

Лекція 6. ТЕНЗОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (ТП)

Тензометричні перетворювачі ґрунтуються на використанні зміни електричного опору провідних матеріалів (металів і напівпровідників) при розтягу та стиску їх у межах пружних деформацій.

У практиці вимірювальних перетворювачів тензоефект застосовується в двох напрямках:

- використання тензоефекту об'ємно стискаємого або розтягуємого тензочутливого матеріалу;
- застосування тензоефекту лінійно розтягуємого або стискаємого тензочутливого матеріалу.

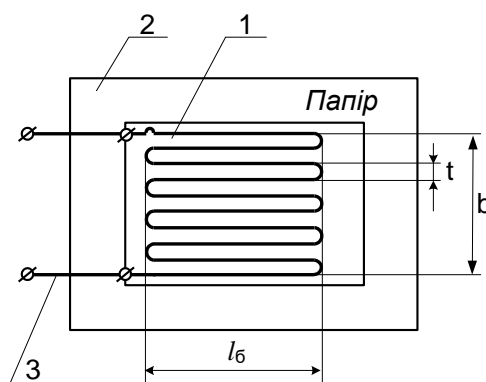
Переваги ТП:

- 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 тензоперетворювачами лежить у межах 0,2–1,5% .



b – ширина решітки;

l_6 – довжина петлі або база ТП, $l_6=5...25$ мм;

t – ширина петлі або крок петлі, $t \geq 2d=0,8...10$ мм;

d – діаметр дроту ТП.

Рис. 6.1. Конструкція наклеюваного дротяного тензоперетворювача

Таблиця 6.1

Характеристики тензочутливих матеріалів

Матеріал	S	d , мкм	ρ , Ом·мм ² /м	$\alpha_R \cdot 10^{-6}$, 1/°C	
Константан МНМЦ-40-1,5	2,1	10; 20; 30	0,46...0,52	-20...110	
Сплав НМ23ХЮ	2,2±0,05	10;20; 30	1,45...1,60	<35	
Матеріал	E , Па	σ_B , Па	εl_{max} , %	$\alpha_l \cdot 10^6$, 1/°C	t_{max} , °C
Константан МНМЦ-40-1,5	$1,48 \cdot 10^{11}$	$65 \cdot 10^7$	–	14...15	500
Сплав НМ23ХЮ	$2,1 \cdot 10^{11}$	(130- 150)х $\times 10^7$	>18	11,5	500

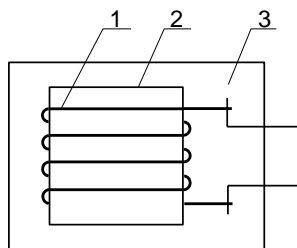


Рис. 6.2. Конструкція двошарового наклеюваного дрітвяного тензоперетворювача

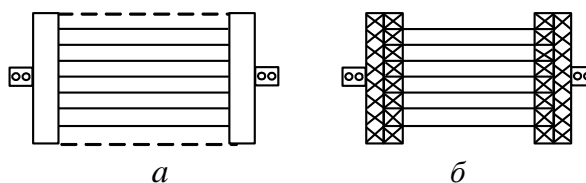
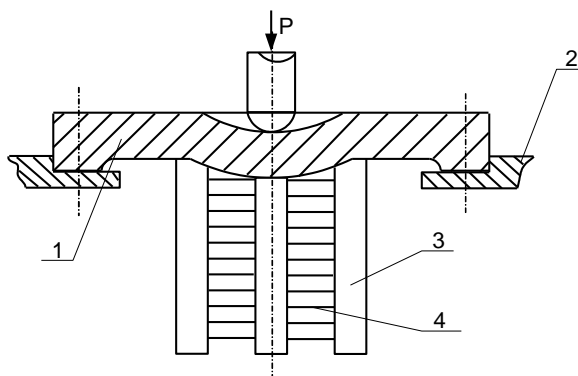
Рис. 6.3. Конструкція вільного тензоперетворювача із з'єднанням:
а – паралельним; б – послідовним

Рис. 6.4. Конструкція вільного тензоперетворювача для вимірювання зусиль

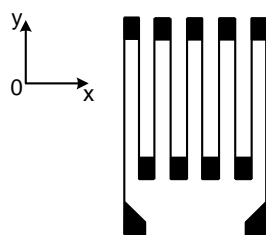


Рис. 6.5. Фольговий тензоперетворювач

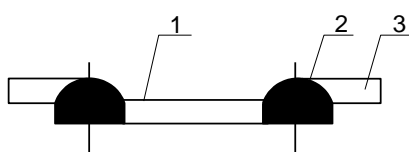
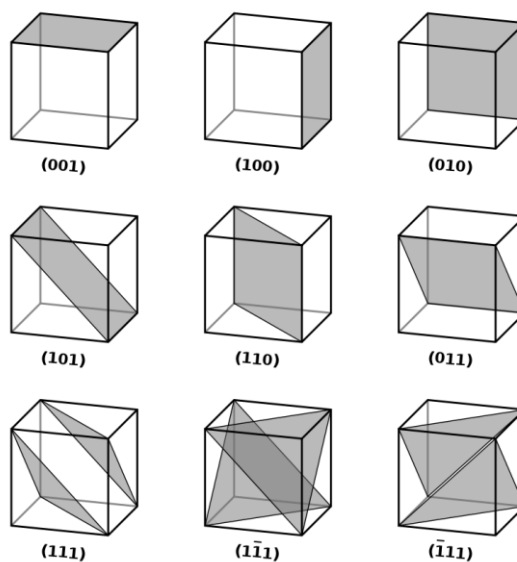


Рис. 6.6. Напівпровідниковий тензоперетворювач типу Ю-8

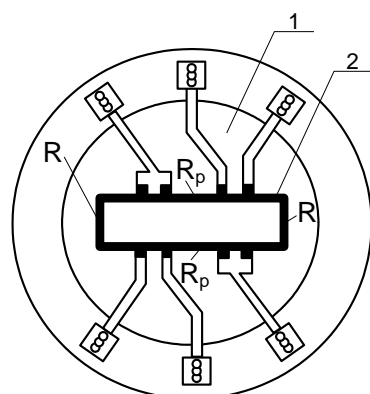
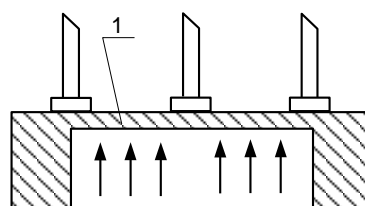


Рис. 6.7. Тензомодуль мембранного датчика тиску

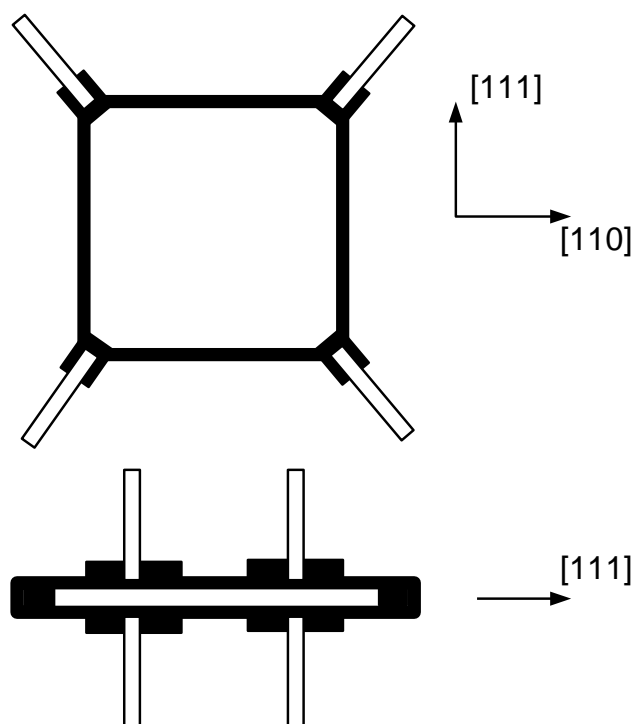


Рис. 6.8. Напівпровідникові мостові тензорезистивні структури

$$S = \frac{\varepsilon R_x}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R_x / R_x}{\Delta l / l}. \quad (1)$$

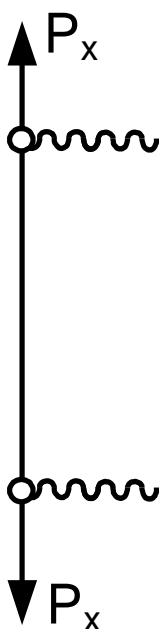


Рис. 6.9. Найпростіший тензоперетворювач для вимірювання зусиль

$$R_x = \rho \frac{l}{q}, \quad (2)$$

$$\ln R_x = \ln \rho + \ln l - \ln q. \quad (3)$$

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta q}{q} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta l}{l} \left[\frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} + I - \frac{\Delta q / q}{\Delta l / l} \right]. \quad (5)$$

$$\frac{\Delta q / q}{\Delta l / l} = -2\sigma, \quad (6)$$

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta l}{l} \left(\frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} + I + 2\sigma \right). \quad (7)$$

$$S = \frac{\Delta R_x / R_x}{\Delta l / l} = \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} + I + 2\sigma. \quad (8)$$



Рис. 6.10. Поперечний переріз тензодроту

$$\frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} \ll 1 + 2\sigma, \quad S = 1 \dots 1,8; \quad (9)$$

$$\frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} \gg 1 + 2\sigma, \quad S = 10 - 100. \quad (10)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{P_x}{Eq}, \quad (11)$$

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{P_x}{Eq} \left[\frac{\Delta \rho / \rho}{P_x / Eq} + I + 2\sigma \right]. \quad (12)$$

Таблиця 6.2

Основні характеристики тензочувливих матеріалів

Матеріал	Коефіцієнт тензочувливості S	Модуль пружності E , ГПа	ТКС, 10^{-6} 1/К	ТК лінійного розширення, 10^{-6} 1/К	Питомий опір, $\text{мк} \times \text{Ом} \cdot \text{м}$	Термо-ЕРС з міддю, $\text{мк} \cdot \text{В/К}$	ТК тензочувливості, 10^{-6} 1/К
Константан	1,9... 2,1	150	± 50	14...15	0,46... 0,50	-40	-
Ніхром	2,1... 2,3	180	22	14	0,9... 1,7	+22	-
Платинородій	5,1... 5,5	-	1700	-	0,2	-	-
Елінвар	0,7... 3,8	176	300	0,9	0,84	0,3	-
Германій (дендрит): n -типу [111]	-150	155	1500	0,1...6	$0,25 \times 10^4$	-	3000
p -типу [111]	+100	155	3000... 8000	0,1...6	$1,1 \times 10^4$	-	400... 5000
Кремній: n -типу [100]	-130	130	6000	0...4	$0,35 \times 10^4$	-	3000
p -типу [111]	+175	190	1300	0...4	$7,8 \cdot 10^4$	-	2000

$$R = \rho \frac{l}{q} = \rho \frac{l^2}{V}, \quad (13)$$

$$\Delta R = \frac{\rho}{V} 2l \Delta l. \quad (14)$$

$$S = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = 2. \quad (15)$$

$$\frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = S \quad (16)$$

$$\frac{dR}{R} = S \frac{dl}{l}. \quad (17)$$

$$\frac{R}{R_0} = \left(\frac{l}{l_0}\right)^S, \quad R = R_0 \left(\frac{l}{l_0}\right)^S. \quad (18)$$

$$l = l_0 + \Delta l, \quad a \frac{\Delta l}{l_0} = \varepsilon_l. \quad (19)$$

$$R = R_0 \left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}\right)^S = R_0 \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right)^S = R_0 (1 + \varepsilon_l)^S. \quad (20)$$

$$R = R_0 (1 + \varepsilon_l)^S + R_n. \quad (21)$$

$$\sigma_{II} = \frac{\Delta \varepsilon_l}{\varepsilon_l}, \quad (22)$$

$$\varepsilon_{\Theta} = \frac{\Delta l_{\Theta}}{l} = (\beta_D - \beta_{II}), \quad (23)$$

$$\Delta R = SR \frac{\Delta l_{\Theta}}{l} = SR(\beta_D - \beta_{II}). \quad (24)$$

$$\Delta R_{\Theta} = R\alpha_{\Theta} + SR(\beta_D - \beta_{II}) = R[\alpha_{\Theta} + S(\beta_D - \beta_{II})]. \quad (25)$$

$$\Delta R_{\Theta} = R[\alpha_{\Theta} + S(\beta_D - \beta_{II})], \quad (26)$$

де R – опір ТП; α_{Θ} – температурний коефіцієнт опору дроту; S – коефіцієнт тензочутливості; β_D , β_{II} – температурний коефіцієнт лінійного розширення відповідно матеріалу об'єкта та дроту.

$$\Delta R_{\beta} = R_{\beta} \alpha_{\kappa}, \quad (27)$$

$$R_{\beta} = R \frac{\alpha_{\Theta} + S(\beta_D - \beta_{II})}{\alpha_{\kappa}}. \quad (28)$$

$$I_{\text{дон}} = \sqrt{7,3 \cdot 10^{10}} \cdot d^3, \quad (29)$$

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

$$l_{\sigma} / b = n = 2 \dots 5. \quad (30)$$

$$W = \frac{l}{2l_{\sigma}} = \frac{l}{2bn}, \quad (31)$$

де $l = \pi R d^2 / 4 \rho$ – довжина тензодроту; R – опір ТП; d – діаметр дроту; ρ – питомий опір ТП.

$$P = \frac{U^2}{R}. \quad (32)$$

$$\sigma = \frac{S}{P} \geq \sigma_{\text{дон}}, \quad \frac{8bl_{\delta}}{U^2/R} \geq \sigma_{\text{дон}}, \quad (33)$$

$$8bl_{\delta}R \geq \sigma_{\text{дон}}U^2, \quad U \leq \sqrt{\frac{8bl_{\delta}R}{\sigma_{\text{дон}}}}$$

$$\delta = \sqrt{\delta_T^2 + \delta_K^2}. \quad (34)$$

$$U_{\text{вих}} = U \frac{r_1 r_3 - r_2 r_4}{(r_2 + r_3)(r_1 + r_4)}. \quad (35)$$

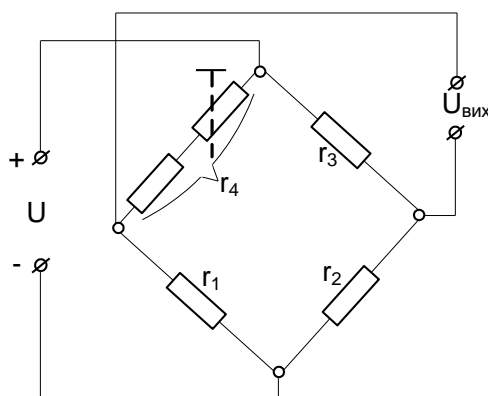


Рис. 6.11. Мостова схема ввімкнення тензоперетворювачів

$$r_1 = r_D \text{ і } r_2 = r_3 = r_4 = r_0 \quad (36)$$

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

$$r_1 = r_3 = r_D, \quad (37)$$

$$r_2 = r_4 = r_0,$$

$$U_{\text{вих}} = U \frac{r_D - r_0}{r_D + r_0}$$

$$U_{\text{вих}} = U \frac{r_{D1} - r_{L2}}{r_{D1} + r_{D2}} \quad (38)$$

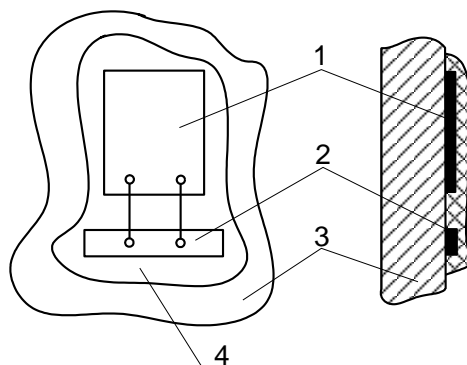


Рис. 6.12. Розміщення тензоперетворювача на об'єкті