

## Практична робота №2

### Тема: «Дослідження тензометричного вимірювального перетворювача та розрахунок його параметрів»

**Мета роботи:** вивчити принцип роботи, спосіб ввімкнення та виконати розрахунки дротяного тензометричного вимірювального перетворювача.

#### 2. 1 Теоретичні відомості

*Тензометричний вимірювальний перетворювач* – це параметричний резистивний перетворювач, який перетворює деформацію твердого тіла, викликану прикладеною до нього механічною напругою, в електричний сигнал. Тензометричні перетворювачі ґрунтуються на використанні зміни електричного опору провідних матеріалів (металів і напівпровідників) при розтягуванні та стисканні їх у межах пружних деформацій.

У практиці вимірювальних перетворювачів тензоефект застосовується у двох напрямках:

– використання тензоефекту тензочутливого матеріалу, який *об'ємно* розтягується або стискається. Вхідна величина такого перетворювача – тиск газу або рідини, що його оточують. На цьому принципі будуються перетворювачі високих і надвисоких тисків, які виготовляють у вигляді безкаркасної обмотки, намотаної зазвичай з манганінового дроту. Перетворювачами низьких тисків є германієвий або кремнієвий тензорезистор;

– використання тензоефекту тензочутливого матеріалу, який *лінійно* розтягується або стискається. Перетворювачі цієї групи можуть бути виконані у вигляді *наклеюваних дротяних, фольгових, пліткових або так званих вільних* (навісних) ТП. Їх використовують для вимірювання малих переміщень, деформацій або зусиль, які спричинюють деформацію деталей.

*Переваги ТП:*

- малі маса і габаритні розміри;
- можливість вимірювати сталі та змінні деформації;

- можливість розміщувати їх у важкодоступних місцях;
- простота конструкції і дешевизна виконання.

*Основні недоліки ТП:*

- наявність поперечної тензочутливості для дротяних ТП, яка становить 0,25–1% (у фольгових і ненаклеюваних ТП вона практично відсутня);
- мала потужність вихідного сигналу ТП.

Клас точності вимірювальних пристроїв з ТП лежить у межах 0,2–1,5%.

Найчастіше застосовуються в промисловості такі різновиди ТП:

- провідникові (дротяні та фольгові) - найпоширеніші;
- напівпровідникові;
- плівкові.

*Дротяні ТП*

Дротяні ТП у загальному випадку представляють собою ряд петель тонкого тензочутливого дроту 1 (решітку) (число петель від 2 до 80) діаметром 0,01...0,05 мм з високоомного сплаву, наклеєних на ізоляційну підкладку (паперову прокладку) 2 і згори заклеєних також ізоляційною підкладкою (захисним папером).

Для зміцнення місця закріплення вивідних кінців згори та знизу ТП приклеюють смужки паперу і роблять розвантажувальну петлю (рис. 2.1).

До кінців дроту приєднані паянням або зварюванням виводи 3 із мідного проводу.

Опір таких ТП дорівнює 20...500 Ом.

*Найчастіше для дротяних ТП застосовують такі матеріали: константан, ніхром, манганін, вісмут. Проте, найпоширенішими у вітчизняній тензометрії є ТП із спеціального константанового дроту діаметром 0,025...0,035 мм.*

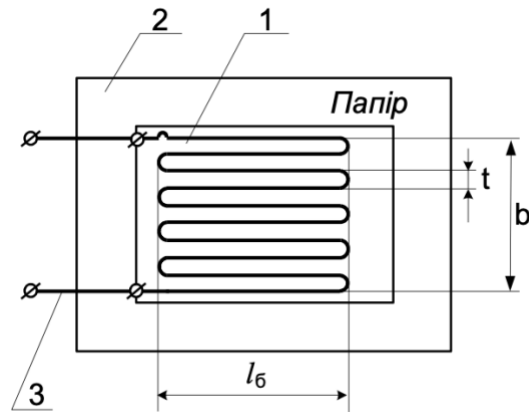


Рисунок 2.1 - Конструкція наклеюваного дротяного тензоперетворювача ( $b$  – ширина решітки;  $l_б$  – довжина петлі або база ТП;  $l_б=5...25$  мм;  $t$  – ширина петлі або крок петлі;  $t \geq 2d=0,8...10$  мм;  $d$  – діаметр дроту ТП)

Електроізоляційні підкладки, між якими розміщують дріт ТП, виконують із цигаркового паперу, лакової плівки або цементу, скріплених між собою клеєм, лаком або цементом. Перетворювачі називають відповідно паперовими, лаковими або цементними.

Щоб отримати ТП з малою базою (1...3 мм), їх роблять двошаровими і виготовляють намотуванням тензочутливого дроту 1 на трубчастий паперовий каркас 2, який після проклеювання розплющується і наклеюється на підкладку 3 (рис 2.2).

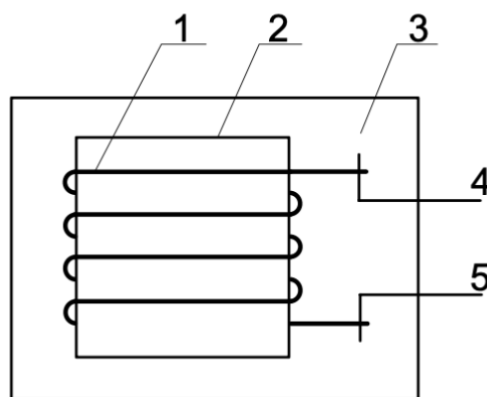


Рисунок 2.2 - Конструкція двошарового наклеюваного тензоперетворювача: 1 - тензочутливий дріт; 2 - трубчастий паперовий каркас, який після проклеювання розплющується і наклеюється на підкладку 3; 4,5 – вивідні провідники

До якості клею ставлять найвищі вимоги, оскільки найдрібніші бульбашки

повітря в шарі клею різко зменшують чутливість ТП відносно розрахункового значення.

В якості клеючих речовини залежно від умов роботи використовують різноманітні клеї та цементи:

– за умов нормальних температур – ацетатно-целулоїдні та бакелітові клеї, клеї на основі органічних смол, кремненітрогліфталеві клеї тощо;

– за умов підвищених температур (до 700...800°C) – кремнійорганічні цементи та спеціальні цементи на основі рідкого скла або полісилоксани з різними наповнювачами.

Дротяний ТП реагує лише на складову вхідного сигналу деформації вздовж петель.

Ця властивість використовується для визначення напрямку деформації за її складовими, які вимірюються за допомогою двох датчиків, наклеєних поруч, але із взаємно перпендикулярним розміщенням петель.

*Особливість наклеюваних ТП* полягає в тому, що це перетворювачі разової дії, тобто вони не можуть бути переклеєні з об'єкта на об'єкт.

## **2.2 Методика розрахунку тензометричного вимірювального перетворювача**

*Основні етапи розрахунку:*

- вибір конструкції, матеріалу;
- розрахунок геометричних розмірів;
- розрахунок чутливості та похибки.

Вихідними даними для розрахунку є вимоги технічного завдання (ТЗ) на розробку ТП.

Згідно з вимогами ТЗ конструкцію і матеріал ТП вибирають, зважаючи на межі вимірювання, умови встановлення ТП на об'єкті вимірювання (матеріал об'єкта вимірювання, розміри, кривизна та стан місця під встановлення ТП, можливість виконання термообробки), температурний діапазон роботи і точність. Частіше застосовують дротяні ТП, оскільки вони забезпечують вимірювання деформації в широких амплітудному і температурному діапазонах з достатньою точністю. Якщо вимірювання виконують при від'ємних

температурах, перевагу надають плівковим (лаковим) ТП, при високих температурах – цементним.

Малі деформації у вузькому температурному діапазоні вимірюють за допомогою напівпровідникових ТП завдяки їх високій чутливості.

Для розрахунку геометричних розмірів ТП визначальними є вимоги щодо живлення вимірювального кола.

Допустимий струм живлення наклеюваного дротяного ТП може бути розрахований за формулою:

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{7,3 \cdot 10^{10} \cdot d^3}, \quad (2.1)$$

де  $d$  – діаметр дроту, м (вибирають мінімально можливим).

Для плівкових і фольгових ТП допустимий струм  $I_{\text{доп}}$  значно більший, оскільки в цих ТП умови охолодження кращі, ніж в дротяних. Величина  $I_{\text{доп}}$  цих ТП залежить від співвідношення ширини  $m$  до товщини  $z$  смужки ТП. Так, при співвідношенні  $m/z=10$ ,  $I_{\text{доп}}=1,4 I_{\text{доп}}$  дротяного ТП того ж самого перерізу. При  $m/z=40$   $I_{\text{доп}}=1,95 I_{\text{доп}}$ .

Допустимий струм напівпровідникових ТП можна брати таким, що дорівнює допустимому струму фольгових ТП, а вільних ТП – в 1,5 рази нижчий, ніж наклеюваних.

За даною напругою живлення і залежно від вибраного вимірювального кола обчислюють опір ТП.

Базу і ширину дротяного ТП визначають з таких передумов.

Для зменшення габаритних розмірів датчика потрібно зменшувати базу тензорезистора. Проте при заданому опорі в матеріалі ТП це спричинює збільшення ширини і все більша частина дроту виявляється неробочою, через що знижується коефіцієнт чутливості. Тому відношення розміру бази  $l_0$ , ТП до його ширини  $b$  має бути в межах 2...5, тобто:

$$l_0/b = n = 2 \dots 5, \quad (2.2)$$

Зменшити ширину ТП можна за рахунок скорочення відстані між окремими дротами. Проте надмірне зменшення цієї відстані спричиняє

температурний вплив одного боку петлі ТП на другий, що потребує зниження допустимого струму,  $i$ , крім того, обмежене технологічними можливостями намотки ТП. Крок намотки  $t \gg 2l$ . Практично відстань між витками вибирають у 10...20 раз більшою за діаметр дроту.

Враховуючи, що відношення розміру бази ТП до його ширини  $n=l_0/b$ , знаходимо число витків ТП:

$$W = \frac{l}{2l_0} = \frac{l}{2b \cdot n}, \quad (2.3)$$

де  $l = \pi R d^2 / 4 \rho$  довжина тензодроту;

$R$  – опір ТП;

$d$  – діаметр дроту;

$\rho$  – питомий опір ТП.

Ширина ТП може бути виражена через число витків та крок намотки:

$$b = (2W - 1)t.$$

Динамічні властивості ТП визначаються динамічними властивостями об'єкта вимірювання, верхня гранична частота вимірювання деформації ТП становить 100 кГц; амплітудний діапазон ТП визначається межею міцності тензочутливого матеріалу і для найпоширеніших дротяних ТП на паперовій основі, плівкових та фольгових ТП становить 0,005–2%.

Потужність, яка розвивається в ТП, дорівнює:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (2.4)$$

Питома площа поверхні охолодження не повинна бути нижчою за норму  $\delta \geq \delta_{\text{доп}}$ , яка для ТП, наклеєних на метал, приблизно дорівнює 2 см/Вт, а для ТП, наклеєних на пластмасу, – 5 см/Вт.

Оскільки площа поверхні охолодження  $S = (2bl_0)4$ , для чотирьох тензодатчиків мостової схеми, мають виконуватися умови:

$$\sigma = \frac{S}{P} \geq \sigma_{\text{доп}}, \quad (2.5)$$

$$\frac{8b \cdot l_6}{U^2/R} \geq \sigma_{\text{доп}}, \quad (2.6)$$

$$8b \cdot l_6 \cdot R \geq \sigma_{\text{доп}} \cdot U^2, \quad (2.7)$$

$$U \leq \sqrt{\frac{8b \cdot l_6 \cdot R}{\sigma_{\text{доп}}}},$$

Похибка ТП характеризується такими складовими: повзучістю, гістерезисом, нелінійністю, температурною похибкою нуля та чутливості, похибкою від розкиду тензочутливості тощо.

Основна похибка вимірювального кола  $\delta_K$  може бути значно меншою і зумовлена в основному стабільністю й точністю напруги живлення  $\delta_T$  та елементів вимірювального кола. Формулу для розрахунку основної похибки ТП можна подати у вигляді:

$$\delta = \sqrt{\delta_T^2 + \delta_K^2}, \quad (2.8)$$

Найважливіші характеристики ТП – чутливість, основна похибка, напруга живлення, опір.

Тензометричні перетворювачі вмикаються за мостовою схемою в одне, два або чотири плеча. При цьому в два протилежних плеча вмикаються перетворювачі, що реагують на одну й ту ж саму деформацію (наприклад, розміщені поруч), а в два інших плеча – ті, що реагують на ту ж саму

деформацію, але протилежного знака (наприклад, розміщені з іншого боку пластини, що згинається). Міст з двома, чотирма ТП має чутливість відповідно у 2 і 4 рази більшу, ніж міст з одним ТП.

Для компенсації температурної похибки ТП використовують, наприклад, такий спосіб. Два однакових перетворювачі розміщують на місці вимірювання (один – на деталі, що деформується, другий – на деталі, яка не зазнає деформації) і вмикають їх як два суміжні плеча мостової схеми.

Тоді прирости опорів ТП за рахунок температури однакові в обох плечах мосту і не впливають на результат вимірювання.

Мостову схему ввімкнення ТП зображено на рис. 2.3.

Із чотирьох відібраних тензоперетворювачів у плечі  $r_1$  та  $r_3$  вмикаються перетворювачі з найбільшим опором. Тоді за допомогою змінного резистора, який ввімкнено в плече  $r_4$ , і який має опір одного порядку з розкидом значень перетворювачів  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  та  $r_4$ , можна встановити міст у стан рівноваги за відсутності деформації. За наявності деформації на виході у режимі холостого ходу буде напруга:

$$U_{вих} = U \frac{r_1 r_3 - r_2 r_4}{(r_2 + r_3)(r_1 + r_4)}, \quad (2.9)$$

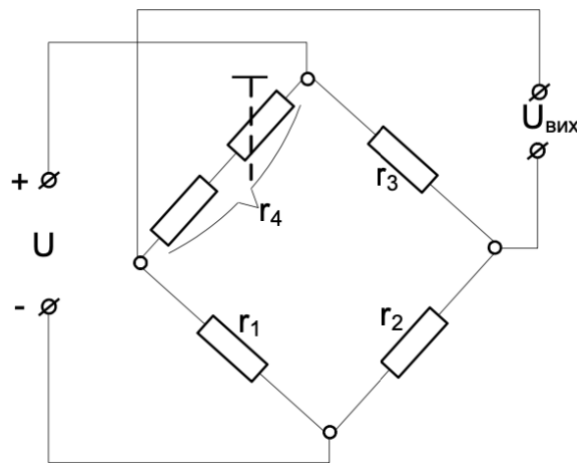


Рисунок 2.3 - Мостова схема ввімкнення тензоперетворювачів

У разі одного активного ТП, увімкненого в плече  $r_1$ ,

$$r_1 = r_D \text{ та } r_2 = r_3 = r_4 = r_0$$

$$U_{вих} = U \frac{r_D - r_0}{2(r_D + r_0)}, \quad (2.10)$$

У разі двох активних ТП, увімкнених в плечі  $r_1$  і  $r_3$ :

$$r_1 = r_3 = r_D,$$

$$r_2 = r_4 = r_0$$

$$U_{вих} = U \frac{r_D - r_0}{r_D + r_0}, \quad (2.11)$$



У разі чотирьох активних ТП  $r_1=r_3=r_{д1}$  та  $r_2=r_4=r_{д2}$  (якщо наклеюємо два ТП згори, а два інших ТП знизу і беремо в них приріст довжини з різними знаками).

$$U_{вих} = U \frac{r_{Д1} - r_{Д2}}{r_{Д1} + r_{Д2}}, \quad (2.12)$$

### 2.3 Приклад виконання розрахунку

Вибираємо дріт з константану. Діаметр дроту:  $d = 0,025$  мм.

Питомий опір матеріалу дроту:  $\rho = 0,45 \cdot 10^{-3}$  Ом·мм.

Опір навантаження:  $r_n = 30,0$  Ом.

Кількість ТП у схемі мосту – 1; база  $l_6 = 20$  мм; ширина  $b = 10$  мм. ТП клеїться на метал.

Питома допустима площа поверхні охолодження  $\sigma_{дод} = 2 \cdot 10^2$  мм<sup>2</sup>/Вт.

Обчислимо крок  $t \geq 2d = 0,05$  мм. Виберемо  $t = 0,07$  мм.

Визначимо число петель ТП за формулою:

$$2W - 1 = b/t = 10/0,07 = 143, \text{ звідки } W = 72$$

Знайдемо вихідний внутрішній опір  $r$  мосту за формулою:  $r = r_0 + r_n$ ,

взявши до уваги, що:

$$r_0 = \frac{4 \cdot \rho \cdot l_\delta}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{3,14 \cdot 0,025^2} = 18 \text{ Ом},$$

$$r_n = \frac{4 \cdot \rho \cdot b}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,025^2} = 9 \text{ Ом},$$

Тоді  $r = r_0 + r_n = 27,0$  Ом.

Розраховане значення  $r < r_n = 30,0$  Ом, тобто розрахунок виконано не за оптимальним варіантом, але близьким до нього.

Напряга на вході ТП:

$$U = \sqrt{\frac{8 \cdot b \cdot l_{\delta} \cdot r}{\sigma_{\text{доп}}}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 10 \cdot 20 \cdot 27}{2 \cdot 10^2}} = 14,7 \text{ В}$$

Потужність, яка споживається в ТП:

$$P = \frac{U^2}{r} = \frac{14,7^2}{27} = 8 \text{ Вт}$$

### 2.3 Порядок виконання роботи

1. Розрахувати параметри тензоперетворювача, виконаного з ніхром, який вмикається за мостовою схемою.

Вид мостової схеми задається викладачем.

Дані для розрахунку обираються за варіантами в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 - Дані для виконання розрахунків

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$r_n$ , Ом	25	26	27	28	29	30	31	32	33	26	27	28
$l_{\delta}$ , мм	20	23	25	28	30	32	20	25	28	30	32	34
$b$ , мм	10	12	15	10	12	15	10	12	15	10	12	15
$d$ , мм	0,025	0,030	0,035	0,025	0,030	0,035	0,025	0,030	0,035	0,025	0,030	0,035

2. Побудувати мостову схему.
3. Зробити висновки щодо причин виникнення похибки ТП,

## 2.4 Контрольні питання

1. Які перетворювачі називаються тензометричними?
2. В яких напрямках використовується тензоефект у тензочутливому матеріалі?
3. З чого може бути виготовлений чутливий елемент тензорезистора?
4. Який діаметр дроту застосовується в ТП?
5. Які матеріали найчастіше застосовуються для дротових ТП?
6. Як виготовляється двошаровий наклеюваний дротовий ТП?
7. Які матеріали найчастіше застосовуються для напівпровідникових ТП?
8. Які переваги напівпровідникових ТП?
9. Яка чутливість провідникових та напівпровідникових ТП?
10. Які основні техніко-метрологічні характеристики ТП?