

POLITECHNIKA



BIAŁOSTOCKA

WYDZIAŁ



INŻYNIERII
ZARZĄDZANIA

KATEDRA ZARZĄDZANIA PRODUKCJĄ

Instrukcja do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu:

Podstawy techniki i technologii

Kod przedmiotu: ISO 02123, INO 02123

Ćwiczenie Nr 14

**WYZNACZANIE STAŁEJ
PRZETWARZANIA PRZETWORNIKA
TENSOMETRYCZNEGO**

O p r a c o w a ł :

dr inż. Arkadiusz Łukjaniuk

Białystok 2023

Wszystkie prawa zastrzeżone

Wszystkie nazwy handlowe i towarów występujące w niniejszej instrukcji są znakami towarowymi zastrzeżonymi lub nazwami zastrzeżonymi odpowiednich firm odnośnych właścicieli.

Celem ćwiczenia jest opanowanie metody wyznaczania stałej przetwarzania przetworników tensometrycznych, a także poznanie właściwości tensometrów oporowych oraz zastosowanie ich do wyznaczania odkształceń statycznych, zapoznanie się z budową i obsługą mostka laboratoryjnego Wheatstone'a.

1. PODSTAWY TEORETYCZNE

1.1. Budowa i zasada działania przetwornika tensometrycznego

Przy obciążeniach statycznych dla oceny naprężeń wymagany jest pomiar odpowiednich odkształceń. Zmiany liniowe wymiarów $\varepsilon = \Delta l / l$ mierzone są pośrednio przy pomocy mostka zwanego mostkiem tensometrycznym:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

Elementem, który przetwarza zmiany odkształceń na zmiany rezystancji jest przetwornik naprężno–oporowy, zwany tensometrem. W zależności od materiału, z którego są wykonane, tensometry dzielą się na trzy typy grupy:

- drutowe;
- foliowe;
- półprzewodnikowe.

Przetwornik drutowy posiada szereg równoległe ułożonych drucików oporowych o średnicy ok. 25μm, najczęściej w postaci wężyka. Wężyk nakleja się na cienki papier lub folię. Od góry wężyk przykryty jest taką samą warstwą papieru lub folii. Do obu końców czujnika przyspawane są wyprowadzenia elektryczne.

W czujniku foliowym elementem czynnym jest folia konstantanowa o grubości 5 - 10 μ m. Tensometry foliowe mają szereg zalet w porównaniu z drutowymi:

- powtarzalność parametrów - rezystancji i czułości;
- możliwość wykonania skomplikowanych kształtów;
- lepsze warunki odprowadzania ciepła, co pozwala na zwiększenie napięcia zasilającego i w efekcie większą wartość sygnału na przekątnej mostka tensometrycznego.

Czujniki półprzewodnikowe uzyskiwane są w wyniku odpowiedniego cięcia kryształu półprzewodnika. Wartość i znak czułości tych tensometrów zależy od rodzaju półprzewodnika oraz płaszczyzny cięcia kryształu. Stała tensometrów półprzewodnikowych jest większa od 20 – 100 razy w porównaniu z metalowymi, dzięki istnieniu zjawiska piezorezystywności zachodzącego w półprzewodnikach. Dodatkową zaletą tensometrów półprzewodnikowych jest duża rezystancja (dziesiątki k Ω), co pozwala na ich miniaturyzację. Oprócz zalet te tensometry posiadają też i wady:

- mała powtarzalność parametrów - rezystancji i czułości;
- duża i nieliniowa zależność rezystancji i czułości od temperatury;
- większa, w porównaniu do tensometrów metalowych, nieliniowość zmian rezystancji w funkcji odkształcenia.

Wszystkie wymienione czujniki mogą występować, jako dotykowe lub naklejane. W przypadku czujników naklejanych, podczas pomiarów tensometr jest przyklejony do badanej konstrukcji, np. metalowej. Wielkością mierzoną jest rezystancja drutu, folii lub półprzewodnika. Między względnym przyrostem

rezystancji drutu $\frac{\Delta R}{R}$, a jego odkształceniem ϵ zachodzi związek:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon, \quad (1)$$

gdzie: k – stała tensometru.

Rezystancja drutu R wynosi:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (2)$$

gdzie: ρ - rezystywność materiału, z którego został wykonany drut;

l – długość drutu;

S – pole powierzchni przekroju poprzecznego drutu.

Jeżeli nastąpi odkształcenie jednostkowe drutu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (3)$$

to nastąpi zmiana rezystancji względnej $\Delta R/R$.

Po zlogarytmowaniu i zróżniczkowaniu wyrażenia (2) oraz po przejściu do przyrostów skończonych, otrzymamy:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S}. \quad (4)$$

Liczbę Poissona można przedstawić jako:

$$\nu = \frac{\frac{\delta d}{d}}{\frac{\Delta L}{L}},$$

gdzie: d – średnica drutu.

Wyznaczając z równania (4) iloraz względnego przyrostu rezystancji do wydłużenia jednostkowego uzyskamy:

$$k_m = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = 1 + 2\nu + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon}, \quad (5)$$

gdzie: k_m – stała materiałowa charakteryzująca wyłącznie dany materiał, nie uwzględniająca konstrukcji tensometru. Na przykład w czujniku drutowym wężykowym, przy odkształceniu wzdłuż osi tensometru, stała tensometru wynosi:

$$k = \frac{n \cdot b - a \cdot \nu}{n \cdot b + a} \cdot k_m$$

(6)

gdzie: b – czynna długość tensometru;

a – szerokość tensometru;

n – ilość drutów ułożonych równolegle;

ν – liczba Poissona.

Ponieważ połączenia poprzeczne dla tego rodzaju tensometrów są wykonane z tego samego materiału, czujnik będzie też reagował na odkształcenia poprzeczne. Stałą poprzeczną takiego tensometru określa się wzorem:

$$k_p = \frac{a - \nu \cdot n \cdot b}{n \cdot b + a} \cdot k_m \quad (6a)$$

W przypadku tensometrów kratowych rezystancja połączeń czołowych nie wpływa na wielkość względnej zmiany rezystancji zarówno przy odkształceniach podłużnych, jak i poprzecznych. Dla tego przypadku zachodzi:

$$k = k_p = k_m \quad (6b)$$

Stała tensometru k podana jest przez wytwórcę, który wyrywkowo wyznacza ją dla produkowanej serii. Stała ta obowiązuje dla przypadku, gdy oś tensometru pokrywa się z kierunkiem odkształceń mierzonych (tak należy naklejać tensometr). Rezystancja tensometrów metalowych może się zawierać w granicach 50Ω – do kilku $k\Omega$. Względne zmiany rezystancji tensometru są rzędu ułamków procent przy

maksymalnym odkształceniu układu. Zwykle przetworniki tensometryczne włączone są w układy mostkowe. Poziom napięcia wyjściowego z przekątnej mostka zależy od wartości napięcia zasilającego. Przy napięciu zasilającym 10V, napięcie wyjściowe jest rzędu 10 – 100mV.

1.2. Dokładność pomiarów tensometrycznych

Na dokładność pomiarów tensometrycznych wpływają następujące czynniki:

- błędy termiczne:
 - zmiana rezystancji pod wpływem zmiany temperatury czujnika;
 - różny współczynnik rozszerzalności liniowej tensometru i podłoża, na które jest naklejony tensometr (są to tzw. pozorne naprężenia);
 - możliwość powstawania sił termoelektrycznych (powstających na styku dwóch różnych metali);
- błędy natury elektrycznej:
 - niedokładne określenie stałej tensometru;
 - rezystancja przewodów łączących czujnik z układem pomiarowym;
 - pojemność własna czujnika i przewodów łączących go z mostkiem;
 - zniekształcenia sygnału w układach elektronicznych mostka, itp.
- błędy czujnika i naklejania: histereza, pełzanie, wadliwe naklejenie, czułość poprzeczna, wilgoć, itp.

Źródłem największych błędów są wahania temperatury i wilgoć. Przy zmianie temperatury o ΔT względna zmiana rezystancji tensometru wyniesie:

$$\frac{\Delta R}{R_0} \cdot \Delta T = (\alpha + (\beta_p - \beta_d) \cdot k) \cdot \Delta T \quad , \quad (7)$$

gdzie: α – współczynnik termicznych zmian rezystancji drutu tensometru;

β_p, β_d – współczynniki rozszerzalności liniowej podłoża i drutu;

k – stała tensometru;

R_0 – rezystancja tensometru w temperaturze początkowej.

Błędy spowodowane wpływem temperatury eliminuje się poprzez stosowanie dwóch tensometrów: pomiarowego i kompensacyjnego. Tensometr pomiarowy nakleja się na badanym elemencie. Taki sam tensometr – kompensacyjny – nakleja się na takim samym materiale, lecz w miejscu nie poddawany naprężeniom. Oba tensometry muszą znajdować się w tej samej temperaturze i tworzą przeciwległe gałęzie mostka. Przy jednakowych zmianach temperatury dla obu tensometrów, stan równowagi mostka nie ulega zmianie – będzie natomiast zależał tylko od odkształcenia tensometru pomiarowego. W pewnych przypadkach, np. przy zginaniu, można stosować dwa tensometry czynne, tak naklejone, że jeden jest ściskany, a drugi rozciągany i w ten sposób zapewnią kompensację wpływu temperatury. Czułość takiego układu pomiarowego, nazywanego półmostkiem, będzie dwukrotnie większa. W przypadku możliwości zastosowania czterech czynnych tensometrów (układ pełnego mostka) też jest zapewniona kompensacja wpływu temperatury, a czułość wzrasta 4 razy.

Wilgotność zmienia właściwości kleju jak i podkładki nośnej czujnika, a tym samym powoduje zmianę warunków przenoszenia odkształceń konstrukcji na drut czujnika. Dalszą konsekwencją wpływu wilgotności jest zmiana właściwości izolacji czujnika. Przejawia się to zmianą rezystancji między wyprowadzeniami czujnika, jak też zmianą rezystancji między czujnikiem i konstrukcją badaną. Oba przypadki prowadzą do spadku rezystancji czujnika. Przy zmianie rezystancji izolacji między wyprowadzeniami:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx 1 - \frac{R_1'}{R_1} \cdot \frac{R_1' + R}{R_1 + R} \quad (8)$$

Przy zmianie rezystancji izolacji względem masy:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{R}{12} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'} \right), \quad (8a)$$

gdzie: **R** – rezystancja czujnika;

R₁, R₁' – rezystancja izolacji “suchej” i “wilgotnej”.

W celu zabezpieczenia tensometrów od wpływów wilgoci konieczne jest pokrywanie tensometru powłokami ochronnymi. W tensometrach, w których druty oporowe wykonane są z materiałów ferromagnetycznych, występuje niekiedy zjawisko magnetostrykcyjne, które może powodować powstanie napięć zakłócających w pomiarowej przekątnej mostka rzędu 2mV. Daje się to zauważyć dopiero po dłuższej pracy tensometru poddanego działaniu prądu elektrycznego i narażonego na wielokrotne odkształcenia udarowe.

1.3. Naklejanie tensometrów

Tensometry naklejane są zazwyczaj przy pomocy kleju nitrocelulozowego. Duży wpływ na dokładność pomiarów ma ściśle przyleganie tensometru do badanej konstrukcji. Przyczyną powstawania dużych błędów pomiaru mogą być pęcherzyki powietrza i wnęki tworzące się między powierzchnią tensometru i badanym elementem wskutek ich nieściśłego przylegania.

Do zalet tensometrów naklejanych zaliczyć można:

- ✓ elastyczność, pozwalającą na sprzęganie ich z elementami o różnych kształtach;
- ✓ małe wymiary;
- ✓ stabilność działania;
- ✓ wysoka dokładność działania.

Do wad natomiast zaliczyć można:

- ✓ wymaganie dużych zewnętrznych sił odkształcających;

- ✓ mała czułość w porównaniu z czujnikami pojemnościowymi i indukcyjnymi;
- ✓ długi czas przymocowywania do badanego elementu.

1.4. Układy pomiarowe

W pomiarach tensometrycznych powinno stosować metody do pomiaru bardzo małych zmian rezystancji. Najczęściej zmiany rezystancji tensometru mierzy się w układach mostków zrównoważonych i niezrównoważonych, zasilanych prądem stałym lub przemiennym. Dobór metody wynika z wymagań dokładności pomiaru. Zmiany rezystancji tensometrów pod wpływem zmian odkształceń mierzonych są stosunkowo małe, co powoduje niewielkie zachwianie równowagi mostka, które można wykryć stosując bardzo czułe galwanometry lub przez wmontowanie w układ wzmacniacza i pomiar napięć wyjściowych mniej czułym miernikiem. Zastosowanie wzmacniacza pomiarowego zwiększa czułość układu, zmniejszając niekiedy dokładność pomiarów w porównaniu z metodami klasycznymi.

Konieczność wzmacniania sygnału przekątnej pomiarowej mostka, szczególnie w urządzeniach przenośnych powoduje, że celowym jest zasilanie układu pomiarowego napięciem przemiennym. Zasilanie takie eliminuje ponadto wpływ sił termoelektrycznych, powstających na stykach układu przy zmianie temperatury otoczenia. Zwykle taki układ pomiarowy składa się z trzech zasadniczych części:

- ✓ układ mostkowy z przetwornikami;
- ✓ generator (najczęściej o częstotliwości akustycznej);
- ✓ wzmacniacz z prostownikiem fazoczułym i miernikiem na wyjściu.

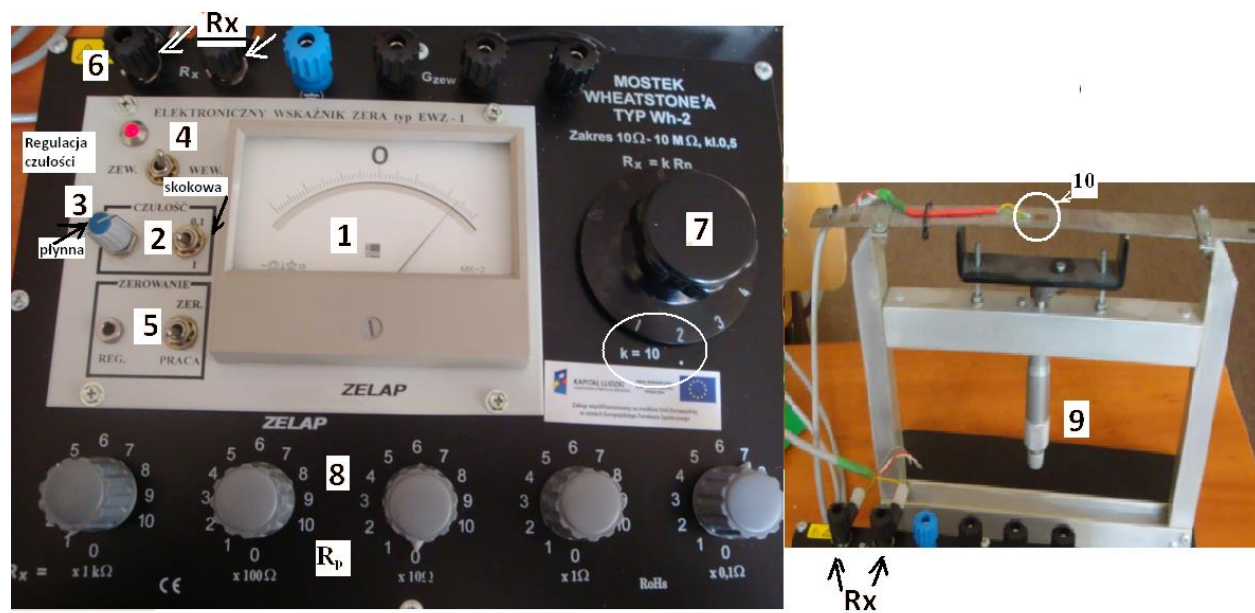
Ze względu na możliwość pracy mostka w układzie niezrównoważonym, generator zasilający powinien spełniać warunki wysokiej stabilności częstotliwości i amplitudy. Osiąga się to przez stosowanie stabilizacji napięć zasilających i silnego

sprężenia zwrotnego w układzie wzmacniacza oraz przez odpowiednie dopasowanie rezystancji wszystkich członów układu.

2. WYZNACZANIE STAŁEJ TENSOMETRU

2.1. Przygotowanie mostka do pomiarów

Na rysunku 1a przedstawiony jest widok z góry mostka laboratoryjnego Wheatstone'a, a na rys. 1b – widok stanowiska badawczego.

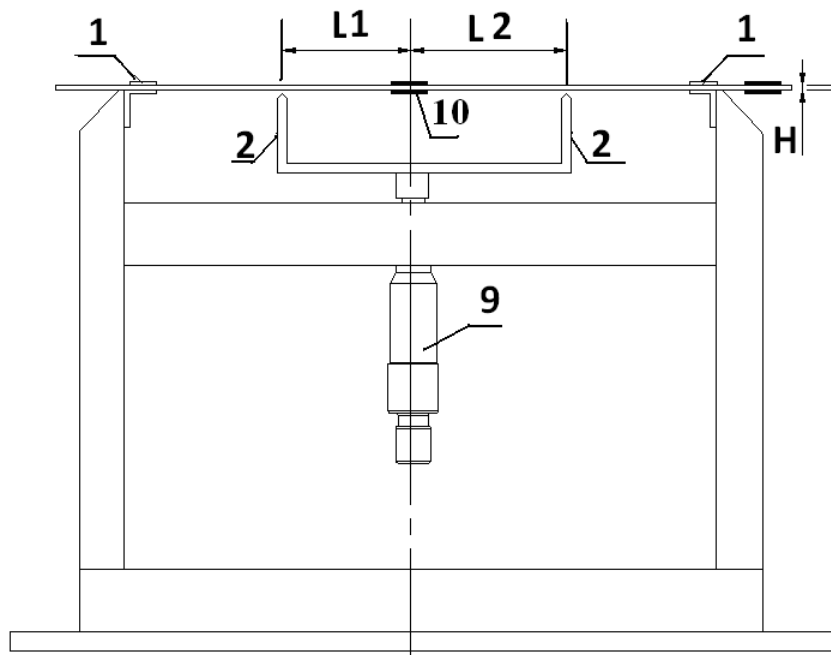


a)

b)

Rys.1. a) mostek laboratoryjny Wheatstone'a; b) stanowisko badawcze: **1**- wskaźnik zera; **2** – przełącznik skokowej regulacji czułości wskaźnika zera **1**; **3** - pokrętko płynnej regulacji wskaźnika zera **1**; **4** - przełącznik rodzaju wskaźnika zera (powinien być w pozycji **WEW.**); **5** – przełącznik trybu pracy (przy pomiarach w pozycji **PRACA**); **6** – zaciski podłączania rezystancji badanego tensometru; **7** – pokrętko ustawiania mnożnika **k**; **8** – rezystor dekadowy **R_p**, służący do równoważenia mostka; **9** – śruba mikrometryczna służąca do wyginania belki z naklejonym tensometrem **10**; **10** – badany tensometr.

Tensometr **10** jest naklejony na belkę (rys.2), którą ulega zginaniu za pomocą śruby mikrometrycznej **9**. Belka leży na dwóch podporach **2**, położonych od siebie w odległości $L_3=L_1+L_2$. Końce belki umocowane są sztywno w strzemionach **1**. Kręcąc śrubą mikrometryczną **9** powoduje się unoszenie podpór, które wyginają belkę.



Rys. 2. Stanowisko badawcze do wyznaczania stałej tensometru.

Między odkształceniem jednostkowym ε a wymiarami belki i strzałką ugięcia f przy zginaniu za pomocą urządzenia wg. rysunku 2 zachodzi zależność :

$$\varepsilon = \frac{4H}{L^2} \cdot f \quad (9)$$

Przed rozpoczęciem pomiarów należy sprawdzić położenia poszczególnych przełączników na panelu mostka Wheatstone'a:

- przełącznik **4** w pozycji **WEW.**;
- przełącznik **2** w pozycji **0,1**;
- przełącznik **5** w pozycji **PRACA**;
- potencjometr **3** w środkowym położeniu.

Następnie zmierzyć za pomocą multimetru rezystancję tensometru i ustawić jej wartość przy pomocy dekad rezystora R_p w następujący sposób np.: jeżeli zmierzona multimetrem rezystancja R_x wynosi 125,3 Ω , to na pierwszej z lewa dekadzie ustawiamy **1**, na drugiej - **2**, na trzeciej – **5**, na czwartej - **3**, a na ostatniej - **0**.

Wartość mnożnika **k** ustawiamy pokrętle 7 po uprzednim wyznaczeniu z zależności (w przytoczonym przykładzie $R_p=1253,0 \Omega$, a $R_p/R_x=10$, to $k=2$):

$$\frac{R_p}{R_x} = 10^{k-3}. \quad (10)$$

Podłączamy badany tensometr przy pomocy przewodów do zacisków R_x mostka.

Włączamy mostek przełącznikiem znajdującym się z tyłu obudowy (zapali się lampka kontrolna na panelu mostka).

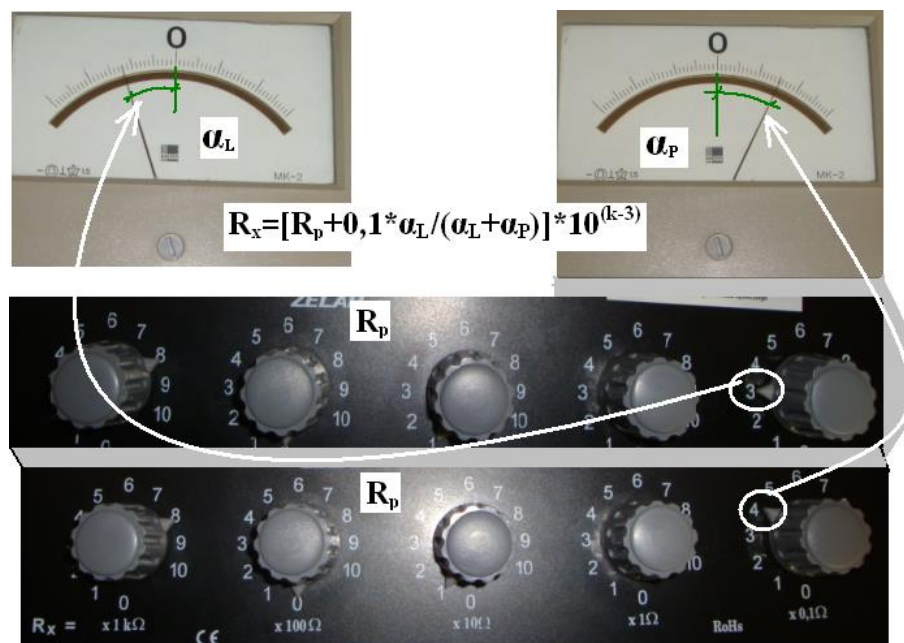
2.2. *Przeprowadzenie pomiarów (Uwaga, przed rozpoczęciem pomiarów zapoznać się z obsługą laboratoryjnego MWh – instrukcja Nr1 p. 2.2)*

- a) zmierzyć suwmiarką odległość **L** i mikrometrem grubość **H** belki (wyniki pomiarów zanotować w tabeli 1);
- b) ustawić śrubę mikrometryczną na wartości 12,5mm;
- c) regulując dekadami (zaczynając od najmniejszej – tej z prawej strony panelu mostka) doprowadzić do wyzerowania wskaźnika zera **1** (rys. 1);
- d) zmienić skokowo czułość mostka z **0,1** na **1** przełącznikiem **2**;
- e) regulując ostatnią dekadą R_p doprowadzić do stanu, gdy przełączanie ostatniej dekady R_p o jedną wartość powoduje zmianę wychylenia wskaźnika zera z lewego na prawe (w razie potrzeby można zwiększyć czułość pokrętle płynnej regulacji 3);
- f) zapisać wartość R_p dla lewego wychylenia wskaźnika zera (w kolumnie R_{pn} – tabela 1) oraz wartość wychylenia wskazówki α_L w działkach - rys.3 (w kolumnie α_n lewe);
- g) zwiększyć o jedną wartość ostatnią dekadę R_p , odczytać wychylenie prawe wskaźnika zera (rys.3) i zanotować w tabeli 1 - kolumna α_n prawe;
- h) zwiększamy ugięcie belki o 0,1 mm (przekręcając śrubę mikrometryczną na wartość 12,6mm);
- i) powtarzamy operacje wymienione w punktach **e-h**, aż do uzupełnienia wszystkich wierszy tabeli 1, czyli do wartości 15,5 mm na śrubie mikrometrycznej.

2.3. Obliczenia

Dokładną wartość rezystancji R_{xn} odpowiadającej n-temu pomiarowi odkształcenia belki wyznaczamy z zależności:

$$R_{xn} = [R_{pn} + 0,1 \cdot \alpha_L / (\alpha_L + \alpha_P)] \cdot 10^{(k-3)} \Omega. \quad (11)$$



Rys. 3. Ilustracja metodyki wyznaczania dokładnej wartości rezystancji R_x .

Obliczenie wartości przyrostu rezystancji przy n-tym przedziale odkształcenia:

$$\Delta R_n = R_{Xn} - R_{Xn-1} . \quad (12)$$

Wartość stałej tensometru w n-tym przedziale odkształcenia:

$$k_n = \frac{\Delta R_n}{\Delta \varepsilon_n \cdot R_{Xn-1}} , \quad (13)$$

$$\Delta \varepsilon_n = \frac{4 \cdot H}{L^2} \cdot \Delta f_n \cdot 1,45529 , \quad (14)$$

gdzie: L- odległość strzemion w mm;

H – grubość belki w mm;

1,45529 – stała konstrukcyjna;

$\Delta \varepsilon_n$ – przyrost odkształcenia jednostkowego w n-tym pomiarze.

Wartość k_{sr} wyznaczamy z zależności:

$$k_{sr} = \frac{\sum_{n=1}^N k_n}{N},$$

gdzie: N – liczba pomiarów.

Celem określenia stałej tensometru k należy wykreślić w czasie zajęć zależność:

$$\frac{\Delta R}{R} = f(\varepsilon)$$

Oznaczenia w tabeli 1:

$\Delta f_n = f_n - f_{n-1}$ – przyrost ugięcia spowodowana n -tym wygięciem belki;

R_{p_n} – rezystancja odczytana z opornika dekadowego R_p przy lewym wychyleniu wskaźnika zera;

α_n lewe – wychylenie wskazówki galwanometru przy R_{p_n} ;

α_n prawe – wychylenie wskazówki galwanometru przy $R_{p_n} + 0,1\Omega$;

R_{X_n} – wartość rezystancji odpowiadająca n -temu pomiarowi odkształcenia belki;

ΔR_n – zmiana rezystancji spowodowana n -tym wygięciem belki;

k_n – stała tensometru odpowiadająca n -temu pomiarowi odkształcenia belki,;

$\Delta \varepsilon_n$ – przyrost wydłużenia belki pomiarowej odpowiadający n -temu pomiarowi;

H – grubość belki pomiarowej w mm;

L – długość pomiarowa belki w mm.

Wykres oraz wypełnioną tabelę 1 przedstawić prowadzącemu, a następnie na podstawie uzyskanych wyników pomiarów wyznaczyć stałą tensometru, aproksymując wykreśloną zależność linią prostą. Współczynnik kierunkowy wykreślonej prostej równy jest poszukiwanej stałej tensometru. Wyznaczyć go można graficznie, lub obliczyć korzystając z metody najmniejszych kwadratów, zgodnie z zależnością (15), w której N równe jest liczbie wykonanych pomiarów.

$$k = \frac{N \sum_{n=1}^N \left(\varepsilon_n \frac{\Delta R_n}{R} \right) - \sum_{n=1}^N \frac{\Delta R_n}{R} \cdot \sum_{n=1}^N \varepsilon_n}{N \sum_{n=1}^N \varepsilon_n^2 - \left(\sum_{n=1}^N \varepsilon_n \right)^2} \quad (15)$$

Tabela 1.

Lp.	f mm	R_{pn} Ω	α_n lewe dz	α_n prawe dz	R_{Xn} Ω	ΔR_n Ω	$\frac{\Delta R_n}{\Delta R_{n-1}}$	Δf_n mm	$\Delta \varepsilon_n$	k_n	k_{sr}
0	0						-	-	-	-	
1	0,1										
2	0,2										
3	0,3										
4	0,4										
5	0,5										
6	0,6										
7	0,7										
8	0,8										
9	0,9										
10	1,0										
11	1,1										
12	1,2										
13	1,3										
14	1,4										
15	1,5										
16	1,6										
17	1,7										
18	1,8										
19	1,9										
20	2,0										
21	2,1										
22	2,2										
23	2,3										
23	2,4										
25	2,5										
26	2,6										
27	2,7										
28	2,8										
29	2,9										
30	3,0										

3. WNIOSKI

1. Podać uwagi o przebiegu pomiarów.
2. Zinterpretować wyniki pomiarów, ze szczególnym uwzględnieniem porównania wartości wyznaczonych z pomiarów z wartościami uzyskanymi z obliczeń.
3. Wyjaśnić przyczyny rozbieżności między tymi wartościami.
4. Omówić kształt wykreślonych zależności.
5. Przedyskutować wpływ czynników zewnętrznych na dokładność pomiarów.

4. PYTANIA KONTROLNE

1. Tensometr oporowy – narysować i omówić budowę oraz zasadę działania.
2. Rodzaje tensometrów, właściwości, wady i zalety.
3. Błędy pomiarowe w pomiarach tensometrycznych – przyczyny ich powstawania i metody minimalizacji.
4. Zastosowania tensometrów wymienić, jedno z nich narysować i opisać.
5. Omów procedurę wyznaczania stałej tensometru.
6. Omów proces pomiaru rezystancji mostkiem laboratoryjnym Wheatstone'a.

5. LITERATURA

1. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: *Metrologia elektryczna*, WNT, Warszawa, 2003.
2. Piotrowski J.: *Podstawy miernictwa*, WNT, Warszawa, 2002.
3. Roliński Z.: *Tensometria oporowa*, WNT, Warszawa 1981.
4. Miłek M.: *Pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi*. Pol. Zielonogórska 1998.

Wymagania BHP

Warunkiem przystąpienia do praktycznej realizacji ćwiczenia jest zapoznanie się z instrukcją BHP i instrukcją przeciw pożarową oraz przestrzeganie zasad w nich zawartych. Wybrane urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym mogą posiadać instrukcje stanowiskowe. Przed rozpoczęciem pracy należy zapoznać się z instrukcjami stanowiskowymi wskazanymi przez prowadzącego.

W trakcie zajęć laboratoryjnych należy przestrzegać następujących zasad:

- Sprawdzić, czy urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym są w stanie kompletnym, nie wskazującym na fizyczne uszkodzenie.
- Sprawdzić prawidłowość połączeń urządzeń.
- Załączenie napięcia do układu pomiarowego może się odbywać po wyrażeniu zgody przez prowadzącego.
- Przyrządy pomiarowe należy ustawić w sposób zapewniający stałą obserwację, bez konieczności nachylania się nad innymi elementami układu znajdującymi się pod napięciem.
- Zabronione jest dokonywanie jakichkolwiek przełączeń oraz wymiana elementów składowych stanowiska pod napięciem.
- Zmiana konfiguracji stanowiska i połączeń w badanym układzie może się odbywać wyłącznie w porozumieniu z prowadzącym zajęcia.
- W przypadku zaniku napięcia zasilającego należy niezwłocznie wyłączyć wszystkie urządzenia.
- Stwierdzone wszelkie braki w wyposażeniu stanowiska oraz nieprawidłowości w funkcjonowaniu sprzętu należy przekazywać prowadzącemu zajęcia.
- Zabrania się samodzielnego włączania, manipulowania i korzystania z urządzeń nie należących do danego ćwiczenia.
- W przypadku wystąpienia porażenia prądem elektrycznym należy niezwłocznie wyłączyć zasilanie stanowisk laboratoryjnych za pomocą wyłącznika bezpieczeństwa, dostępnego na każdej tablicy rozdzielczej w laboratorium. Przed odłączeniem napięcia nie dotykać porażonego.