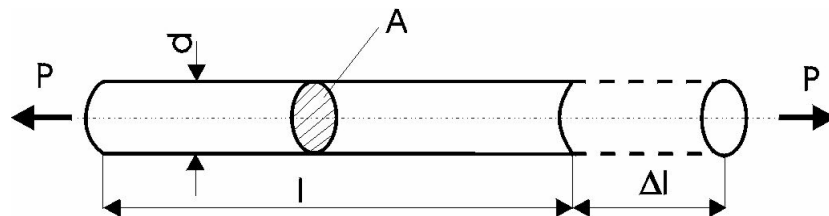


# Tensometria oporowa

## 1. Opis zjawiska fizycznego

W przewodniku poddanym działaniu zewnętrznych sił występują naprężenia w kierunku działania siły, zmiany wymiarów geometrycznych oraz własności elektrycznych. Zmiany wymiarów geometrycznych wyrażają się zmianą długości i pola przekroju poprzecznego. Wynikiem tych zmian jest zmiana rezystancji przewodnika. W przypadku półprzewodników naprężenia mogą spowodować zmiany siatki krystalicznej i rezystywności kryształu. Zjawisko to znane jest pod nazwą piezorezystywności. W zjawisku tym zmiany geometryczne nie odgrywają większej roli, ponieważ o zmianie rezystancji decyduje zmiana rezystywności. Jeżeli rozpatrzmy element o długości  $l$  poddany działaniu siły  $P$  (rys. 1) to na podstawie teorii



Rysunek 1. Sposób określenia naprężeń w przewodniku

wytrzymałości materiałów można zapisać, iż naprężenia wyrażają się zależnością:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

a wydłużenie względne jest określone zależnością (2):

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

Według prawa Hooke'a można zapisać (3):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{P}{E \cdot A} = \frac{\sigma}{E} \quad (3)$$

Wynikiem wydłużenia elementu jest zmniejszenie przekroju poprzecznego. Stosunek względnej zmiany przekroju  $dA/A$  do wydłużenia określa liczba Poissona  $\nu$  wyrażona zależnością (4):

$$\nu = -\frac{\frac{dA}{A}}{2 \cdot \frac{dl}{l}} = -\frac{\frac{dA}{A}}{2 \cdot \varepsilon} \quad (4)$$

Na przykład dla przekroju kołowego względna zmiana przekroju jest określona następującymi równaniami (5 i 6):

$$\frac{dA}{A} = \frac{\frac{2 \cdot \pi}{4} \cdot D \cdot dD}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \frac{2}{D} \cdot dD \quad (5)$$

$$dA = d \left[ \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] = \pi \cdot \frac{2}{4} \cdot D \cdot dD \quad (6)$$

Rezystancję  $R$  przewodnika wyraża funkcja (7):

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (7)$$

gdzie:  $\rho$ - rezystywność przewodnika.

Elementarną zmianę oporu przewodnika wyraża się jako różniczkę zupełną funkcji (7) i określa równaniem (8):

$$dR = \frac{\delta R}{\delta l} \cdot dl + \frac{\delta R}{\delta \rho} \cdot d\rho + \frac{\delta R}{\delta A} \cdot dA \quad (8)$$

Dla przewodnika z rys. 1 poszczególne pochodne cząstkowe funkcji (7) wyrażają się (9):

$$\frac{\delta R}{\delta l} = \frac{\rho}{A}; \quad \frac{\delta R}{\delta \rho} = \frac{l}{A}; \quad \frac{\delta R}{\delta A} = -\frac{\rho \cdot l}{A^2} \quad (9)$$

Po podstawieniu pochodnych cząstkowych (9) do równania (8) i podzieleniu go przez  $R$  można określić zależność (10):

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{\delta l}{l} + \frac{\delta \rho}{\rho} - \frac{\delta A}{A} \quad (10)$$

Przekształcając równanie (10) przez zastąpienie składników  $dl/l$  z (2) i  $dA/A$  z równania (6) otrzymujemy zależność (11):

$$\frac{\delta R}{R} = \varepsilon + \frac{\delta \rho}{\rho} + 2 \cdot \nu \cdot \varepsilon = \varepsilon \cdot (1 + 2 \cdot \nu) + \frac{\delta \rho}{\rho} \quad (11)$$

W teorii tensometrii równanie to jest przedstawiane w postaci (12):

$$k = \frac{\delta R}{\varepsilon} = (1 + 2 \cdot \nu) + \frac{\delta \rho}{\rho} \quad (12)$$

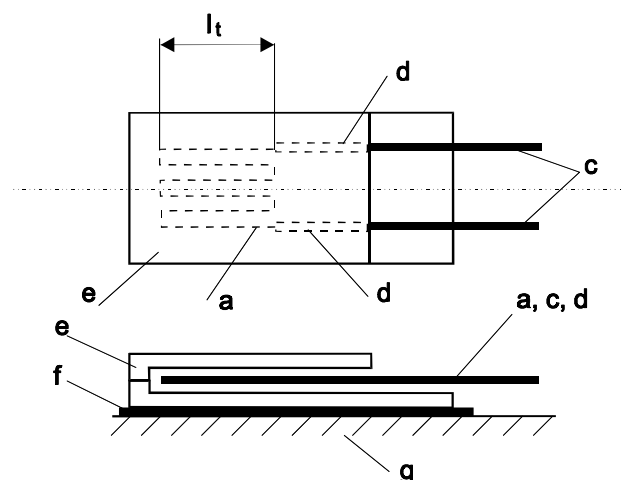
Wielkość  $k$  nazywana jest stałą ( czułością ) tensometru, która uwzględnia:

- wpływ zmian wymiarów geometrycznych tensometru,
- wpływ zmian temperatury przy działaniu naprężeń oraz wpływ piezorezystywności na czułość odkształcenia tensometru. Dla przykładu dla tensometru wykonanego z konstantanu osiąga ona wartości  $2,0 \div 2,1$ .

## 2. Konstrukcje i właściwości tensometrów

## 2.1. Tensometry wężykowe

Tensometry te, których schemat przedstawiono na rys. 2 wykonuje się z drutu oporowego ułożonego na podłożu izolacyjnym ( papier, folia celulozowa, żywica i inne ).

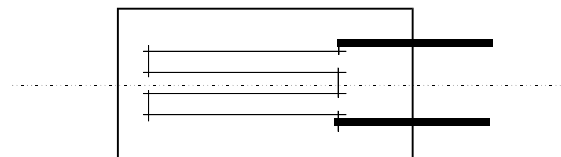


Rysunek 2. Schemat tensometru drutowego: a - siatka oporowa, b - podkładka izolacyjna, c, d - wyprowadzenia, e - nakładka, f - warstwa kleju, g - element badany.

W celu uzyskania dużej rezystancji drut układa się na podkładce b o kształcie wężyka. Doprowadzenia wykonane są z drutu lub folii miedzianej. Całość przykryta jest paskiem papieru. Długość ułożenia  $l_t$  drutów pomiarowych nazywa się bazą pomiarową tensometru. W tensometrach przeznaczonych do pracy w wysokich temperaturach stosuje się druty ze stopu niklu i chromu oraz platyny i indu. Stopy żelaza, chromu czy aluminium mogą być stosowane w zakresie średnich temperatur. Niekiedy stosuje się druty manganinowe o bardzo małej czułości rzędu 0,5 przy stosunkowo dużej wrażliwości na odkształcenia poprzeczne do kierunku mierzonych odkształceń.

## 2.2. Tensometry kratowe

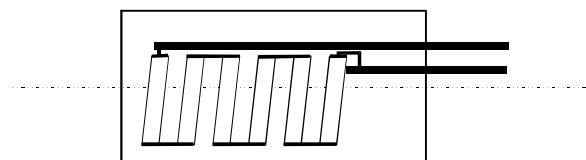
Tensometr kratowy składa się z równoległe ułożonych drutów oporowych połączonych spawanym mostkiem z grubego drutu lub taśmy miedzianej. Odznacza się małą wrażliwością na odkształcenia poprzeczne do kierunku mierzonych odkształceń.



Rysunek 3. Schemat tensometru kratowego

## 2.3. Tensometry foliowe

Wykonywane są z cienkiej folii metalowej ( 3÷8 mm ). Schemat tensometru foliowego

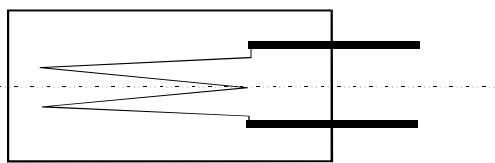


Rysunek 4. Schemat tensometru foliowego

oporowej wraz z doprowadzeniami nanoszony jest na emulsję metodą fotograficzną a po naświetleniu część folii zostaje poddana chemicznemu trawieniu. Taką technologią można wykonywać tensometry o dowolnym kształcie, dobrze przystosowanym dożądanego zadania pomiarowego. Długość bazy wynosi min. 0,3 mm.

## 2.4. Tensometry zygzakowate

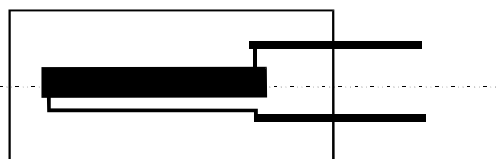
Tensometry zygzakowate odznaczają się małą zmianą współczynnika czułości odkształceniowej na odkształcenia poprzeczne. Czułość ta wynosi kilka procent wartości czułości w kierunku podłużnym. Schemat takiego tensometru przedstawia rys. 5.



Rysunek 5. Schemat tensometru zygzakowatego

## 2.5. Tensometry półprzewodnikowe

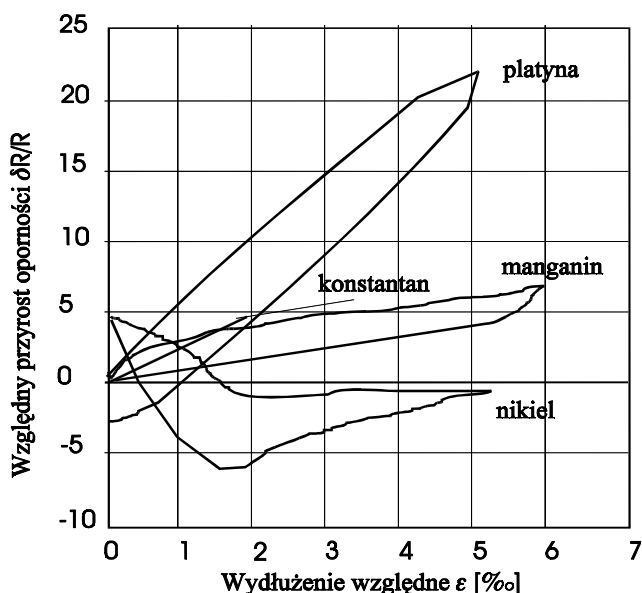
Czujniki te są wykonywane m.in. z monokryształów germanu lub krzemu. W związku z dużą wartością współczynnika czułości odkształceniowej czujniki nazywane również czujnikami naprężno - rezystancyjno półprzewodnikowymi są chętnie stosowane w tensometrii, zwłaszcza w tych przypadkach, w których chodzi o uzyskanie dużej czułości czujnika. Są one jednakowo skuteczne przy pomiarach statycznych jak i dynamicznych. Praca półprzewodnikowych czujników naprężno-rezystancyjnych jest związana z przechodzeniem elektronów na różne dozwolone poziomy energetyczne, a ponieważ przechodzenie to odbywa się w czasie  $10^{-12}$ s, więc czujniki te mogą być stosowane w dużym zakresie częstotliwości.



Rysunek 6. Schemat tensometru półprzewodnikowego

## 2.5. Właściwości tensometrów

Typowe charakterystyki statyczne tensometrycznych czujników wykonanych z różnych metali przedstawiono na rys. 7. Podstawowe dane techniczne tensometrów metalowych i półprzewodnikowych zamieszczono w tabelicy 1.



Rysunek 7. Charakterystyki statyczne czujników tensometrycznych

Tablica 1. Podstawowe dane techniczne tensometrów

Rodzaj tensometru	DRUTOWE	FOLIOWE	PÓŁPRZEWODNIKOWE

Materiał siatki	Konstantan (60%Cu+40%Ni) Nichrom (80%Ni+20%Cr) Elinwar (36%Ni+8%Cr+55%Fe+..)		Ge+domieszki n,p Si+ domieszki n
	$f_d=12\div 50\text{mm}$	Folia 3÷8mm	
rezystancja [ $\Omega$ ]	120, 300, 350, 500, 600, 1000		10 ÷100000
Długość bazy pomiarowej $l_t$ [mm]	3÷150	0.2÷150	0.2÷20
Czułość $K$	2.1 - Konstantan 2.1 - Nichrom 3.6 - Elinwar		- 100÷200
Liniowość [%]	$\pm 0.1$ dla $\varepsilon < 4\text{‰}$ , $\pm 1$ dla $\varepsilon < 10\text{‰}$ ,		1 przy $\varepsilon < 1\text{‰}$
Próg czułości odkształceń $\varepsilon$ [ $\mu\text{D}$ ]*	0.1	0.1	0.001
Zakres mierzonych odkształceń [%]	$\pm 3, \pm 5$	$\sim \pm 5$	$\pm 5, \pm 6$
Dopuszczalne odkształcenie $\varepsilon$ [%]	1 przy $l_t < 5\text{mm}$ 1,2 - $l_t > 5\text{mm}$	3 dla $l_t < 5\text{mm}$ 3,4 dla $l_t > 5\text{mm}$	0.5
Czułość poprzeczna [%]	- 4 ÷ 0.1 ( $l_t=25\div 6\text{mm}$ )	- 0.2 ÷ +2 ( $l_t=23\div 0.75\text{mm}$ )	$\pm 0.1$
Trwałość dla $\varepsilon = 100\ \mu\text{m/m}$	$10^7$	$10^7$	$10^6$
Współczynnik temperaturowy rezystancji [ $\Omega/\Omega/\text{deg}$ ]	$(-3.9-6)\cdot 10^{-6}$	$\pm 10^{-5}$	$6\cdot 10^{-4}-3\cdot 10^{-3}$
Współczynnik temperaturowy czułości [1/deg]	$\sim 5\cdot 10^{-6}$ nie zmienia się dla konstantanu przy $T=150,573\text{K}$	-	$6\cdot 10^{-5}-3.3\cdot 10^{-3}$

\* -  $\mu\text{D}$  - mikrodeformacja ( odpowiada ona  $D/l = 10^{-6}$  )

Istotnym problemem w czasie pracy tensometru jest wpływ temperatury otoczenia na jego parametry. Wraz ze zmianą temperatury otoczenia zmienia się w sposób mniej lub bardziej znaczący oporność tensometru. Zmianę oporności naklejonego czujnika tensometrycznego pod wpływem temperatury określa równanie (13).

$$\frac{\delta R}{R} = k \cdot \varepsilon + [\alpha_r + k \cdot (\alpha_p - \alpha_t)] \cdot \Delta T \quad (13)$$

gdzie:

- $k$  - stała tensometru,
- $\varepsilon$  - odkształcenie względne,
- $\alpha_r$  - temperaturowy współczynnik zmiany rezystancji siatki,
- $\alpha_p$  - temperaturowy współczynnik liniowej rozszerzalności materiału podłoża,
- $\alpha_t$  - temperaturowy współczynnik liniowej rozszerzalności materiału siatki,
- $\Delta T$  - przyrost temperatury.

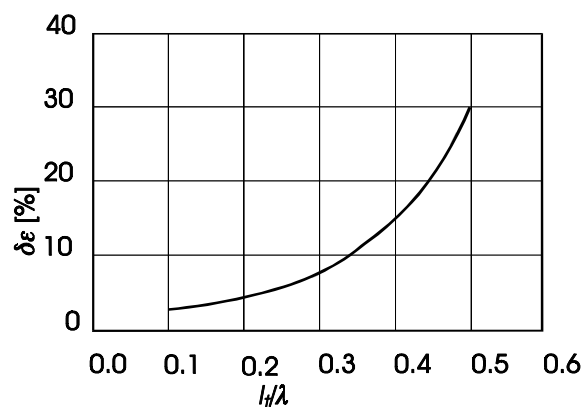
Warunkiem kompensacji temperatury jest równość (14):

$$\alpha_r + k \cdot (\alpha_p - \alpha_t) = 0 \quad (14)$$

Niżej wymieniono niektóre sposoby kompensacji temperatury:

- samokompensacja siatka wykonana jest ze stopów rezystancyjnych i przeznaczona do przyklejania na ściśle określone podłoże, wtedy zachodzi równość współczynników  $\alpha_p = \alpha_t$ ,
- dołączanie tensometrów kompensacyjnych w układzie pół lub pełnego mostka Wheatstone'a,
- montowanie mikrotermoelementów w bezpośrednim sąsiedztwie tensometrów, których napięcie dodając się do napięcia wyjściowego mostka kompensuje wpływ temperatury.

Innym istotnym parametrem tensometru jest jego częstotliwość graniczna. Względną zmianę mierzonego odkształcenia w zależności od częstotliwości reprezentowanej przez długość fali pobudzenia sprężystego rozchodzącego się w badanym podłożu przedstawia rys. 8.



Rysunek 8. Błąd pomiaru a częstotliwość graniczna tensometru ( $\lambda$  - długość fali pobudzenia sprężystego rozchodzącego się w badanym podłożu).

Natomiast częstotliwość graniczną danego tensometru można wyrazić równaniem (15):

$$f_g = \frac{v}{\pi \cdot l_t} \cdot \sqrt{\delta \varepsilon \cdot 6} \quad (15)$$

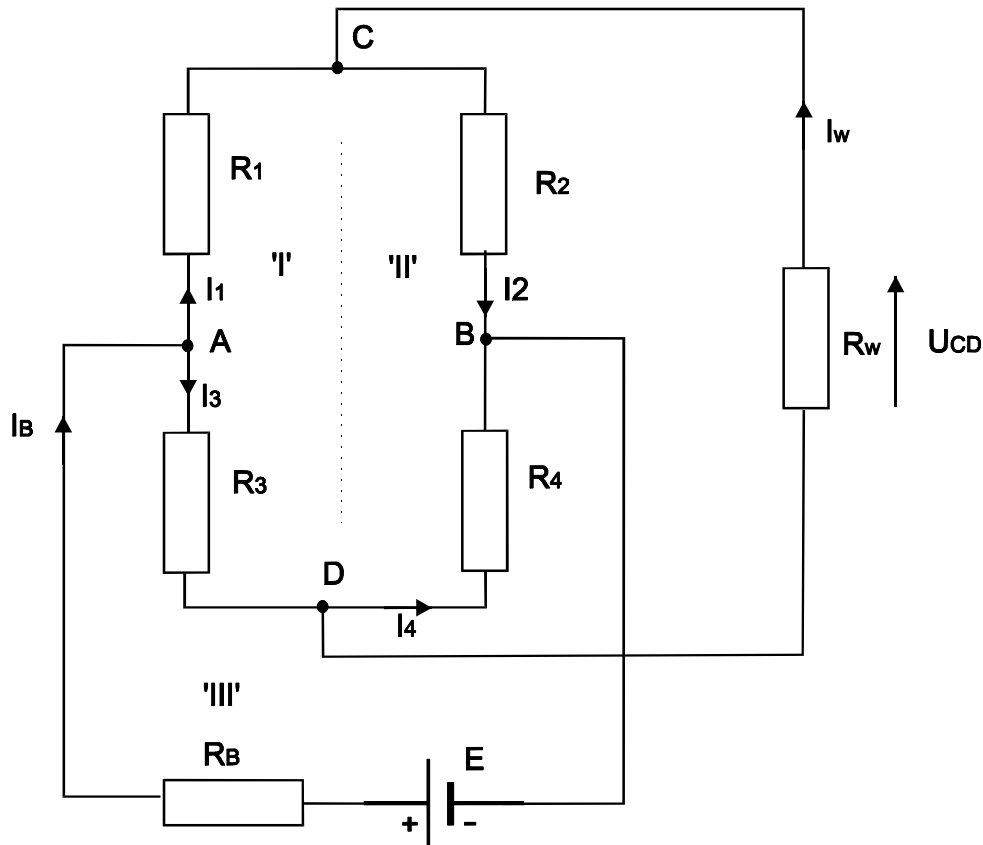
gdzie:

- $v$  - prędkość dźwięku w materiale podłoża,

$\delta\varepsilon$  - przyjęty dopuszczalny błąd pomiaru.

### 3. Mostek pomiarowy

Tensometry w technice pomiarowej pracują w układzie tzw. mostka pomiarowego. Może to być układ np. mostka Wheatstone'a. Celem poznania zależności charakteryzujących układ mostkowy należy wyprowadzić zależności określające prąd w przekątnej mostka lub napięcie w tej przekątnej jako funkcję rezystancji poszczególnych ramion oraz napięcia lub prądu zasilającego. Schemat mostka pomiarowego przedstawia rys. 9.



Rysunek 9. Schemat mostka pomiarowego

Warunkiem równowagi mostka jest równanie (16):

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (16)$$

Jeżeli miernik nierównowagi mostka ma oporność wejściową bardzo dużą ( $R_w \gg 0$ ) oraz  $R_w \gg R_i$  ( $R_i$  - oporność tensometru w  $i$ -tej gałęzi), oraz zakładając, że  $E = \text{const}$  i  $R_B = 0$ , to wtedy napięcie nierównowagi wyraża się przybliżoną zależnością (17):

$$U_{CD} = E \cdot \frac{R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \quad (17)$$

Pod wpływem mierzonej wielkości zmienia się jedna lub więcej rezystancji w gałęziach mostka. W ogólnym przypadku rezystancję  $R_i$  w gałęzi  $i$ -tej mostka można wyrazić jako sumę wartości stałej  $R_{i0}$  i przyrostu  $\Delta R$  - równanie (18):

$$R_i = R_{i0} + \Delta R_{i0} = R_{i0} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta R_i}{R_{i0}} \right) \quad (18)$$

W układzie tzw. pełnego mostka, poszczególne rezystancje można określić zależnościami podanymi w równaniu (19):

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{10} + \Delta R_1 \\ R_2 &= R_{20} + \Delta R_2 \\ R_3 &= R_{30} + \Delta R_3 \\ R_4 &= R_{40} + \Delta R_4 \end{aligned} \quad (19)$$

Podstawiając równania (19) do (17) otrzymuje się zależność (20):

$$U_{CD} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{2 + \sum \frac{\Delta R_i}{R_i}} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (20)$$

dla małych przyrostów  $\Delta R$  można pominąć pewne składniki w równaniu (20) a wtedy przyjmuje ono postać (21):

$$U_{CD} = \frac{E}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (21)$$

Zależność (21) można również przedstawić w postaci (22):

$$U_{CD} = \frac{E}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \quad (22)$$

### 3.1. Stosowane układy pomiarowe

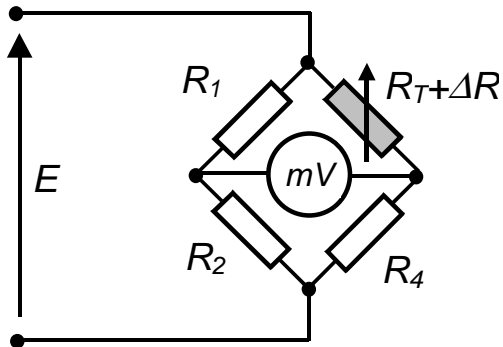
Na rys. 10 przedstawiono szereg schematów konstrukcyjnych, w których określony sposób naklejania tensometru umożliwia powiększenie sygnału wyjściowego przy nieziennej wielkości odkształcenia. W praktyce pomiarowej mogą być stosowane różne ich kombinacje.



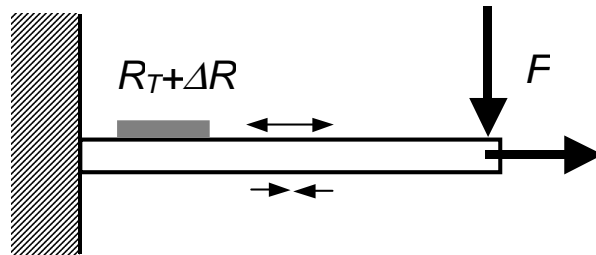
Układ ćwierć-mostka:

jeżeli  $R_1=R_2$  i  $R_4=R_T$  to:

$$U = -\frac{E}{4} \left( \frac{\Delta R_T}{R_T + \Delta R_T/2} \right)$$

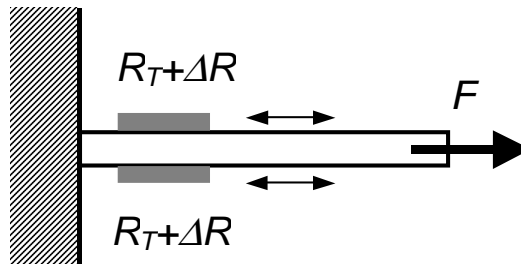
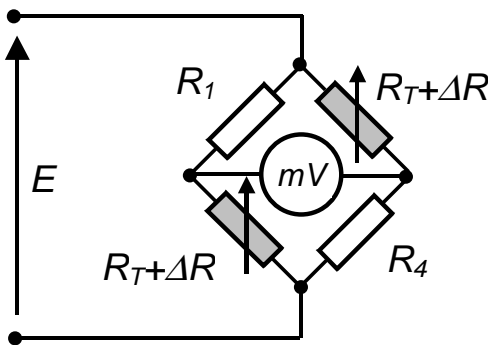


Może być wykorzystany np. do pomiaru zginania i rozciągania:



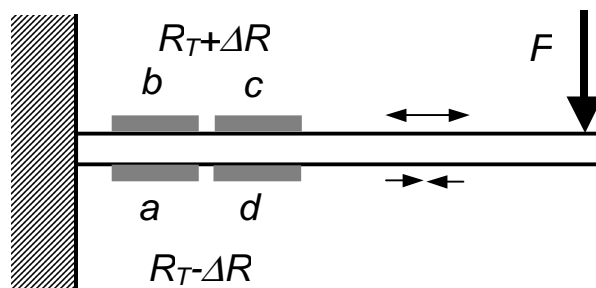
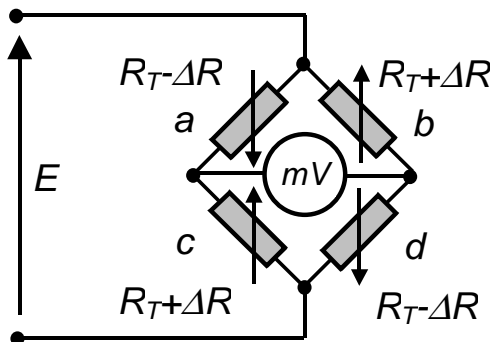
Układ pół-mostka:  $U = -\frac{E}{2} \left( \frac{\Delta R_T}{R_T} \right)$

Może być wykorzystany np. do pomiaru rozciągania (w poniższym układzie nieczułym na zginanie):



Układ pełnego mostka:  $U = -E \left( \frac{\Delta R_T}{R_T} \right)$

Może być wykorzystany np. do pomiaru zginania (w poniższym układzie nieczułym na rozciąganie):



Rysunek 10. Podstawowe układy pomiarowe czujnikami tensometrycznym

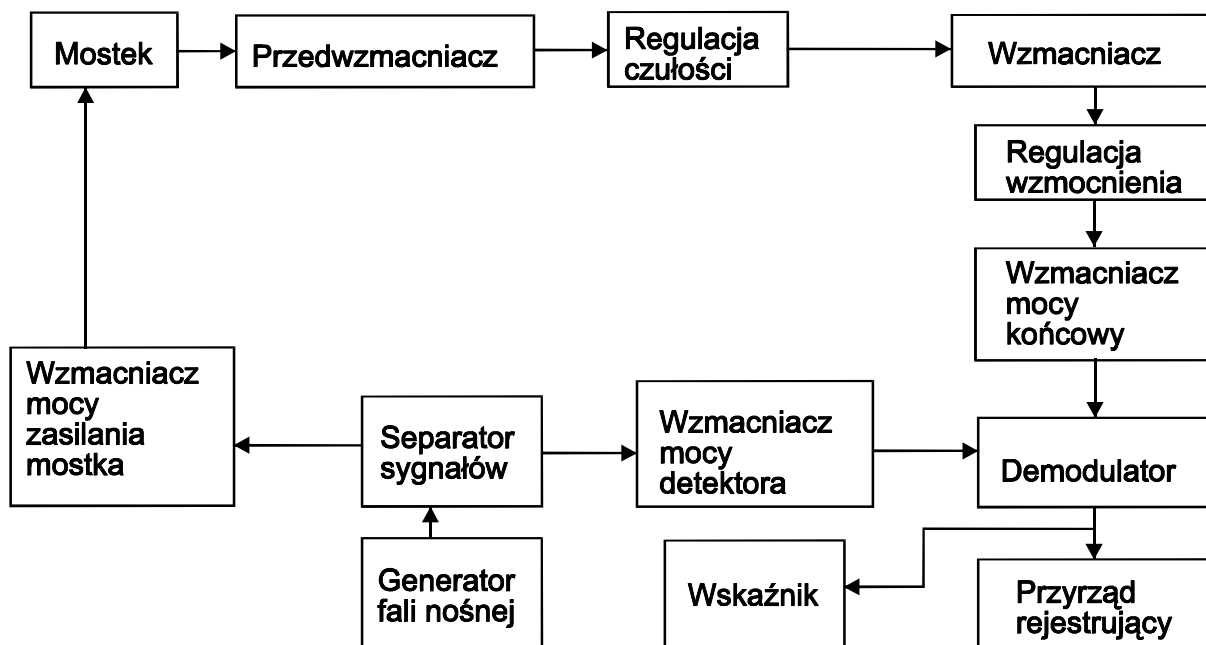
#### 4. Układy aparatury tensometrycznej

Podstawowy schemat mostka Wheatstone'a jest jednakowy zarówno dla pomiarów realizowanych przy zasilaniu go prądem stałym, jak i przemiennym. Nie przeprowadzając szczegółowej analizy, oraz zakładając, że w przypadku pomiarów stałoprądowych układ mostka składa się z rezystancji (oporów czynnych) zaś dla układów zmiennoprądowych - z impedancji (oporów zespolonych), można stwierdzić, że jeśli wszystkie cztery oporniki są jednakowe, to wyprowadzone w pkt. 3 zależności są słuszne zarówno dla prądu stałego, jak i zmiennego.

##### 4.1. Układ zmiennoprądowy

W układzie zmiennoprądowym, na skutek przemienności kierunku przepływu prądu, wpływ termoogniów jest eliminowany, a więc pod tym względem ma on istotną przewagę nad układem stałoprądowym. Uwzględniając ponadto prostszą konstrukcję i znacznie niższy koszt wzmacniacza prądu zmiennego, oczywiste stają się powody, wobec których przez szereg lat większość pomiarów tensometrycznych była realizowana w układzie prądu zmiennego. Układy prądu zmiennego nie są oczywiście całkowicie wolne od wad. Podstawową ich wadą jest ograniczenie (od góry) częstotliwości mierzonych przebiegów dynamicznych. Wynika to z faktu, że w pomiarze prądem zmiennym, mierzone przebiegi dynamiczne nakładają się, jako tzw. fala modulująca na przebieg o częstotliwości podstawowej ( napięcia zasilającego). Aby przebieg mierzony dało się z powrotem wyodrębnić, ich częstotliwości muszą znacznie różnić się między sobą.

W praktyce pomiarowej zaleca się, aby częstotliwość przebiegów mierzonych nie przekraczała wartości  $0,1 \div 0,3$  częstotliwości fali nośnej. Pełny schemat blokowy aparatury tensometrycznej do pomiarów statycznych i dynamicznych pracujących metodą mostka niezrównoważonego, w układzie prądu zmiennego na tzw. fali nośnej pokazano na rys. 11.



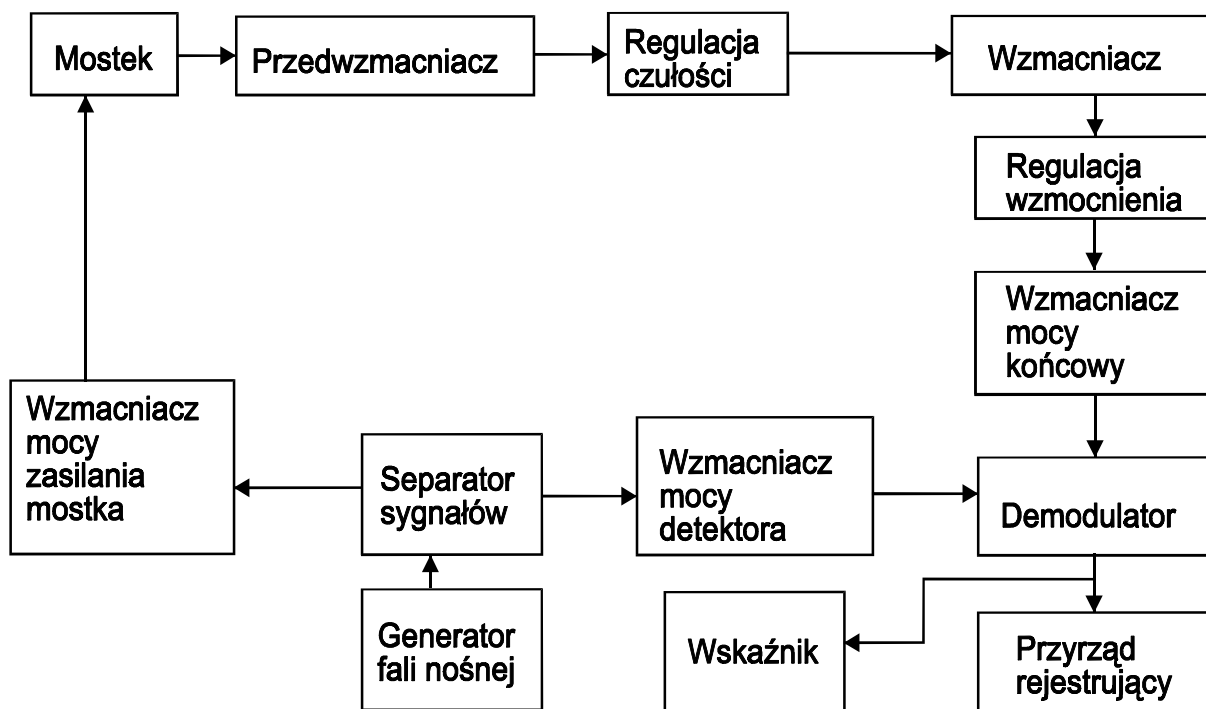
Rysunek 11. Schemat blokowy tensometrycznej aparatury wzmacniającej pracującej z falą nośną

Należy zwrócić uwagę, że urządzenia tensometryczne pracujące metodą mostka niezrównoważonego stosowane są zarówno do pomiarów statycznych jak i dynamicznych. Aparatura do pomiarów dynamicznych przenosi zarówno składową stałą, jak i składową zmienną mierzonych przebiegów. Generator podaje zmienne napięcie - o częstotliwości nośnej - do separatora. W separatorze sygnał zostaje rozdzielony i skierowany do wzmacniacza mocy zasilania mostka pomiarowego i wzmacniacza detektora. Napięcie o częstotliwości nośnej zostaje wzmocnione we wzmacniaczu i doprowadzone do przekątnej zasilania mostka pomiarowego. Sygnał wyjściowy z mostka jest modulowanym amplitudowo sygnałem fali nośnej. Sygnał wypadkowy jest wzmacniany, a następnie kierowany do układu regulacji czułości, zapewniający regulację wielkości prądu i napięcia wyjściowego z aparatury.

Z kolei sygnał powtórnie wzmocniony zostaje wprowadzony do układu regulującego wzmocnienie. Po wyjściu z układu regulacji wzmocnienia i przejściu przez wzmacniacz mocy stopnia końcowego, sygnał kierowany jest do demodulatora i detektora. Detektor sterowany jest sygnałem, który dociera do niego z generatora przez separator i wzmacniacz mocy detektora. Zadaniem demodulatora i detektora jest usunięcie częstotliwości nośnej z przebiegu mierzonego oraz identyfikacja jego polaryzacji. Wszystkie dotychczasowe operacje obróbki sygnału były wykonywane w układzie prądu zmiennego o kształcie fali nośnej, zmodulowanej przebiegiem mierzonym. W dyskryminatorze i detektorze fala nośna zostaje usunięta, zaś przebieg mierzony po dodatkowym odfiltrowaniu zostaje podany do wskaźnika wbudowanego do przyrządu, bądź też może być, w formie sygnału napięciowego lub prądowego, przekazany do urządzenia rejestrującego.

#### **4.2. Układ stałoprądowy**

Istotną wadą układu stałoprądowego była jego wrażliwość na zmiany temperatury otoczenia. Nie dotyczy to wrażliwości samych tensometrów na temperaturę, gdyż ten czynnik, występujący zarówno dla układu stałoprądowego jak i zmiennoprądowego, jest kompensowany przez odpowiednie zaprojektowanie układu pomiarowego, lecz tworzenia się termoogniw w miejscach połączenia metali o różnych właściwościach termoelektrycznych. Tensometry, z uwagi na bardzo mały współczynnik termicznej zmiany rezystancji, są z reguły wykonywane z konstantanu. Elektryczne przewody łączeniowe wykonuje się z miedzi. Materiał: miedź-konstantan tworzą termoparę o stosunkowo dużej sile termoelektrycznej, wynoszącej ok.  $0,5 \text{ mV}/10^\circ\text{C}$ . Wielkość ta jest porównywalna z sygnałem wyjściowym mostka Wheatstone'a. Całkowite skompensowanie wpływu temperatury w pomiarach stałoprądowych nie jest możliwe. Uda się to jedynie w ograniczonym zakresie, przez wprowadzenie, w układzie mostka Wheatstone'a, dodatkowych elementów kompensacyjnych. Współczesne przetworniki tensometryczne są z reguły wyposażone w taką kompensację, zapewniającą z określoną dokładnością poprawność ich pracy w wymaganym zakresie temperatur. Schemat blokowy tensometrycznej aparatury pracującej metodą mostka niezrównoważonego w układzie stałoprądowym, pokazano na rys. 12. Mostek pomiarowy, zasilany z zasilacza prądu stałego, połączono z układem równoważenia.



Rysunek 12. Schemat blokowy stałoprądowej aparatury wzmacniającej

Powstający podczas pomiaru sygnał niezrównoważenia mostka jest kolejno wzmacniany, regulowany stosownie do zakresu pomiarowego i przez końcowy wzmacniacz mocy kierowany do wskaźnika lub do przyrządu rejestrującego. Jak widać ze schematu jest on znacznie prostszy od układu zmiennoprądowego. Przez szereg lat podstawową trudnością było zbudowanie wzmacniacza o stosunkowo dużym wzmocnieniu (ok.  $10^4$ ) oraz o dużej stabilności. Problem ten został obecnie rozwiązany i współczesne urządzenia tensometryczne z powodzeniem pracują w również w układach stałoprądowych.

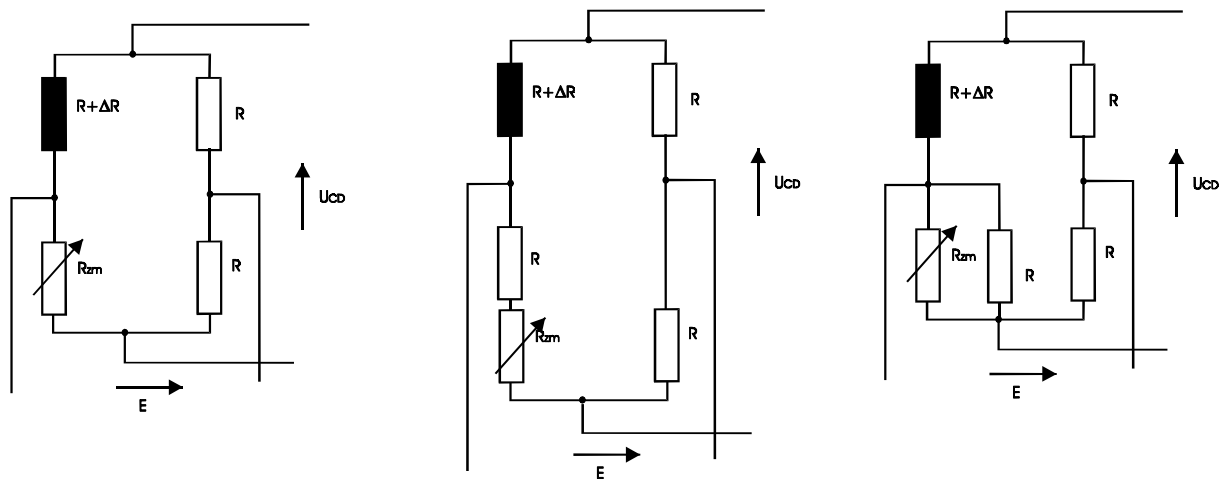
## 5. Równoważenie mostkowych układów tensometrycznych

W ogólnym przypadku możliwe są dwa rodzaje wykorzystania sygnału wyjściowego:

- **metoda mostka zrównoważonego**, polegająca na skompensowaniu sygnału niezrównoważenia
- **metoda mostka niezrównoważonego**, polegająca na bezpośrednim odczytaniu sygnału niezrównoważenia ( np. przy wykorzystaniu wskaźnika wychyłowego).

Obydwie metody są współcześnie wykorzystywane w tensometrii, przy czym każda z nich ma swoją specyfikę, która rekomenduje ją do określonego typu pomiarów.

Chronologicznie pierwszą była metoda mostka zrównoważonego. Zasada jej, polega na skompensowaniu niezrównoważenia mostka, spowodowanego zmianą rezystancji jednego lub kilku tensometrów tak, aby przyrząd włączony na przekątnej pomiarowej wskazywał ponownie stan równowagi. Organ kompensacyjny może być umieszczony np. w jednej z gałęzi mostka w formie opornika o zmiennej rezystancji. Układ taki przedstawiono na rys. 13a. Zmiana rezystancji jednego z oporników (tensometru) o wartość  $\Delta R$  może być skompensowana przez zmianę wielkości opornika  $R_{zm}$ . Jeśli z kolei opornik ten jest przyrządem skalowanym, to nieznaną wartość rozstrojenia  $\Delta R$  może być bezpośrednio odczytana na jego skali.



Rysunek 13. Sposoby równoważenia mostka tensometrycznego

Ponieważ mierzone zmiany  $\Delta R$  są bardzo małe ( $0.01 \div 1 \Omega$ ), więc ich pomiar, wymagający analogicznych co do wielkości zmian rezystancji opornika  $R_{zm}$ , jest trudny do zrealizowania. Możliwe są dwa podstawowe schematy: zmiana rezystancji w układzie szeregowym (rys. 13b), bądź też równoległym (rys. 13c). Realizacja zmian rezystancji w układzie szeregowym jest trudna pod względem technicznym. Dużą rolę odgrywają tutaj trudne często do wyrażenia rezystancji doprowadzeń, styków, itp. sumujące się w szereg z rezystancją opornika nastawianego  $R_{zm}$ . W praktyce realizowany jest schemat przedstawiony na rys. 13c. Omówiony sposób nosi często nazwę pomiaru metodą zerową. Jest on niestety obarczony zasadniczą wadą, polegającą na tym, że dla dokonania kompensacji układu pomiarowego niezbędne jest, aby przez pewien okres czasu wielkość mierzona pozostawała niezmienną. Nadaje się, więc tylko do pomiarów statycznych. Wady tej pozbawiona jest metoda mostka niezrównoważonego zwana często metodą wychyłową. Polega ona na bezpośrednim pomiarze niezrównoważenia mostka pomiarowego przy wykorzystaniu odpowiedniego przyrządu.

## 6. Pomiar wielkości mechanicznych

Ogólnie można stwierdzić, że pomiar wielkości mechanicznej metodą tensometryczną sprowadza się do pomiaru odkształceń spowodowanych przez tę wielkość. Pomiar wielkości mechanicznych metodą tensometryczną wymaga, zatem doboru odpowiedniej konstrukcji układu przetwarzającego wielkość mierzoną na odkształcenie elementu pomiarowego. Wykonane tą metodą przetworniki są proste i tanie, a często bardziej dokładne od przetworników opartych na innych zasadach pomiaru. W celu zrealizowania metodą tensometryczną pomiaru dowolnej wielkości mechanicznej należy opracować przetworniki, które będą realizowały ciąg przekształceń przedstawiony na rys. 14.



Rysunek 14. Ciąg przekształceń realizowany przez przetwornik tensometryczny

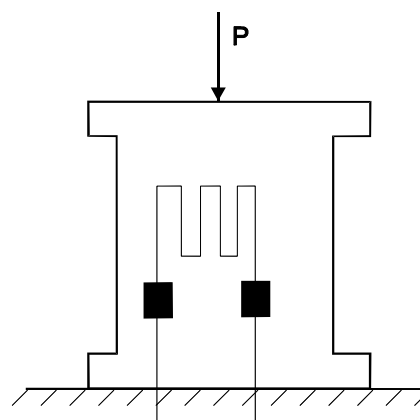
Wielkość mierzona wywołuje proporcjonalne odkształcenie elementu sprężystego. Na elemencie sprężystym jest naklejony tensometr (lub tensometry). Tensometr odkształca się w ten sam sposób, jak element sprężysty. Przy zachowaniu odpowiednich warunków odnośnie konstrukcji elementu sprężystego, zmiana rezystancji tensometru jest wprost proporcjonalna

do wielkości mierzonej. Sygnał zmiany rezystancji jest przekazywany do urządzenia pomiarowego.

### 6.1. Pomiar siły

Najprostszym przykładem pomiarów wielkości mechanicznej przy wykorzystaniu techniki tensometrycznej jest pomiar siły. Schemat takiego układu przedstawiono na rys. 15. Mierzona siła powoduje odkształcenie elementu sprężystego o przekroju kołowym, cylindrycznym lub prostokątnym. Na elemencie tym jest nakleony tensometr. Odkształcenia tensometru są takie same, jak odkształcenia elementu, na którym tensometr jest nakleony, zaś odkształcenia elementu są proporcjonalne do wartości działającej siły.

W końcowym efekcie zmiana rezystancji tensometru jest proporcjonalna do wartości działającej siły. Parametry te są związane ze sobą w formie funkcji  $P=f(\Delta R)$  lub  $P=f(\Delta R/R)$ , stanowiącej użytkową charakterystykę przetwornika do pomiaru siły.



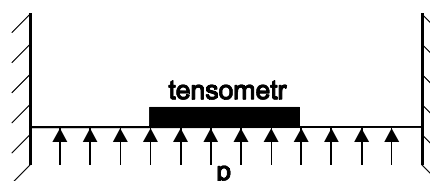
Rysunek 15. Schemat przetwornika do pomiaru siły w układzie ściskanym

### 6.2. Pomiar ciśnienia

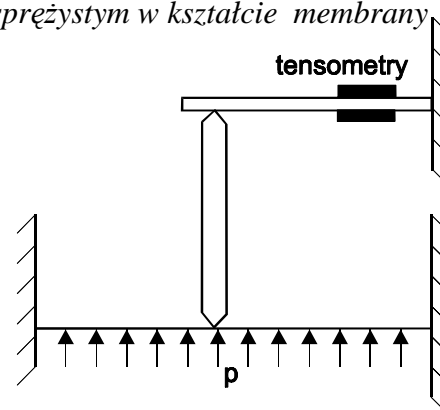
Jest on zapożyczony z typowych manometrów mechanicznych. Miejsce skomplikowanego układu mechanicznego, przetwarzającego ugięcie membrany na wychylenie wskazówki, zajmuje tensometr nakleony bezpośrednio na membranie. Zmiana rezystancji tensometru jest proporcjonalna do odkształceń membrany, a te z kolei - do wartości mierzonego ciśnienia. Układ konstrukcyjny umożliwia zarówno pomiar wartości ciśnienia w stosunku do ciśnienia otoczenia, jak również różnicy ciśnień. W pewnych przypadkach, omawiany układ (rys. 16) może być przekształcony w układ przedstawiony na rys. 17.

Wywołane działaniem ciśnienia ugięcie membrany pomiarowej jest przenoszone, za pośrednictwem sztywnego trzpienia, na element zginany. Tensometry są naklejone na elemencie sprężystym o kształcie belki zginanej, utwierdzonej jednostronnie. W stosunku do schematu przedstawionego na rys. 16, układ ten ma następujące zalety:

- umożliwia utworzenie pewnego rodzaju przełożenia, dzięki możliwości stosowania elementów sprężystych o odpowiedniej sztywności; stosunkowo niewielkie ugięcie membrany powodować może odpowiednio duże odkształcenia elementu zginanego;
- w przypadku pomiaru ciśnienia czynnika o wysokiej temperaturze istnieje możliwość oddalenia wrażliwych na temperaturę elementów, jakimi są tensometry.



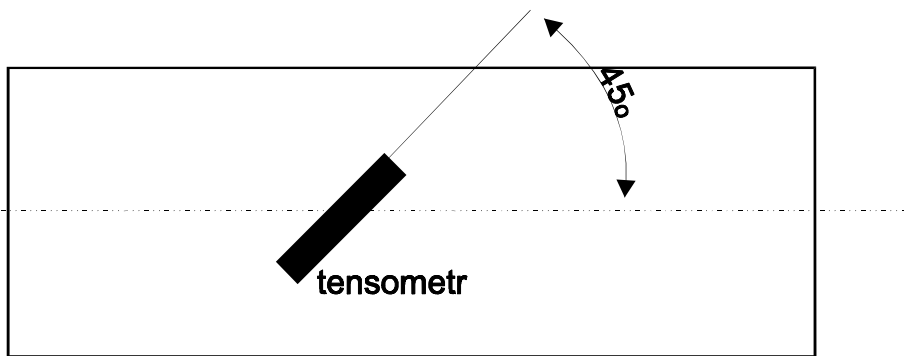
Rysunek 16. Schemat przetwornika do pomiaru ciśnienia z elementem sprężystym w kształcie membrany



Rysunek 17. Schemat przetwornika do pomiaru ciśnienia z elementem pośrednim

### 6.3. Pomiar momentu obrotowego

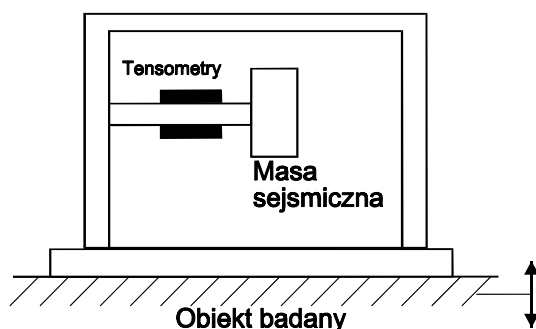
Z teorii wytrzymałości materiałów wynika, że w walcowym elemencie skręcanym, maksymalne odkształcenia występują pod kątem  $45^\circ$  do głównej osi skręcania. Zasada ta może być wykorzystana w przetwornikach momentu obrotowego. Na rys. 18 przedstawiono sprężysty element skręcany, na którym naklejono tensometr pod kątem  $45^\circ$  do osi skręcania w celu uzyskania maksymalnego sygnału wyjściowego. Zmiana rezystancji tensometru jest proporcjonalna do wielkości momentu skręcającego. Układ ten jest stosowany również w pomiarach momentów skręcających w elementach wirujących.



Rysunek 18. Schemat układu do pomiaru momentu obrotowego

### 6.4. Pomiar przemieszczeń

Do pomiaru przemieszczeń wykorzystywany jest m.in. układ belki jednostronnie utwierdzonej. Rozkład naprężeń w belce zginanej jest praktycznie, w pewnym zakresie, proporcjonalny do jej strzałki ugięcia. Tensometry naklejane w pobliżu miejsca utwierdzenia przekażą sygnał proporcjonalny do strzałki ugięcia końca belki. Przetworniki tensometryczne łatwo realizują pomiar przemieszczenia lub przyspieszenia. Prędkość w ruchu drgającym może być, przy wykorzystaniu metody tensometrycznej, określona jedynie przez zastosowanie odpowiednich układów elektronicznych różniczkujących przemieszczenie lub całkujących przyspieszenie. Układ z utwierdzoną belką posiada ujemną cechę, a mianowicie, stanowi on dodatkową więź sprężystą, która swą obecnością może w pewnych przypadkach wpływać na parametry mierzonego ruchu. Wady powyższej nie posiada układ przedstawiony na rys. 19.

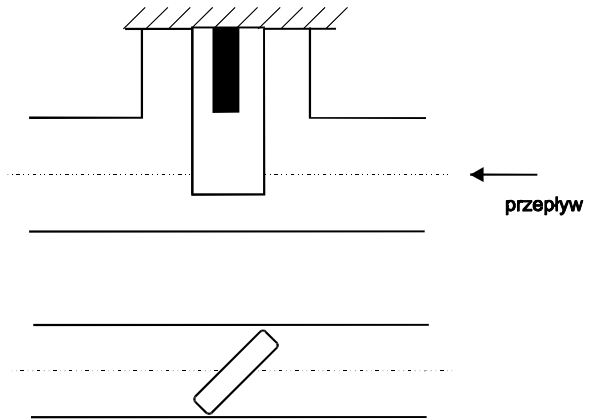


Jest to tzw. układ sejsmiczny. Tensometry naklejone są na elemencie sprężystym ( płaska sprężyna ) obciążonym z jednej strony ciężarem o określonej masie, a z drugiej - sztywno zamocowanym.

Rysunek 2. Schemat układu z masą sejsmiczną

## 6.6. Pomiar natężenia przepływu

Pomiar ten polega na wykorzystaniu zginanego elementu sprężystego oraz faktu oddziaływania sił aerodynamicznych na profil umieszczony pod kątem do kierunku napływającego strumienia. Schemat konstrukcji przetwornika pokazano na rys. 20. Ciśnienie dynamiczne przepływającego płynu powoduje powstawanie siły zginającej element sprężysty na którym naklejone są tensometry. Siła zginająca jest tym większa im większa jest prędkość przepływu. Przy stałej prędkości przepływu siła ta będzie tym większa im większy kąt tworzy płaszczyzna elementu sprężystego z kierunkiem napływu strugi. Układ zatem pozwala na ewentualne zmiany zakresu pomiarowego. Jednak należy zwrócić uwagę, iż siła gnąca jest proporcjonalna do kwadratu prędkości czynnika, a więc charakterystyka przetwornika jest nieliniowa.



Rysunek 3. Schemat układu do pomiaru natężenia przepływu