

# Sensory naprężeń

## Cel ćwiczenia

Poznanie i przetestowanie typowych układów pomiarowych, stosowanych przy pomiarach naprężeń mechanicznych tensometrami metalowymi. Wyznaczenie charakterystyk przetwarzania dla układów tensometrycznych: ćwierć-mostkowych, pół-mostkowych, różnicowych. Sprawdzenie wpływu błędu temperaturowego na pomiary naprężeń, oraz zaprojektowanie i przetestowanie układu kompensacji błędu temperaturowego.

## 1. Wstęp

Tensometr metalowy jest sensorem rezystancyjnym, którego zmiana rezystancji jest proporcjonalna do zmiany jego wymiarów geometrycznych spowodowanych naprężeniami (głównie wydłużeniem – *ang. strain*). Tensometr działa tylko w granicach stosowalności prawa Hooke tzn. w granicach sprężystości materiału z którego został wykonany. Wtedy obserwowana jest liniowa zależność między naprężeniem  $\sigma$ , a wydłużeniem względnym  $\varepsilon$

$$\sigma = \frac{F}{S} = E\varepsilon = E \frac{\Delta l}{l}$$

$F$ - siła

$S$ - powierzchnia poddana działaniu siły

$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \left[ \frac{N}{m^2} \right]$ - moduł Younga

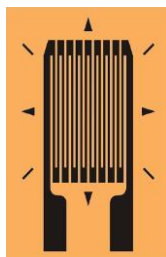
$l$ - długość,  $\Delta l$ zmiana długości;

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ - wydłużenie względne, zwyczajową jednostką wydłużenia jest  $1\mu\varepsilon$  (mikro-strain) lub

$1\mu D$  (mikro-deformacja) odpowiadająca zmianie długości o  $10^{-6}$ długości bazowej  $l$

W trakcie pracy tensometr naklejony jest na element sprężysty którego parametry materiałowe i wymiary są znane. Dzięki temu możliwy jest pośredni pomiar siły, masy, ciśnienia, momentu siły.

W ćwiczeniu badane są parametry tensometru metalowego foliowego, przykładowy tensometry foliowy przedstawiony jest na rysunku



Rys. 1. Tensometr metalowy foliowy

Rezystancja ( $R$ ), drutu metalowego (ścieżki przewodzącej) może zostać wyrażona wzorem

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

$\rho$ - rezystywność materiału [ $\Omega\text{m}$ ]

$l$ - długość drutu

$S$ - przekrój poprzeczny drutu

Stała tensometru  $K$  (czułość odkształceniowa – ang. *GF gauge factor*) jest podstawowym parametrem tensometru, wiążącą zmianę względnej rezystancji tensometru z jego odkształceniem. Można to wyrazić następującą zależnością:

$$K\varepsilon = \frac{\Delta R}{R}$$

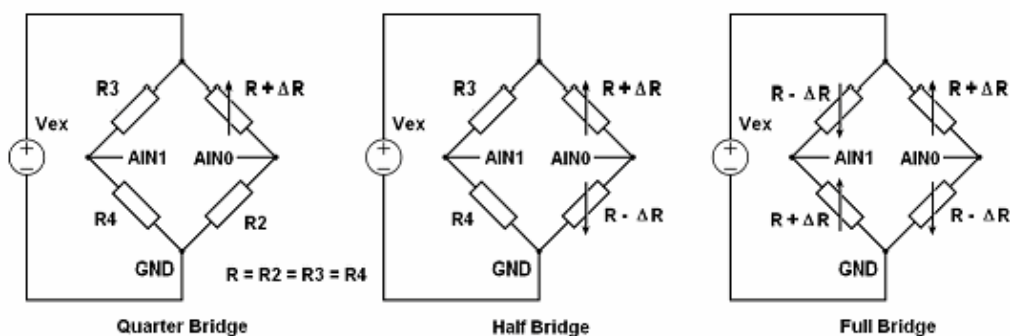
$R$  – rezystancja bazowa tensometru;

$\Delta R$  – zmiana rezystancji tensometru.

Najczęstszym materiałem z którego wykonywane są tensometry metalowe jest Konstantan stop miedzi 60% i niklu 40%. Typowe wartości rezystancji bazowej tensometrów to 120, 300, 600, 1200  $\Omega$ , a zakresy pomiarowe zwykle nie przekraczają 5000 $\mu\varepsilon$ . Zmiany rezystancji tensometrów wywołane dopuszczalnym naprężeniem oscylują w zakresie m $\Omega$ . Zważywszy na to rezystancja tensometru mierzona jest w układzie mostka Wheatstone'a pracującego jako mostek nie zrównoważony.

W zależności od liczby aktywnych tensometrów rozróżniamy trzy podstawowe konfiguracje dedykowane do pomiarów tensometrycznych:

- układ ćwierć-mostkowy gdzie tylko jeden tensometr jest aktywny,
- układ pół-mostkowy gdzie dwa tensometry mogą być umieszczone w sąsiednich lub równoległych ramionach,
- układ pełno-mostkowy gdzie aktywne są wszystkie 4 tensometry



Rys. 2. Podstawowe konfiguracje pracy tensometrów oporowych

## 2. Przebieg ćwiczenia

Zadaniem studentów jest samodzielne zestawienie układów pomiarowych oraz wykonanie pomiarów i wyznaczenie charakterystyk zgodnie z programem ćwiczenia, jak również opracowanie sprawozdania końcowego z przygotowaniem odpowiedzi na pytania postawione w poniższej instrukcji.

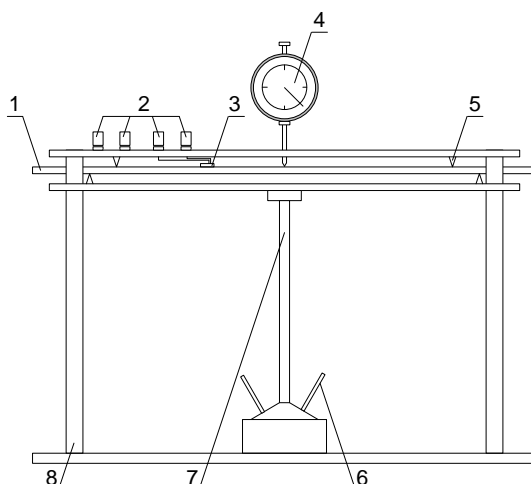
**Uwaga: Po zestawieniu układu pomiarowego, przed przystąpieniem do dalszej pracy konieczne jest sprawdzenie i akceptacja układu pomiarowego przez prowadzącego zajęcia laboratoryjne.**

### 2.1 Stanowisko pracy

Do realizacji ćwiczenia przeznaczone jest stanowisko wyposażone w:

- Układ do wytwarzania odkształceń statycznych, w skład którego wchodzi:
  - Element odkształcany – stalowa belka wzorcowa z naklejonymi 10 tensometrami (dwa zestawy po 5 tensometrów) umożliwiającymi pomiar odkształceń wzdłużnych oraz poprzecznych
  - Stelaż umożliwiający kontrolowane wytwarzanie odkształceń statycznych belki
  - Mikrometr
- Mostek tensometryczny NI 9237
- Układ grzewczy elementu odkształcanego
- Termometr cyfrowy
- Rezystor dekadowy
- Komputer PC z oprogramowaniem pozwalającym na przedstawienie wyników pomiarów w sposób graficzny oraz wspomagającym wykonanie sprawozdania końcowego.
- Instrukcje wykonania ćwiczenia

Do badań są dostępne dwa zestawy po pięć tensometrów tego samego typu naklejonych na stalowej belce sprężystej umieszczonej na stelażu. Poglądowy schemat stelaża wraz z zamontowaną belką przedstawiony jest na Rys. 3. Zastosowana konstrukcja daje możliwość zadawania powtarzalnych odkształceń statycznych. Wzrost naprężeń (odkształceń) powodowany jest poprzez skręcenie śruby dociskowej zgodnie ze wskazówkami zegara, co powoduje podniesienie ruchomych trzpienie naciskających na belkę wzorcową. Zainstalowany mikrometr pozwala zmierzyć strzałkę ugięcia belki wzorcowej.



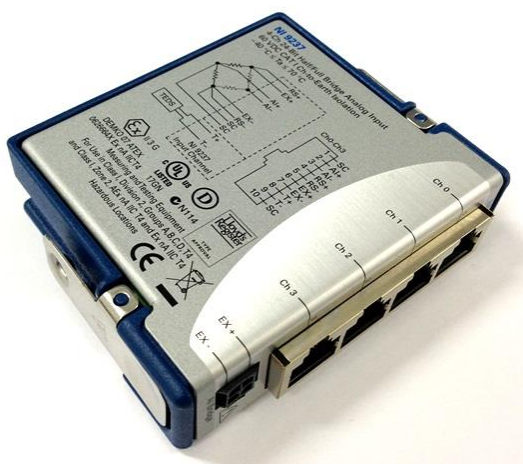
Rys. 3. Stelaż 1. belka wzorcowa, 2. zaciski tensometrów badanych, 3. umiejscowienie tensometrów na belce, 4. mikrometr, 5. trzpień naciskowej, 6. pokrętko śruby dociskowej, 7. śruba dociskowa, 8. Statyw.

Podstawowym przyrządem pomiarowym służącym do określenia zmian rezystancji tensometrów, w czasie pracy w układzie pomiarowym, jest mostek tensometryczny. W ćwiczeniu używany jest zintegrowany z komputerem mostek tensometryczny NI 9237 osadzony w kasecie komunikacyjnej WLS 91 63. Mostek komunikuje się z komputerem za pomocą interfejsu Ethernet przy użyciu protokołów TCP/IP

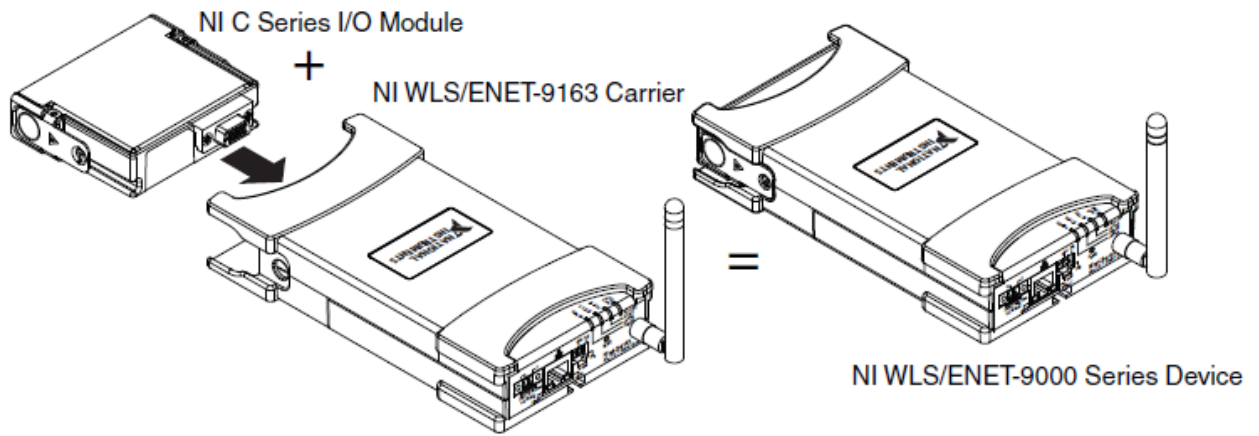
## UWAGA

**Nie wyjmować Mostka NI 9237 z kasy**

Zmianę konfiguracji mostka dokonuje tylko prowadzący

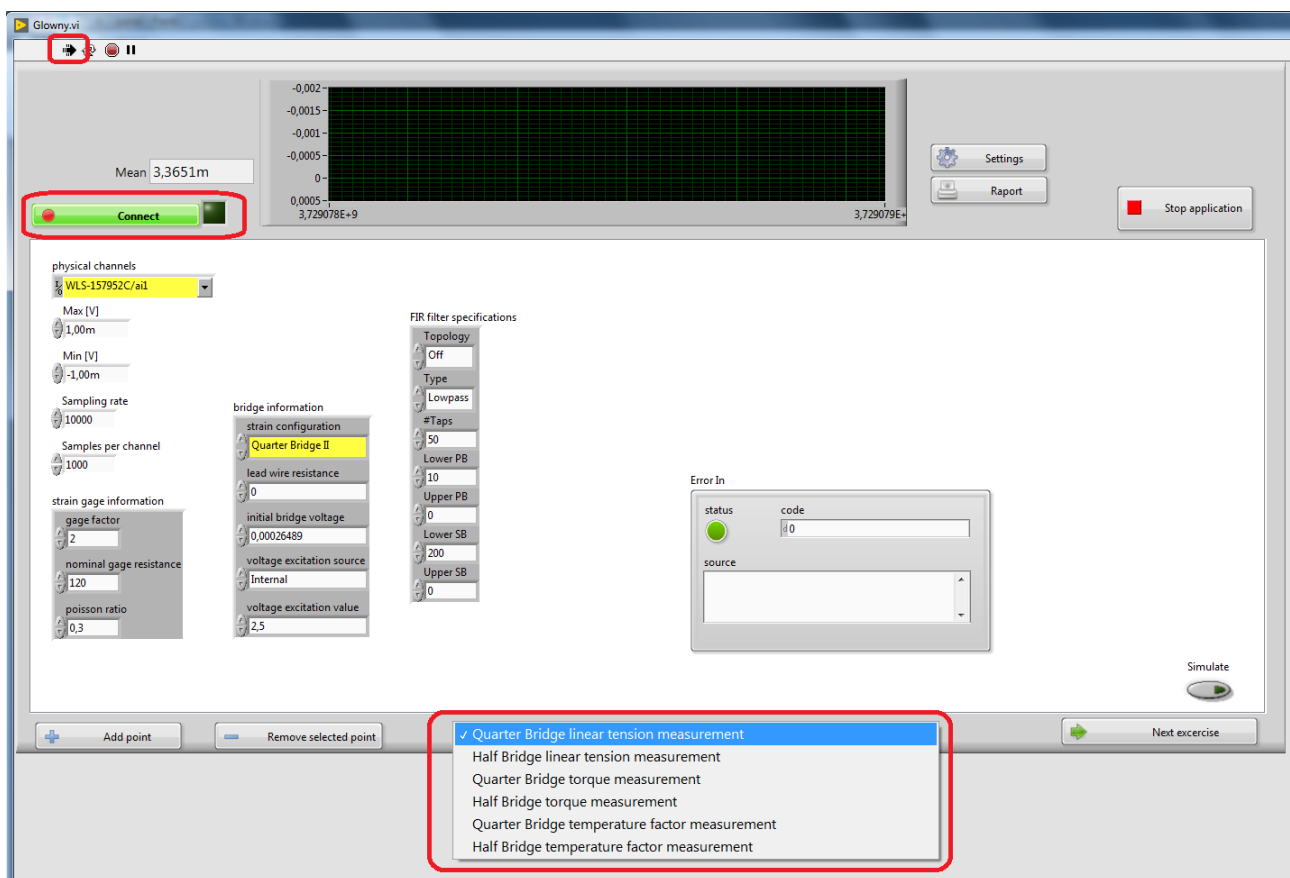


Rys. 4. Moduł mostka tensometrycznego NI 9237



Rys 4 Mostek tensometryczny NI9237 z kasetą komunikacyjną WLS 9163

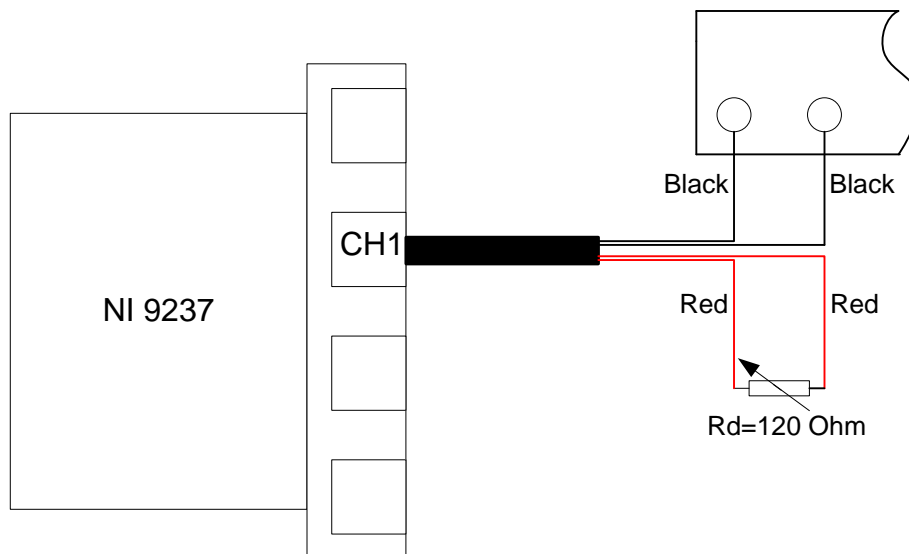
Do obsługi mostka tensometrycznego służy dedykowany Wirtualny Przyrząd Pomiarowy bazujący na oprogramowaniu LabVIEW. Przyrząd uruchamia się ikoną umieszczoną na pulpicie o nazwie **Strain**. Przyrząd należy aktywować (przycisk strzałka) a następnie połączyć z mostkiem (przycisk connect). Po prawidłowym podłączeniu na wykresie będzie wyświetlana przebieg wydłużenia w czasie a jego dokładna wartość w oknie. W menu rozsuwanym na dale przyrządu.



Rys. 5. Przyrząd wirtualny do obsługi mostka tensometrycznego z zaznaczonymi polami startowymi i konfiguracyjnymi

## 2.2 Wyznaczenie stałej odkształceniowej tensometrów

Schemat układu pomiarowego umożliwiającego wyznaczenie stałej tensometru przedstawiony jest na Rys. 6.



Rys 6. Układ pomiarowy do wyznaczenia stałej pojedynczego tensometru

Badany tensometr pracuje w układzie ćwierć mostka – oznacza to, że tylko w jednej gałęzi mostka jest włączony czynny tensometr (poddawany odkształceniom), w drugą gałąź mostka należy włączyć rezystor dekadowy o rezystancji równej rezystancji bazowej tensometru.

O ile prowadzący nie zaleci inaczej przed przystąpieniem do pomiarów należy:

- Ustawić wstępne minimalne ugięcie belki wzorcowej za pomocą śruby dociskowej.
- Ustawić wskaźnik zera mikrometru odpowiadający aktualnemu położeniu wskazówki mikrometru na wartość  $f = 0$ .
- Ustawić wartość rezystora dekadowego na  $120 \Omega$  (jest to wartość rezystancji bazowej użytych w ćwiczeniu, tensometrów)
- Podłączyć jeden z badanych tensometrów
- Połączyć przyrząd wirtualny z mostkiem
- Przyciskiem Add point dodać aktualną wartość  $\epsilon$  i zanotować aktualne ugięcie  $f$  (0mm)
- Zmienić wartość ugięcia śrubą dociskową o  $0,25 - 0,3 \text{ mm}$  i dodać następny punkt pomiarowy
- Pomiary kontynuować do momentu stawiania wyczuwalnego oporu przez śrubę dociskową (max 3mm)
- Rozłączyć przyrząd wirtualny od mostka (disconnect) i przełączyć przewody pomiarowe na następny tensometr
- Podłączyć przyrząd (connect) zmienić numer tensometru i kontynuować wyznaczenie charakterystyki dla następnego tensometru

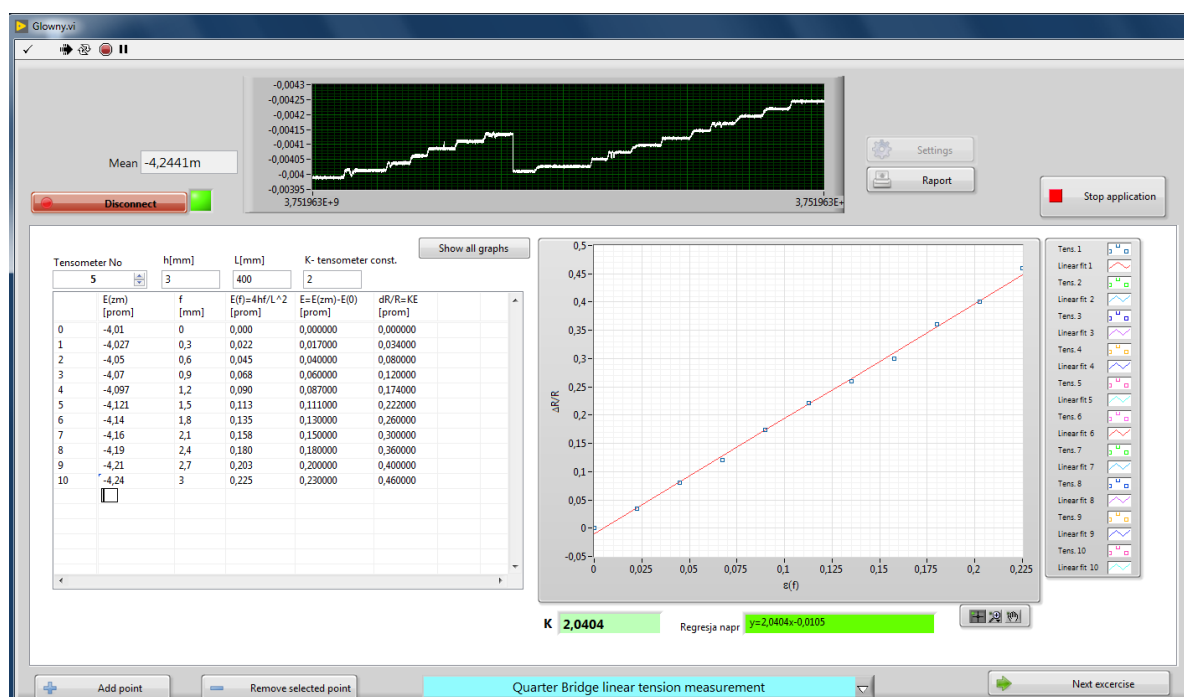
k) Procedurę powtórzyć dla wszystkich tensometrów podlegającym badaniom.

Po przeprowadzeniu badań należy ocenić, czy uzyskane charakterystyki spełniają wymagania dla tensometru metalowego, tzn. czy uzyskana czułość odkształceniowa zawiera się w granicach 1,8 – 2,6, jeżeli nie, to należy ocenić co może być przyczyną widocznego odstępstwa. Czy uzyskany rozrzut punktów pomiarowych jest akceptowalny. W przypadku wątpliwości co do poprawności uzyskanych wyników należy zgłosić swoje uwagi prowadzącemu zajęcia.

Po zebraniu charakterystyk należy je przeanalizować i omówić następujące problemy

1. Uzasadnić kształt otrzymanych charakterystyk;
2. Wiedząc, że wszystkie badane tensometry są tego samego typu zastanowić się co może wpływać na zróżnicowanie uzyskanych wyników?
3. Jakie informacje dotyczące układu pomiarowego można uzyskać z przeprowadzonych badań

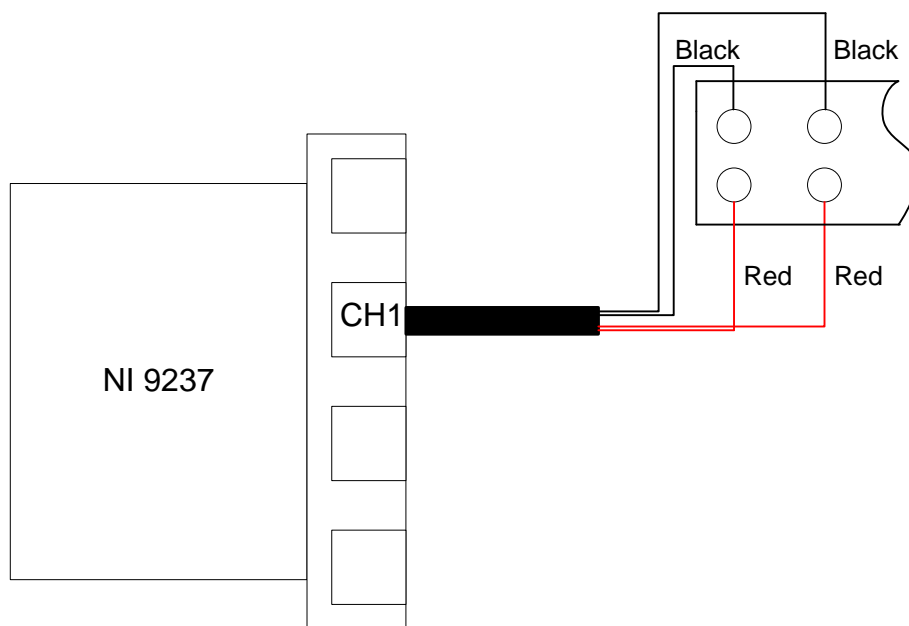
Przykładowa panel charakterystyki odkształceniowej tensometru w układzie ćwierć-mostkowym znajduje się na rysunku



Rys. 7. Wyznaczenie charakterystyki odkształceniowej w układzie ćwierć mostkowym

### 2.3 Wyznaczenie czułości odkształceniowej układu pół-mostkowego

Następnym punktem realizowanym w ćwiczeniu jest wyznaczenie efektywnej czułości odkształceniowej dwóch tensometrów pracujących w układzie pół-mostkowym. Celem jest zestawienie układu pomiarowego o końcowej czułości odkształceniowej nie mniejszej niż 4. Schemat układu pomiarowego przedstawiony jest na Rys. 6.



Rys. 8. Układ pomiarowy do wyznaczeniu stałej odkształceniowej w układzie pół-mostkowym.

Przed przystąpieniem do pomiarów należy, bazując na wcześniej uzyskanych wynikach, wybrać odpowiednie dwa tensometry. Należy uzasadnić dlaczego właśnie te dwa tensometry zostały wybrane – wybór nie może być uzyskany na podstawie metody prób i błędów.

W celu wyznaczenia efektywnej czułości odkształceniowej  $K$  układu pół-mostkowego należy:

- Podłączyć do układu pomiarowego wybrane tensometry zgodnie z Rys. 6.
- Podłączyć WPP do mostka
- Wybrać z dolnego menu pomiary w układzie pół-mostkowy
- Zmierzyć wartość odkształcenia  $\varepsilon$  dla aktualnego ugięcia  $f$  i wprowadzić dane do WPP
- Cyklicznie zwiększać wartość ugięcia i wprowadzać dane do WPP, analogicznie jak w poprzednim przypadku
- Rozłączyć WPP od mostka tensometrycznego.

Po przeprowadzeniu pomiarów przeanalizować rezultaty i omówić problemy:

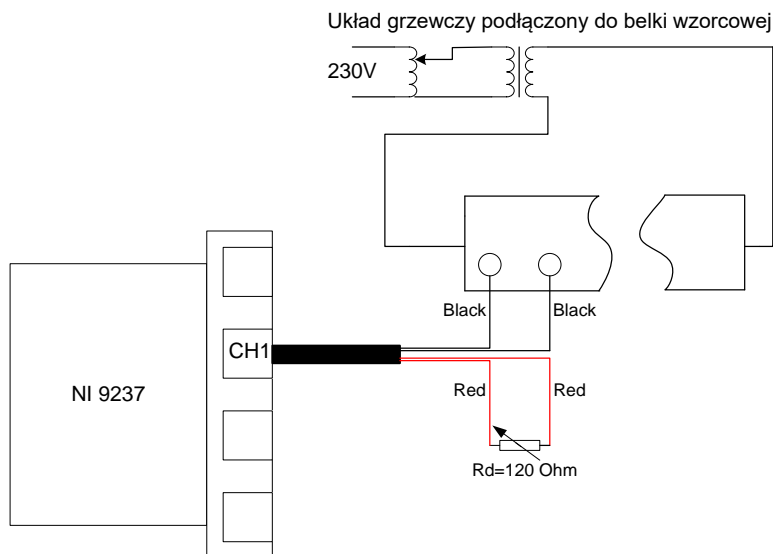
- Uzasadnić wybór tensometrów umożliwiających uzyskanie czułości odkształceniowej równej~ 4.
- Przedstawić alternatywne możliwości uzyskania czułości odkształceniowej na tym samym poziomie.

## 2.4 Badanie wpływu temperatury na pojedynczy tensometr

W tym punkcie ćwiczenia należy wyznaczyć wpływ temperatury na pracę pojedynczego tensometru. Zmiany temperatury elementu badanego uzyskiwane będą poprzez nagrzewanie belki wzorcowej prądem przemiennym o natężeniu ok. 100A.



Do badań należy wybrać jeden z wcześniej badanych tensometrów charakteryzujących się czułością odkształceniową zbliżoną do 2. Schemat układu pomiarowego przedstawiony jest na Rys.9.



Rys. 9. Układ do badania wpływu temperatury na pracę pojedynczego tensometru

O ile prowadzący nie zaleci inaczej, w celu wyznaczenia charakterystyki  $\frac{\Delta R}{R} = f(T)$  przy

$\varepsilon = \text{constans}$  należy:

- Zestawić schemat pomiarowy zgodnie z Rys. 7.
- Ustawić wartość rezystora dekadowego na  $120 \Omega$
- Włączyć termometr cyfrowy – sprawdzić czy czujnik termometru znajduje się na belce wzorcowej
- Ustawić wstępne ugięcie belki wzorcowej, strzałka ugięcia  $f$  powinna znajdować się w granicach od 0,5 do 0,9 ugięcia maksymalnego. Przez cały czas trwania pomiarów kontrolować, aby ugięcie pozostawało na stałym poziomie. Ewentualne zmiany ugięcia, korygować w miarę potrzeby śrubą dociskowa.
- Podłączyć WPP do mostka i wybrać z menu dolnego pomiaru wpływu temperatury na pojedynczy tensometr
- Dodać pierwszy punkt pomiarowy dla temperatury otoczenia
- W celu podgrzania belki ustawić pokrętko autotransformatora na wartość 100 (co spowoduje, że przez belkę popłynie prąd rzędu 100A).
- Po podgrzaniu belki o  $3^{\circ}\text{C}$  w stosunku do temperatury początkowej, skorygować ugięcie – o ile się zmieniło.
- Zmierzyć odkształcenie, dodać kolejny punkt pomiarowy
- Powtórzyć punkt h) i) do czasu osiągnięcia przez belkę temperatury nie większej niż  $45^{\circ}\text{C}$

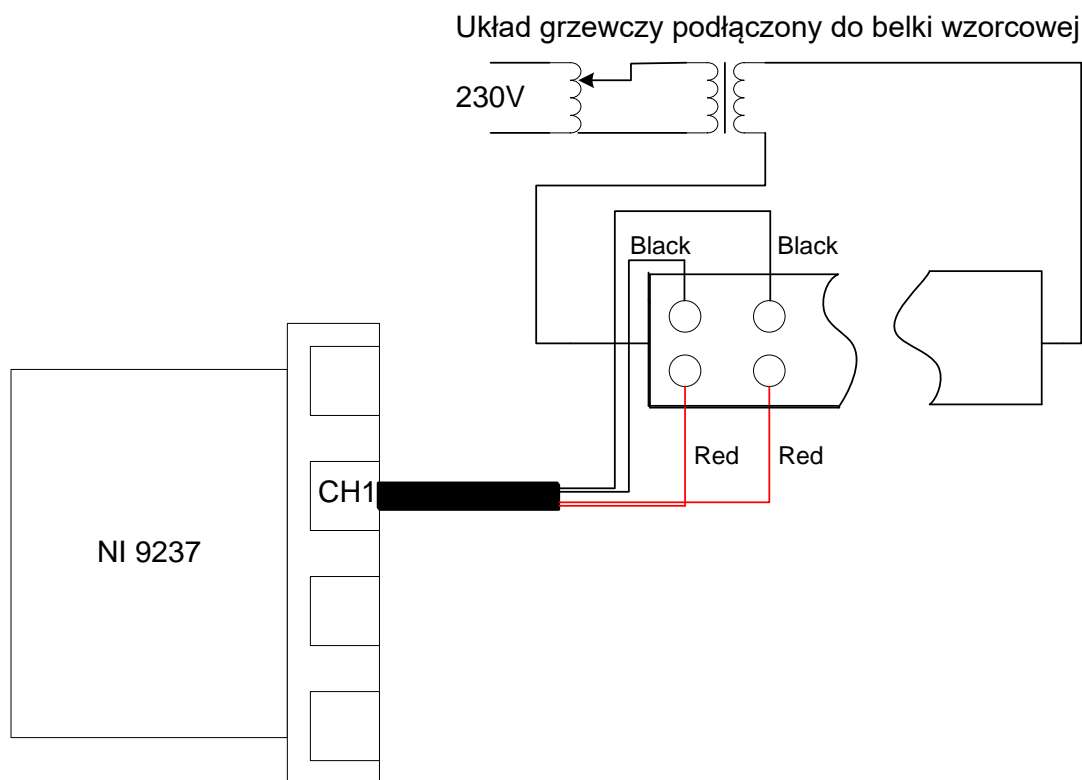
**Po wyznaczeniu charakterystyki koniecznie ustawić pokrętko autotransformatora na wartość zero !!!**

Po przeprowadzeniu pomiarów przeanalizować rezultaty i omówić problemy:

1. Wyznaczyć temperaturowy współczynnik rezystancji dla badanego tensometru, porównać z termorezystorem platynowym.
2. Przeanalizować możliwości pomiaru naprężeń pojedynczym tensometrem w środowisku o zmiennej temperaturze.

**2.5 Badanie wpływu temperatury dla dwóch tensometrów w układzie pół-mostka.**

Do wyznaczenia wpływu temperatury na pracę dwóch tensometrów pracujących w układzie półmostkowym należy wybrać te same tensometry, co w punkcie 2.3 ćwiczeni, i włączyć je do układu zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 10.



Rys. 10. Układ pomiarowy do wyznaczenia wpływu temperatury na pracę dwóch tensometrów

O ile prowadzący nie zaleci inaczej w celu wyznaczenia charakterystyki  $\frac{\Delta R}{R} = f(T)$  przy  $\varepsilon = \text{constans}$  należy:

- a) Zestawić schemat pomiarowy zgodnie z Rys. 8, pamiętając o włączeniu odpowiednich tensometrów.

- b) Włączyć termometr cyfrowy – **sprawdzić czy temperatura belki jest zbliżona do temperatury pokojowej**, jeśli jest wyższa w związku ze wcześniejszymi badaniami, poczekać na ostygnięcie belki.
- c) Ustawić wstępne ugięcie belki wzorcowej, strzałka ugięcia  $f$  powinna znajdować się w granicach 0,5 do 0,9 ugięcia maksymalnego. Przez cały czas trwania pomiarów kontrolować, aby ugięcie pozostawało na stały poziomie. Korygować w miarę potrzeby naprężenie śrubą dociskowa.
- d) Podłączyć PWW do mostka tensometrycznego
- e) Wprowadzić pierwszy punkt pomiarowy
- f) W celu podgrzania belki ustawić pokrętło autotransformatora na wartość 100. Po podgrzaniu belki o  $3^{\circ}\text{C}$  skorygować ugięcie – o ile uległo zmianie w stosunku do ugięcia wstępnego.
- g) Wprowadzić następny punkt pomiarowy do WPP
- h) Powtórzyć punkt f) i g) do czasu osiągnięcia przez belkę temperatury nie większej niż  $45^{\circ}\text{C}$ .

**Po wyznaczeniu charakterystyki koniecznie ustawić pokrętło autotransformatora na wartość zero !!!**

Po przeprowadzeniu pomiarów przeanalizować rezultaty i omówić problemy:

1. Wyjaśnić wpływ zmian temperatury na pracę układu pół-mostka wykorzystującego dwa czynne tensometry.
2. Dokonać oceny możliwości zastosowania, w rzeczywistych warunkach, badanych układów pomiarowych (z jednym i dwoma tensometrami)
3. Oszacować przebieg charakterystyk dla układu pełnego mostka tensometrycznego wykorzystującego różnoimienne odkształcenia.

### **3. Sprawozdanie**

Wirtualny przyrząd pomiarowy ma możliwość wygenerowania wstępnego raportu. Po naciśnięciu przycisku report należy wybrać charakterystyki które zostały zrealizowane oraz charakterystyki porównawcze. Po zapisaniu raportu można go dowolnie edytować w celu wykonania sprawozdania końcowego.

W sprawozdaniu powinny znaleźć się:

- Schematy układów pomiarowych;
- Wyniki pomiarów;
- Wydrukowane charakterystyki;

- Odpowiedzi na pytania zawarte w instrukcji;
- Wnioski własne i spostrzeżenia.

Po wykonaniu sprawozdania należy wyłączyć przyrządy pomiarowe oraz komputer, Sprawozdanie przekazać prowadzącemu zajęcia laboratoryjne.