

## **Лекція 14. Вимірювання деформації поверхні досліджуваного об'єкта та сили.**

Найпоширенішим методом вимірювання деформацій є так званий тензометричний метод, у якому як первинні перетворювачі деформації використовують тензорезистори (розділ 2). Металеві тензорезистори використовують при вимірюванні відносних деформацій від 0,002 до 1...2%, напівпровідникові – до 0,1...0,2%.

Тензорезистори можуть використовуватися для вимірювань статичних та змінних деформацій у діапазоні частот до 100 кГц.

Для вимірювання деформацій тензорезистор наклеюють на досліджувану деталь так, щоб деформація дедалі повністю сприймалась тензорезистором. Для температур до 200°C застосовують клеї БФ, бакелітовий лак, а для вищих температур – жаростійкі кремнійорганічні цементи. Особливістю приклеюваних тензорезисторів є те, що вони не можуть бути переклеєні з об'єкта на об'єкт. Тому дійсна функція перетворення робочого тензорезистора не може бути визначена, а для її оцінки використовують функцію перетворення градуовального тензорезистора з цієї партії.

Похибка від неідентичності дійсної та номінальної функції перетворення з достатньо однорідної партії не перевищує 1,5%.

Вихідним параметром тензорезисторів є зміна їхнього опору пропорційно вимірюваній деформації, тому в якості вимірювальної схеми тензоперетворювачів застосовуються мостові схеми з живленням змінним або постійним струмом. Коливання навколишньої температури викликає зміну опору тензорезистора.

Через те, що відносна зміна опору тензорезистора під дією вимірюваної деформації дуже мала (менше 1%), то температурні зміни його опору можуть призвести до значних похибок.

Для усунення цієї температурної похибки використовують мостову схему із двома тензорезисторами  $R_{T_1}$  і  $R_{T_2}$  (рис. 4.29), один із яких є робочим, а інший – термокомпенсуючим.

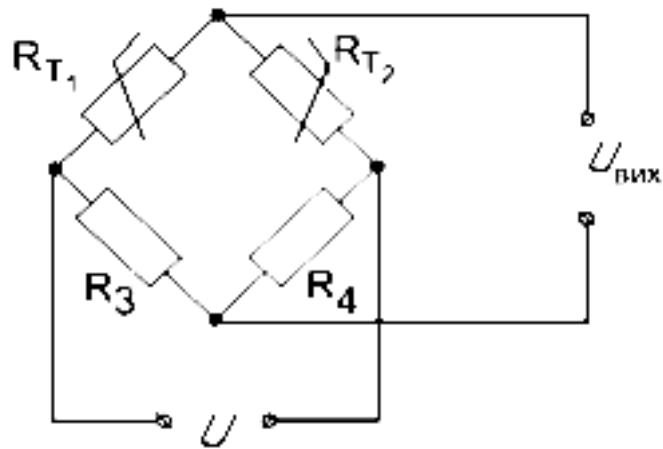


Рис. 4.29

Робочий тензорезистор наклеюють на досліджувану деталь уздовж очікуваної деформації, а компенсаційний – поперек її.

Температурні умови й температурні зміни опорів тензорезисторів повинні бути однаковими. Тензорезистори включаються в суміжні плечі моста, і це компенсує температурну похибку.

Якщо опір навантаження досить великий (режим холостого ходу), то вихідна напруга моста

$$U_{\text{вих}} = \frac{UR_{T_1}}{R_{T_1} + R_{T_2}} - \frac{UR_3}{R_3 + R_4} \quad (4.108)$$

При відсутності деформації  $R_{T_1} = R_{T_2}$  і якщо  $R_3 = R_4$  то, міст буде зрівноважений, а  $U_{вих} = 0$ .

При деформації тензорезисторів, коли  $R_{T_1} \neq R_{T_2}$ , вихідна напруга

$$U_{вих} = \frac{U(R_{T_1} - R_{T_2})}{2(R_{T_1} + R_{T_2})},$$

(4.109)

Отже, вихідна напруга моста змінюється пропорційно різниці опорів тензорезисторів. Якщо елементи мостової схеми обрані оптимальними, то її чутливість може бути підвищена лише за рахунок збільшення тензочутливості перетворювача і за рахунок збільшення сили струму, що протікає через перетворювач. Однак збільшення струму через перетворювач обмежено його теплорозсіюючою здатністю. Тому для збільшення чутливості в мостову схему включають чотири однакових тензорезистори, що наклеюють на досліджувану деталь так, що тензорезистори  $R_{T_1}$  і  $R_{T_3}$  (рис. 4.30) перетворюють поздовжню деформацію, а  $R_{T_2}$  і  $R_{T_4}$  – поперечну. У мостовій схемі температурна похибка буде також компенсуватися.

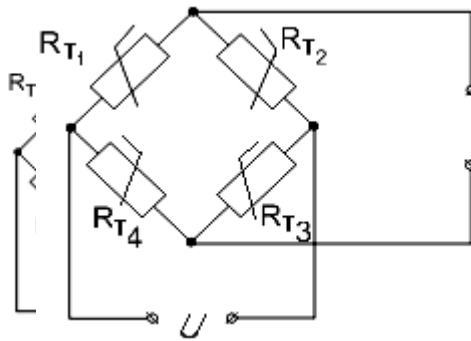


Рис. 4.30

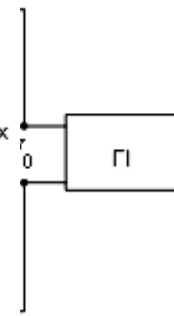


Рис. 4.31

Чутливість схеми може бути підвищена також за рахунок застосування імпульсного живлення. У цьому випадку чутливість збільшується в десятки разів шляхом підвищення напруги живлення вимірювального кола моста без порушення нормального режиму роботи тензоперетворювача. Застосування імпульсного живлення дозволяє на виході моста одержати прямокутні імпульси напруги (струму), амплітуда яких пропорційна різниці значень опорів тензорезисторів, що змінюються. Отримані імпульси можуть бути перетворені в цифровий код за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

На рис. 4.31 зображена структурна схема тензометричного вимірювального перетворювача при живленні моста  $R_{T1}$ ,  $R_{T2}$ ,  $R_{T3}$ ,  $R_{T4}$  прямокутними імпульсами струму від генератора імпульсів ГІ. Одночасно від генератора ГІ прямокутні імпульси опорної напруги  $U_0$  надходять на вхід АЦП, де вони порівнюються з напругою небалансу мостової схеми  $\Delta U_x$ .

Вихідний цифровий код АЦП пропорційний відношенню сигналів  $\Delta U_x$  й  $U_0$  та не залежить від параметрів імпульсів живлення  $U_0$ .

#### 4.4. Вимірювання механічних сил

Переважає більшість силовимірювальних пристроїв (динамометрів) заснована на методі перетворення вимірюваної сили в механічні напруження у матеріалі пружного перетворювального елемента, його деформацію, або переміщення, які за допомогою п'єзоелектричних, тензорезистивних, індуктивних, ємнісних чи інших перетворювачів, перетворюються в електричний сигнал, або зміну вихідного електричного параметра.

Перетворення вимірюваної сили в переміщення здійснюється за допомогою пружних елементів, деформація яких залежить від величини вимірюваної сили. В нинішній час розроблено велику кількість пружних елементів, що дозволяють вимірювати сили від  $10^{-3}$  до  $10^5$  Н (рис. 4.32).

Для вимірювання зосереджених великих сил  $F$  використовують пружні елементи у вигляді стержнів (рис. 4.32,*a*). Недоліком стержневих пружних елементів є дуже малі вихідні переміщення (деформації), тому вони використовуються лише з тензорезистивними перетворювачами.

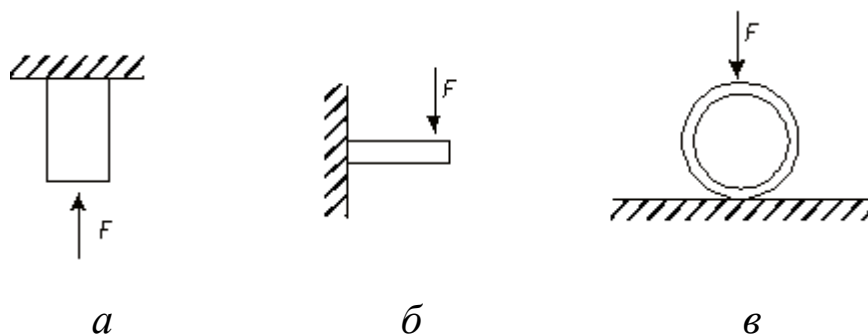


Рис. 4.32

Найчутливішими до дії сил є балкові пружні елементи (рис. 4.32,б) та кільцеві пружні елементи (рис. 4.32,в).

Вони мають великі вихідні переміщення, що дає змогу використовувати їх у ємнісних та індуктивних датчиках.

Пружні елементи виконують таким чином, щоб їхні характеристики перетворення наближалися до лінійних. Чутливість пружних елементів визначається величиною їхньої жорсткості.

$$F = k_{жс} \cdot \delta$$

(4.110)

де  $k_{жс}$  – жорсткість пружного елемента;  $\delta$  – величина деформації пружного елемента;  $F$  – вимірювана сила

Похибки пружних елементів обумовлені старінням матеріалу пружного елемента, механічним гістерезисом, залежністю модуля пружності від температури.

Для безпосереднього вимірювання сили можуть застосовуватися магнітопружні та п'єзоелектричні перетворювачі. Принципи дії і властивості цих перетворювачів розглянуті вище, в розділі 2.

Один з можливих типів магнітопружного перетворювача зображений на рис. 4.33,а. Він являє собою феромагнітне осердя з обмоткою. Під дією вимірюваної сили  $F$  у матеріалі осердя виникає механічна напруга, що змінює його магнітну проникність, що у свою чергу, приводить до зміни магнітного опору осердя, а також до зміни індуктивності обмотки.

На рис. 4.33,б зображений магнітопружний перетворювач з двома обмотками. Такий перетворювач є трансформаторним. Вимірювана сила  $F$  перетворюється в механічну напругу осердя, що приводить до зміни його магнітної проникності. В результаті цього змінюється взаємна індуктивність між обмотками і ЕРС вторинної обмотки.

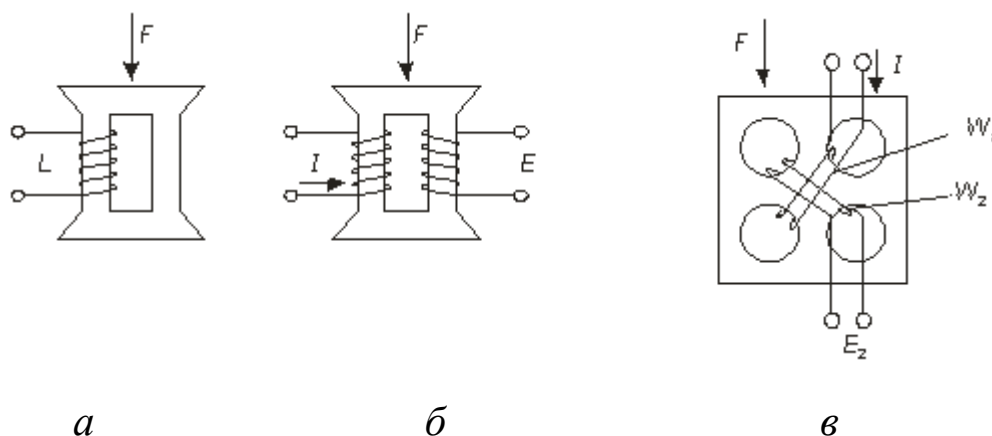


Рис. 4.33

Кращі метрологічні характеристики має магнітоанізотропний трансформаторний перетворювач (рис. 4.33,в).

Магнітопровід такого перетворювача має вигляд куба, що має чотири отвори. В отворах вкладено обмотку живлення  $W_1$  і вимірювальна у обмотку  $W_2$ . Вони розташовані під кутом  $45^\circ$  до напрямку дії вимірюваної сили  $F$  і під кутом  $90^\circ$  одна до одної. За відсутності сили  $F$  магнітопровід такого перетворювача буде магнітоізотропним, тобто його магнітна проникність є однаковою у всіх напрямках. У цьому випадку магнітне поле, створюване обмоткою живлення  $W_1$ , спрямоване паралельно виткам вимірювальної обмотки  $W_2$  і не заходить у неї. У вимірювальній обмотці ЕРС не індукується.

Під впливом вимірюваної сили  $F$  у магнітопроводі виникає механічна напруга, що змінює магнітну проникність магнітопроводу

в напрямку цієї напруги. Це змінює магнітний опір матеріалу в тому самому напрямку. Магнітний потік у магнітопроводі змінює свій напрямок, пронизує вимірювальну обмотку  $W_2$ , індукуючи в ній ЕРС  $E_2$ , пропорційну вимірюваній силі.

На похибку магнітопружних перетворювачів впливає нелінійність їхньої характеристики перетворення, вплив магнітного і механічного гістерезису, старіння матеріалу магнітопроводу.

При зміні температури змінюються магнітна проникність магнітопроводу і електричний опір обмоток, а це призводить до збільшення похибок перетворення.

Для зменшення похибок магнітопружні перетворювачі виготовляють диференціальними. Один з перетворювачів є робочим, а ідентичний йому другий перетворювач, на який не впливає вимірювана сила, призначений для компенсації впливу температури, зміни напруги живлення тощо.

Магнітопружні перетворювачі мають низьку точність (сума похибок вимірювання сили становить  $\approx 3\%$ ), і вони широко використовуються для вимірювання великих сил ( $10^5 \dots 10^6$  Н). Їхня перевага – простота конструкції, надійність в роботі.

П'єзоелектричні динамометри засновані на використанні п'єзоелектричних перетворювачів сили в електричний заряд. Дія п'єзоелектричного перетворювача заснована на прямому п'єзоелектричному ефекті, що полягає на властивості деяких кристалів (п'єзоелектриків) перетворювати механічні деформації в пропорційні їм електричні заряди на їхніх гранях. П'єзоелектрик являє собою пластинку, вирізану із кри-



стала кварцу, на гранях якої є два ізольованих один від одного електроди.

На рис. 4.34 зображений п'єзоелектричний перетворювач сили типу ДТ. Як чутливий елемент у перетворювачі застосовані дві кварцові пластини 1, розміщені в сталевому пружному корпусі 2. Зовнішні грані пластин з'єднані електрично з корпусом, а внутрішні з'єднані між собою паралельно і вони ізольовані від корпусу самим кварцом. Заряд із пластини знімається за допомогою виводу 3 через коаксіальний кабель 4.

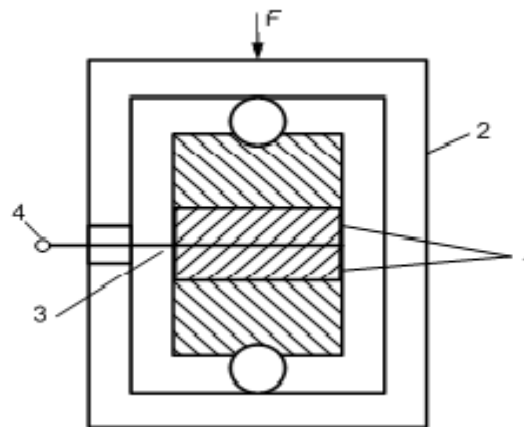


Рис. 4.34

Вимірювана сила  $F$  прикладається до корпусу перетворювача. Діапазон перетворюваних зусиль дорівнює  $0 \dots 2 \cdot 10^5$  Н. Нелінійність статичної характеристики коливається в межах  $1 \dots 3\%$ .

Особливістю п'єзоперетворювачів є дуже маленька вихідна потужність і великий внутрішній опір.

Для посилення вихідної напруги п'єзоелектричного перетворювача застосовують операційні підсилювачі з максимально можливим вхідним опором (не менше  $10^{11}$  Ом).

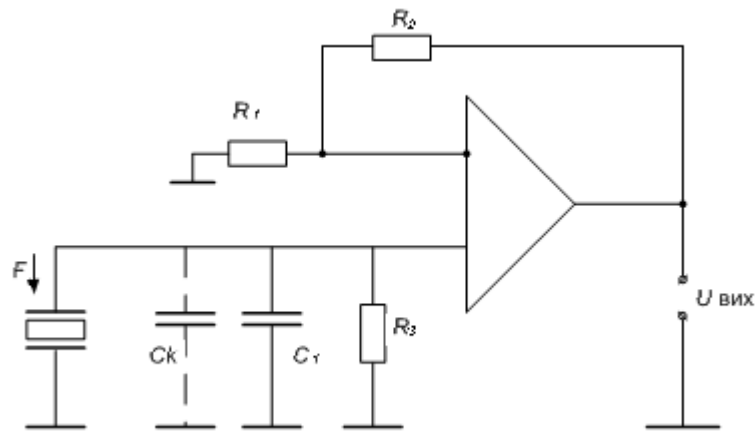


Рис. 4.35

На рис. 4.35 наведена електрична схема вимірювального кола п'єзоелектричних перетворювачів, де  $C_k$  – паразитна ємність екранованого кабелю. Нестабільність параметрів кабелю, наприклад зміна електричної ємності  $C_k$ , викликана його вигином, впливом температури, вологості, впливає на вихідну напругу. Для зменшення цього впливу паралельно до входу підсилювача підключається ємність  $C_1$ .

Перевагою п'єзодинамометрів є їхня висока чутливість, висока швидкодія. Загальна похибка п'єзодинамометрів перебуває в межах 1%.