

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,  
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра  
**Фізичні принципи роботи тензодатчиків**

Студент. гр. ЕП-81

В. І. Шевченко

Науковий керівник  
к. ф.-м. н к., доцент

Н. І. Шумакова

Завідувач кафедри  
д. ф.-м. н, професор

І. Ю. Проценко

Суми 2022

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики  
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-професійна програма  
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ

І.Ю. Проценко

«25» травня 2022 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

**Шевченка Вадима Ігоревича**

1. Темароботи Фізичні принципи роботи тензодатчиків  
затверджена наказом по університету від «04» травня 2022р. , №0316-VI
2. Термін здачі студентом закінченої роботи 08 червня 2022 року
3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

В даний час тензорезистори застосовуються в багатьох областях науки і техніки. При цьому виникає багато складних теоретичних і практичних проблем. Серед різних експериментальних методів вимірювання деформацій переважна більшість дослідників віддає перевагу вимірам із застосуванням тензодатчиків або тензорезисторів, оскільки вони найкращим чином відповідають критеріям вартість-ефективність, володіючи оптимальним поєднанням характеристик. Використання тензодатчиків при проведенні науково-технічних досліджень дозволяє здійснювати контроль деформацій і напружень при дії статичних і динамічних навантажень. Особливо актуальним це є при роботі зі статично невизначеними механічними системами, параметри навантаження яких можуть бути визначені лише за допомогою непрямих емпіричних методів. Мета кваліфікаційної роботи полягає в узагальненні літературних даних стосовно особливостей конструкцій, застосування та принципів роботи тензодатчиків.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)
  1. Загальна інформація та класифікація тензодатчиків.
  2. Принцип роботи тензодатчиків

3. Основи тензометрії
  4. Особливості конструкції та застосування тензодатчиків
  5. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди №1-2 – Основи тензометрії

Слайди №3-6 – Принцип роботи тензодатчиків

Слайди №7-10 – Застосування тензодатчиків

Слайд № 11 – Висновки

6. Дата видачі завдання 26.05.2022р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| №  | Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалаврів     | Термін виконання етапів роботи                                     | Примітка    |
|----|--|--|-------------|
| 1. | Аналіз літературних даних                          | до 30.05.2022р.  | <i>вик.</i> |
| 2. | Загальна інформація та класифікація.               | до 04.06.2022р.  | <i>вик.</i> |
| 3. | Принцип роботи тензодатчиків. Основи тензометрії . | до 06.06.2022р.  | <i>вик.</i> |
| 4. | Підготовка тексту кваліфікаційної роботи бакалавра | до 08.06.2022р.  | <i>вик.</i> |
| 5. | Попередній захист роботи                           | 10.06.2022р.,<br>10 <sup>05</sup> (дистанційно)                    | <i>вик.</i> |
| 6. | Захист роботи в екзаменаційній комісії             | 16.06.2022 р.,<br>17.06.2022 р.,<br>10 <sup>05</sup> (дистанційно) | <i>вик.</i> |

Студент

В.І. Шевченко

Керівник роботи

Н.І. Шумакова

## РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи бакалавра полягає у вивченні фізичних принципів роботи тензодатчиків та їх практичного застосування.

Для досягнення поставленої мети ставилися наступні завдання:

- проаналізувати фізичні принципи функціонування тензодатчиків;
- розглянути їх будову і принцип роботи;
- розглянути можливі схеми підключення тензодатчиків;
- вказати сфери застосування, переваги та недолік тензодатчиків.

**Актуальність** роботи обумовлена тим, що тензодатчик є центральним елементом для переважної більшості приладів, які використовують у вимірюванні неелектричних показників. Завдяки використанню тензодатчиків електронне обладнання вдалося зробити більш компактним та точним, збільшити його функціональні можливості.

Тензодатчики мають дуже широку сферу застосування: вимірювальна техніка, наукові дослідження, електроніка, переважна більшість зважуючих приладів і т. д.

Під час виконання роботи використовували методи досліджень: аналіз і синтез та порівняльний аналіз.

Робота викладена на 31 сторінках, містить 12 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел із 18 найменувань.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ТЕНЗОРЕЗИСТОР, ТЕНЗОДАТЧИК, КОЕФІЦІЄНТ ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ, ДЕФОРМАЦІЯ, ОПР, ТЕНЗОЕФЕКТ, ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| <b>ВСТУП</b> .....   | 4  |
| <b>РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИНЦИП ДІЇ ТЕНЗОДАТИКІВ</b> | 5  |
| 1.1. Уявлення про тензоефект.....                              | 5  |
| 1.2. Поняття про тензодатчики .....                            | 7  |
| 1.3. Опис і призначення тензодатчиків .....                    | 8  |
| 1.4. Пристрій і принцип роботи.....                            | 10 |
| 1.5. Схема підключення тензодатчиків .....                     | 12 |
| <b>РОЗДІЛ 2. РІЗНОВИДИ ТЕНЗОДАТЧИКІВ</b> .....                 | 14 |
| 2.1. Тензодатчики з дроту .....                                | 15 |
| 2.2. Тензодатчики з фольги.....                                | 17 |
| 2.3. Тензодатчики з напівпровідників.....                      | 19 |
| <b>РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕНЗОДАТЧИКІВ</b> .....              | 22 |
| 3.1. Вимірювання маси.....                                     | 22 |
| 3.2. Вимірювання тиску .....                                   | 25 |
| <b>ВИСНОВКИ</b> .....  | 29 |
| <b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....                        | 30 |

## ВСТУП

Тензометрія як метод заснована на здатності вимірювання та аналізу деформацій, що у свою чергу дає можливість оцінки напруженого стану [1, 2].

Тензометричні датчики використовують з ціллю вимірювання деформацій та механічної напруги. Найпоширенішою сферою застосування тензодатчиків є вимірювання неелектричних величин серед яких вага, тиск, вібрація, прискорення, крутний момент, переміщення та інші. Ці показники трансформуються в деформацію робочого тіла, цю деформацію сприймає тензодатчик. Сигнал від тензодатчика потім обробляється допоміжними перетворювачами (індикатор ваги, ваговий процесор, аналого-цифровий перетворювач тощо).

Тензодатчики заміряють зміни активного опору матеріалу під час механічної деформації. Як матеріал тензодатчиків використовуються провідники (у вигляді дроту, фольги або плівки) та напівпровідники. Основну роль в утворенні електричного сигналу в напівпровідникових тензорезисторах відіграє зміна їх питомого опору під дією механічного навантаження [3].

Тензодатчик, як правило, являє собою спеціальну еластичну конструкцію з прикріпленими до неї тензомерами та іншими допоміжними компонентами. Після калібрування, змінюючи опір тензомерів, можна розрахувати ступінь деформації, яка буде пропорційна зусиллю, прикладеному до конструкції.

Тензодатчики відіграють ключову роль в автоматизації виробництва, що дозволяє значно зменшити людський фактор та знизити вартість продукту на багатьох великих підприємствах та заводах.

Тензодатчики мають дуже велику сферу застосування це наприклад: будівництво, газо-нафто переробні підприємства, водопостачання, переважна більшість зважуючих приладів і т. д.

# РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ПРИНЦИП ДІЇ ТЕНЗОДАТИКІВ

## 1.1. Уявлення про тензоефект

Тензорезистори являють собою резистори, електричний опір яких змінюється пропорційно зі зміною їх лінійних розмірів під дією механічного напруження на поверхні об'єкта дослідження [4]. Робота тензорезисторів заснована на явищі тензоефекту, зміні опору провідників при їх механічній деформації [3]. Зміна активного опору відбувається з декількох причин: по-перше, змінюються геометричні розміри (довжина  $l$  перетин  $s$ ); по-друге, змінюється питомий опір матеріалу. А ці показники визначають активний опір дроту. Візьмемо довжину резистора  $l$ , його площа визначається формулою  $S = a \cdot d$  (параметри ширини та довжини). У такому випадку електроопір резистора корелює з питомим опором ( $\rho$ ) по співвідношенню

$$R = \rho \frac{l}{a \cdot d}. \quad (1.1)$$

Візьмемо диференціал логарифмів лівої і правої частин. Виходить наступне:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{da}{a} - \frac{dd}{d}, \quad (1.2)$$

Формула 1.2 може бути перетворена на:

$$\frac{d \ln R}{d \ln l} = \frac{d \ln \rho}{d \ln l} + (1 + 2\mu), \quad (1.3)$$

де  $\mu = -\frac{da/a}{dl/l} = -\frac{dd/d}{dl/l}$  – коефіцієнтом Пуассона для матеріалу тензорезистора.

При знаходженні тензорезистора у незалежному стані (1.3) отримаємо

$$K = \frac{dR}{Rd\epsilon} = m + (l + 2\mu), \quad (1.4)$$

Чутливість як механічних, так і напівпровідникових тензорезисторів оцінюється коефіцієнтом тензочутливості  $K$ , визначеним тензо ефектом.

Слід зазначити, що коефіцієнти тензочутливості  $K$ ,  $m$  та ряд інших величин відрізняються у позначенні в теорії і на практиці. Так, в теоретичній тензочутливості використовують показники поперечної ( $\gamma$ ) та повздожньої ( $\gamma$ ) чутливості. При вираженні цих параметрів через питомий опір користуються коефіцієнтом  $\gamma^p$  і  $\gamma^l$ , який приходить на зміну стандартному  $m$ .

Необхідно також пам'ятати, що теорія тензо ефекту вивчає незалежні тензорезистори у деформаціях  $\epsilon_l$  і  $\epsilon_t$ . У той же час на практиці існують окремі позначення для показників конструкційної деформації ( $\epsilon$ ) і чуттєвого елемента ( $\epsilon_u$ ). З урахуванням розвитку експериментальної тензометрії на базі датчиків з фольги, дротів, аналізу фундаментальних питань тензо ефекту за полікристалічними плівковими системами стає зрозумілою така відмінність. Два напрямки науково-практичного дослідження з початку своєї історії рухались за окремими векторами та своїми власними сценаріями[5].

На положення речей вплинув перехід до виготовлення чутливих елементів з тонкої плівки. Тому відпала нагальність вимірювання деяких показників, серед яких коефіцієнт передачі інформації  $K_{пер}$ .

У випадку роботи з масивним тензорезистором співвідношення (1.3) приймає такий вигляд:

$$\frac{dR}{R} = K_{npm} \frac{dl}{l}, \quad (1.5)$$

де  $K_{npm} = 1 + 2\mu + m$  – є коефіцієнтом перетворення конструкційної деформації ( $\epsilon$ ).



Зв'язок між показниками  $K$  і  $K_{нрт}$

$$K = K_{пер.ч} \cdot K_{нрт}, \quad (1.6)$$

призводить до того, що  $K = K_{нрт}$  при умові, що коефіцієнт передачі деформації  $\varepsilon$  пов'язує чутливий елемент  $K_{пер.ч}$  ( $K_{пер.ч} = \overline{\varepsilon}_c / \varepsilon$ , де  $\overline{\varepsilon}_c$  - істинна деформація чутливого елемента ) та дорівнює одиниці[5].

## 1.2. Поняття про тензодатчики

Тензодатчики є основним обладнанням для перетворення фізичних деформацій в нормовані електричні сигнали. Сигнал від тензодатчика зазвичай обробляється вторинним перетворювачем (індикатором ваги, ваговим процесором, аналого-цифровим перетворювачем тощо). Гравіметричний тензомер (тензодатчик) - Пристрій, який вимірює деформацію різних конструкцій на основі визначення деформації (або зміщення) пружних елементів. Датчики зсуву можуть вимірювати лінійний зсув (переміщення) і кут повороту.

Залежно від використовуваного принципу перетворення існує багато способів вимірювання деформації: тензодатчики, оптична поляризація, п'єзо резистивні, оптичні волокна або просто зчитування дроту механічного тензодатчика[7].

Тензодатчики можуть використовуватися для контролю маси стрічкових конвеєрів і вимірювання маси різних транспортних засобів (автомобілів, залізничних транспортних засобів). Завдяки конструктивним особливостям тензодатчик легко інтегрується в систему зважування, забезпечуючи високу якість монтажу. Як правило, тензодатчики можуть працювати в будь-яких умовах навколишнього середовища.

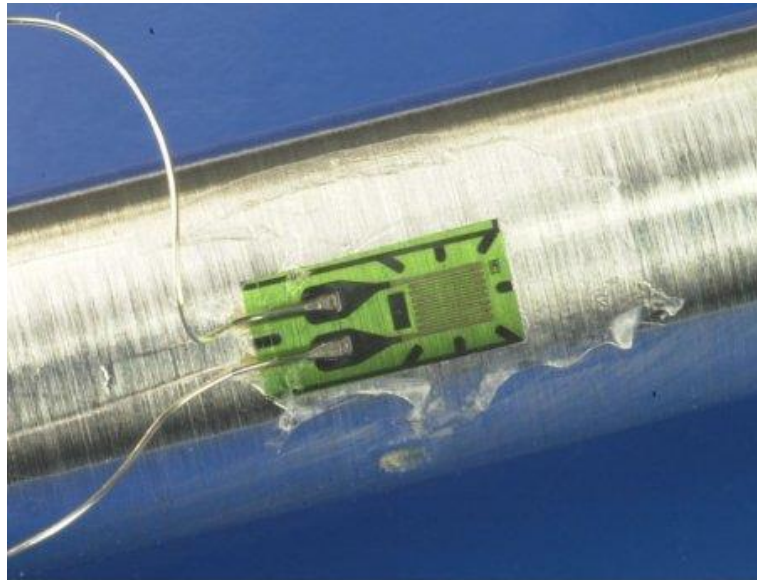


Рисунок 1.1 - Тензодатчик [6]

Тензодатчик - це набір конструктивних тензорезисторів з точкою зв'язку на панелі. Останній кріпиться до вимірюваного матеріалу. Тензодатчики працюють, впливаючи на чутливий елемент. Пристрій підключається до джерела живлення за допомогою електричної розетки, яка з'єднана з чутливою платою.

### **1.3. Опис і призначення тензодатчиків**

Тензодатчики засновані на тензорезисторі. При механічному впливі на підкладку вона згинається, в результаті чого плівка, фольга або дріт розтягуються. Тому в розтягнутому стані змінюється (зменшується) його площа поперечного перерізу і збільшується опір. Коли тиск зменшується, тензорезистор повертається до початкових даних, а також резистивний шар, опір якого почав зменшуватися і повертатися до нормального стану. На рисунку 1.3 показано як це виглядає на практиці.

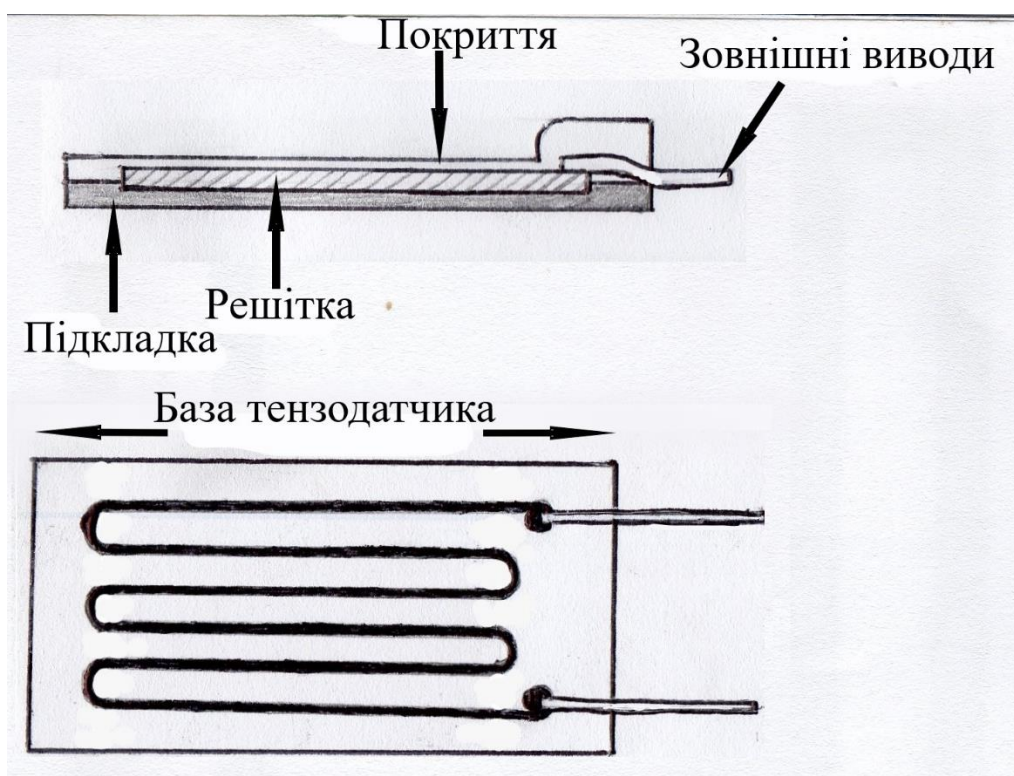


Рисунок 1.2 -Загальна схема тензодатчика

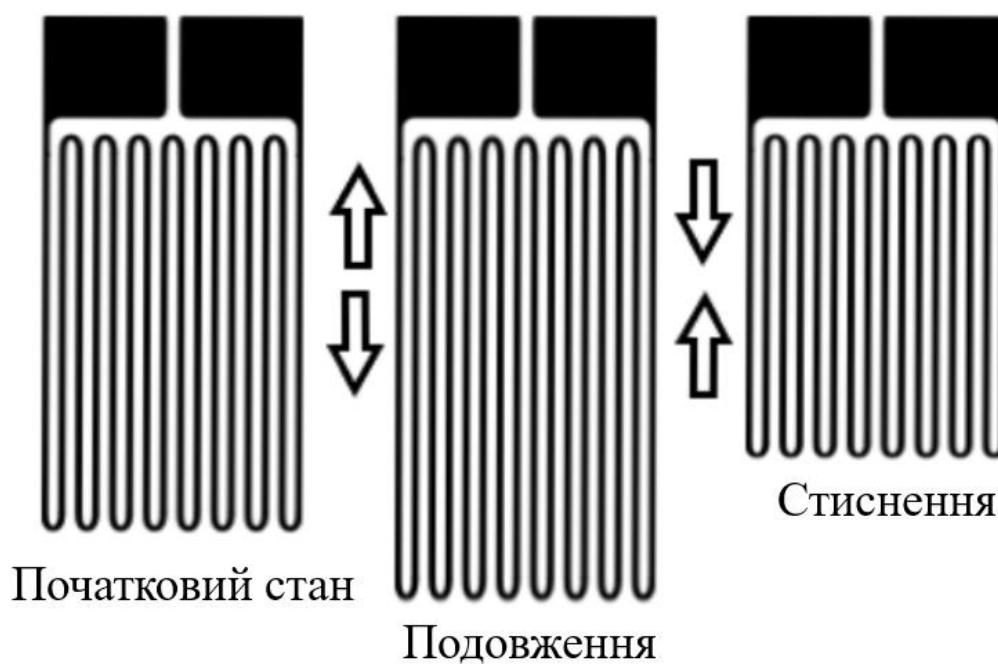


Рисунок 1.3 -Принцип дії тензодатчика[8]

Деформація на рисунку 1.3 показана в більшому масштабі ніж це є насправді, зазвичай довжина тензорезистора, при подовженні, або стисненні змінюється приблизно на один відсоток від його значення у стані спокою.

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

#### 1.4. Пристрій і принцип роботи

Як правило, тензодатчики працюють не тільки через тензорезистор, а й підключаються до мостової схеми вимірювання. Цей принцип має назву міст Уїтстона, і реалізується він таким чином (рисунок 1.4):

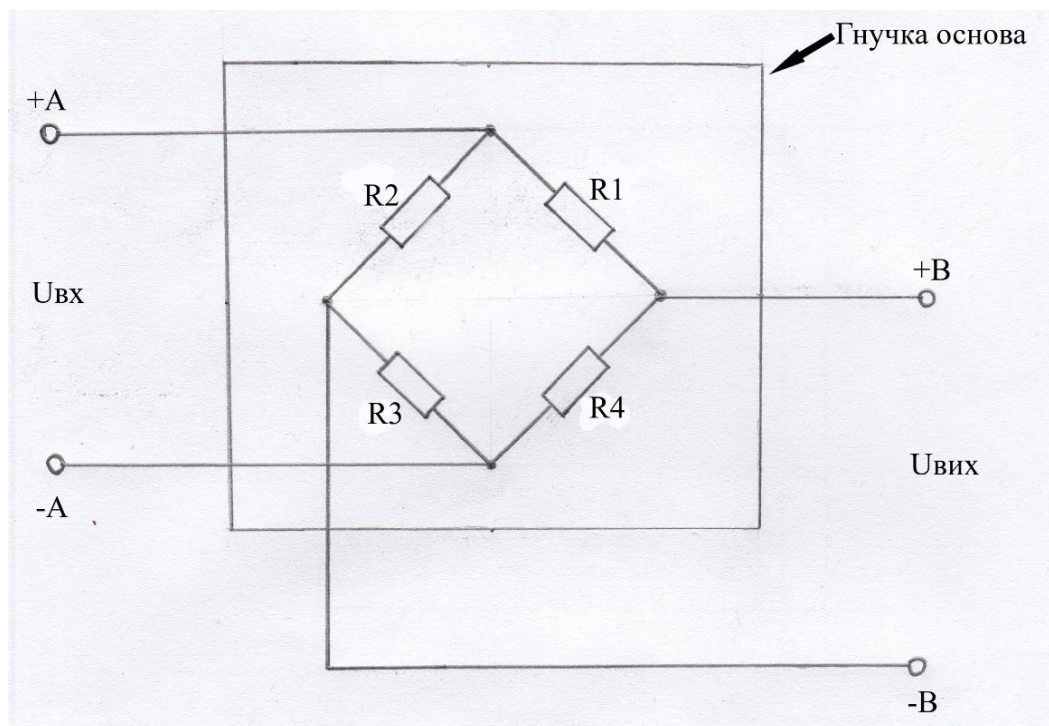


Рисунок 1.4 - Міст Уїтстона

На рисунку 1.4 показано, як чотири тензодатчики містяться в «плечах» моста, які розташовані на гнучкій підкладці, забезпечуючи їм пружну

деформацію під час вимірювання. Усі резистивні елементи тензодатчика вибираються еквівалентними для забезпечення нульової різниці потенціалів у точках +В і -В на вихідному сигналі спокою. Це означає, що ідеальний тензодатчик не матиме струму у вихідному ланцюзі вимірювання[9].

У реальному пристрої все ще існує навантаження на мережу через структурні та температурні перепади між резистивними компонентами. Після того, як на вимірювальний пристрій прикладається механічне навантаження, гнучка основа деформується, що змінює параметри резисторів у мостовій схемі тензодатчика. Зазвичай подовження і стиснення відбуваються попарно (рисунок 1.5):

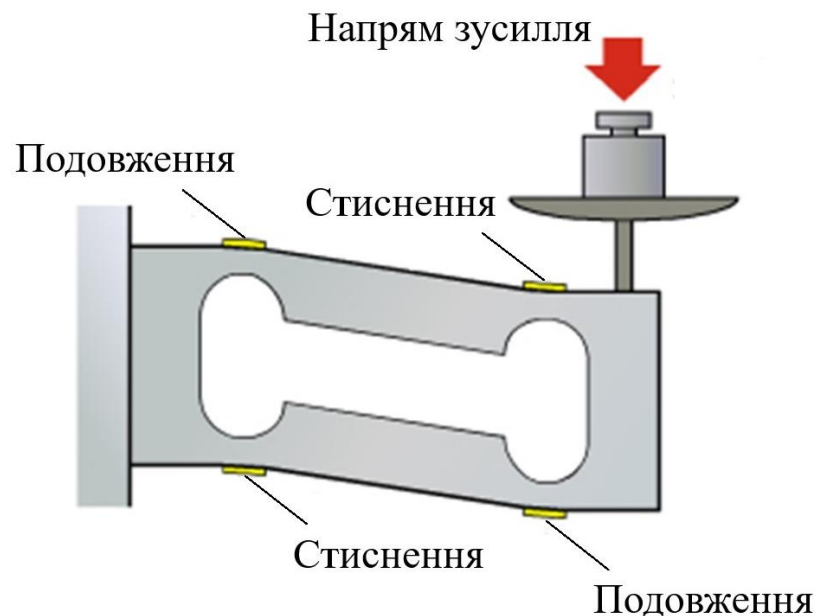


Рисунок 1.5 - Вплив навантаження на тензодатчики [10]

Як видно на рисунку 1.5, два резистора стискаються, а два інших розтягуються, що призводить до деформації моста. Схема розбалансована і вихідний струм через тензодатчик починає протікати. На це відреагує стрілка гальванометра або дисплей приладу, який реагує на зміну різниці потенціалів. Як тільки навантаження перестане впливати на тензодатчики, плата повернеться до початкового стану, а міст повернеться в рівновагу[9].

## 1.5. Схема підключення тензодатчиків

На практиці використовуються різні способи підключення тензодатчиків до мережі. Найпростішим варіантом є чотирипровідна схема підключення (рисунок 1.6).

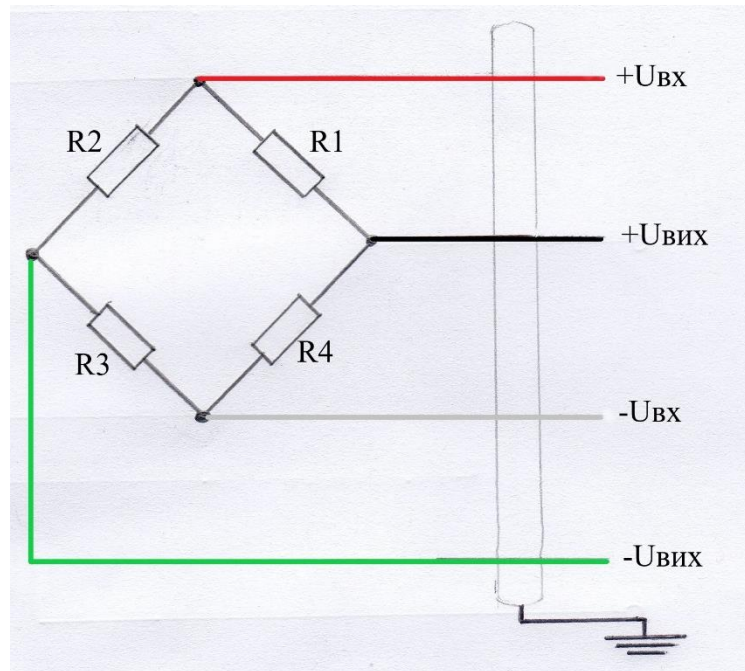


Рисунок 1.6 - Чотирипровідна схема підключення

У цьому випадку схема підключення вимагає суворого дотримання кольорового маркування проводів: червоний і білий для живлення, чорний і зелений для прийому сигналу[7].

П'ятий провід призначений для заземлення корпусу пристрою, а в деяких моделях для усунення шумів використовується екран. Коли блок живлення знаходиться далеко від чутливих компонентів, використовується шестипровідна схема підключення (рисунок. 1.7), щоб уникнути впливу опору самого провідника джерела живлення на результати вимірювань. Виходи +А та -А використовуються для живлення тензодатчиків. Клеми +С і -С усувають падіння напруги на дроті, яке потім віднімається від отриманого сигналу. Для запису використовуються контакти +В і -В

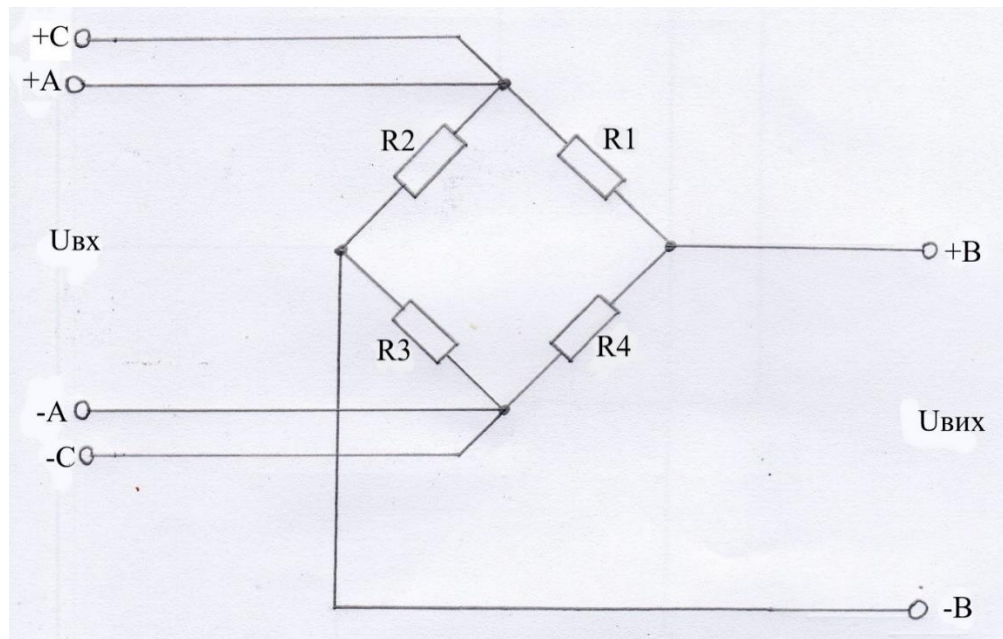


Рисунок 1.7 - Шестипровідна схема підключення

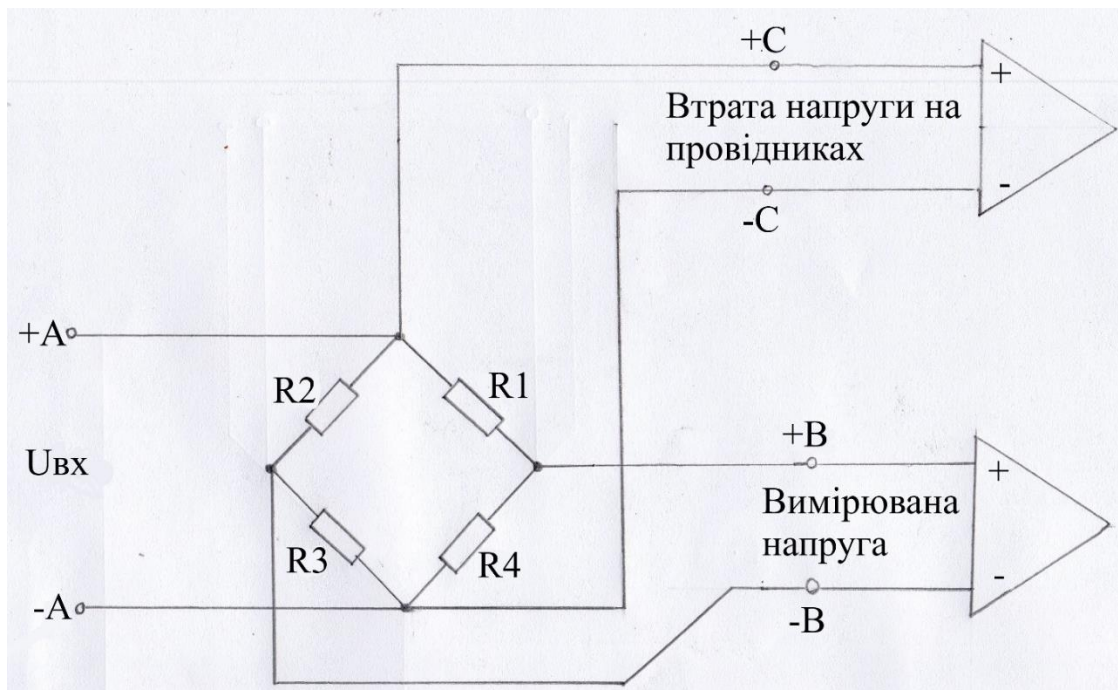


Рисунок 1.8 - Практична реалізація розрахунку втрати напруги

На рисунку 1.8 вказані лише необхідні частини тензодатчика. На практиці, вимірювальний ланцюг складається з різних додаткових частин, наприклад обладнання для перемикання вимірюваного місця, фільтри, перемикачі максимальних значень, реєстратори тощо. Також можливе використання різних електронних систем дисплеїв для обробки даних [11] тощо.

## РОЗДІЛ 2. РІЗНОВИДИ ТЕНЗОДАТЧИКІВ

Тензорезистори бувають дротяні, фольгові і напівпровідникові. Геометричні розміри чутливих елементів перших двох типів змінюються при їх деформації [12]. У тензодатчиків, що мають фольговий чутливий елемент (типи КФ4, КФ5), робочий температурний показник складає від  $-70$  до  $200$  градусів за Цельсієм, а для дротяних (типу НМТ-450) гранична температура витримування може сягати  $450^{\circ}\text{C}$ . При підкладці з металу для типу ТТ-600 максимальний температурний показник становить  $600^{\circ}\text{C}$ .

На сьогодні виділяють п'ять груп металів, з яких виготовляють тензорезистивні елементи. Серед них:

- металеві сплави з низьким рівнем ТКО ( $\sim 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ) та граничною теплостійкістю ( $200-300^{\circ}\text{C}$ ) при показникові  $K = 0,3-3$  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 ( $400-500^{\circ}\text{C}$ ) при показникові  $K = 2-3$  це 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 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 з високим рівнем спротиву жару платиново-вольфрамові (Pt-W), залізно-хромово-алюмінієві (Fe-Cr-Al) сплави;
- сплави благородних металів платино-паладієво-родієві (Pt-Pd-Rh), платино-родієво-осмієві (Pt-Rh-Os), платино-паладієво-молібденові (Pt-Pd-Mo) сплави.

Узагальнення інформації про тензодатчики з металів на основі великих конструкцій дозволяє встановити що середня температура роботи для цього типу деталей має межу від  $-269$  до  $600-700^{\circ}\text{C}$  та величину  $K$  від  $10^{-1}$  до  $20$  [5].



## 2.1. Тензодатчики з дроту

Тензорезистори із дроту є одним із двох великих різновидів металевих конструкцій (іншим є деталі з фольги). Їх застосовують при визначенні деформації та напруги в конструкціях механічного типу, в якості чутливих елементів манометрів, динамометрів, витратомірів та тому подібного[13].

Дротяний тензорезистор являє собою решітку з дроту діаметром 0,02 – 0,05 мм., наліплену на основу (підкладку) тонкого паперу або лакової плівки [12]. Він має високий питомий опір та виготовлений з таких сплавів як константан, ніхром, едванс, елінвар та інші). Його викладають частими петлями на тонкий папір чи ізоляційну плівку, потім приклеюють до неї[5].

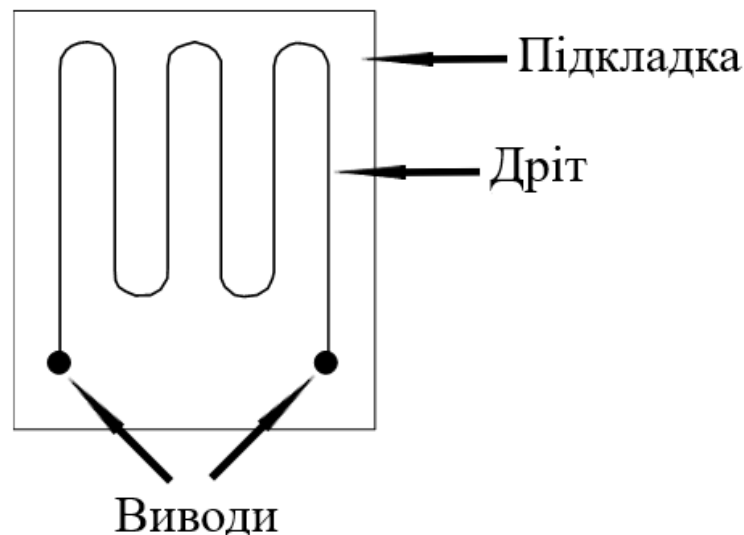


Рисунок 2.1 - Дротяний тензорезистор[14]

На кінцях дроту розташовують виводи. Завдяки ним датчик можна підключити до схеми вимірювання.

Тензорезистор приклеюють до поверхні досліджуваного елемента так, щоб поздовжня вісь розташовувалась за напрямом деформації вимірювання деталі. Деформація повинна проходити вздовж резисторних петель. Завдяки цьому вимірювання лінійних деформацій стає більш точним.

Показник управління датчиків із дроту в межах пружної деформації має близьку до лінійної величину. Його визначають за формулою:

$$\Delta R = RK_T \Delta l = \frac{\rho K_T}{s} \Delta l \quad (2.1)$$

Показник лінійності може дорівнювати 0,1%.

Чутливість тензорезистора із дроту:

$$K_S = \frac{d(\Delta R)}{d(\Delta l)} = \frac{\rho K_T}{s} \quad (2.2)$$

Для того щоб збільшити чутливість тензорезисторів із дроту використовують матеріали з високим рівнем тензочутливості  $K_T$ , високим питомим опором  $r$  та невеликою площею перерізу  $s$  в поперечній площині [9].

Відхилення показів чутливих елементів із дроту має залежність від температурних коливань, ізоляційного опору, стійкості до вологи, якості наклейки та існування деформації у поперечній площині. Температурні коливання можуть призводити до занадто великих відхилень. Це явище виникає, тому що зміна питомого опору датчика, та поява додаткових механічних напруг призводить до різниці температурних розширень матеріалів тензорезисторів та елементів, деформацію яких вимірюють. Через це є популярним використання датчиків із константану. Вони мають невеликий температурний коефіцієнт опору[13].

У загальних випадках для чутливих елементів із дроту показник максимального струму дорівнює величині у декілька десятків міліамперів.

Тензорезистори із дроту виготовляють з показником опору в 10-1000 Ом. Їх розмір основи становить 20-100 мм, найбільший показник подовження при вимірюванні не повинен бути більшим за межі пружної деформації. Відносне подовження дорівнює приблизно 1% у більшості випадків.

Приклади умовного позначення дротяного датчика: 2 ДКП-5-50Г; 2 ДКП-20-200Х. Перша буква (Д) вказує, що решітка виконана з дроту; друга буква (К) – константан (матеріал дроту); третя (П) – матеріал основи (папір або плівка); цифри вказують довжину бази і номінальний опір решітки; остання буква (Г або Х) – температуру наклейки (Х – не більше 30 0С, Г – не більше 180 0С) [12].

Переваги тензорезисторів із дроту:

- невелика інерція;
- висока гранична температура роботи;
- дешевизна;
- відсутність явища гістерезису.

Недоліки:

- великі габарити порівняно з фольговими та напівпровідниковими 20 – 100 мм<sup>2</sup>;
- малий ресурс роботи;
- низький рівень чутливості;
- поганий теплообмін.

## 2.2. Тензодатчики з фольги

Тензорезистор з фольги (рисунок 2.2) має схожий до елемента з дроту принцип роботи. Його ґратка виготовлена з константанової фольги товщина якої дорівнює 10 мкм. Рисунокґратки підбирають таким чином, щоб максимально зменшити відхилення поперечної деформації, показник якої в чутливих елементах із фольги вдається практично звести до нуля.

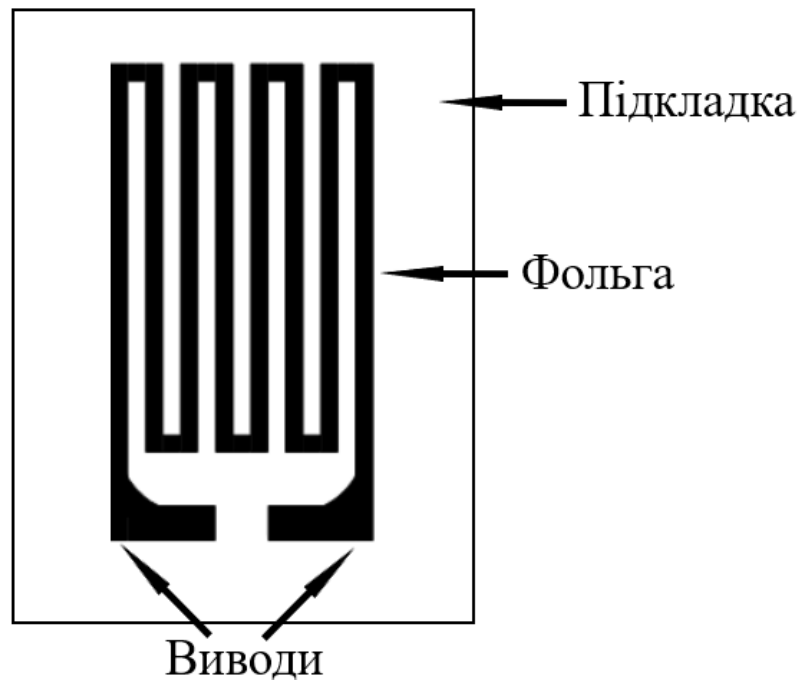


Рисунок 2.2 – Фольговий тензорезистор[14]

Тензорезистори з фольги пропускають струм більшої величини у порівнянні з конструкціями із дроту; це пов'язано з більшою площею провідника у поперечному перетині при збереженні однакових показників розміру резисторів та тепловіддачі, тому що ґратка примикає до деталі дослідження більшою поверхнею. Це робить умови обміну тепла кращими[13].

Переваги датчика із фольги:

- гарний теплообмін;
- краща чутливість порівняно з дротяними;
- компактність;
- лінійність.

Недоліки:

- гірша чутливість ніж у напівпровідникових;
- дороговизна виготовлення більша ніж у дротяних;
- нижча гранична температура ніж у дротяних.

### 2.3. Тензодатчики з напівпровідників

У 60-ті роки минулого століття виготовлення тензодатчиків суттєво просунулося. Цього вдалося досягти за рахунок розробки та випуску тензочувливих конструкцій напівпровідникового типу. Таблиця 2.1 демонструє головну перевагу цих конструкцій – високий показник коефіцієнту чутливості.

Слід зазначити, що електро-фізичні показники напівпровідників мають високу залежність від рівня легування та розташування монокристалів[5].

Матеріали на основі кремнію, демонструють набагато вищі значення завдяки п'єзорезистивному ефекту та мають коефіцієнт тензочувливості для монокристалічного кремнію 100, для полікристалічного кремнію 20–40 та 20–30 для аморфного кремнію. Можливість контролю їх питомого опору легуванням також є перевагою при розробці вимірюваних резисторів в обмеженому просторі. Кремнієві плівки можуть бути осаджені в аморфному або кристалізованому вигляді [15].

У кристалів  $GaP_xAs_{1-x}$  з нитковою формою показник чутливості  $K$  дорівнює 120, кристалів з формою стрічки –  $K = 62$ . При тому їх використовують в однаковому температурному інтервалі від 100 до 400°C.

Таблиця 2.1 – Показники тензо-чутливих конструкцій напівпровідників[5]

| Матеріал | Склад | $TKO \cdot 10^3, K^{-1}$ | $K$       |
|----------|-------|--------------------------|-----------|
| Кремній  | p-тип | 0,7-7                    | 100-170   |
| Кремній  | n-тип | 0,7-7                    | -(100-40) |
| Германій | p-тип | -                        | 102       |
| Германій | n-тип | -                        | -150      |

У резисторів з тонкої плівки Ge можна спостерігати показник  $K$ , що дорівнює 20-50 одиниць, але він сильно залежить від температурної величини підкладки при максимальному значенні  $t \cong 500^\circ C$  ( $K=40$ ). Було виявлено, що

параметр  $K$  має залежність як від  $t_{\text{п}}$ , так і від способу отримання плівки (рисунок 2.3). Через кореляцію параметру  $K$  з товщиною, при зниженні цього показника  $K$  має збільшуватись. Це підтверджують отримані при термічній обробці плівок Ge показники: при  $d \cong 100\text{-}200$  нм вдалося отримати  $K = -70$ [5].

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

Нагальну важливість чутливості ( $K=330$ ) можна спостерігати при вивченні монокристалів  $\text{TlInTe}_2$  з голковою формою. Тензорезистори цього типу мають температурну стійкість до  $180^\circ\text{C}$ , але їх перевагою є можливість функціонувати у режимах як статика, так і динаміки.

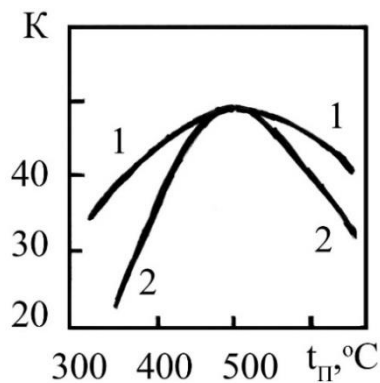


Рисунок 2.3 – Як коефіцієнт чутливості  $K$  залежить від  $t_{\text{п}}$ : 1 – при розпиленні іонно-плазмового типу; 2 – при термічній обробці; за показника товщини 0,6-2 мкм[5]

Їх також використовують у якості датчиків тиску. Але при цьому впливає на поверхню суттєвий недолік – електричний опір є нестабільним у часі та підпадає під температурний вплив. Що цікаво у напівпровідниках n-типу коефіцієнт тензочутливості від'ємний, а в напівпровідниках p-типу - додатний. Це пов'язано з типом провідності.

Їх можна зробити значно меншими відносно металевих, зберігаючи при цьому високий номінальний опір. Напівпровідникові тензодатчики мають в 30 разів більшу чутливість, ніж металеві, але також більш чутливі до температурних впливів. Проблемою є нелінійність деформації до зміни опору. Вони не так

широко використовуються, як більш стабільні пристрої з металевою плівкою; однак там, де важлива чутливість і коливання температури невеликі, вони можуть мати певну перевагу [14].

Переваги напівпровідникових:

- показник чутливості більше в 30 разів порівняно з чутливістю резисторів з дроту;
- значно менші розміри;
- рівня сигналу на виході часто достатньо для експлуатації без допомоги підсилювачів;
- велика зміна опору при деформації (до 50%).

Недоліки напівпровідникових:

- малий рівень механічної міцності та гнучкості;
- велика тензочутливість таких тензорезисторів дуже складна для реалізації, тому що має нелінійні властивості;
- високий рівень чутливості до зовнішніх впливів та суттєві відхилення показників від одного до іншого зразка.

## РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕНЗОДАТЧИКІВ

### 3.1. Вимірювання маси

Виробництво високоякісних тензодатчиків - це дуже важкий процес, який вимагає суворої основи технології виробництва, випробувального обладнання та багаторічного досвіду. Через це у світі порівняно небагато виробників якісних тензодатчиків.

Виробники можуть знизити витрати на виготовлення тензодатчиків завдяки роботизації процесу. Контроль якості на всіх етапах виробництва є однією з найважливіших складових створення якісного продукту [16].

Серед якісних виробників не менше 60% вартості тензодатчика витрачається на перевірку температурних і метрологічних властивостей.

Лише калька заводів у світі випускають тензодатчики з повним замкнутим циклом – від виробництва до складання. Більшість виробників закупають частину елементів в других підприємств, а потім збирають їх в одне ціле.

Застосування тензодатчику у якості ваг є найбільш типовим варіантом. Застосовують елементи різних видів, а їх конструкція залежить від типу платформи приймання вантажів [17]:

- балкова на зсувах;
- тензодатчики з s-подібною формою;
- різновид з однією точкою;
- балкова на зсув з двома опорами:
- стрижневого типу;
- мембранна (у формі шайби):
- тензодатчики цифрового типу;
- міні-сенсорні елементи.

Використання конструкцій певного типу датчика залежить від завдань, які поставлені перед ними, та системною, конструкцією, в яку вони будуть вбудовані.



Різновиди з однією точкою призначені для вимірювання невеликих навантажень. Їх використовують в процесі виготовлення платформних ваг, дозаторів, обладнання для фасування. Єдиний датчик розміщують на конструкції в центральній частині платформи (під нею).


Датчики консольного типу – це консольні балки, які перетворюють механічну деформацію зсуву. Цей тип здебільшого використовують в процесі виготовлення ваг для підлоги, які витримують навантаження не більше семи тонн.

Тензодатчики з s-подібною формою мають властивість перетворювати електричні сигнали у механічну силу стиснення або розтягування. Їх використовують в якості чутливого елемента підвісних бункерних ваг або ваг на крані. Такі конструкції комплектують підвісами на шарнірах, завдяки чому можна скоротити час їх монтажу та підготовки до експлуатації [17].

Датчики у формі циліндра використовують в багатотонних вагах, а саме вагонного, автомобільного, бункерного типів. Також вони можуть бути застосовані задля оновлення та покращення роботи ваг механічного типу.

Тензодатчики на розтяг конструюють для використання у промисловості зі складними умовами праці. Вони мають здібність перетворювати силу розтягування.

Таблиця 3.1 - Які існують тензодатчики та де їх використовують [17]

| Фотографія зовнішнього вигляду тензодатчика та його типу  | Сфера використання   |
|---|--|
| <p data-bbox="280 1688 874 1727">Тензодатчик маси типу “колона”</p>  | <p data-bbox="906 1688 1469 1854">Використовують для зваження елементів з вагою 20 тонн та більше.</p> <p data-bbox="906 1883 1469 1984">Вони виготовлені з нержавіючої сталі зі ступенем захисту IP-68.</p> |

|   |  |
|---|--|
|   | <p>Область використання: платформові, автомобільні та вагонні терези.</p>  |
| <p>Тензодатчик маси з “S-подібною” формою</p>      | <p>Використовують для виміру масиємностей або конструктивних елементів, що знаходяться у стані підвішення, для обчислення розтяжних зусиль.</p> <p>Область використання: підвісні та бункерні ваги, дозатори маси.</p>   |
| <p>Тензодатчик маси різновиду “Одноточкови”</p>  | <p>Використовують в платформних вагах для перевірки великих навантажень. Конструкція цих датчиків дає змогу застосовувати їх для створення терезів лише за рахунок одного датчика.</p> <p>Область використання: товарні, платформні, монорейкові, бункерні терези та дозатори.</p> |
| <p>Тензодатчики маси типу "балка зрізу"</p>      | <p>Тензодатчики маси типу "Балка" застосовуються в платформних терезах від 300 кг до 10 т, для зважування ємностей і бункерів.</p> <p>Область застосування: платформні, монорейкові, конвеєрні та бункерні терези, а також дозатори.</p>   |
| <p>Тензодатчик ваги різновиду “двостороння балка зрізу”</p>   | <p>За рахунок конструктивних особливостей можуть бути</p>  |

|   |   |
|---|---|
|  | <p>використані для обчислення значних навантажень, більших ніж для датчиків типу “балка”</p> <p>Область використання: платформні, монорейкові, конвеєрні та бункерні терези (від 10 тонн), також використовують на дозаторах.</p> |
|---|---|

Високотемпературні датчики допомагають вимірювати масу в умовах підвищених температурних показників. Такі тензодатчики можуть бути встановлені на пристрої підприємств металургійної та інших сфер промисловості, де мають місце джерела підвищеної температури.

При агресивних умовах використання краще застосовувати датчики з нержавіючої сталі. Вони мають високий рівень популярності у харчовій, хімічній та нафтохімічній сферах важкої промисловості.

### 3.2. Вимірювання тиску

Тиск – це один з найважливіших параметрів у фізиці, який необхідний для того, щоб визначити витрати, об’єм речовини, прогнозувати безпечність та продуктивність режимів гідравліки роботи напірних трубопроводів, а також для того, щоб застосуватися в автоматизованих системах з перетворювачами частот із автоматичними регуляторами, що вбудовані в замкнутий контур управління для зміни обертів насосів з електричним приладом [18].

Тиск - це сила, яка прикладена рідиною або газом до поверхні, одиниця вимірювання величини – це Паскаль (Па), Бар (бар), Н/мм<sup>2</sup>.



Рисунок 3.1 – Датчик тиску [18]

#### Види вимірювань тиску

Існують деякі властивості, які використовуються для того, щоб класифікувати сенсори тиску по таким параметрам, як діапазон тиску, що вимірюється, діапазони робочих температур або тип тиску, що вимірюється.

За типом тиску, що вимірюється, сенсори можна поділити на:

- Сенсори абсолютного тиску, які можуть виміряти тиск відносно еталонної камери, яка дорівнюється вакууму.
- Сенсори манометричного тиску – або сенсори відносного тиску – їх використовують для того, щоб виміряти тиск відносно поточного атмосферного тиску.
- Герметичні сенсори, які дуже схожі на сенсори манометричного тиску, але за їх допомогою вимірюється тиск відносно зафіксованого тиску, а не атмосферного.
- Сенсори диференціального тиску використовуються для визначення різниці між двома тисками та перепадів тиску [18].

Сенсор абсолютного тиску відрізняється тим, що він завжди вимірює один і той самий еталонний параметр (рівний вакууму) і, отже, на нього не впливають зовнішні ефекти.

Тензодатчик має принцип роботи, який засновується на явищі тензоефекта в матеріалах. Вони працюють за таким же принципом, як і перетворювачі сили. Первинний вимірювальний перетворювач – це мембрана з тензорезисторами, яка з'єднується зі схемою. Під дією тиску вимірюваного середовища чутливий елемент прогинається та змінює свій опір, що є причиною розбалансування моста Уїтстона. Цей ефект лінійно залежить від того, наскільки сильно деформувався резистор і, отже, від прикладеного тиску.

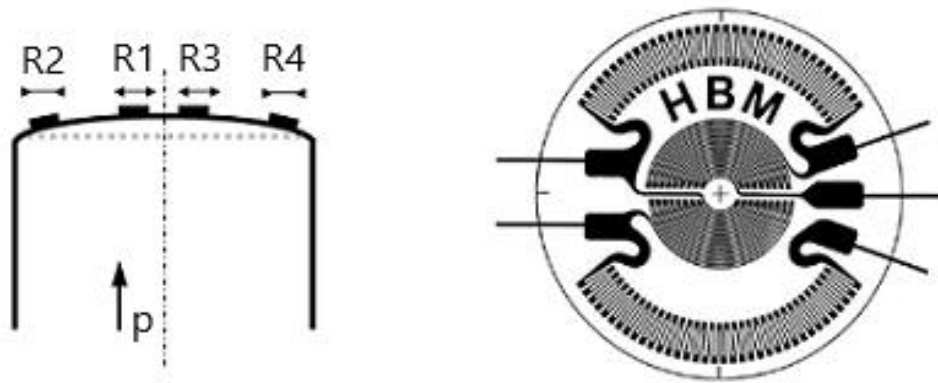


Рисунок 3.2 – Розташування тензодатчиків на мембрані та форма тензодатчика тиску [18]

В ідеалі тензодатчики встановлюються в зоні найбільшої позитивної та негативної деформації або напруження для отримання максимально можливої чутливості ДТ. Оскільки точний градієнт деформації та розподіл деформацій у вимірювальному корпусі відомі на етапі проектування перетворювача тиску, форму, положення та його розміри можна оптимізувати [18].

Чотири тензосенсори, вбудовані на вимірювальному корпусі, з'єднуються з мостом Уїтстона. Масштабний вимірювальний перетворювач є предметом живлення тензодатчика напругою збудження, а також отримання та обробки вихідного сигналу схеми мосту, щоб дозволяє робити видимими зміни опору сенсору. Вимірювальний сигнал, що отримується, можна обробляти стандартним вимірювальним перетворювачем. Також для якісної візуалізації сигналу можна використати підсилювач із високою точністю.

Залежно від мети тензодатчик для вимірювання тиску може виготовлятися із різних матеріалів. Для вимірювання великих значення тиску (до 15000 бар) чи при високій температурі використовують дротяні чи фольгові тензодатчики. Для вимірювання малих показників тиску (до 1000 бар) краще використати тензодатчик на основі напівпровідникових матеріалів.

## ВИСНОВКИ

1. У ході виконання кваліфікаційної роботи були вивчені фізичні основи тензометрії і було встановлено, що у рамках класичної теорії можна зробити висновок про два фактори – внутрішній та геометричний, - які дають основний внесок у величину коефіцієнта тензочутливості; перший із них ( $dln\rho/dlnl$ ) пов'язаний із електронними властивостями чутливого елемента, а другий із змінами геометричних розмірів датчика при деформації.

2. Здійснено аналіз основних параметрів тензодатчиків із металевим або напівпровідниковим чутливим елементом:

– термічні коефіцієнти опору для металевих тензорезисторів мають величину в діапазоні  $10^{-4}$ – $10^{-3}\text{K}^{-1}$ , а у напівпровідникових у діапазоні  $7\cdot 10^{-4}$  –  $7\cdot 10^{-2}\text{K}^{-1}$ ;

– коефіцієнти тензочутливості у металевих тензорезисторах мають величину від 1 до 50 одиниць, а в напівпровідникових – від 2 до  $3\cdot 10^3$  одиниць, але у першому випадку тензодатчики мають більшу термічну стабільність.

3. Установлено, що при вимірюваннях із відносно малою точністю, але із великим терміном експлуатації, перевага віддається металевим чутливим елементам, в той час при вимірюванні мінімальних деформацій із високою точністю перевага віддається напівпровідниковим датчикам.

4. Вивчені можливі схеми підключення датчиків; розглянуті приклади їх застосування при вимірюванні маси або тиску.

## 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. <https://hi-news.pp.ua/tehnka-tehnologyi/10814-tenzometrichniy-datchik-vidi-princip-roboti-pristryi.html> Тензометричний датчик: види, принцип роботи і пристрій. Дата доступу 11.06.2022
7. <https://samelectryk.in.ua/електрообладнання/реле,-контактори,-датчики/451-що-таке-тензодатчик-і-як-він-працює.html> Що таке тензодатчик і як він працює. Дата доступу 11.06.2022
8. <https://www.continuummechanics.org/straingauges.html> Straingauges. Дата доступу 11.06.2022
9. <https://www.omega.com/en-us/resources/wheatstone-bridge> Wheatstonebridgeforstraingages. Дата доступу 11.06.2022



10. <https://slv.thehouseofchronic.com/4278263-strain-gauges-description-instructions-for-use-specifications-and-reviews> Merilnili: opis, navodilazauporabo, tehničnekarakteristikeinocena. Дата доступу 11.06.2022
11. 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.
12. 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.
13. Васюра А.С. Елементи та пристрої систем управління і автоматики.- Вінниця: Вид-во ВДТУ, 1999.- 157с.
14. <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Practical-Design-Techniques-Sensor-Signal/Section4.PDF> Strain, force, pressureandflowmeasurements. Дата доступу 11.06.2022
15. CastroaF. G., SagazanaO., CoulonaN., CorberaA. H.,Fassini D., Cramer J., BihanaF. L.μ-Si strain gauge array on flexible substrate for dynamic pressure measurement // Sensors and Actuators A: Physical. - Univ Rennes, CNRS. – 2020. – V. 315. - P. 112–120.
16. <https://zemic.com.ua/news-and-articles/mifi-pro-tenzometriczni-datchiki> Міфи про тензометричні датчики. Дата доступу 11.06.2022
17. <https://unipro.com.ua/ua/typy-tenzodatchykiv--sfera-zastosuvannya-tenzodatchykiv/> Типи тензодатчиків, сфера застосування тензодатчиків. Дата доступу 11.06.2022
18. <https://www.hbm.com/es/7646/que-es-un-sensor-de-presion/> Що таке датчик тиску ? Дата доступу 14.06.2022