

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA



WYDZIAŁ



INŻYNIERII  
ZARZĄDZANIA

KATEDRA ZARZĄDZANIA PRODUKCJĄ

Instrukcja do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu:

*Podstawy diagnostyki technicznej*

Kod przedmiotu: KS05513, KN05513

**Ćwiczenie Nr 7**

# POMIARY TENSOMETRYCZNE NAPRĘŻEŃ SKRĘCAJĄCYCH I PARAMETRÓW RUCHU DRGAJĄCEGO

*(z zastosowaniem systemu National Instruments)*

Autor:

*dr inż. Arkadiusz Łukjaniuk*

Białystok 2022

*Wszystkie prawa zastrzeżone*

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

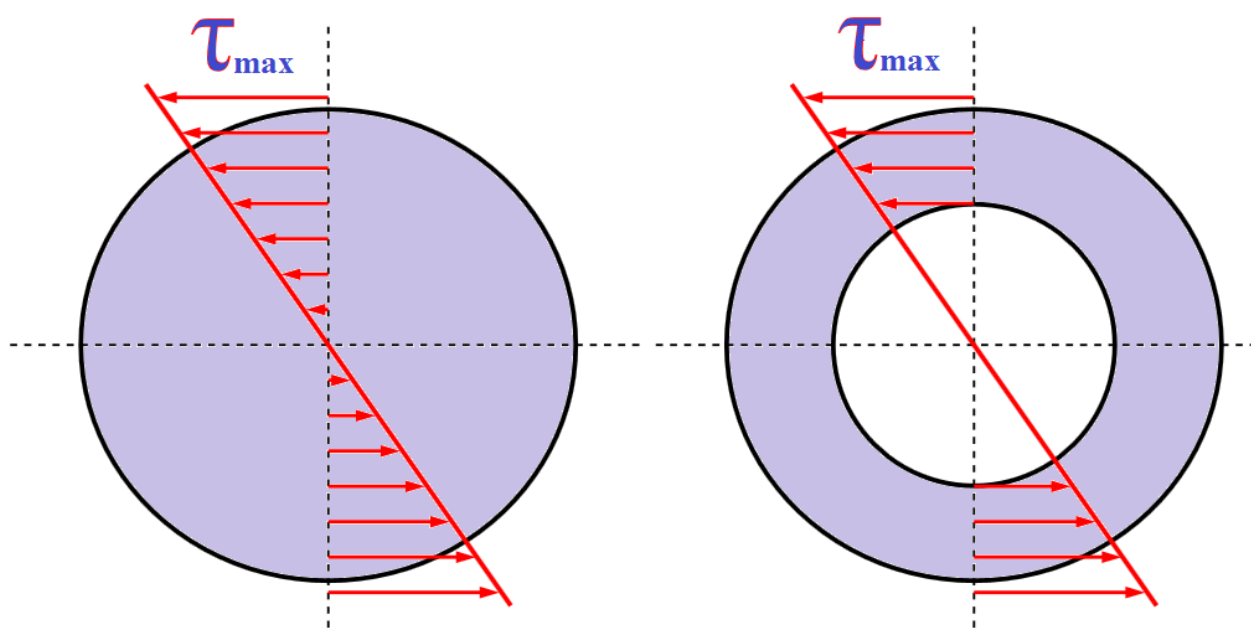
Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z istotą i zastosowaniem pomiarów tensometrycznych naprężeń skręcających i podstawowych parametrów ruchu drgającego oraz nauczanie (na przykładzie *LabVIEW* – program *National Instruments*) podstawowych zasad wykorzystywania w praktyce komputerowych systemów pomiarowych.

## 1. Skręcanie

**Skręcaniem** nazywamy stan obciążenia materiału, w którym na materiał w płaszczyźnie przekroju poprzecznego działa moment nazywany momentem skręcającym. Powoduje on występowanie naprężeń ścinających w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny działania momentu (rys.1). Skręcanie występuje najczęściej w wałach maszyn. Skręcanie możemy podzielić na czyste i proste.

**Skręcaniem czystym** nazywamy stan naprężeń, gdy do ścianek poprzecznych jednorodnego i izotropowego pręta pryzmatycznego przyłożone jest obciążenie, które można zredukować do dwóch przeciwnie skierowanych momentów działających w płaszczyźnie ścianek poprzecznych.

**Skręcaniem prostym** pręta nazywamy stan naprężeń, gdy obciążenie zastępujemy dwójką przeciwnie skierowanych, równych co do wartości skupionych momentów skręcających.



Rys. 1. Rozkład naprężeń skręcających w przekroju pręta i rury

Naprężenia skręcające występujące w badanej rurze obliczamy z następujących zależności (rys. 2):

$$\tau_{so} = \frac{M_s}{W_0}, W_0 = \frac{\pi}{16} \frac{D^4 - d^4}{D}, M_s = mgl, \quad (1)$$

gdzie:  $M_s$  – moment skręcający w  $Nm$ ;

$W_0$  – wskaźnik wytrzymałości przekroju na skręcanie w  $m^3$ ;

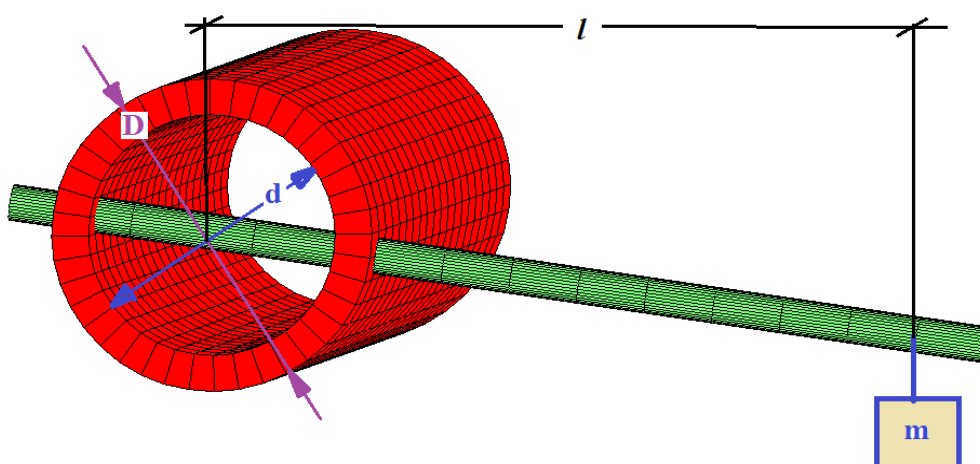
$D$  – średnica zewnętrzna rury w  $m$ ;

$d$  – średnica wewnętrzna rury w  $m$ ;

$m$  – masa obciążenia w  $kg$ ;

$g$  – przyspieszenie ziemskie  $\approx 9,81 m/s^2$ ;

$l$  – długość ramienia, na którym zawieszane są odważniki w  $m$ .



Rys.2. Ilustracja wielkości geometrycznych występujących we wzorze (1)

Naprężenia skręcające wyznaczone za pomocą pomiarów mostkiem NI USB-9162 obliczymy z zależności (2):

$$\tau_{sp} = \varepsilon \cdot G, \quad (2)$$

gdzie:  $\varepsilon$  – odkształcenie skręcające zmierzone za pomocą modułu NI USB-9162;

$G$  – moduł sprężystości poprzecznej (dla stali  $G = E/(2(1+\nu))$  w  $MPa$ );

$E$  - moduł sprężystości poprzecznej (dla stali  $E = 2,1 \cdot 10^5 MPa$ );

$\nu$  – liczba Poissona (dla stali  $\nu = 0,3$ ).

Obliczenia  $\tau_{sp}$  można też wykonać przy pomocy opcji „Formuła” w programie LabVIEW (zastosowanie do obliczeń naprężeń skręcających opcji „Formuła” pozwoli ćwiczącym uzyskać dodatkowe punkty do końcowej oceny za sprawozdanie).

Błąd względny pomiaru naprężeń skręcających należy obliczyć korzystając ze wzoru (3):

$$\delta = \frac{\tau_{so} - \tau_{sp}}{\tau_{so}} \cdot 100\% \quad (3)$$

## 2. Podstawowe zależności charakteryzujące ruch drgający

Przebieg czasowy drgań swobodnych tłumionych można zapisać w postaci (rys. 3):

$$x(t) = A_0 e^{-\rho t} \sin(\omega_1 t + \varphi), \quad (3)$$

gdzie:

$$A_0 = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{\rho x_0 + \dot{x}_0}{\omega_1}\right)^2}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_0 \omega_1}{\rho x_0 + \dot{x}_0}, \quad \rho = \frac{\alpha}{2m_b}, \quad \omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \rho^2}, \quad (5)$$

$A_0$  – amplituda drgania w chwili  $t=0$ ;

$\dot{x}_0$  – prędkość początkowa drgań belki;

$\omega_1 = 2\pi/T_1$  – częstotliwość drgań tłumionych;

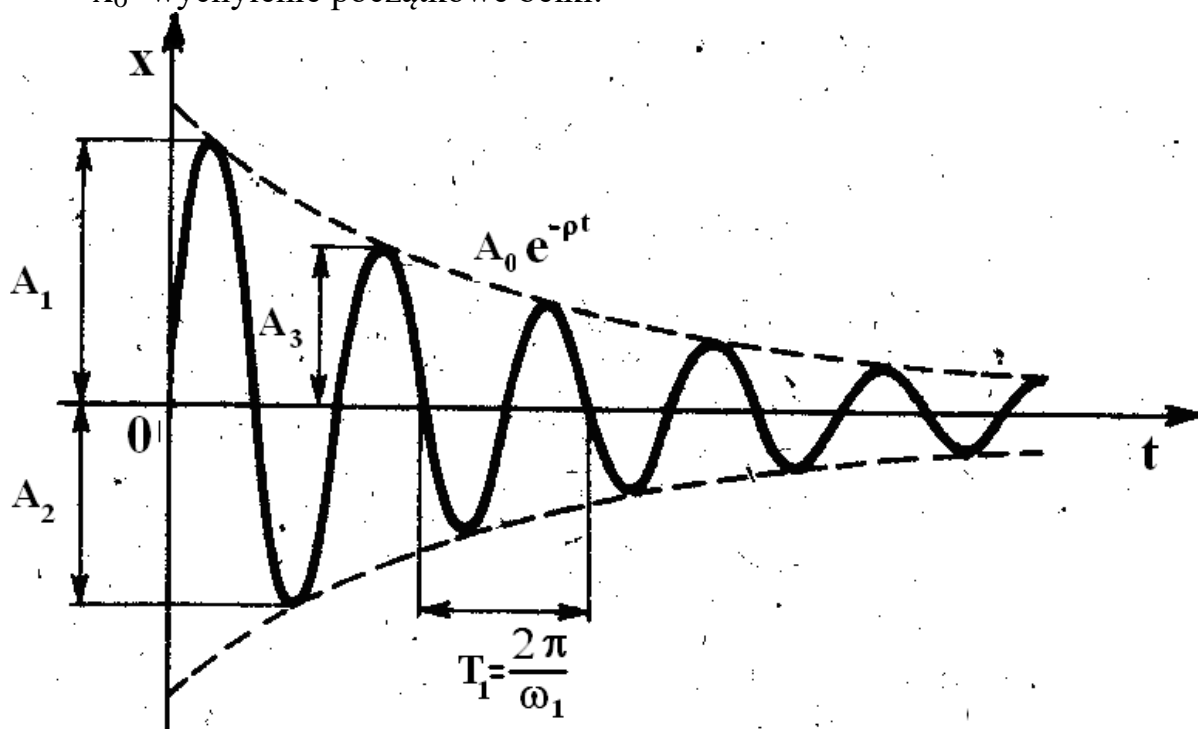
$\omega_0^2 = k/m$  – częstotliwość drgań nietłumionych;

$k$  – sztywność drgającego układu;

$m_b$  – masa drgającego układu;

$\alpha$  – opór wiskotyczny w Ns/m;

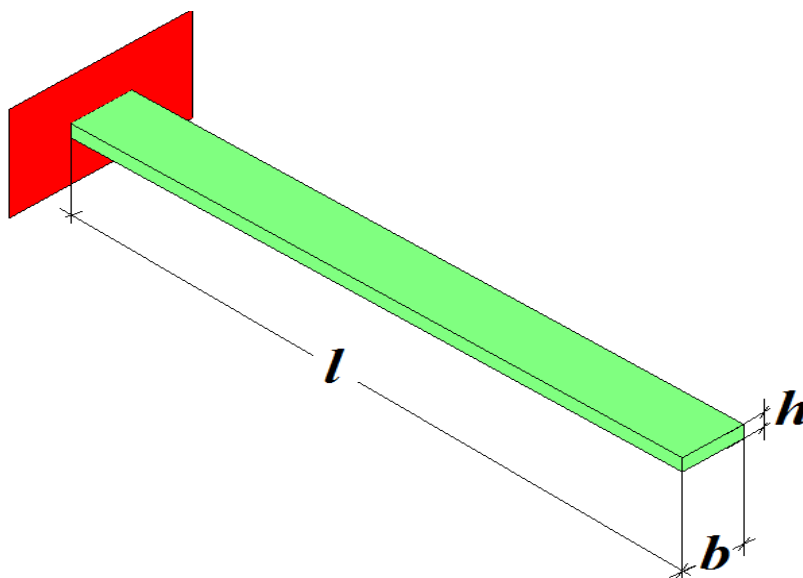
$x_0$  – wychylenie początkowe belki.



Rys. 3. Wykres ruchu periodycznego tłumionego [1].

Sztywność belki zamocowanej jednostronnie o długości  $l$ , szerokości  $b$  i wysokości  $h$  wynosi (rys. 4):

$$k = \frac{Ebh^3}{4l^3} \quad (6)$$



Rys. 4. Belka zamocowana jednostronnie.

Częstotliwość drgań nietłumionych belki swobodnie drgającej obliczamy ze wzoru:

$$\omega_o = 2,036 \sqrt{\frac{k}{m_b}}, \quad (7)$$

natomiast dla belki obciążonej:

$$\omega_o = \sqrt{\frac{k}{m_a + 0,236m_b}}, \quad (8)$$

gdzie:  $m_a = m_t + m_d$  – suma mas tłumika i obciążenia.

Częstotliwość  $\omega_{op}$  drgań nietłumionych belki możemy też obliczyć na podstawie danych pomiarowych (zarejestrowanego przebiegu drgań), a mianowicie mierząc okres drgań tłumionych i na podstawie wartości kolejnych dodatnich amplitud wyznaczając dekrement drgań  $D$ :

$$\omega_{op} = \frac{1}{T_1} \sqrt{4\pi^2 + D^2}. \quad (9)$$

Iloraz dwóch kolejnych amplitud  $A_n / A_{n+1}$  równy jest:

$$\frac{A_n}{A_{n+1}} = \frac{x(t)}{x(t + T_1)} = \frac{e^{-\rho t} \sin(\omega_1 t + \varphi)}{e^{-\rho(t+T_1)} \sin[\omega_1(t + T_1) + \varphi]} = e^{\rho T_1}. \quad (10)$$

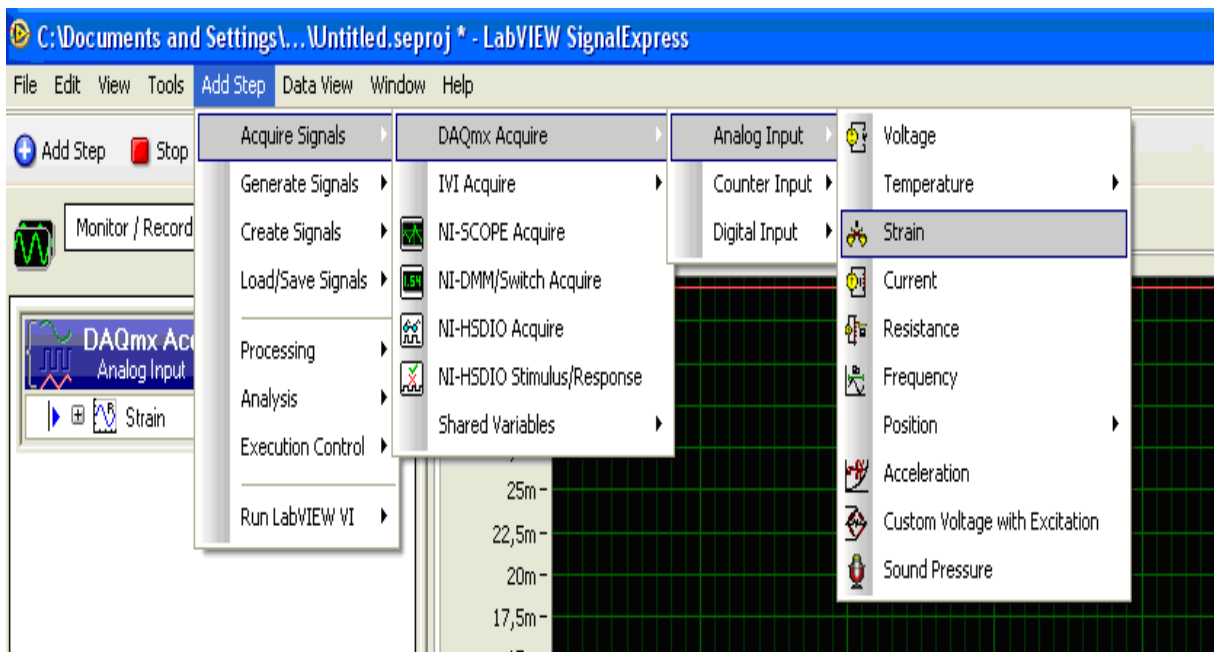
Wielkość

$$D = \ln \frac{x(t)}{x(t + T_1)} = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} = \rho T_1 \quad (11)$$

nazywa się logarytmicznym dekrementem tłumienia (miara tłumienia drgań), używany przy eksperymentalnym określaniu współczynnika tłumienia.

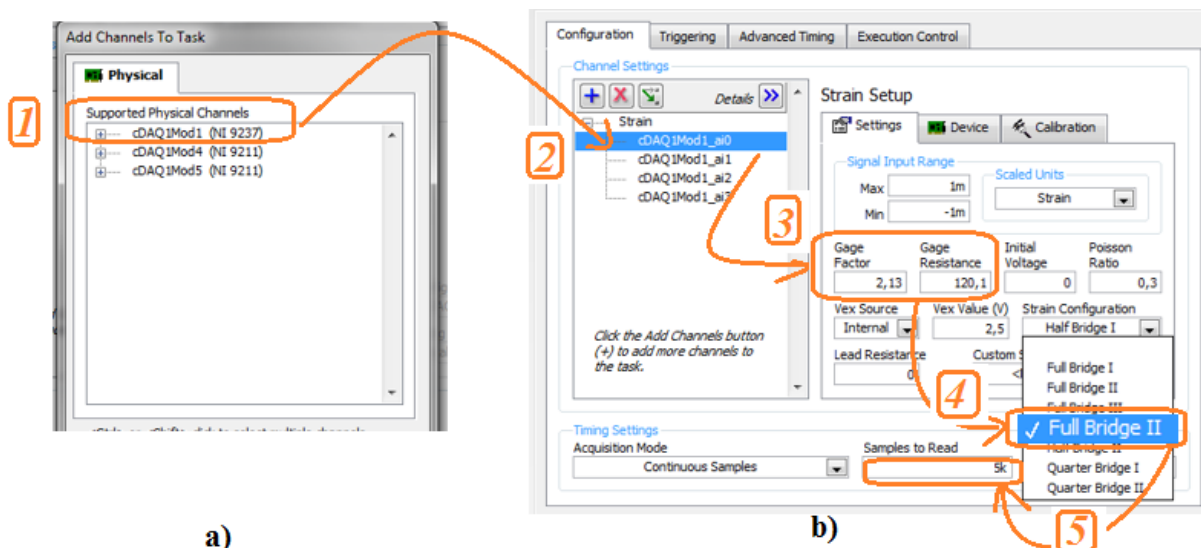
### 3. Przygotowanie do pomiarów mostka tensometrycznego NI USB-9162

W celu dokonania pomiarów naprężeń skręcających przy pomocy mostka tensometrycznego National Instruments NI USB-9162 należy uruchomić program LabVIEW SignalExpress. Następnie wybrać rodzaj mierzonej wielkości w następującej kolejności: **Add Step** → **Acquire Signals** → **DAQmx Acquire** → **Analog Input** → **Strain** (rys. 5).



Rys. 5. Wybór rodzaju mierzonej wielkości

Następnie należy przeprowadzić wybór modułu (rys.6a) i konfigurację odpowiednich kanałów mostka (rys.6b). W tym celu należy zaznaczyć kursorem kanał **cDAQ1Mod1\_ai0** i potwierdzić „OK”



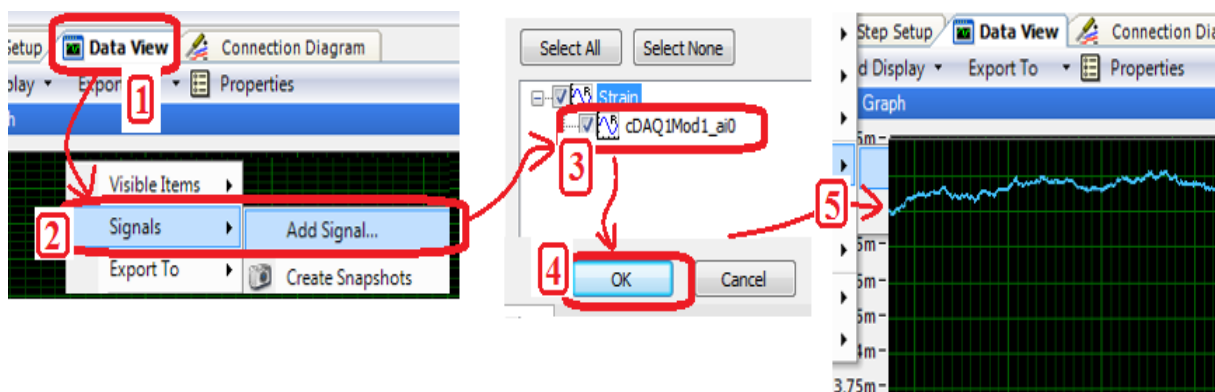
Rys. 6. Proces konfiguracji systemu NI: a) wybór odpowiedniego modułu pomiarowego; b) etapy konfiguracji wybranego kanału pomiarowego.

Po pojawieniu się okna jak na rys. 6b należy przeprowadzić ustawienia danego kanału, a mianowicie:

- wprowadzić wartość rezystancji tensometru (Gage Resistance -  $R=120,1$ -rys. 6b p.3);
- wprowadzić wartość stałej tensometru (Gage Factor -  $k=2,13$ -rys. 6b p.3);
- wybrać konfigurację mostka (**Full Bridge II** – pomiar naprężeń skręcających w układzie pełnego mostka - rys. 6b p.4).
- wpisać rozmiar bloku próbek (**Samples to Read** – 5k) i częstotliwość próbkowania (**Rate** – 5k) - rys. 6b p.5;

Po wykonaniu tych czynności należy uaktywnić opcję **Run** i obserwować przebieg odkształceń w wybranym kanale mostka.

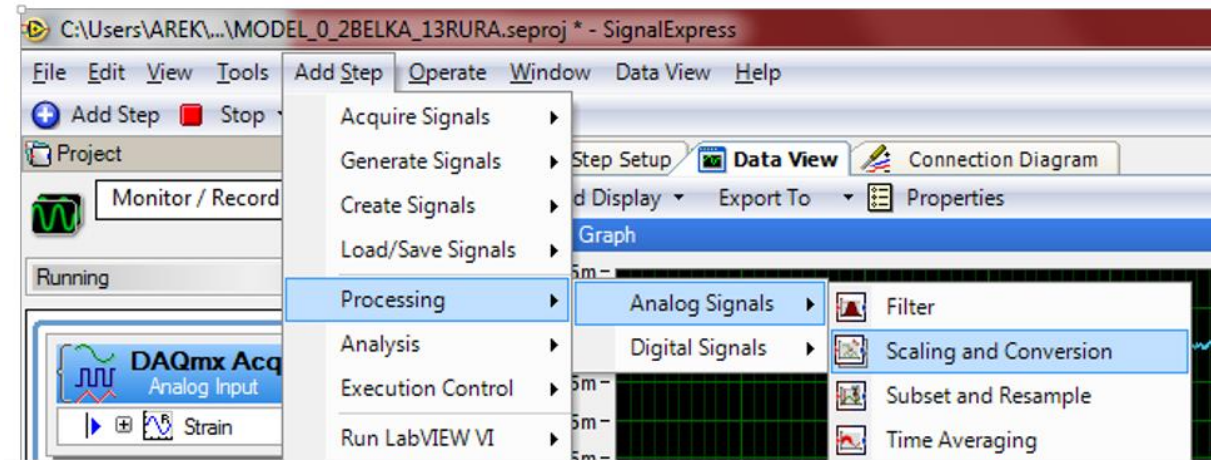
W tym celu należy otworzyć okno wizualizacji wyników pomiaru **Data View** (rys. 7) i wybrać potrzebny do wyświetlania numer kanału (opcje: **Signals** → **Add Signal** → **nr kanału**). Usuwanie niepotrzebnych do prezentacji kanałów odbywa się przy pomocy opcji **Remove Signals**.



Rys.7. Etapy uaktywniania wizualizacji przebiegu

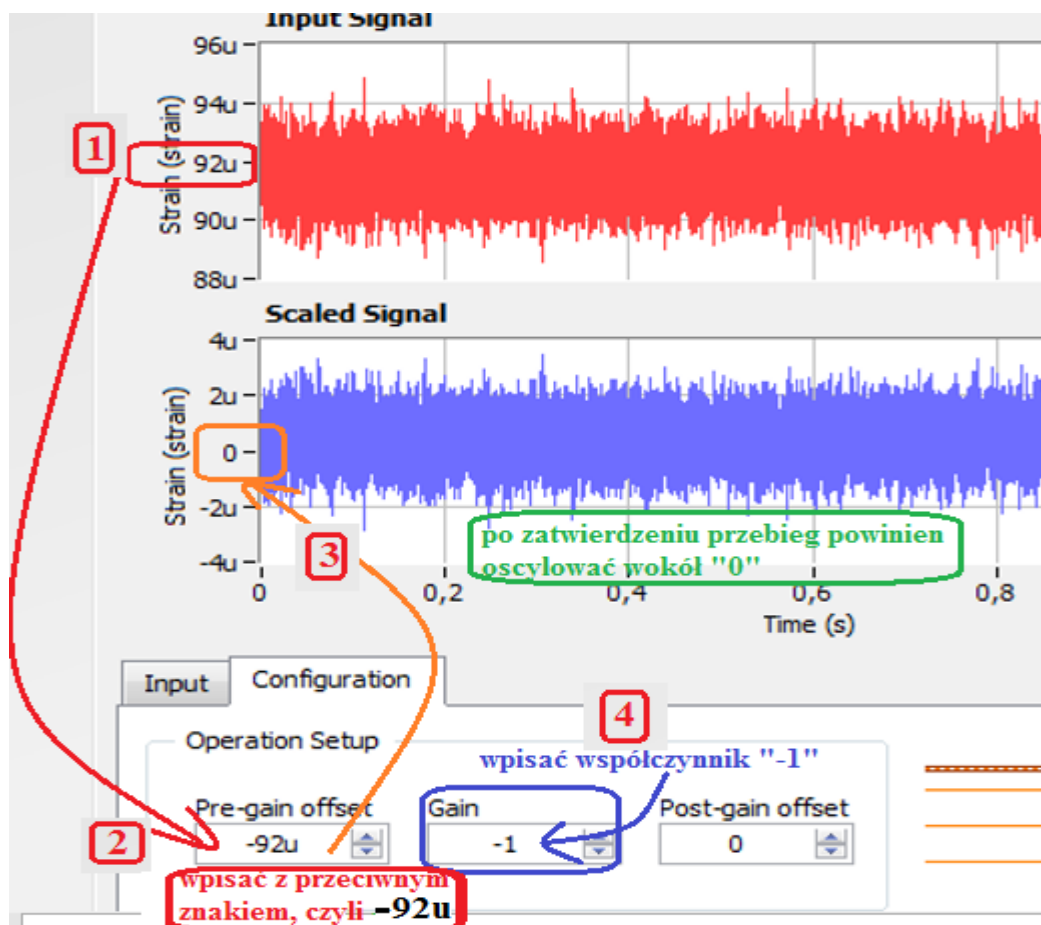


Z obserwowanego przebiegu należy usunąć składową stałą, czyli wyzerować (rys. 8 - **Add Step** → **Processing** → **Analog Signals** → **Scaling and Conversion**).



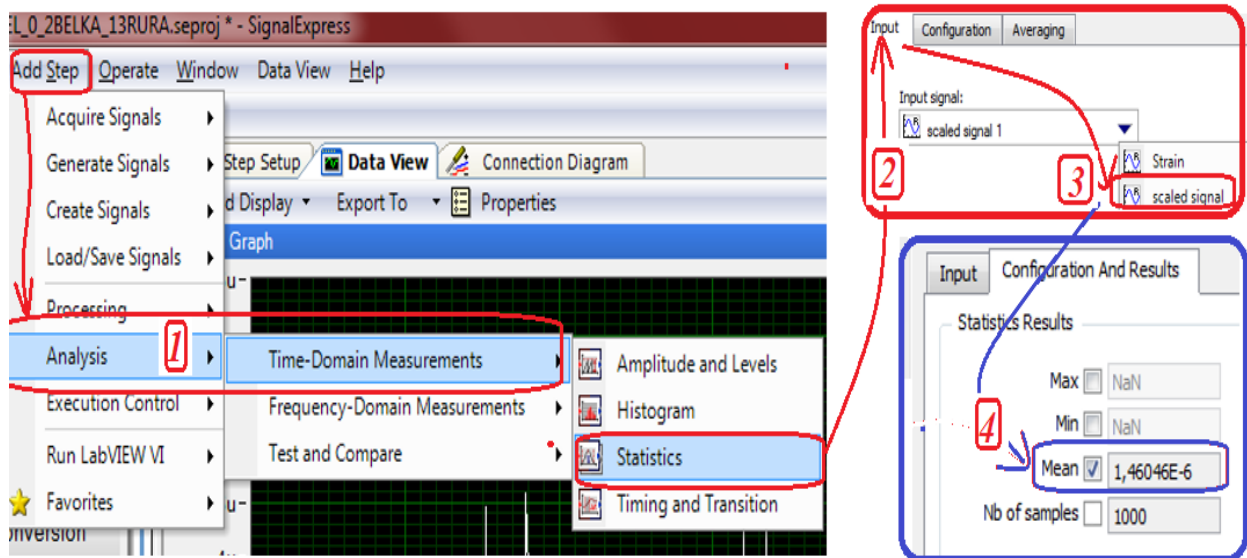
Rys.8. Uaktywnienie opcji „Scaling and Conversion”.

Po uaktywnieniu okna **Scaling and Conversion** kliknąć okno **Configuration** i wpisać w oknie **Pre-gain offset** wartość sygnału z górnego przebiegu (kolor czerwony) z uwzględnieniem litery oznaczającej rząd wielkości odkształceń (np.: **m** - mili, **u** – mikro - rys.9).



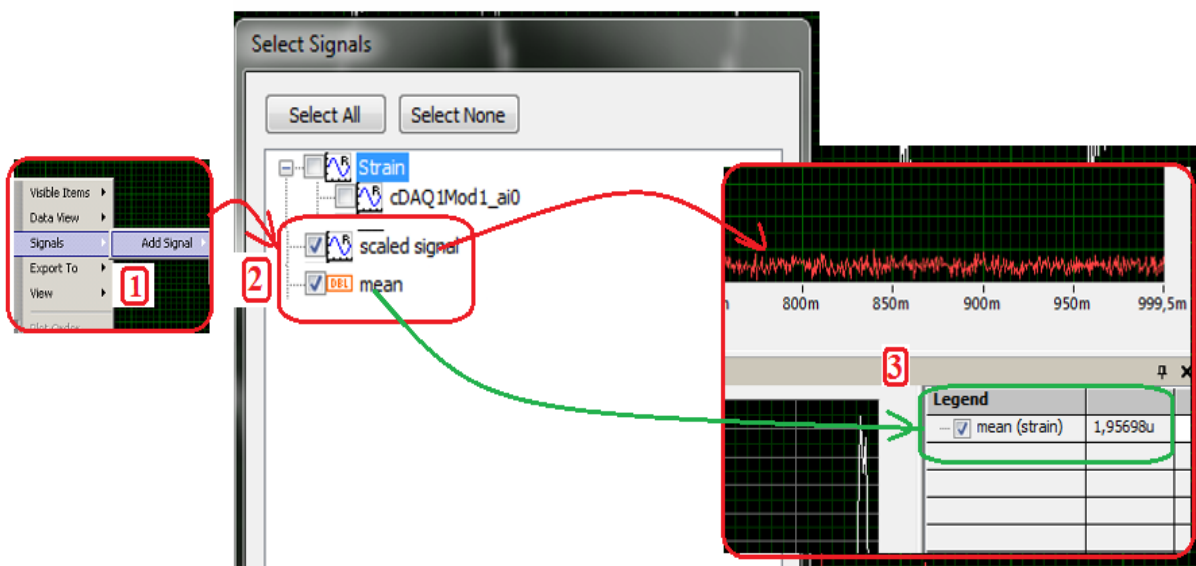
Rys.9. Skalowanie wybranych przebiegów.

Tak zarejestrowany przebieg czasowy wymaga uśrednienia i można to wykonać w arkuszu Excel lub prościej włączając w programie opcję **Statistics** (rys. 10 - **Add Step** → **Analysis** → **Time-Domain Measurements** → **Statistics**). Potem kliknąć na „Input” (rys. 10 p.2) i wybrać **scaled signal**. W następnym kroku odznaczyć opcje **Max**, **Min** i uaktywnić **Mean** (rys.10 p.4).



Rys. 10. Włączenie opcji Statistics.

Następnie otworzyć okno wizualizacji wyników pomiaru **Data View** i usunąć kanał ai0 (opcje: **Signals** → **Remove Signals** → **cDAQ1Mod1\_ai0** – odznaczyć), a następnie dodać kanały sygnału wyzerowanego i z wartością średnią – rys.11.

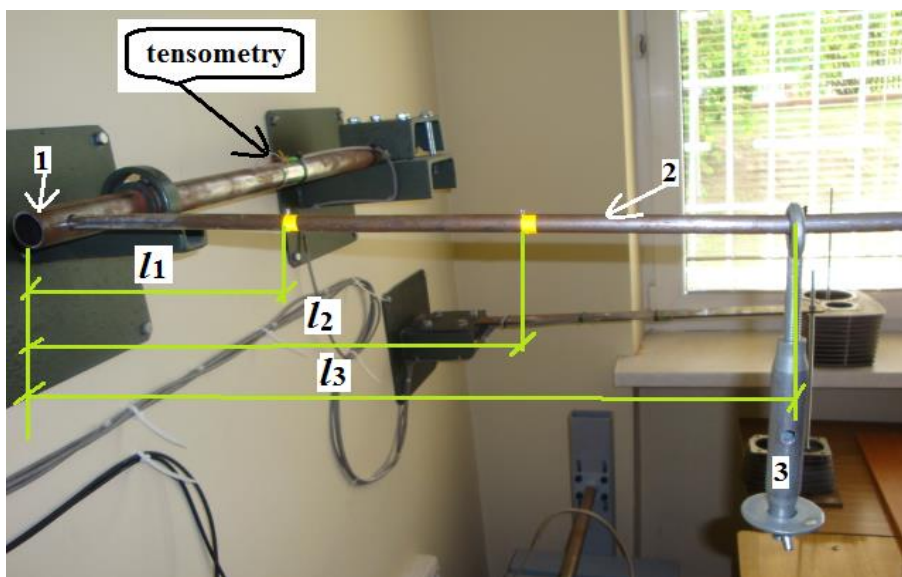


Rys.11. Włączenie wizualizacji kanału: **scaled signal** i wartości średniej.

Tak skonfigurowany program jest gotowy do pomiaru naprężeń skręcających.

## 4. Pomiar naprężeń skręcających rury

Przy pomiarze naprężeń skręcających tensometry są naklejone na powierzchni badanej rury w ten sposób, że osie kolejnych tensometrów tworzą pomiędzy sobą kąt prosty (można to zaobserwować na stanowisku pomiarowym - rys.12 - tensometry). Jest to uwarunkowane tym, że maksymalne naprężenia skręcające występują pod kątem  $45^{\circ}$  do osi rury.



Rys. 12. Stanowisko laboratoryjne do pomiaru naprężeń skręcających

Kolejność czynności podczas wykonywania ćwiczenia:

1. Zmierzyć średnicę zewnętrzną i wewnętrzną rury **1** oraz odległości (**l1**, **l2**, **l3**) od osi symetrii rury do miejsc, w których będą zawieszane ciężarki (prowadzący ćwiczenie wskaże te miejsca). Wyniki pomiarów w [mm] zapisać w tabeli 1.
2. Ramię **2** do zawieszania odważników wysunąć do oporu. Hak **3** do zawieszania ciężarków umieścić w pierwszym punkcie pomiarowym (pierwsza odległość zmierzona w poprzednim punkcie) i wyzerować mostek zgodnie z procedurą opisaną w poprzednim rozdziale (rys. 9).
3. Wygasić ewentualne drgania ramienia i zapisać wartość średnią zmierzonego odkształcenia  $\epsilon$  (Mean – rys.11) w tabeli 1 (wiersz **0 kg**).
4. Zważyć siłomierzem AXIS FB500 pierwszy ciężarek i zapisać wynik w drugim wierszu tabeli 1.
5. Delikatnie zawiesić na końcu belki zważony ciężarek, stłumić oscylacje ramienia i zapisać wartość średnią zmierzonego odkształcenia  $\epsilon$  (Mean – rys.11) w odpowiedniej komórce tabeli 1.
6. Przeprowadzić pomiary dla pozostałych wartości obciążeń wskazanych przez prowadzącego ćwiczenia laboratoryjne.

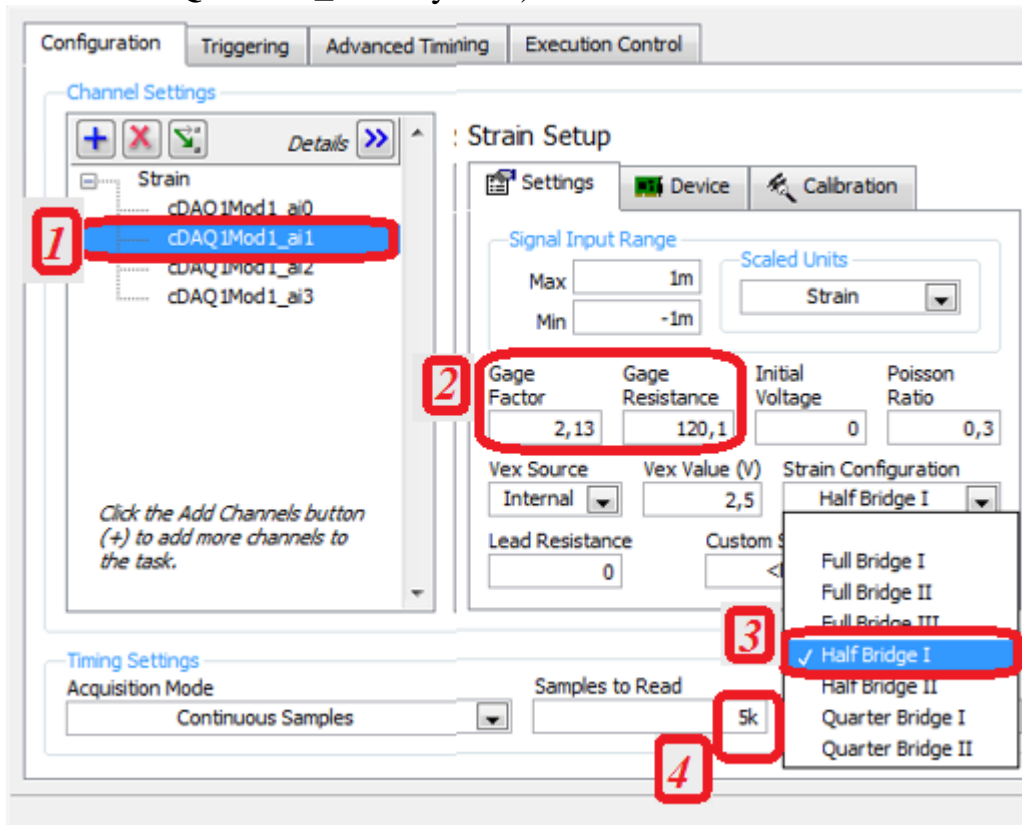
7. Zanotować wartość odkształcenia bez obciążenia (tzw. „zero po pomiarze”).
8. Powtórzyć pomiary z p. 3-7 przy zawieszaniu obciążników w drugim punkcie pomiarowym.
9. Obliczyć pozostałe wielkości wymienione w tabeli 1.

Tabela 1. Pomiary naprężeń skręcających

Masa obciążenia $m$	Moment skręcający $M_s$	Naprężenie skręcające obliczone $\tau_{so}$	Odkształcenie $\varepsilon$ zmierzone systemem NI USB-9162	Naprężenie skręcające zmierzone $\tau_{sp}$	Błąd względny $\delta$ wyznaczonych naprężeń $\tau_{sp}$
<b>Pierwszy punkt pomiarowy</b>					
<b>kg</b>	<b>Nm</b>	<b>MPa</b>	<b><math>\mu</math>D</b>	<b>MPa</b>	<b>%</b>
0					
„0 po”					
<b>Drugi punkt pomiarowy</b>					
<b>kg</b>	<b>Nm</b>	<b>MPa</b>	<b><math>\mu</math>D</b>	<b>MPa</b>	<b>%</b>
0					
„0 po”					

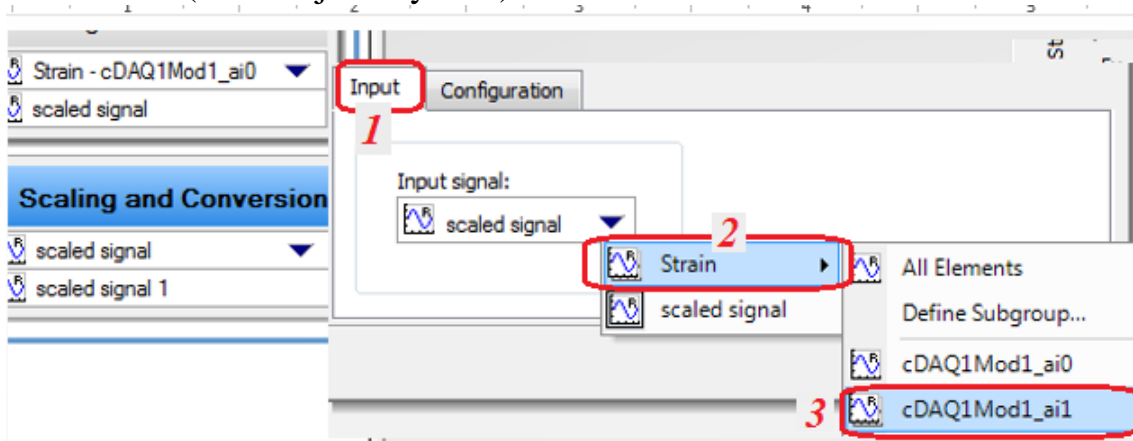
## 5. Przygotowanie do pomiarów drgań mostkiem tensometrycznym NI USB-9162

W uruchomionym programie „SignalExpress” dodać kolejny kanał pomiarowy w następującej kolejności: **Add Step** → **Acquire Signals** → **DAQmx Acquire** → **Analog Input** → **Strain** (w naszym przypadku pomiar w kanale **cDAQ1Mod1\_ai1** – rys. 13).



Rys. 13. Kolejność procesu konfiguracji kanału do pomiaru drgań.

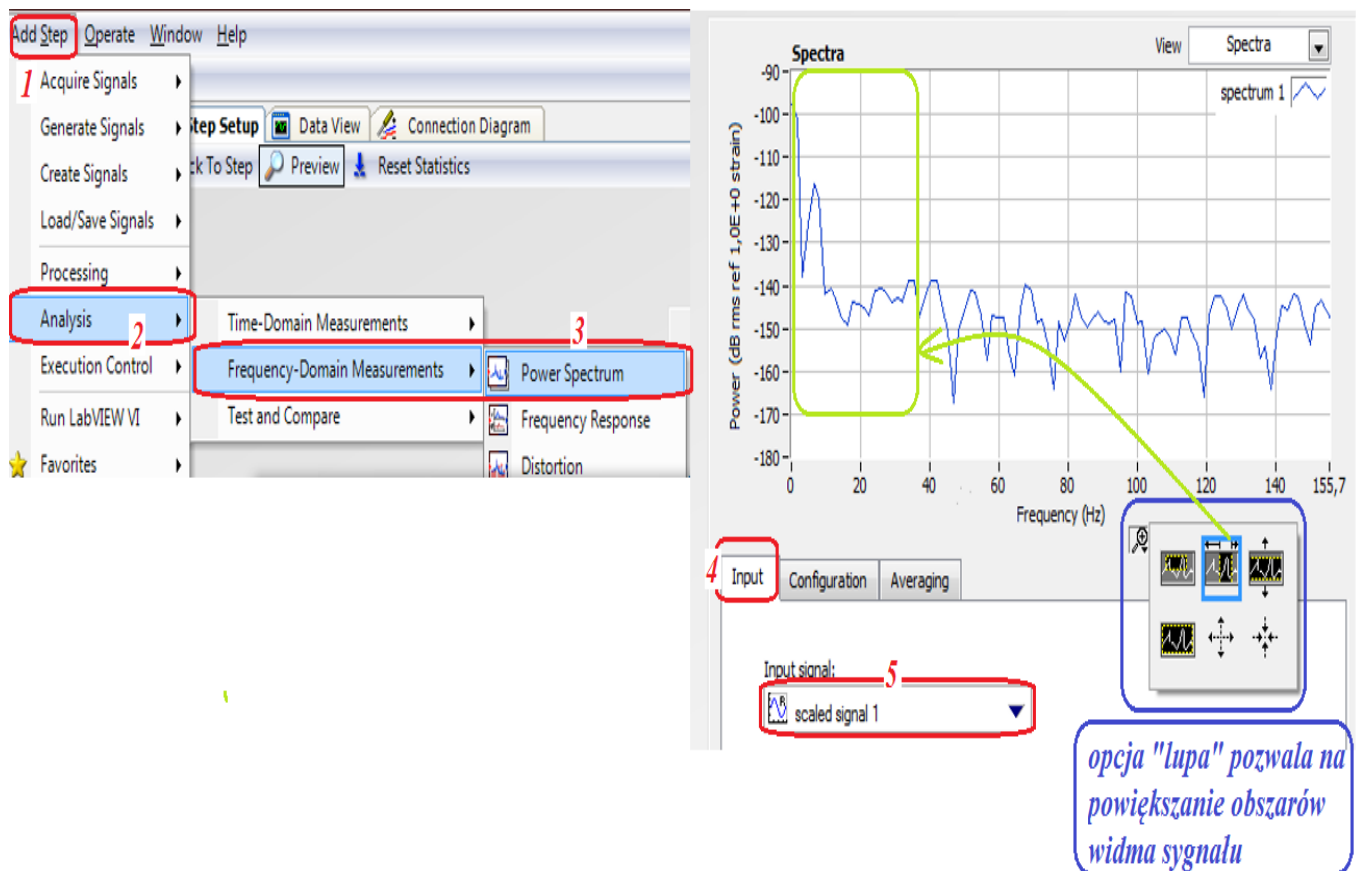
Po wykonaniu konfiguracji kanału **cDAQ1Mod1\_ai1** należy przeprowadzić jego skalowanie (podobnie jak przy pomiarach naprężeń skręcających – rys.9). Trzeba pamiętać o poprawnym wyborze kanału do skalowania (instrukcja na rys. 14).



Rys. 14. Proces wprowadzania numeru kanału używanego do skalowania.

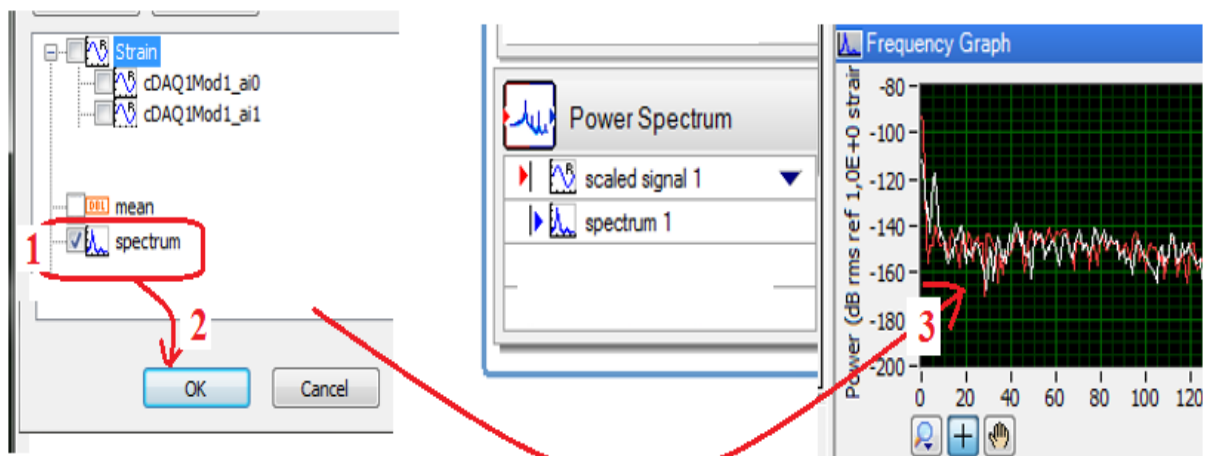


Kolejnym krokiem jest aktywacja opcji do analizy widma drgań, a tym samym umożliwienia pomiaru częstotliwości drgań tłumionych. Kolejność operacji jest przedstawiona na rysunku 15.



Rys. 15. Etapy aktywacji opcji analizy widmowej sygnału drgań.

Następnym krokiem jest dezaktywacja wizualizacji przebiegu **scaled signal** (z pomiaru naprężeń skręcających) i aktywacja opcji „**spectrum**” (zgodnie z instrukcją na rys. 16).

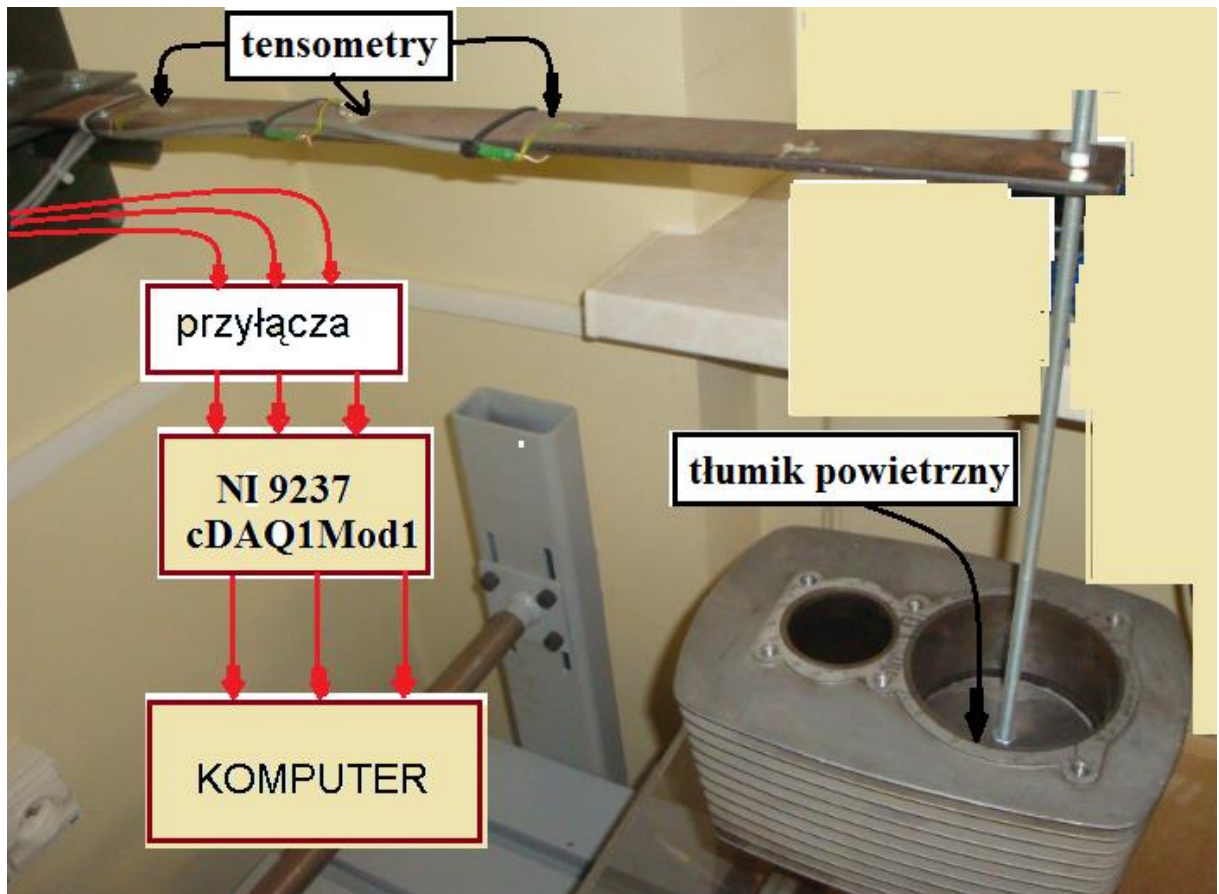


Rys. 16. Etapy aktywacji wizualizacji analizy widmowej sygnału drgań.

Po wykonaniu tych czynności program jest gotowy do pomiarów.

## 6. Przeprowadzenie pomiarów drgań mostkiem tensometrycznym NI USB-9162

1. Pomiary można rozpocząć po poprawnym wykonaniu wszystkich poleceń podanych w poprzednim rozdziale.
2. Zmierzyć wymiary belki i zanotować je w tabeli 2.
3. Zważyć wskazany przez prowadzącego ćwiczenia tłumik i ciężarki.
4. Wygasić ewentualne drgania belki (rys. 17).



Rys.17. Schemat ideowy układu do pomiaru parametrów ruchu drgającego.

5. Sprawdzić zerowanie badanego przebiegu i w razie istnienia składowej zerowej przeprowadzić ponownie operację skalowania.
6. Odchylić belkę nieobciążoną i bez tłumika od położenia równowagi i puścić.
7. Wyeksportować uzyskane przebiegi drgań belki do arkusza Excel i zapisać do pliku z nazwą np.: *drgania\_swobodne\_belki\_bez\_obciążenia*.
8. Wykonać pomiar częstotliwości drgań tłumionych belki (znajdowania częstotliwości, przy której jest maksimum widma mocy – rys.15 posługując się lupą powiększać odpowiednio fragment widma).

W przypadku wygaśnięcia drgań ponownie wychylić belkę z położenia równowagi.

9. Powtórzyć punkty 4-8 przy sposobach tłumienia belki i dodatkowych masach wskazanych przez prowadzącego.
10. Wykorzystując zarejestrowane w arkuszu Excel przebiegi badanych drgań wyznaczyć okres drgań tłumionych  $T_1$  oraz obliczyć wartości dekrementu tłumienia i częstotliwości drgań nietłumionych (wykorzystując zależności 11 i 9). Rezultaty zamieścić w tabeli 2.
11. Obliczyć wartości błędu względnego wyznaczenia częstotliwości drgań nietłumionych z zależności:

$$\delta_{op} = \frac{\omega_o - \omega_{op}}{\omega_o} \cdot 100\%, \quad \delta_{NI} = \frac{\omega_o - \omega_{oNI}}{\omega_o} \cdot 100\%.$$

12. Przeprowadzić analizę uzyskanych rezultatów.

Tabela 2. Rezultaty pomiarów i obliczeń

Numer pomiaru	Masa dodatkowa	Rodzaj tłumika	Obliczenia z przebiegów czasowych: wzory 9 i 11			Obliczenia: wzory 7 i 8	Odczytane z widma mocy		Błąd względny wyznaczenia częstotliwości drgań nietłumionych	
			$T_1$	D	$\omega_{op}$		$\omega_o$	$\omega_{oNI}=2\pi f_{NI}$	$f_{NI}$	$\delta_{op}$
	kg		s	-	rad/s		Hz	%		
1	0	brak								
2		brak								
3		brak								
4	0									
5										
6										

**Sprawozdanie powinno zawierać:**

1. Uzupełnioną tabelę 1 i 2.
2. Wykres zależności naprężeń  $\tau_p = f(M_s)$  dla dwóch punktów pomiarowych.
3. Wykres zależności błędu  $\delta = f(M_s)$  dla dwóch punktów pomiarowych.
4. Analizę uzyskanych rezultatów z uwzględnieniem czynników wpływających na błąd pomiaru naprężeń



## 7. Pytania kontrolne

1. Wyjaśnij zasadę działania tensometru oporowego. Jakiego parametru drutu oporowego zmieniają się w wyniku rozciągania?
2. Wymień i narysuj rodzaje tensometrów, podaj ich wady i zalety.
3. Narysować i omówić budowę oraz zasadę działania podstawowych przetworników stosowanych do pomiaru parametrów ruchu drgającego.
4. Podaj definicję pulsacji własnej i tłumienia względnego, podaj ich jednostki.
5. Podaj definicję odkształcenia jednostkowego  $\varepsilon$  oraz naprężenia skręcającego  $\tau$  oraz ich jednostki.
6. Opisz metodykę obliczania naprężeń skręcających.
7. Opisz procedurę pomiaru naprężeń skręcających za pomocą NI.
8. Opisz metodykę obliczania podstawowych parametrów ruchu drgającego.
9. Opisz procedurę pomiaru podstawowych parametrów ruchu drgającego za pomocą NI.
10. Wymień układy mostkowe występujące w pomiarach tensometrycznych i opisz jeden z nich.
11. Przyczyny błędów pomiaru naprężeń skręcających i sposoby zmniejszania tych błędów.

## 8. Literatura

1. Miłek Marian: *Pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi*. Zielona Góra. Politechnika Zielonogórska, 1998.
2. Zakrzewski Jan: *Czujniki i przetworniki pomiarowe*. Gliwice. Wydaw. Politechniki Śląskiej, 2004.
3. Chwaleba A. i inni: *Metrologia elektryczna*. WNT, Warszawa 2003
4. Osiński Zb.: *Tłumienie drgań*, PWN, 1997.
5. Osiński Zb.: *Teoria drgań* PWN Warszawa 1980.
6. Chwaleba Augustyn, Czajewski Jacek: *Przetworniki pomiarowe wielkości fizycznych*. Oficyna Wydawnicza PW, 1993.

## 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.