, то можна визначити, що пружний елемент тензодатчика деформований і пошкоджено ізоляційний шар тензодатчика.

Перевірка опору ізоляції. Виробляється шляхом підключення мегомметра до кабелю тензодатчика і перевірки наявності струму витoku між корпусом тензодатчика і струмоведучими частинами. Низьке значення опору ізоляції нижче 1 кОм свідчить про КЗ (коротке замикання). Нормальним значенням є резистор 5 мОм. Можливі короткі замикання між корпусом тензорного резистора і струмоведучими частинами, а також між кабелями. При КЗ кабель можна замінити, якщо дозволяє конструкція тензодатчика.

Перевірка цілісності тензометричного містка (міст Уїтстона). Перевірка цілісності моста, вимірявши вхідний і вихідний опір, а також балансувальний опір моста. Від'єднується датчик від коробки або вимірювального пристрою. Вхідний і вихідний опір вимірюється омметром, підключеним до кожної пари вхідних і вихідних ліній тензора. Потім порівнюється вхідний і вихідний опори зі значеннями в сертифікаті калібрування або оригінальних специфікаціях тензодатчика. Вимірюється балансувальний опір моста, по черзі підключивши омметр до кожної пари кабельних клем. Значення опору між парами не повинні відрізнятися більш ніж на 1-2 Ом.

Різниця між вхідним і вихідним опорами тензорного резистора і паспортним значенням свідчить про несправність моста тензорного резистора, а наявність дизбалансу опору означає, що тензорний резистор несправний і потребує заміни. Як правило, такі поломки виникають внаслідок електричних впливів (зварювання, електростатичні поля, електричний пробій), фізичних впливів (удари, кочення, бічні навантаження), теплових впливів.

Перевірка під навантаженням. Тензодатчик повинен бути підключений до вагового індикатора або пристрою зі стабільним джерелом живлення не менше

10 В. За допомогою мілівольметра, підключеного до виходу тензора, навантажують датчик і фіксують показання вихідного сигналу. Після зняття навантаження показання вихідного сигналу повинні повернутися до початкового значення. Якщо під час перевірки показання змінюються при безперервному застосуванні навантаження і не повертаються до вихідного значення, можна судити про поганий контакт між тензорним резистором і пружним елементом. Необхідно замінити резистор напруги.

1.3 Висновки до розділу 1

Тензорезистивні сенсори є важливим інструментом у вимірювальній техніці завдяки їх високій чутливості та точності. Принцип їх роботи базується на зміні електричного опору матеріалу при деформації. Це дозволяє точно вимірювати механічні деформації, що робить тензорезистивні сенсори незамінними в багатьох галузях, таких як авіація, машинобудування, біомедицина та цивільне будівництво.

Переваги тензорезистивних сенсорів включають високу чутливість, швидку відповідь на зміни навантаження, можливість виготовлення сенсорів різних форм і розмірів, а також відносну простоту у використанні. Вони можуть бути застосовані для вимірювання як статичних, так і динамічних навантажень, що розширює сферу їх застосування.

Однак, ці сенсори також мають певні недоліки. Вони можуть бути чутливими до температурних змін, що може впливати на точність вимірювань. Для забезпечення стабільної роботи необхідно використовувати температурну компенсацію. Крім того, тензорезистивні сенсори можуть бути піддані дрейфу з часом, що вимагає періодичного калібрування.

Загалом, тензорезистивні сенсори є ефективним засобом для вимірювання механічних деформацій, хоча їх використання потребує

врахування певних обмежень та забезпечення додаткових заходів для підвищення точності вимірювань.

2 РОЗРОБКА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО СЕНСОРА ДЛЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

2.1 Розробка структурної схеми тензорезистивного сенсора

При вимірюванні пружної деформації на деталь у напрямку основної (вимірюваної) деформації ставлять наклеєний тензорний резистор.

В межах пружних деформацій тензор характеризується порівняно невеликими змінами опору.

Невелике збільшення тензометричного опору має призвести до значної відносної зміни вихідної потужності.

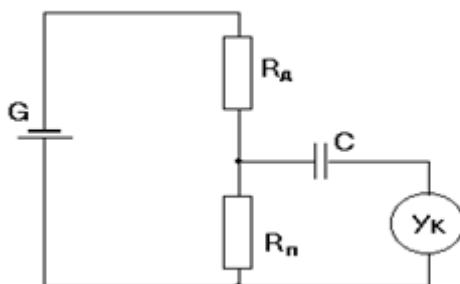


Рисунок 2.1 – Подільник напруги з живленням постійного струму

Найчастіше вимірювальна схема являє собою дільник напруги або резисторний міст, як показано на рисунку 2.1

Дільник напруги з джерелом постійного струму використовується тільки в тих випадках, коли цікавлять лише вимірювання змінної, тоді як постійна складова падіння напруги на резисторі R перетворювача напруги в сотні разів перевищує змінну. У всіх інших випадках схема вимірювання використовує мостову схему, що живиться від постійного або змінного струму.

Високу точність вимірювання гарантують методи порівняння: нульовий і диференціальний. Обидва методи реалізовані в одній мостовій схемі.

Нульовий спосіб відповідає встановленому режиму роботи моста, а диференціальний метод – дисбалансу.

Найпростіша схема моста (рис. 2.2) складається з резисторів кожного плеча моста U , представлених внутрішнім опором R_i ; потужність діагоналі, до якої підключається вольтметр для вимірювання діагоналі.

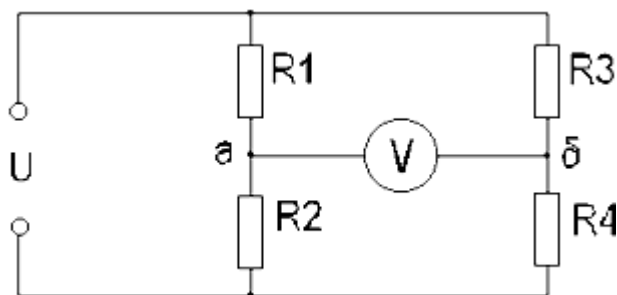


Рисунок 2.2 – Мостова схема включення

Одне з плечей містить тензорний резистор, який відчуває деформацію. Стан моста характеризується вимірюванням напруги по діагоналі. Напруга в точках a і b . На точність тензодатчиків у вимірюванні деформації та напруги сильно впливають зміни температури. Однак резисторний міст може легко усунути температурні похибки. Для цього відкриваємо другий резистор натягу в плечі перемички, що примикає до датчика, який також розташований на цій частині, але в такому напрямку, щоб вимірювана деформація не змінила його опір. У деяких випадках датчики можна розмістити на частинах так, щоб вони мали однакову температуру, але мали різні ознаки деформації. При цьому при термокомпенсації чутливість перетворення подвоюється.

2.2 Розробка рівняння перетворення тензорезистивного сенсора

До недавнього часу методи розрахунку датчиків опору деформації не були відомі, а розробка датчиків була суто емпіричною. Однак з розвитком вимірювань якості вимірювальних датчиків виявилось, що основні співвідношення режимів роботи тензорів добре описані математично, і вони

розраховуються при проектуванні тензорів і порівнянні нових типів з відомими тензорами.

Розрахунок тензорного резистора спрощується визначенням допустимої потужності, що розсіюється тензорним резистором (і, отже, допустимого значення струму при даному опорі) з урахуванням його вибраних розмірів, або, навпаки, визначенням допустимої потужності, необхідної для забезпечення заданої потужності. Необхідний розмір тензорного резистора.

Потужність P , що розсіюється в тензорному резисторі, обмежена його нагріванням, що викликає збільшення значення похибки. Перегрів Θ тензора порівняно з температурою обклесної деталі дорівнює:

$$\Theta = PR_T = \frac{P}{S_0 \xi} = \frac{P_{уд}}{\xi}, \quad (2.1)$$

де R_T — тепловий опір, К / Вт;

S_0 — площа поверхні тепловіддачі матеріалу резистора, м²;

ξ — коефіцієнт тепловіддачі, Вт / (м² · К);

$P_{уд} = P / S_0$ — питома теплова навантаження, Вт / м².

Коли тензорний резистор перебуває в тепловому контакті з компонентом через лінію зв'язку та підкладку, тепловий потік, що виділяється, у 200-300 разів більший, ніж коли тензорний резистор нагріває навколишнє повітря. Це пояснюється тим, що коефіцієнт тепловіддачі повітря дорівнює $\xi = 10$ Вт / (м² · К). Тому можна з високою точністю припустити, що майже весь тепловий потік від тензорного резистора передається через клейовий шар до тієї деталі, до якої він приклеєний. Тому площа теплообміну поверхні S_0 — плівкових і фольгованих тензорних резисторів повинна розглядатися як поверхня резистора, звернена до деталі, тоді як для дротяних резисторів слід вважати половину його поверхні дротяного циліндра (в досить точному наближенні).

Величина $P_{y0} = P/S_0$, необхідна для розрахунку питомого теплового навантаження більшості використовуваних сьогодні дрітчастих, фольгованих і напівпровідникових тензорних резисторів (потужність від 25 до 630 мВт, загальна площа ґратки від 0,9 до 250 мм²) коливається у дуже вузькому діапазоні $P_{y0} = 26 \div 28$ кВт/мм² (або мВт/мм²). Лише в окремих випадках, використовуючи дуже тонкі підкладки, можна досягти $P_{y0} = 38 \div 39$ мВт/мм².

Допустима величина струму $I_{доп}$ через тензорний резистор визначається співвідношенням $P = I^2 R = P_{y0} S_0$. Наприклад, для тензодатчика дроту основної довжини n проводів у сітці діаметром d , виготовленого з матеріалу з питомим опором ρ :

$$S_0 = \frac{\pi d}{2} n \quad (2.2)$$

$$R = \frac{4n\rho}{\pi d^2}, \quad (2.3)$$

і допустиме значення струму:

$$I_{доп} = \sqrt{\frac{P_{y0} S_0}{R}} = \sqrt{\frac{P_{y0} \pi^2 d^3}{8\rho}}. \quad (2.4)$$

Для константової дроту $\rho = 0,46 \cdot 10^{-6}$ Ом , а при $P_{y0} = 27$ кВт / м² допустиме значення струму I буде дорівнювати:

$$I_{доп} = \sqrt{7,3 \cdot 10^{10} d^3}, \quad (2.5)$$

де $I_{доп}$ вимірюється в Амперах і величина d в метрах.

Основними факторами, що спричиняють похибки вимірювання датчиків тензоопору, є:

- Вплив температури перетворювача на його опір і лінійне розширення;
- характерна повзучість, тобто зміни повзучості, викликані залишковими деформаціями в конвертері при тривалому впливі значних навантажень, близьких до допустимих;
- Крутизна перехідних характеристик змінюється з часом внаслідок старіння матеріалу і, зокрема, внаслідок зміни властивостей клейової композиції;
- Чутливість зменшується зі збільшенням частоти деформації, яка пропорційна основі перетворювача, оскільки довжина поширюється в деталі звукової хвилі.

Перший фактор має найбільш суттєвий вплив на величину помилки. Зміни опору перетворювача внаслідок зміни температури можна порівняти зі змінами опору внаслідок деформації. Температура тензорного резистора залежить від температури навколишнього середовища та величини струму, що протікає через резистор. Зміни температури слід враховувати при обробці результатів шляхом внесення поправок або, що більш переважно, шляхом автоматичної компенсації температурних похибок. Є кілька способів зменшити температурні похибки:

- обирати матеріал тензодатчика з малим температурним коефіцієнтом лінійного розширення, близьким до коефіцієнта розширення деталі;
- використовувати компенсуючий перетворювач, який розташований близько до робочого такого ж перетворювача, але не деформується.

Використовуйте самокомпенсуючий тензорний резистор, що складається з двох частин. Один компонент має позитивний температурний коефіцієнт опору, а другий компонент має негативний температурний коефіцієнт опору. За допомогою правильного вибору значень опору і температурних коефіцієнтів різних компонентів датчика можна досягти високого ступеня компенсації

температурної похибки. Особливо широко цей метод використовується при виготовленні напівпровідникових тензодатчиків.

Основна похибка дротяних і фольгованих тензодатчиків промислового виробництва не перевищує 1% після температурної компенсації похибки.

2.3 Висновки до розділу 2

У даному розділі були розглянуті рівняння перетворення тензорезистивних сенсорів, що є фундаментальними для розуміння їх роботи та застосування в різних галузях. Рівняння перетворення описують зв'язок між механічною деформацією та зміною електричного опору, що є основним принципом функціонування тензорезистивних сенсорів.

Аналіз рівнянь перетворення дозволив виявити кілька ключових аспектів:

- Лінійність та нелінійність: Більшість тензорезистивних сенсорів демонструють лінійну залежність між деформацією та зміною опору в межах малих деформацій. Однак, при більших деформаціях можлива поява нелінійних ефектів, які слід враховувати під час проектування та калібрування сенсорів.

- Коефіцієнт гейджа (Gauge Factor): Цей параметр відіграє ключову роль у рівняннях перетворення, оскільки він визначає чутливість сенсора до механічних деформацій. Високе значення коефіцієнта гейджа забезпечує високу точність вимірювань.

- Вплив температури: Температурні зміни можуть значно впливати на точність вимірювань, змінюючи опір матеріалу сенсора. Тому необхідно враховувати температурну компенсацію в рівняннях перетворення для забезпечення стабільності роботи сенсорів.

- Матеріали та конструкції: Рівняння перетворення також показують, як вибір матеріалу та конструкції сенсора впливає на його характеристики.

Використання матеріалів з високою механічною та електричною стабільністю може покращити роботу сенсора.

Узагальнюючи, рівняння перетворення тензорезистивних сенсорів є критично важливими для їх ефективного застосування. Вони дозволяють розробникам точно моделювати поведінку сенсорів під навантаженням, прогнозувати їх характеристики та здійснювати належну калібровку для досягнення максимальної точності та стабільності вимірювань.

3 ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТЕНЗОЕФЕКТУ

3.1 Уявлення про тензоефект

Тензорний резистор – резистор, величина опору якого змінюється пропорційно зміні його лінійних розмірів під дією механічних навантажень на поверхню об’єкта дослідження [4]. Робота тензорних резисторів заснована на явищі тензорного ефекту, який полягає в зміні опору провідника при механічній деформації [3]. Існує кілька причин, чому змінюється активний опір: по-перше, зміна геометричних, по-друге, змінюється питомий опір матеріалу. Ці показники визначають активний опір дроту. Взявши довжину резистора, його площу визначають за формулою $S = a \cdot d$ (параметри ширини і довжини). У цьому випадку опір резистора співвідноситься з питомим опором (ρ) таким чином:

$$R = \rho \frac{l}{a \cdot d}. \quad (3.1)$$

Візьмемо диференціал логарифмів лівої і правої частин рівняння (3.1). Тоді виходить наступне:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{da}{a} - \frac{dd}{d}. \quad (3.2)$$

Рівняння (3.2) може бути записаний як:

$$\frac{d \ln R}{d \ln l} = \frac{d \ln \rho}{d \ln l} + (1 + 2\mu). \quad (3.3)$$

Де $\mu = -\frac{\frac{da}{a}}{\frac{dl}{l}} = -\frac{\frac{dd}{l}}{\frac{dl}{l}} - \epsilon$ коефіцієнтом Пуассона для матеріалу тензорезистора.

Для тензорезистора у незалежному стані (3.3) маємо:

$$K = \frac{dR}{R d_\epsilon} = m + (l + 2\mu). \quad (3.4)$$

Чутливість як механічних, так і напівпровідникових тензорів оцінюється коефіцієнтом тензорної чутливості K , який визначається тензорними ефектами.

Коефіцієнти тензочутливості K , m та інші величини відрізняються у позначенні в теорії і на практиці. Для теоретичної тензочутливості використовують показники поперечної та повздовжньої чутливості. Для вираженні даних показників через питомий опір m .

Також важливо пам'ятати, що теорія ефекту деформації вивчає незалежні тензорні опори в деформаціях. Також на практиці показники структурної деформації (ϵ) і сенсорного елемента (ϵ_u) мають окремі назви. Ця різниця стає очевидною з огляду на розвиток експериментальних вимірювань натягу на основі датчиків, виготовлених із фольги, дроту, та аналіз фундаментальних питань ефектів натягу в полікристалічних тонкоплівкових системах. Два напрями науково-практичних досліджень від початку своєї історії розвивалися за різними напрямками та за відповідними сценаріями [5].

На положення речей впливає перехід у виробництво тонкоплівкових чутливих компонентів. Тому актуальність вимірювання деяких показників, зокрема коефіцієнта передачі інформації $K_{пер}$, відпала.

Для роботи з масивним тензорезистором рівняння (3.3) матиме вигляд:

$$\frac{dR}{R} = K_{\text{прт}} \frac{dl}{l}, \quad (3.5)$$

де $K_{\text{прт}} = 1 + 2\mu + m$

де зв'язок між показниками K і $K_{\text{прт}}$

$$K = K_{\text{пер.ч}} \cdot K_{\text{прт}}, \quad (3.6)$$

де $K = K_{\text{прт}}$ при умові, що коефіцієнт передачі деформації ε пов'язує чутливий елемент $K_{\text{пер.ч}}$ ($K_{\text{пер.ч}} = \varepsilon_q / \varepsilon$, де ε_q - істинна деформація чутливого елемента ($\varepsilon_q = 1$) [5].

3.2 Аналіз тензодатчиків та обрання оптимального для побудови засобу вимірювання

Тензорні резистори доступні у вигляді дроту, фольги та напівпровідника. Геометричні розміри перших двох типів чутливих елементів будуть змінюватися при деформації [12]. Для тензодатчиків з фольгованими чутливими елементами (типу КФ4, КФ5) показник робочої температури становить від -70 до 200 °С, а для дріт'яних тензодатчиків (типу НМТ-450) гранична температура впливу може досягати 450°С. Модель ТТ-600 має металеву основу і максимальний показник температури 600°С.

Сьогодні існує п'ять видів металів, з яких виготовляють тензорно-резистивні елементи:

- металеві сплави з низьким рівнем ТКО ($\sim 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) та граничною теплостійкістю (200-300°С) при $K = 0,3-3$ – це мідно-марганцеві (Cu- Mn) та

мідно-нікелеві сплави (Cu-Ni): манганін (Cu-85%, Mn-12,5%, Ni-2,5%), мінальф, константан (Cu-59%, Ni-39%, Mn-2%), едванс та інші;

- металеві сплави з відносно низьким рівнем ТКО ($\sim 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) і підвищеним рівнем термостійкості (400-500°C) при показникові $K = 2-3$ відносяться такі як: нікелево-хромові (Ni -Cr) сплави: ніхром (Ni-80%, Cr-20%), стабілой, еваном, карма (Ni-74%, Cr- 20%, Al-3%, Fe-3%), інші;

- металеві сплави з високим показником ТКО ($\sim 10^{-3} \text{ K}^{-1}$) і $K \leq 20$ це такі сплави як: нікелево-хромово-залізні сплави (Ni-Cr-Fe): ізоеластик (Fe-55,5%, Ni-36%, Cr-8%, Mo-0,5%), ніхромові сплави, елінвар та інші;

- Металеві сплави високої жаростійкості платино-вольфрамові (Pt-W) і залізо-хром-алюмінієві (Fe-Cr-Al) сплави;

- Дорогоцінні метали сплав платина-паладій-родій (Pt-Pd-Rh), сплав платина-родій-осмій (Pt-Rh-Os), сплав платина-паладій-молібден (Pt-Pd-Mo).

Узагальнюючи інформацію щодо металевих тензодатчиках на основі великогабаритних конструкцій, можна визначити, що середній діапазон робочих температур таких деталей становить від -269 до 600-700°C, при значеннях K від 10^{-1} до 20[5].

Тензодатчики з дроту. Дротяні тензодатчики є одним із двох основних типів металевих конструкцій (інший — компоненти з фольги). Вони використовуються для визначення деформацій і напружень у механічних конструкціях як чутливі елементи для манометрів, динамометрів, витратомірів тощо [13].

Дротяний тензодатчик - це дротяна сітка діаметром 0,02-0,05 мм, яка наклеєна на основу (підкладку) з цигаркового паперу або плівки фарби [12], має високий питомий опір і виготовлена з таких сплавів, як константан і нікель-хромовий сплав. , Advanced, Elinvar та ін.). Його часто розташовують на цигарковому папері або ізоляційній плівці, а потім приклеюють [5].

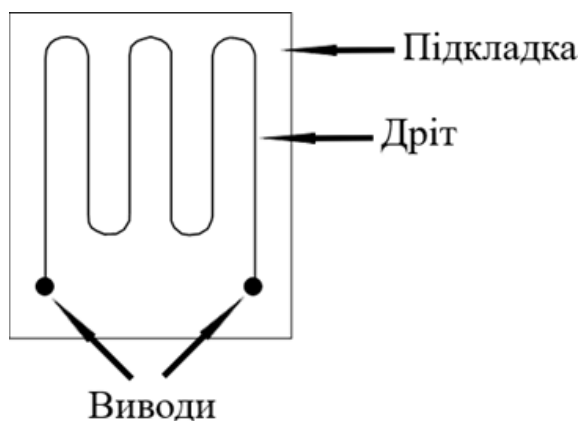


Рисунок 3.1 - Дротяний тензорезистор

Клеми таких тензорезисторів розташовані на кінцях проводів. Завдяки їм датчики можна підключати до вимірювальних ланцюгів.

Тензодатчик приклеюють до поверхні випробовуваної деталі так, щоб його поздовжня вісь була в напрямку вимірюваної деформації деталі. Деформація повинна відбуватися вздовж петлі опору. Тому вимірювання лінійної деформації стає більш точним.

Показник контролю датчика дроту в межах пружної деформації має значення, близьке до лінійного. Визначається за такою формулою:

$$\Delta R = RK_T \Delta l = \frac{\rho K_T}{s} \Delta l \quad (3.7)$$

Показник лінійності може дорівнювати 0,1%. Чутливість дротяних тензорезисторів розраховується як:

$$K_s = \frac{d(\Delta R)}{d(\Delta l)} = \frac{\rho K_T}{s} \quad (3.8)$$

Для підвищення чутливості дротяного тензодатчика використовуються матеріали з високою тензочутливістю K_T , високим питомим опором ρ і малою площею поперечного перерізу s [9].

Відхилення показань датчика від провідника залежить від температурних коливань, опору ізоляції, вологостійкості, якості наклейки і наявності деформацій в поперечній площині. Коливання температури можуть спричинити занадто велике відхилення. Це явище відбувається через те, що зміни питомого опору датчика та виникнення додаткових механічних напруг призводять до відмінностей у температурному розширенні матеріалу тензодатчика та елемента, що вимірює деформацію. Через це використання константанових датчиків є популярним. Температурний коефіцієнт опору у них малий [13].

Як правило, для чутливих дротяних компонентів максимальний показник струму становить десятки міліампер.

Тензорні резистори виготовляються з проводів опором 10-1000 Ом. Його базовий розмір становить 20-100 мм, а максимальне подовження при вимірюванні не повинно перевищувати межі пружної деформації. У більшості випадків відносне подовження становить приблизно 1%.

Приклади загальних назв лінійних датчиків: 2 ДКП-5-50Г; 2 ДКП-200Х. Перша буква (D) означає, що сітка виготовлена з дроту, друга буква (K) - підкладка (папір або плівка); опір воріт (G або X) – температура наклейки (X – не вище 30 °C, G – не вище 180 °C) [12].

Переваги дротяних тензодатчиків:

- Мала інерційність;
- Висока максимальна робоча температура;
- Дешевий;
- Відсутність гістерезису.

Недоліки:

- на 20-100 мм² більший розмір порівняно з фольгою та напівпровідниками;
- Мало робочих ресурсів;
- Низька чутливість;
- Поганий теплообмін.

Тензодатчики з фольги. Тензорні резистори з фольги (рис. 3.2) працюють аналогічно елементам з дроту. Його затвор виготовлений з константанової фольги товщиною 10 мкм. Підібравши сітку малюнка таким чином, щоб мінімізувати бічні відхилення деформації, показники бічної деформації в чутливих елементах фольги можна звести практично до нуля.

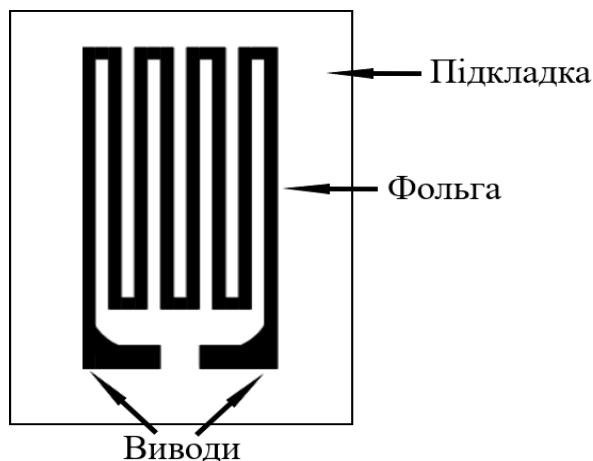


Рисунок 3.2 – Фольговий тензорезистор

Тензорні резистори, виготовлені з фольги, можуть пропускати більші струми в порівнянні з конструкціями, виготовленими з дроту, це пов'язано з більшою площею поперечного перерізу провідника, зберігаючи однакові характеристики розміру резистора та тепловіддачі завдяки сітці. Сітка прилягає до дослідження; частина з більшою поверхнею. Це призводить до кращих умов теплообміну [13].

Переваги фольгових датчиків:

- Хороший теплообмін;
- Краща чутливість порівняно з дровими;
- Компактність;

Недолік:

- Гірша чутливість, ніж напівпровідники;
- Вища вартість виробництва, ніж у дровяних.

Тензодатчики з напівпровідників. У 1960-х роках був досягнутий значний прогрес у виробництві тензодатчиків. Цього вдалося досягти завдяки

розробці та виробництву тензочутливих структур напівпровідникового типу. У таблиці 3.1 показано головну перевагу цих конструкцій – високі показники коефіцієнтів чутливості.

Слід зазначити, що електрофізичні параметри напівпровідників сильно залежать від рівня легування та розташування монокристала [5].

Матеріали на основі кремнію демонструють більш високі значення завдяки п'єзорезистивному ефекту з коефіцієнтом чутливості до деформацій 100 для монокристалічного кремнію, 20-40 для полікристалічного кремнію та 20-30 для аморфного кремнію. Можливість контролювати його питомий опір за допомогою легування також є перевагою для розробки вимірюваних резисторів в обмеженому просторі, а кремнієві плівки можна осаджувати в аморфній або кристалічній формі [15].

У кристалів $\text{GaP}_x\text{As}_{1-x}$ з нитковою формою показник чутливості $K = 120$, а у кристалів з формою стрічки показник чутливості $K = 62$. При однаковому температурному інтервалі від 100 до 400°C.

Таблиця 3.1 – Показники тензо-чутливих конструкцій напівпровідників[5]

Матеріал	Склад	ТКО $10^3, \text{K}^{-1}$	K
Кремній (Si)	p-тип	0,7-7	100-170
Кремній (Si)	n-тип	0,7-7	-(100-40)
Германій (Ge)	p-тип	-	102
Германій (Ge)	n-тип	-	-150

У тонкоплівкових резисторах Ge ми можемо спостерігати значення K, що дорівнюють 20-50 одиницям, але це сильно залежить від значення температури підкладки при максимальній $t = 500^\circ\text{C}$ ($K=40$).

Параметр K залежить від t_p і способу отримання плівки (рис. 2.3). Через залежність параметра K від товщини K має збільшуватися, коли цей параметр зменшується. Це підтверджують показники, отримані при термообробці плівок Ge: при $d = 100\text{-}200$ нм отримано $K = -70$ [5]. У плівках з

затверділого розчину $\text{Eu}_{1-x}\text{Sm}_x$, які мають товщину δ 0,5 мкм, чутливість достатньо висока з показником K дорівнює 50.

Загальну важливість чутливості ($K=330$) можна спостерігати при дослідженні голчастих монокристалів TlInTe_2 . Тензорезистори Цей тип тензорного резистора стійкий до температури до 180°C , але має перевагу в тому, що він може працювати як у статичному, так і в динамічному режимах.

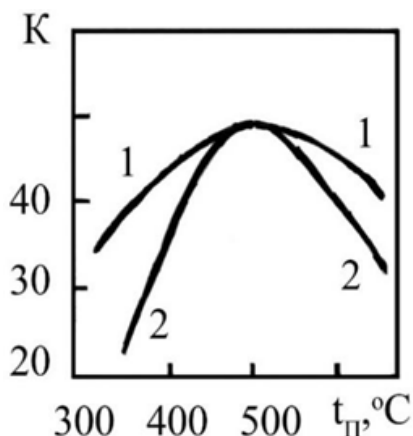


Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнта чутливості від t_p

На рис 3.3 представлено наступні позначення: 1 – при іонно-плазмовому напilenні 2 – при термообробці показника товщини 0,6-2 мкм.

Вони також використовуються як датчики тиску. Але в той же час є і істотний недолік - опір нестабільний в часі і піддається впливу температури. Цікаво, що в напівпровідниках n-типу коефіцієнт тензочутливості від'ємний, а в напівпровідниках p-типу він додатний, залежно від типу провідності.

Порівняно з металами їх можна зробити меншими, зберігаючи високий номінальний опір. Напівпровідникові тензодатчики в 30 разів чутливіші за металеві тензодатчики, але також більш чутливі до температурних впливів. Проблема полягає в нелінійності деформації перед змінами опору, але вони не такі. Широко використовуються як більш стабільні пристрої з металевими плівками, однак вони можуть мати деякі переваги, коли чутливість важлива, а коливання температури невеликі [14].

Переваги напівпровідників:

- Індекс чутливості в 30 разів перевищує чутливість опору лінії;
 - Значне зменшення розміру;
 - Рівень вихідного сигналу зазвичай достатній для роботи без допомоги підсилювача;
 - Опір сильно змінюється при деформації (до 50%).
- Недоліки напівпровідників:
- Низька механічна міцність і гнучкість;
 - Високу тензочутливість цього тензодатчика важко досягти через його нелінійні характеристики.
 - Висока чутливість до зовнішніх впливів і значні відхилення показників від однієї проби до іншої.

3.3 Висновки до розділу 3

У розділі, де було представлено фізико-математичне представлення тензоефекту та здійснено аналіз тензодатчиків з метою обрання оптимального варіанту для вимірювання ваги, зроблено кілька важливих висновків.

Зроблено фізико-математичне представлення тензоефекту:

- Принцип роботи тензоефекту: Тензоефект полягає у зміні електричного опору матеріалу під дією механічного напруження. Це явище детально описується рівняннями, які враховують взаємозв'язок між механічними та електричними параметрами матеріалу.
- Математичні моделі: Рівняння, що описують тензоефект, дозволяють кількісно оцінювати зміну опору в залежності від прикладених механічних деформацій. Ці моделі є основою для розробки та оптимізації тензодатчиків.
- Коефіцієнт гейджа: Важливим параметром у фізико-математичному описі є коефіцієнт гейджа, який визначає чутливість тензорезистивного матеріалу до деформацій. Високі значення цього коефіцієнта сприяють кращій точності вимірювань.

Зроблено аналіз тензодатчиків та обрання оптимального для вимірювання ваги:

- **Різновиди тензодатчиків:** Проведено огляд основних типів тензодатчиків, включаючи металеві фольгові, плівкові, напівпровідникові та оптичні датчики. Кожен з них має свої переваги та недоліки в залежності від застосування.

- **Критерії вибору:** Для вибору оптимального тензодатчика для вимірювання ваги були враховані такі критерії, як чутливість, точність, стабільність, температурна залежність, вартість та легкість інтеграції в системи вимірювання.

- **Оптимальний вибір:** На основі аналізу було визначено, що для вимірювання ваги найбільш підходящими є металеві фольгові тензодатчики. Вони забезпечують високу точність та стабільність вимірювань, мають достатню чутливість, а також відносно невисоку вартість. Ці датчики добре зарекомендували себе у вагах різного типу, включаючи промислові та лабораторні ваги.

4 РОЗРОБКА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

4.1 Підключення розробленого тензосенсора у загальній схемі засобу

Тензодатчики є основним пристроєм для перетворення фізичних деформацій у стандартизовані електричні сигнали. Сигнал від тензодатчика зазвичай обробляється вторинним перетворювачем (ваговим індикатором, ваговим процесором, аналого-цифровим перетворювачем тощо). Гравітаційний тензодатчик (тензодатчик) - прилад, який вимірює деформацію різних конструкцій на основі ваги. Визначення деформації (або зміщення) пружних елементів. Датчики переміщення можуть вимірювати лінійне переміщення (переміщення) і кут повороту.

Залежно від використовуваного принципу перетворення існує багато способів вимірювання деформації: тензодатчики, оптичні поляризаційні, п'єзореzystивні, волоконно-оптичні або просто зчитування механічних тензометричних проводів [7].

Тензодатчики можуть бути використані для контролю маси стрічкових конвеєрів і вимірювання маси різних транспортних засобів (автомобілів, залізничного транспорту). Завдяки конструктивним особливостям тензодатчики легко інтегруються в системи зважування, забезпечуючи якісний монтаж. Взагалі тензодатчики можуть працювати в будь-яких умовах зовнішнього середовища.

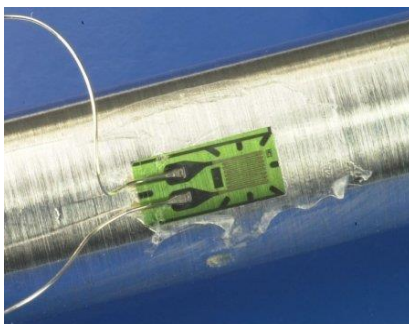


Рисунок 4.1 – Розроблений тензодатчик

Тензодатчик — комплект конструкційних тензодатчиків з точкою з'єднання на торцевій пластині. Останній додається до досліджуваного матеріалу. Тензодатчики працюють, впливаючи на чутливий елемент. Пристрій підключається до мережі за допомогою електричної розетки, підключеної до чутливої плати.

Принцип роботи . При механічному впливі на підкладку, підкладка прогинається, в результаті чого плівка, фольга або дріт розтягуються. Тому в розтягнутому стані площа його поперечного перерізу змінюється (зменшується), а опір збільшується. При зниженні тиску тензодатчик повертається до вихідних даних, а також шар опору, опір якого починає зменшуватися і повертається до свого нормального стану. На рис. 4.3 показано, як це виглядає на практиці.

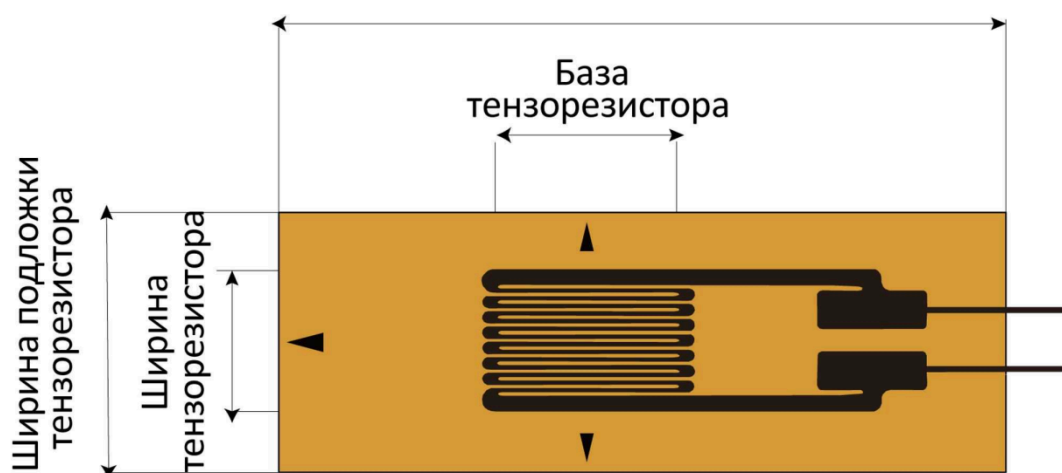


Рисунок 4.2 - Загальна схема тензодатчика

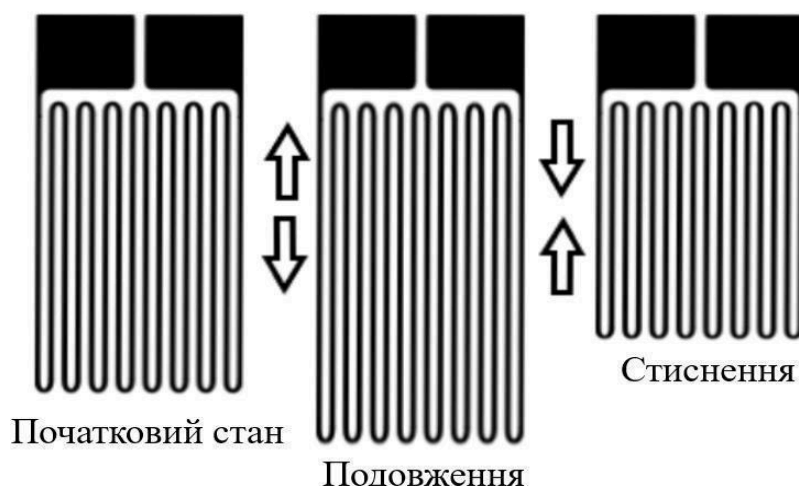


Рисунок 4.3 - Схеми дії тензодатчика

Деформації, показані на рисунку 4.3, пропорційно більші за фактичні розміри, і зазвичай довжина тензодатчика змінюється приблизно на один відсоток від його значення спокою під час розтягування або стискання.

При розтягуванні тензодатчика довжина провідника збільшується, а товщина зменшується. В результаті опір тензодатчика збільшиться. При стисненні відбувається протилежний процес - довжина провідника зменшується, а його товщина збільшується. Внаслідок стиснення опір тензодатчика зменшується, що лежить в основі його принципу роботи [6].

4.2 Схеми підключення тензодатчиків

Як правило, тензодатчики працюють не тільки через тензодатчики, а й підключаються до мостових схем вимірювання. Цей принцип називається мостом Уїтстона і реалізується наступним чином (рис. 4.4):

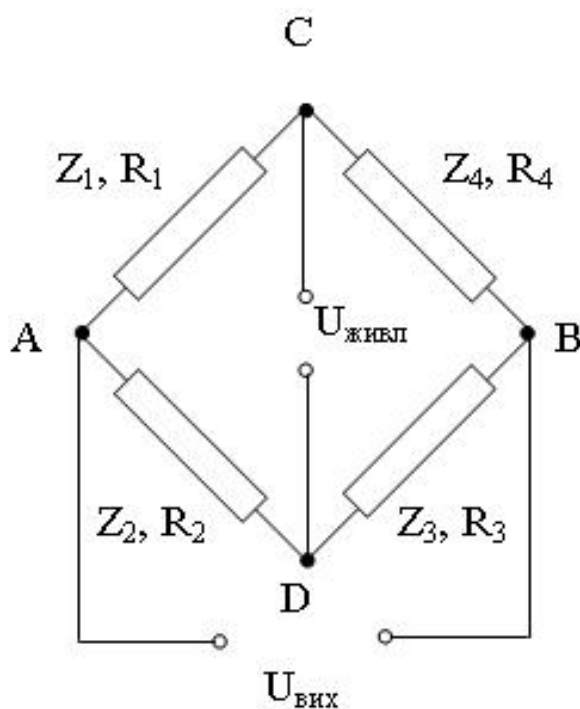


Рисунок 4.4 - Міст Уїтстона

На рисунку 4.4 показано, як «плечі» моста містять чотири тензодатчики, які сидять на гнучкій підкладці, яка забезпечує їм еластичність

Деформація під час вимірювання. Усі резистивні елементи тензодатчиків вибираються еквівалентними, щоб гарантувати, що різниця потенціалів у точках +В і -В статичного вихідного сигналу дорівнює нулю. Це означає, що ідеальний тензодатчик не мав би струму в вимірюваному вихідному ланцюзі [9].

У реальних пристроях все ще існують мережеві навантаження через структурні та температурні перепади між резистивними компонентами. Коли вимірювальний прилад піддається механічному навантаженню, гнучка основа деформується, тим самим змінюючи параметри резисторів у схемі моста тензодатчика. Як правило, подовження і стиснення відбуваються парами (рис. 4.5):

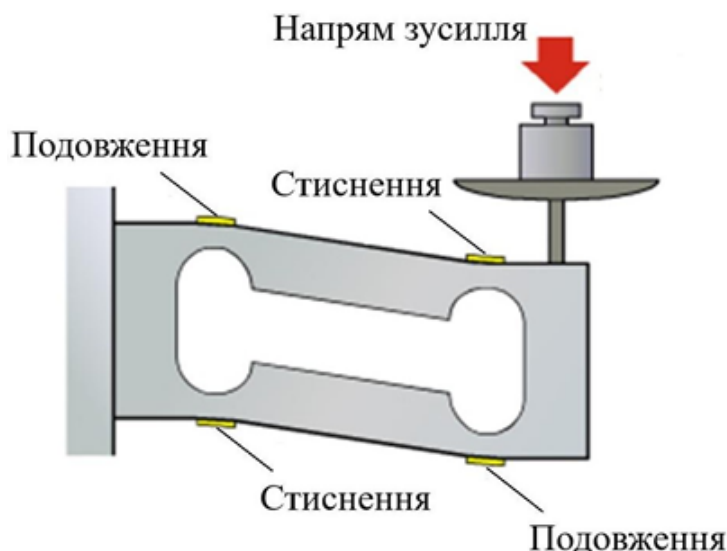


Рисунок 4.5 - Вплив навантаження на тензодатчики

Як показано на рис. 4.5, два резистора стискаються, а два інших резистора розтягуються, що спричиняє деформацію моста. Схема розбалансована, і вихідний струм починає протікати через тензодатчик. Стрілка гальванометра або дисплей приладу реагують на зміну різниці потенціалів і теж реагують на неї. Як тільки навантаження припиняє вплив на тензодатчики, пластина повертається у вихідний стан, а міст повертається до рівноваги [9].

На практиці застосовують кілька способів підключення тензодатчиків до мережі. Найпростішим варіантом є чотирипровідна схема підключення (рисунок 4.6).

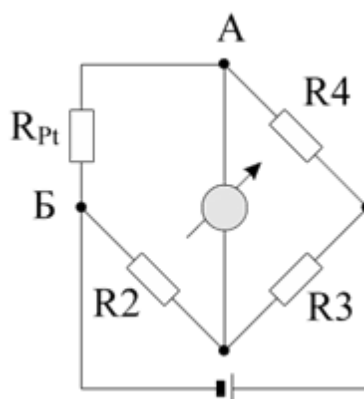


Рисунок 4.6 - Чотирипровідна схема підключення

У цьому випадку при схемі підключення потрібно суворо дотримуватися колірного маркування проводів: червоний і білий для живлення, чорний і зелений для прийому сигналу [7].

П'ятий провід служить для заземлення самого пристрою, а в деяких моделях для усунення перешкод використовується екран. При віддаленні блоку живлення від чутливих компонентів використовується шестипровідна схема підключення (рисунок 1.7), щоб уникнути впливу опору самого провідника живлення на результати вимірювань. Виходи +A і -A використовуються для живлення тензодатчиків. Клеми +C і -C компенсують падіння напруги на дроті, яке потім віднімається з отриманого сигналу. Для запису використовуються контакти +B і -B.

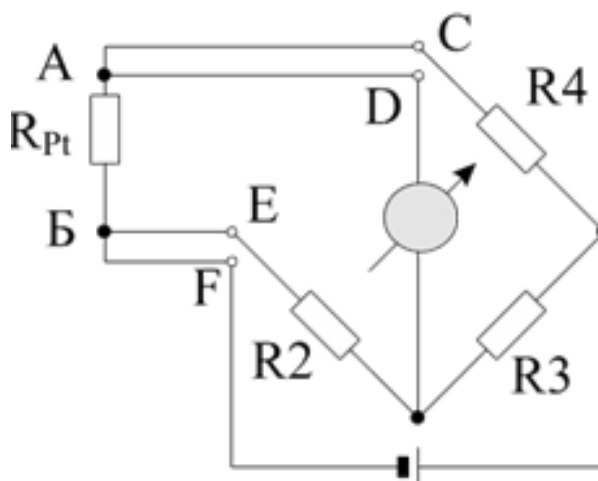


Рисунок 4.7 - Шестипровідна схема підключення

На рис.4.7 показані лише необхідні частини тензодатчика. На практиці ланцюжок вимірювання складається з різних додаткових компонентів, таких як пристрої для перемикання позиції вимірювання, фільтри, перемикачі максимального значення, самописці тощо. Для обробки даних також можуть бути використані різні електронні системи відображення [11] тощо.

4.3 Застосування тензорезистивного сенсора у сучасних засобах вимірювання

Вимірювання маси. Виробництво високоякісних тензодатчиків є дуже складним процесом, який вимагає суворої технології виробництва, випробувального обладнання та багаторічного досвіду. Через це у світі порівняно небагато виробників високоякісних тензодатчиків.

Виробники можуть зменшити витрати на виготовлення тензодатчиків шляхом автоматизації процесу. Контроль якості на всіх етапах виробництва є однією з найважливіших складових створення якісної продукції [16].

У якісних виробників не менше 60% вартості тензодатчиків витрачається на перевірку температурних і метрологічних характеристик.

Лише кілька заводів у світі виробляють тензодатчики з повним замкнутим циклом – від виробництва до складання. Більшість виробників купують деталі у інших компаній і збирають їх в одне ціле.

Використання тензодатчиків як ваг є найбільш типовим вибором. Використовуються різні типи елементів, конструкція яких залежить від типу вантажоприймального майданчика [11]:

- Балки на зсувах;
- S-подібний тензодатчик;
- Трохи мінливий;
- Зрізна балка з двома опорами:
- Тип штанги:
- Мембрана (форма диска):
- Цифрові тензодатчики:
- Мініатюрні сенсорні елементи.

Використання структур для певних типів датчиків залежить від завдань, які вони стоять, і структури системи, в яку вони будуть вбудовані.

Одноточкові різновиди призначені для вимірювання невеликих навантажень. Вони використовуються у виробництві ваг, дозаторів і

пакувального обладнання. Єдиний датчик розміщений на конструкції в центральній частині платформи (під нею).

Консольні датчики — це консольні балки, які перетворюють механічну деформацію зсуву. Цей тип в основному використовується у процесі виробництва підлогових ваг і витримує навантаження не більше семи тонн.

S-подібні тензодатчики мають властивість перетворювати електричні сигнали в механічні сили стиснення або розтягу. Вони використовуються як чутливі елементи в підвісних силосних вагах або кранових вагах. Ця конструкція оснащена шарнірним підвісом, що дозволяє скоротити час монтажу та підготовки до експлуатації [7].

Датчики у вигляді циліндрів використовуються в багатотонних вагах, тобто автомобільних, автомобільних і силосних. Їх також можна використовувати для оновлення та покращення роботи механічних ваг.

Тензодатчики розтягу призначені для використання в промисловості з важкими умовами праці. Вони мають здатність змінювати міцність на розрив.

Сфери використання розробленого тензосенсора представлено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Застосування тензосенсорів [7]

Фотографія зовнішнього вигляду тензодатчика та його типу	Сфера використання
Тензодатчик маси типу “колона” 	Використовується для зважування деталей понад 20 тонн. Вони виготовлені з нержавіючої сталі та мають клас IP-68.

Тензодатчик маси з “S-подібною” формою 	Вони використовуються для вимірювання підвішеної маси або елемента конструкції для розрахунку сил розтягування. Сфери використання: підвісні і бункерні ваги, розподільники маси.
Тензодатчик маси різновиду “Одноточковий” 	Використовується на платформних вагах для перевірки великих вантажів. Ці датчики розроблені таким чином, що їх можна використовувати для створення шкали лише з одним датчиком. Області застосування: вантажні платформи, монорейкові поїзди, Бункерні ваги та дозатори.
Тензодатчики маси типу "балка зрізу" 	Масові тензодатчики типу «Балка» застосовуються від 300 кг до 10 тонн для зважування тари та пального. сфера застосування: Платформні, монорейкові, конвеєрні та бункерні ваги та розподільники.
Тензодатчик ваги різновиду “двостороння балка зрізу” 	Для розрахунку значних навантажень, що перевищують датчики типу «балка». Область застосування: ваги платформні, монорейкові, конвеєрні та бункерні (від 10 тонн)

Датчики високої температури допомагають вимірювати масу в умовах індикатора високої температури. Даний тензодатчик може бути встановлений на

обладнанні металургійних підприємств та інших галузей промисловості з джерелами високої температури.

У важких умовах використання краще використовувати датчики з нержавіючої сталі. Вони добре відомі в харчовій, хімічній та нафтохімічній галузях важкої промисловості.

Вимірювання тиску. Тиск є одним з найважливіших параметрів у фізиці, він необхідний для визначення витрати, об'єму матеріалу, прогнозування безпеки та продуктивності гідравлічних режимів роботи напірних трубопроводів, а також може застосовуватися до перетворювачів частоти з автоматичними регуляторами в системах автоматизації, побудованих в замкнутий контур керування, використовується для зміни швидкості насоса через електричні пристрої [8].

Тиск — це сила, з якою рідина або газ чинить дію на поверхню, вимірюється в Паскалях (Па), Барах (бар), Н/мм².



Рисунок 4.8 – Датчик тиску

Види вимірювання тиску. Існують властивості, які можна використовувати для класифікації датчиків тиску за параметрами, такими як діапазон вимірюного тиску, діапазон робочої температури або тип вимірюного тиску.

Залежно від типу вимірювання тиску датчики можна розділити на:

- Датчик абсолютного тиску, який вимірює тиск відносно еталонної камери, рівний вакууму;
- Датчики манометричного тиску (або датчики відносного тиску) вимірюють тиск відносно поточного атмосферного тиску;

- Герметичні датчики дуже схожі на датчики манометричного тиску, але з їх допомогою тиск вимірюється відносно фіксованого тиску, а не атмосферного;

- Датчики перепаду тиску використовуються для визначення різниці між двома тисками та перепаду тиску [8].

Характеристика датчика абсолютного тиску полягає в тому, що він завжди вимірює той самий еталонний параметр (дорівнює вакууму) і тому не залежить від зовнішніх впливів.

Принцип роботи тензодатчиків заснований на явищі ефектів деформації в матеріалах. Вони працюють за тим же принципом, що і датчики сили. Основним вимірювальним датчиком є тонка плівка з тензорним резистором, яка підключається до схеми. Під дією тиску вимірюваного середовища чутливий елемент вигинається і змінює свій опір, що призводить до розбалансування містка Уїтстона. Цей ефект лінійно залежить від ступеня деформації резистора і, отже, від прикладеного тиску.

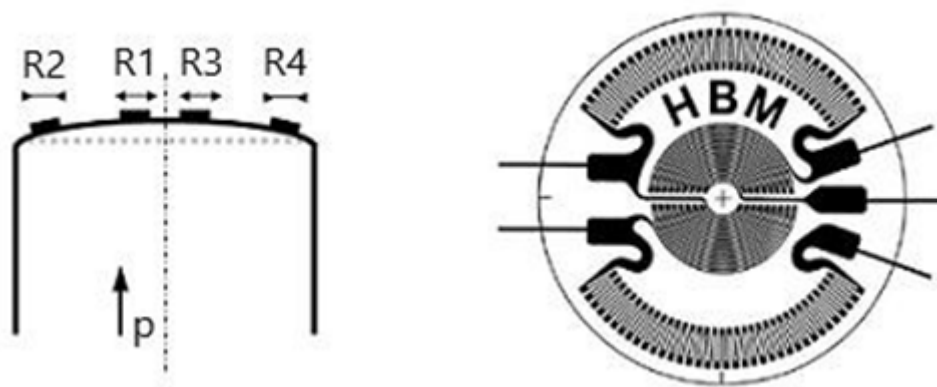


Рисунок 4.9 – Розташування тензодатчиків на мембрані та форма тензодатчика тиску

В ідеалі тензодатчики встановлюють у зонах найбільших позитивних і негативних деформацій або напруг, щоб отримати максимально можливу чутливість ДТ. Оскільки точний градієнт деформації та розподіл деформації в вимірювальному об'ємі відомі на етапі проектування датчика тиску, форму, положення та розмір можна оптимізувати [8].

Чотири датчики деформації, вбудовані в вимірювальний корпус, з'єднані з мостом Уїтстона. Функція датчика вимірювання масштабу полягає в тому, щоб забезпечити напругу збудження на тензодатчику, а також отримати й обробити вихідний сигнал мостової схеми, щоб зробити видимими зміни опору датчика. Отриманий вимірювальний сигнал може бути оброблений стандартними вимірювальними датчиками. Також для якісної візуалізації сигналу можна використовувати високоточні підсилювачі.

Залежно від призначення тензодатчики для вимірювання тиску можуть виготовлятися з різних матеріалів. Для вимірювання великих значень тиску (до 15000 бар) або при високих температурах використовуються дротяні або фольговані тензодатчики. Для вимірювання малих показників тиску (до 1000 бар) найкраще використовувати тензодатчики на основі напівпровідникових матеріалів.

4.4 Висновки до розділу 4

У розділі, присвяченому розробці тензорезистивного засобу вимірювання ваги з покращеними метрологічними характеристиками, розглянуто ключові аспекти проектування та оптимізації даного пристрою.

Проведено проектування тензорезистивного засобу:

- Вибір матеріалів: Для забезпечення високої чутливості та стабільності були обрані високоякісні матеріали для тензорезистивних елементів, зокрема металеві фольгові тензорезистори, які забезпечують точні вимірювання та мають добру стійкість до температурних змін.

- Конструктивні особливості: Оптимізація конструкції сенсора дозволила знизити вплив зовнішніх факторів, таких як вібрації та температурні коливання, на результати вимірювань.

Представлено практичне застосування та тестування:

- Результати тестувань: Експериментальні результати показали, що розроблений тензорезистивний засіб демонструє високу точність та стабільність вимірювань. Проведені випробування підтвердили його відповідність заявленим метрологічним характеристикам.

- Застосування в різних галузях: Розроблений засіб може бути ефективно використаний у різних галузях, таких як промислові системи зважування, лабораторні дослідження та комерційні ваги. Його висока точність та надійність забезпечують широкі можливості для використання.

Розробка тензорезистивного засобу вимірювання ваги з покращеними метрологічними характеристиками є важливим кроком вперед у галузі вимірювальної техніки. Завдяки ретельному підходу до вибору матеріалів, оптимізації конструкції та впровадженню передових методів калібрування вдалося досягти високої точності, чутливості та стабільності вимірювань. Це робить розроблений засіб надійним інструментом для точного вимірювання ваги у різних застосуваннях.

ВИСНОВКИ

У даній роботі розглянуто тензорезистивний сенсор для вимірювальних систем та їх основну класифікацію. Також наведені основні принципи дії тензорезистивного сенсора, який використовується для перетворені величини деформації у вимірювальний сигнал. На основі тензорезисторів розроблено тензорезистивний сенсор тиск. Розглянуто його похибки та виведено рівняння перетворення.

Принцип дії тензорезистивного сенсора оснований на роботі тензорезистора, електричний опір якого змінюється залежно від його деформації. В основі принципу роботи тензорезисторів лежить явище п'єзорезистивного ефекту. За допомогою тензорезисторів можна вимірювати деформації механічно пов'язаних з ними елементів.

Основою тензорезистора служить чутливий елемент, металевий чи напівпровідниковий, електричний опір якого змінюється пропорційно до механічного напруження на поверхні об'єкта дослідження.

Цей елемент виконується у вигляді решітки зазвичай з константанового сплаву і розташовується на підкладці з поліаміду або іншого матеріалу. Ззовні решітка покривається захисною плівкою. Для кріплення до поверхні об'єкта вимірювання переважно застосовується клей а при високих температурах — точкове приварювання підкладки, яка у цьому випадку є металевою.

У ході бакалаврської дипломної роботи були вивчені фізичні основи вимірювання деформацій і встановлено, що в рамках класичної теорії можна зробити висновки про два фактори (внутрішні фактори та геометричні фактори), які дають основний внесок у значення коефіцієнта тензочутливості, перший пов'язаний з електронними властивостями чутливого елемента, а другий — зі зміною геометричних розмірів датчика при деформації.

Проаналізовано основні параметри тензодатчиків металевих або напівпровідникових чутливих компонентів:

- Значення коефіцієнта теплового опору металевих тензорних резисторів знаходиться в наступному діапазоні 10^{-4} – 10^{-3}K^{-1} , а у напівпровідникових у діапазоні $7 \cdot 10^{-4}$ – $7 \cdot 10^{-2}\text{K}^{-1}$;

- Коефіцієнт тензочутливості металевих тензодатчиків коливається від 1 до 50 одиниць, а напівпровідникових від 2 до $3 \cdot 10^3$ одиниць, але в першому випадку тензодатчики мають більш високу термічну стійкість.

Визначено, що коли точність вимірювання відносно низька, але термін служби тривалий, пріоритет надається металевим чутливим компонентам, а коли вимірюється невелика деформація з високою точністю, пріоритет надається напівпровідниковому датчику. Розглянуто можливі варіанти підключення датчиків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tutak P. Application of strain gauges in measurements of strain distribution in complex objects// JACSM. IT Institute, University of Social Sciences. – 2014. V. 2, №6. P. 135–145.
2. Ghimbaseanu I. Experimental research study on the use of a resistive tensometric// International Scientific Journal: Machines. Technologies. Materials. - Transilvania University of Brasov, Romania. - 2015. V. 1, №9. P. 44–47.
3. Фідровська Н. М., Пономаренко Р. В., Слепужніков Є. Д., Козодой Д. С. Обґрунтування проведення тарировкитензорезисторів у комплексі з вимірювальним обладнанням // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – УкрДУЗТ. – 2020. – №194. С. 75-83.
4. Pastor M., Carak P., Gomory I. The assessment of the residual stresses influence on generation of the infringement in shape-complex supporting members // Journal of Mechanical Engineering. - Technical University of Košice. - 2019. №69. P. 85–96.
5. Проценко І.Ю. Шумакова Н.І. Технологія та фізика тонких металевих плівок.- Суми: Вид-во СумДУ, 2000. – 194с.
6. Fidrovska N., Slepuzhnikov E., Varchenko I. Preparation of tensoresistors and measuring equipment for experimental research // Norwegian Journal of development of the International Science. - Technical Sciences. 2020. -V. 1, № 45. P. 69–72.
7. Слепужніков Є. Д., Варченко І. С., Фідровська Н. М. Проведення експериментальних досліджень методом тензометрії /Наукове забезпечення технологічного процесу 21 сторіччя. – Чернівці, 2020. - С. 85–86.
8. Кривуша Л. С., Зайцева Т. О. Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання з дисципліни “Дефекти кристалічної будови” для

студентів спеціальності 7.090412 – термічна обробка металів. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. 30 с. 2

9. Ларіков Л. Н. Структура і властивості металів [Електронний ресурс] : конспект лекцій для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» (освітня програма "Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання") / Ларіков Леонід Нікандрович; КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Сидоренко С. І., Волошко С. М. – Електронні текстові дані (1 файл: 14,98 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 329 с. – (Серія "Педагогічне надбання: Л.Н. Ларіков.").

10. Холявко В.В. Фізичні основи міцності та руйнування. К. : Вид-во НТУУ КПІ. 2015. 100 с.

11. Максименко О. П., Ізмайлова М. К. Конспект лекцій з дисципліни «Теоретичні основи процесів (за фахом)» Частина І, для здобувачів вищої першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 136 – Металургія за освітньо-професійною програмою «Металургія». Кам'янське : ДДТУ, 2016. 63 с.

12. Інформаційні вимірювальні системи для контролю параметрів та властивостей твердих тіл і матеріалів з покриттям. Інформаційні та вимірювальні системи: теорія і практика. Посібник / Г.І. Хімічева та ін. // К. : Основа, 2006. С. 295 – 327.

13. Кузьмич Л. В., Квасніков В. П. Методи та засоби автоматичного контролю та вимірювання параметрів напружено-деформованого стану складних конструкцій : монографія . Київ : Інтерсервіс, 2019. 147 с.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

РОЗРОБКА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ З ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Виконала: студент 4-го курсу, групи КІВТ-20
спеціальності 152 - Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)
_____ Кіт Б.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц., доц. каф. ІРТС
_____ Дулатєв І.А.
(прізвище та ініціали)
«14» 06 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

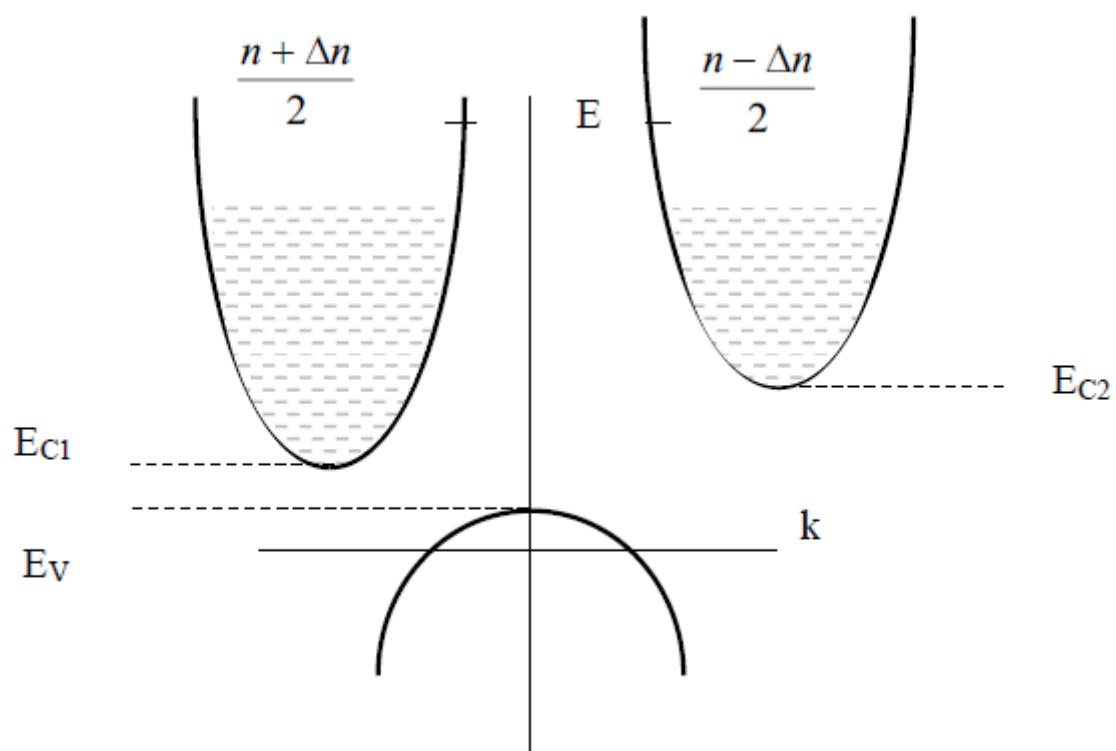


Рисунок 1 – Зміщення долин енергетичної діаграми при одновісній деформації кристалу кремнію

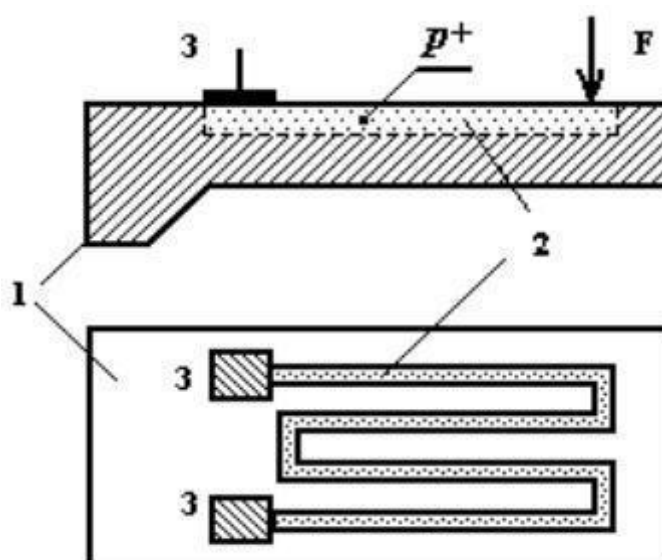


Рисунок 2 – Структурна схема металічних тензорезисторів

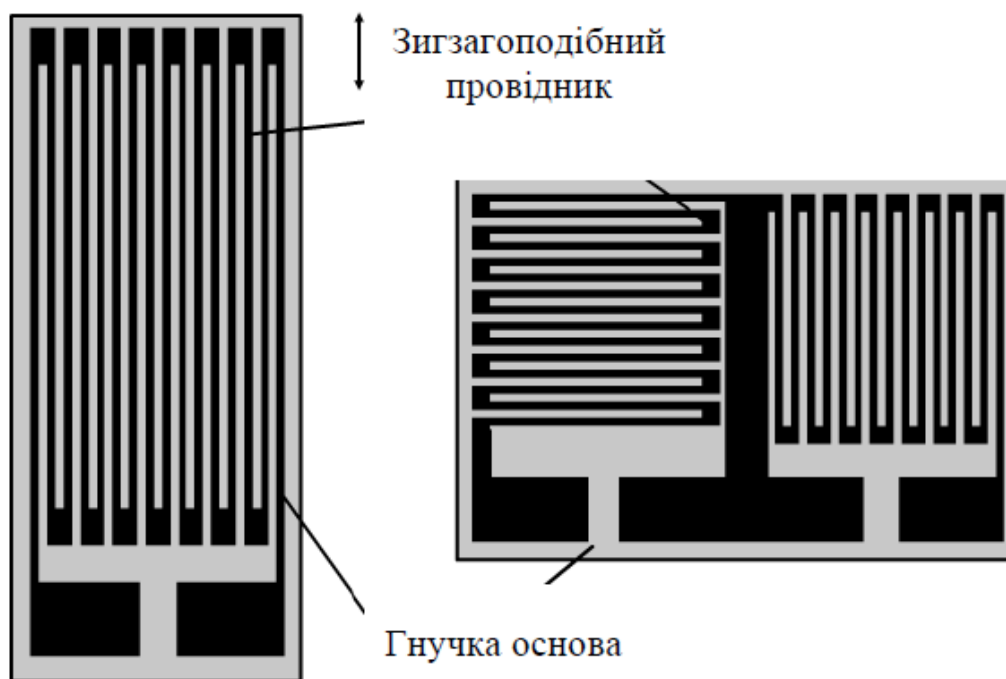


Рисунок 3 – Конструкція фольгових металічних тензорезисторів

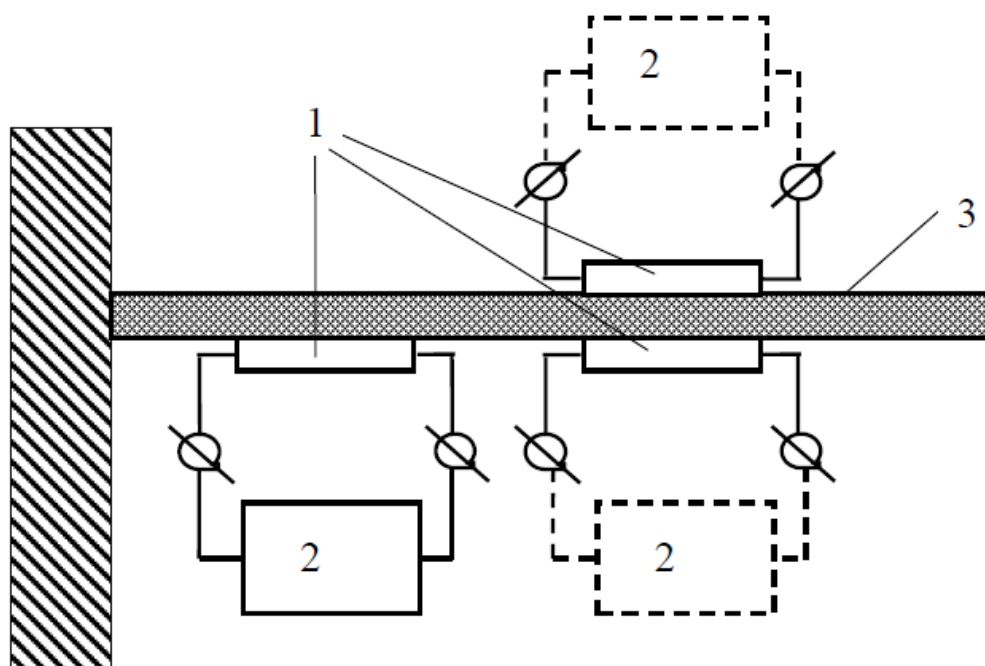


Рисунок 4 – Схема дослідження деформаційних характеристик тензорезисторів:

1 – тензорезистори, 2 – цифровий вимірювач опору, 3 – балка рівного поперечного перерізу

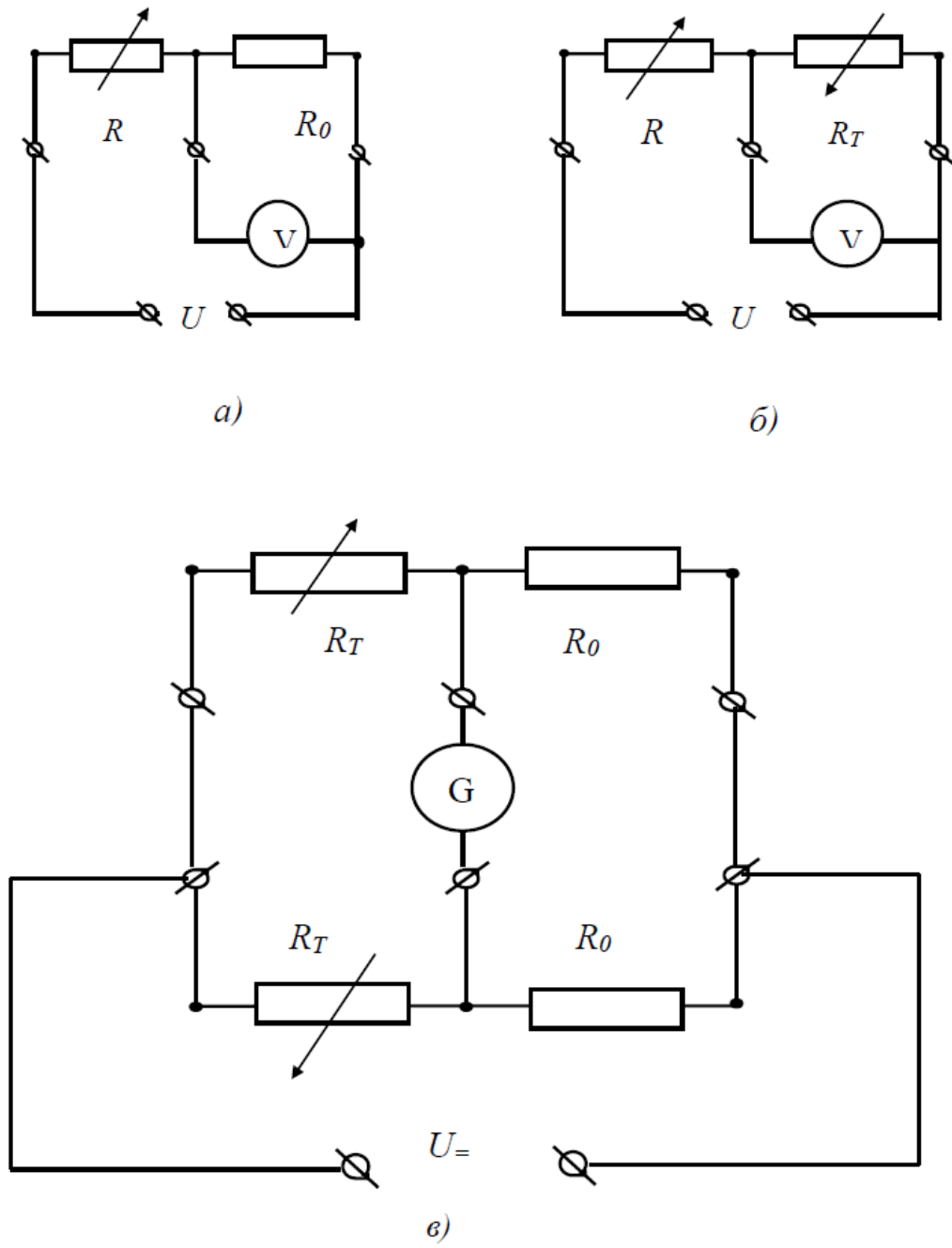


Рисунок 5 – Схеми включення тензорезисторів: *а* – послідовна, *б* – диференціальна, *в* – мостова диференціальна

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ (БАКАЛАВРСЬКОЇ) РОБОТИ

**РОЗРОБКА ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ З
ПОКРАЩЕНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Розробка тензорезистивного засобу вимірювання ваги з покращеними метрологічними характеристиками»

Тип роботи: БДР
(БДР, МКР)

Підрозділ ІРТС. ІЕС
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність 93,53% Схожість 6,47%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

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

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Олександр ЗВЯГІН
(прізвище, ініціали)

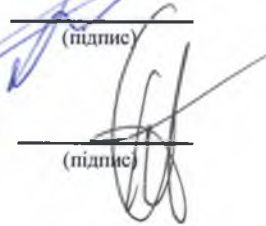
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Богдан КІТ
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Ігор ДУДАТЬЄВ
(прізвище, ініціали)