

## POMIAR SIŁ I NAPRĘŻEN MECHANICZNYCH

### 1. CEL ĆWICZENIA:

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z przetwornikami i układami stosowanymi do pomiaru sił, mas i naprężeń mechanicznych.

### 2. PRZETWORNIKI SIŁ I NAPRĘŻEN

Siła jest wielkością fizyczną, którą mierzy się pośrednio poprzez pomiar skutków jej działania. Skutki działania siły mogą być skutkami dynamicznymi lub statycznymi. Dynamicznym skutkiem działania siły jest ruch ciała z odpowiednim przyśpieszeniem lub odkształcenie ciała zmienne w czasie. Skutki statyczne to odkształcenia stałe w czasie. Do pomiaru sił wykorzystuje się obiekty odkształcalne sprężyste wraz z czujnikami odkształceń lub czujnikami przyśpieszenia. Przetworniki do pomiaru sił mogą być wykorzystywane do pomiaru masy względu na liniowy związek pomiędzy masą i siłą ciężkości.

Najczęściej do pomiaru odkształceń statycznych wykorzystywane są parametryczne przetworniki rezystancyjne oraz magnetosprężyste, natomiast do pomiaru sił dynamicznych wykorzystuje się generacyjne czujniki piezoelektryczne.

#### Przetwornik tensometryczny (tensometr)

Tensometr jest przetwornikiem pomiarowym przeznaczonym do pomiaru naprężeń mechanicznych. Zbudowany jest ze cienkiej sprężystej warstwy izolacyjnej, na którą naniesiono warstwę metaliczną – folię metalową lub rzadziej drut oporowy. Przetwornik przyklejany jest do badanego obiektu odpowiednim klejem. Warstwa izolacyjna powinna wraz z klejem przenosić naprężenie badanego obiektu na element rezystancyjny. Odkształcenie obiektu powoduje odkształcenie tensometru, co za tym idzie zmianę wymiarów geometrycznych ścieżki metalowej. Rezystancja ścieżki metalowej jest funkcją rezystywności metalu  $\rho$  oraz jego długości  $l$  i pola przekroju  $S$ :

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (1)$$

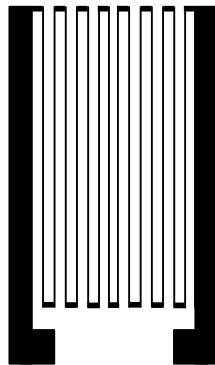
Dla odkształceń sprężystych ścieżki, w zakresie stosowalności prawa Hooke'a, zmienia się długość ścieżki i jej pole przekroju. Naprężenie  $\varepsilon$ , definiowane następująco:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (2)$$

jest proporcjonalne do względnej zmiany rezystancji tensometru  $\Delta R$  według zależności:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon. \quad (3)$$

Stała  $k$  nosi nazwę czułości odkształceniowej tensometru i dla typowych tensometrów foliowych ma wartość rzędu 2. Czułość tensometru można zwiększyć konstrukcyjnie stosując szereg cienkich ścieżek ułożonych równolegle i połączonych szeregowo w sposób pokazany na rys.1. Taki tensometr charakteryzuje się ponadto dużą czułością na naprężenie wzdłuż ścieżek, oraz praktycznie zerową na naprężenia poprzeczne.



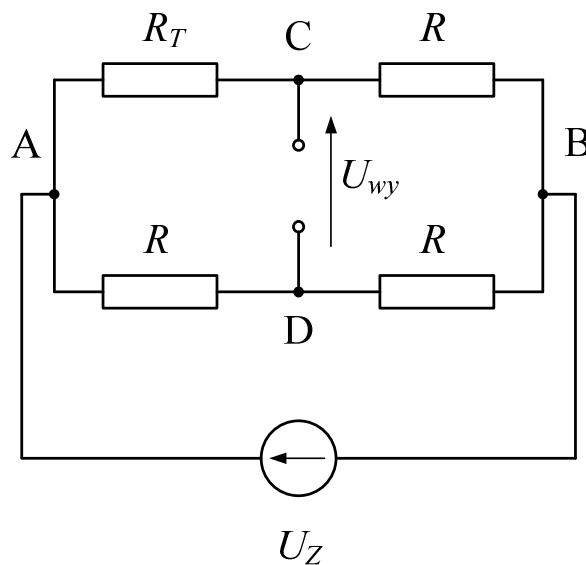
Rys.1. Przykładowy kształt ścieżek rezystancyjnych tensometru foliowego

Wykonywane są także tzw. rozety tensometryczne stanowiące układ tensometrów umieszczonych na jednym podłożu i usytuowanych pod odpowiednim kątem względem siebie (np. dwa tensometry pod kątem  $90^\circ$  lub trzy pod kątem  $120^\circ$ ). Takie tensometry umożliwiają pomiary naprężeń w różnych kierunkach. Typowe tensometry foliowe powierzchnię od 2 do  $10 \text{ mm}^2$ . Pozwalają one na pomiary naprężeń o wartościach maksymalnie do kilku procent.

Istotny wpływ na właściwości tensometru ma temperatura. Zmiany temperatury mogą skutkować zmianami geometrycznymi obiektu badanego jak i samego tensometru.

Temperatura wywołuje także zmiany rezystancji ścieżki rezystancyjnej oraz przewodów pomiarowych. Wpływ temperatury na tensometr można zminimalizować stosując odpowiednie materiały konstrukcyjne. Ścieżki rezystancyjne wykonywane są na ogół ze stopu miedzi i niklu w proporcjach 55% do 45% zwanego konstantanem. Konstantan charakteryzuje się temperaturowym współczynnikiem rezystancji równym  $0,00002 \text{ K}^{-1}$ , temperaturowym współczynnikiem rozszerzalności liniowej równym  $14,9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  oraz rezystywnością równą  $4,9 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ . Wykorzystuje się, choć na razie w niewielkim stopniu nowoczesne odmiany konstantanu: stopy typu A i P oraz stop typu Karma, charakteryzujące się tzw. samokompensacją temperaturową. Podłoże tensometrów wykonywane jest często z poliimidu lub wzmocnionej włóknem szklanym żywicy epoksydowo-fenolowej.

Zmiana rezystancji tensometru mierzona jest na ogół z zastosowaniem czteroramiennego mostka niezrównoważonego. W układzie mostka stosuje się jeden, dwa lub cztery czujniki tensometryczne włączone w miejsce rezystorów mostka. Pozostałe rezystory mostka mają jednakowe wartości rezystancji  $R$  równe rezystancji  $R_T$  nienaprężonego tensometru. Mostek zasilany jest napięciem stałym lub przemiennym  $U_Z$ . Jeżeli na tensometr nie działa naprężenie wówczas mostek pozostaje w stanie równowagi i napięcie wyjściowe jest zerowe.



Rys.2. Niezrównoważony mostek tensometryczny

W przypadku zastosowania jednego czujnika po wystąpieniu dodatniego lub ujemnego naprężenia  $\Delta R_T$  napięcie wyjściowe mostka  $U_{wy}$  ma wartość:

$$U_{wy} = \frac{U_Z}{(R_T \pm \Delta R_T) + R} - \frac{U_Z}{R + R} \approx \frac{U_Z}{4} \left( \frac{\pm \Delta R_T}{R_T} \right). \quad (4)$$

Uwzględniając równanie (3) wyrażenie (4) można zapisać następująco:

$$U_{wy} \approx \frac{cU_Z}{4} \varepsilon, \quad (5)$$

a zatem jest ono proporcjonalne do naprężenia. Mostek niezrównoważony dla niewielkich zmian rezystancji występujących w tensometrach jest liniowym przetwornikiem zmian rezystancji na napięcie.

Korzystną cechą mostków niezrównoważonych jest możliwość kompensacji wpływu temperatury na rezystancję tensometru. Rezystor włączony pomiędzy punkty C i B mostka zastępuje się tensometrem nienaprężanym, o identycznych parametrach jak tensometr pomiarowy. Tensometr ten nazywany jest tensometrem kompensacyjnym i znajduje się w tej samej temperaturze, w której znajduje się tensometr pomiarowy (aktywny). Całkowita zmiana rezystancji tensometru aktywnego jest sumą zmiany temperaturowej i pochodzącej od naprężenia. Zmiana rezystancji tensometru kompensacyjnego jest wyłącznie zmianą temperaturową. Mostek w zakresie niewielkich zmian rezystancji tensometru można uznać za przetwornik liniowy. Zgodnie z zasadą superpozycji napięcie wyjściowe mostka jest sumą odpowiedzi mostka na zmiany temperaturowe  $\Delta R_T(\vartheta)$  i pochodzące od naprężenia  $\Delta R_T(\varepsilon)$ .

$$U_{wy}(\Delta R_T(\vartheta) + \Delta R_T(\varepsilon)) = U_{wy}(\Delta R_T(\vartheta)) + U_{wy}(\Delta R_T(\varepsilon)). \quad (6)$$

Z punktu widzenia zmian temperaturowych mostek pozostaje stale w równowadze, ponieważ niezależnie od temperatury spełnione jest równanie równowagi mostka:

$$\Delta R_{T1}(\vartheta)R = \Delta R_{T2}(\vartheta)R. \quad (6)$$

Napięcie wyjściowe mostka jest z punktu widzenia temperatury stale zerowe. Inaczej mówiąc temperatura nie wpływa na wartość napięcia wyjściowego.

Oprócz tensometrów metalowych buduje się również tensometry półprzewodnikowe, w których wykorzystuje się efekt piezorezystywny. Naprężanie materiału piezorezystywnego powoduje silną zmianę rezystancji. Czułość odkształceniowa tensometrów półprzewodnikowych jest rzędu 100 (maksymalnie 200). Do wad tensometrów półprzewodnikowych można zaliczyć nieliniowość i silną zależność rezystancji od temperatury oraz wyższą cenę.

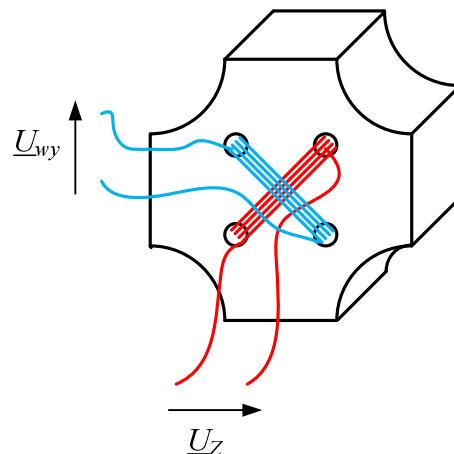
Tensometry wykorzystywane są do pomiarów naprężeń w budownictwie i mechanice. W odpowiednim układzie mechanicznym tensometry pozwalają na pomiar sił i mas.

### Przetwornik magnetosprężysty

Przetworniki magnetosprężyste wykorzystują zależność przenikalności magnetycznej od siły działającej na rdzeń. Jest to zjawisko tzw. odwróconej magnetostrykcji zwane zjawiskiem Villariego. Przenikalność magnetyczna  $\mu$  rdzenia jest funkcją działającej na niego siły:

$$\mu = f(F). \quad (7)$$

Czujnik składa się ze rdzenia oraz dwóch cewek: wzbudzającej i pomiarowej usytuowanych względem siebie pod kątem  $90^\circ$  jak na rys.3. Cewka wzbudzająca jest zasilana prądem sinusoidalnie przemiennym. Rozkład pola magnetycznego w rdzeniu zmienia się po przyłożeniu do niego siły ze względu na zmniejszenie przenikalności magnetycznej w kierunku działania siły oraz zwiększenie przenikalności w kierunku poprzecznym do kierunku jej działania. Wywołuje to zmianę wartości napięcia indukowanego w cewce odbiorczej.



Rys.3. Budowa czujnika magnetosprężystego.

Przetworniki magnetoSprężyste charakteryzują się dużą czułością oraz odpornością na przeciążenie. Dostarczają sygnałów pomiarowych o stosunkowo dużej wartości na wyjściu i charakteryzują się małą impedancją wyjściową. Wykorzystywane są do budowy czujników dużych sił oraz mas. Charakterystyki czujników magnetoSprężystych są liniowe w początkowym zakresie, później stają się nieliniowe. Dodatkowo charakterystyka przetwarzania przetwornika charakteryzuje się histerezą - napięcie wyjściowe dla tej samej siły może przyjmować dwie różne wartości w zależności od wartości siły działającej uprzednio.

### Przetworniki piezoelektryczne

W przetwornikach piezoelektrycznych wykorzystywane jest zjawisko generacji ładunku w materiale piezoelektrycznym poddanym działaniu siły. Do budowy przetworników piezoelektrycznych wykorzystuje się kwarc, turmalin oraz materiały ceramiczne i sole. Generowany ładunek  $Q$  jest proporcjonalny do siły  $F$ :

$$Q = cF . \quad (8)$$

Ładunek gromadzony w przetworniku jest dość szybko rozładowywany przez impedancję układu pomiarowego współpracującego z przetwornikiem, a zatem przetwornik magnetoSprężysty nie może być wykorzystywany do pomiaru sił statycznych. W pomiarach sił zmiennych w czasie ładunek jest na bieżąco odbudowywany. Przetworniki piezoelektryczne wykorzystuje się do pomiaru sił zmiennych w czasie o częstotliwościach do 60 kHz. Budowane są podobnie jak w przypadku tensometrów czujniki złożone z dwóch lub trzech przetworników umożliwiające pomiary kierunkowe.

### **3. PROGRAM ĆWICZENIA**

1. Dołączyć woltomierz cyfrowy do zacisków wyjściowych mostka tensometrycznego.
2. Wybrać wzmocnienie wzmacniacza równe 1.
3. Wybrać zakres miliwoltomierza cyfrowego napięcia stałego 200 mV.
4. Załączyć mostek tensometryczny.

5. Sprowadzić mostek do stanu równowagi za pomocą potencjometru wieloobrotowego.
6. Wyznaczyć charakterystykę napięcia wyjściowego w funkcji masy dokładanej na szalkę przetwornika. Masę zmieniać wykorzystując ciężarki 500 gramowe.
7. Wybrać wzmocnienie wzmacniacza równe 10.
8. Ponownie sprowadzić mostek do stanu równowagi za pomocą potencjometru wieloobrotowego.
9. Wyznaczyć charakterystykę napięcia wyjściowego w funkcji masy dokładanej na szalkę przetwornika.
10. Wybrać wzmocnienie wzmacniacza równe 100.
11. Wybrać zakres miliwoltomierza cyfrowego napięcia stałego 2 V.
12. Sprowadzić mostek do stanu równowagi za pomocą potencjometru wieloobrotowego.
13. Wyznaczyć charakterystykę napięcia wyjściowego w funkcji masy dokładanej na szalkę przetwornika.
14. W sprawozdaniu wyznaczyć proste modelowe dla wzmocnień 1, 10, 100 metodą regresji liniowej. Narysować charakterystyki modelowe i wrysować punkty pomiarowe. Porównać nieliniowość i czułość układu dla różnych wzmocnień.
15. Dołączyć zaciski ZASILANIE do wyjścia transformatora separującego zgodnie ze wskazaniem prowadzącego. Szeregowo z zaciskami dołączyć amperomierz cyfrowy napięcia przemiennego na zakresie 2 A.
16. Do zacisków WYJŚCIE dołączyć woltomierz cyfrowy napięcia przemiennego na zakresie 2V.
17. Dla prądu zasilającego rzędu 400 mA wyznaczyć charakterystykę napięcia wyjściowego w funkcji masy. Masę zadawać ciężarkami 500 g. Charakterystykę wyznaczyć zwiększając obciążenie szalki a następnie zmniejszając masę. Po wyznaczeniu charakterystyki na szalkę położyć nieznaną masę i zapisać napięcie wyjściowe.
18. Pomiary zgodnie z punktem poprzednim wykonać dla prądu zasilającego 600 i 800 mA.
19. Na szalce umieścić masę ok. 2 kg. Wyznaczyć charakterystykę napięcia wyjściowego w funkcji prądu zasilającego. Charakterystykę wyznaczyć zwiększając i zmniejszając prąd zasilający.

20. W sprawozdaniu wykreślić charakterystyki napięcia wyjściowego w funkcji masy dla odpowiednich prądów. Graficznie dla każdego prądu wyznaczyć masę nieznanego ciężarka wraz z graniczną wartością błędu wynikającego z histerezy. Narysować charakterystykę napięcia wyjściowego w funkcji prądu zasilającego. Ocenić wpływ prądu zasilającego na pomiary przetwornikiem oraz wartość prądu dopuszczalnego przetwornika.

#### 4. PYTANIA KONTROLNE:

1. Jakie skutki wywołuje siła?
2. Wyjaśnić zasadę pomiaru naprężeń mechanicznych przetwornikiem tensometrycznym.
3. W jaki sposób kompensuje się wpływ temperatury na tensometr?
4. Wyjaśnić zasadę działania przetwornika magnetosprężystego.
5. Dlaczego przetworniki piezoelektryczne nie nadają się do pomiaru sił zmiennych w czasie?

#### 5. LITERATURA:

1. Parchański J.: *Miernictwo elektryczne i elektroniczne*. WSiP - Warszawa 2008.
2. Tumański S.: *Technika pomiarowa*. WNT, Warszawa 2007.

Opracował: dr inż. Adam Cichy

v.1 / 9 02 2009