

Bezpieczeństwo i eksploatacja systemów
wentylacji i klimatyzacji
Laboratorium nr 3
Wibroizolacja – przygotowania do badań
dynamicznych amortyzatorów

Politechnika Wrocławska
Wydział Inżynierii Środowiska

28 lutego 2025



Spis treści

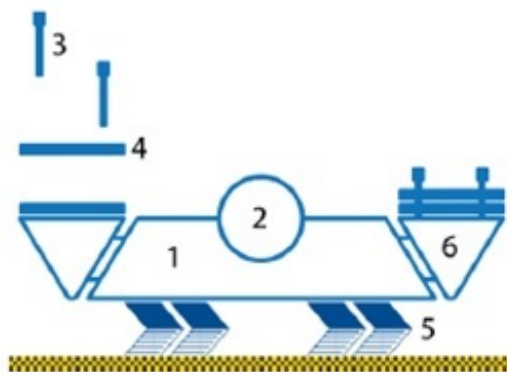
1	Informacje podstawowe	2
1.1	Sprzęt i narzędzia wykorzystywane podczas ćwiczenia	2
1.2	Cel ćwiczenia	2
1.3	Problematyka, przebieg ćwiczenia	3
1.4	Jak się przygotować do ćwiczenia?	4
2	Realizacja ćwiczenia	5
2.1	Ograniczanie drgań	5
2.2	Przeprowadzenie badania	9
2.2.1	Wyznaczenie współczynnika sprężystości statycznej	10
2.2.2	Wyznaczenie współczynnika sprężystości dynamicznej	11
2.2.3	Wyznaczenie stosunku współczynnika sprężystości dynamicznej do statycznej	12
3	Zakres opracowania	13
4	Oznaczenia	14

1 Informacje podstawowe

W sekcji *informacje podstawowe* zebrano wyłącznie najważniejsze i bardzo skondensowane informacje dotyczące ćwiczenia. Warto bardzo dokładnie zapoznać się z tym krótkim fragmentem tekstu.

1.1 Sprzęt i narzędzia wykorzystywane podczas ćwiczenia

Stanowisko pomiarowe to platforma wibracyjna składająca się z silnika, wsporników oraz ramy. Całość posadowiona jest na 4 wibroizolatorach gumowych. Schemat stanowiska pomiarowego został przedstawiony na rys. 1.



Rysunek 1: Schemat platforma wibracyjna

Tabela 1: Parametry platformy wibracyjnej

Lp.	Nazwa	Waga/ Wymiar/ Uwagi
1	Platforma wibracyjna	134 kg
2	Silnik	44 kg
3	Śruba	2.27 kg
4	Odważnik dociążający	Masa wybita na boku odważnika
5	Wibroizolatory	Wysokość 50 mm / Model GP-100
6	Wspornik	32.2 kg

Narzędzia niezbędne do przeprowadzenia ćwiczenia to wysokościomierz suwmiarkowy, stroboskop oraz elektroniczny miernik drgań.

1.2 Cel ćwiczenia

Przeprowadzenie ćwiczenia wiąże się z realizacją następujących celów:

1. ugruntowanie wiedzy dotyczącej właściwości dynamicznych wibroizolatorów,

2. nabycie praktyki w korzystaniu z suwmiarki i wysokościomierza suwmiarkowego,
3. zdobycie umiejętności określania prędkości obrotowej wału silnika elektrycznego,
4. nabycie praktyki w zakresie wyznaczania amplitudy drgań maszyn wirnikowych,
5. pozyskanie umiejętności doświadczalnego wyznaczanie parametrów charakterystycznych dla elementów wibroizolacyjnych,
6. zdobycie umiejętności redagowania wniosków i spostrzeżeń dotyczących zjawiska ruchu harmonicznego.

1.3 Problematyka, przebieg ćwiczenia

Zadaniem wibroizolacji jest ograniczenie drgań, które powstają podczas pracy maszyn wirnikowych. Drgania te należy tłumić aby chronić konstrukcję budynku przed trwałym zniszczeniem. Wprowadzenie elementów sprężystych wibroizolatorów stwarza szanse eliminacji przenoszenia dużych sił na budynki, ale powoduje, że cały układ staje się obiektem oscylacyjnym. Przy pracy z układami oscylacyjnymi należy zawsze pamiętać o zjawisku rezonansu. Częstotliwość drgań swobodnych, nazywana też częstotliwością rezonansową będzie powodowała, że układ będzie drgał z coraz większą amplitudą, powodującą w konsekwencji uszkodzenie układu, dlatego wibroizolację należy dobierać tak, aby układ nie wpadał w rezonans.

Ćwiczenie polega na zbadaniu dla danej masy platformy wibracyjnej takich właściwości jak:

- wartość ugięcia statycznego wibroizolatora,
- częstotliwości wymuszającej,
- amplitudy drgań,
- częstotliwości rezonansowej,
- współczynnika sprężystości statycznej oraz dynamicznej.

Ważne

Ćwiczenie laboratoryjne dotyczy aspektów omawianych podczas wykładu oraz podczas ćwiczeń audytoryjnych z przedmiotu **Hałas i Wibracje**. Warto zajrzeć do własnych notatek i przypomnieć sobie materiał z już odbytych zajęć.

1.4 Jak się przygotować do ćwiczenia?

Przed przystąpieniem do ćwiczeń, należy zapoznać się z dalszą częścią instrukcji oraz z poniższą instrukcją laboratoryjną dostępną pod adresem www.wik.pwr.wroc.pl

2. Wibroizolacja - Pomiary statyczne amortyzatorów. Wyznaczanie częstości drgań swobodnych

2 Realizacja ćwiczenia

W sekcji *realizacja ćwiczenia* opisano bardziej szczegółowo kluczowe kwestie związane z przeprowadzaniem ćwiczenia. Część tekstu powstała w oparciu o doświadczenia uczestników poprzednich edycji ćwiczeń, aby eliminować najczęstsze błędy popełniane podczas realizacji ćwiczenia.

2.1 Ograniczanie drgań

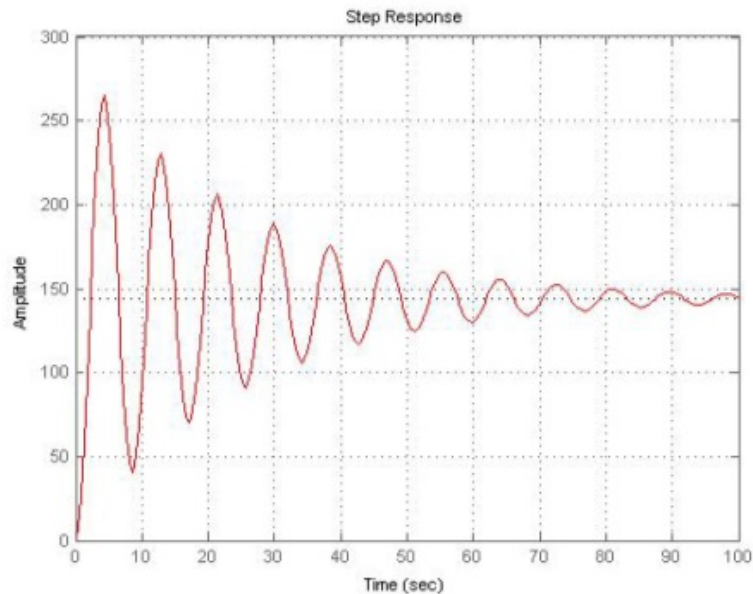
Maszyny wirnikowe generują drgania o częstotliwościach wprost proporcjonalnych do prędkości obrotowych. Przykładowo, jeżeli wirnik obraca się z prędkością 1 obr/s to platforma, na której zamontowany jest silnik będzie drgała z częstotliwością 1 Hz . Innymi słowy platforma z silnikiem będzie uderzać z pewną siłą F_0 w konstrukcję budynku jednokrotnie w ciągu sekundy. Chcąc przeciwdziałać temu zjawisku, które przypomina działanie młota pneumatycznego niszczącego budynek, platformę z silnikiem można umieścić na sprężynach lub podkładkach gumowych, które będą pochłaniać energię drgań. Wprowadzając wibroizolatory zmieniamy jednak sposób, w jaki platforma z silnikiem oddziałuje na budynek.

Zasadniczo zastosowanie dowolnego wibroizolatora będzie powodowało, że platforma będzie uderzać w konstrukcję budynku z siłą mniejszą niż F_0 , ponieważ sprężyna lub guma pochłonie część tej siły. Zmianie nie ulegnie za to częstotliwość drgań platformy, która w dalszym ciągu wynosi tyle, co przed zainstalowaniem wibroizolacji, w naszych rozważaniach 1 Hz . Okazuje się jednak, że takie uproszczone podejście nie jest do końca poprawne.

Każdy wibroizolator jest określony między innymi przez parametr współczynnika sprężystości. Sprężystość wyrażona jest za pomocą współczynnika k (N/m). Dzięki współczynnikowi k jesteśmy w stanie obliczyć, jak bardzo ugnie się wibroizolator pod naciskiem konkretnej siły. Przykładowo, gdy k wynosi 1000 N/m to pod naciskiem 1 N sprężyna ugnie się 1 mm . Zależność określająca wartość ugięcia statycznego została przedstawiona równaniem numer 1:

$$\delta_{st} = \frac{F}{k} \quad (1)$$

Wprowadzenie elementów sprężystych, czyli wibroizolatorów pozwala na ograniczenie przenoszenia dużych sił na budynek, ale powoduje, że cały układ staje się obiektem oscylacyjnym. Innymi słowy układ, wibroizolator – platforma z silnikiem, wykazuje silną tendencję do drgań. Fakt ten można zaobserwować zmieniając nagle masę platformy, na przykład poprzez szybkie jej dociążenie. Cały układ przez chwilę będzie drgał, po czym powróci do stanu równowagi. Powstałe drgania będą miały charakter zanikający. Wpływ nagłego dociążenia układu na jego amplitudę drgań zaprezentowany został na rys. 2.

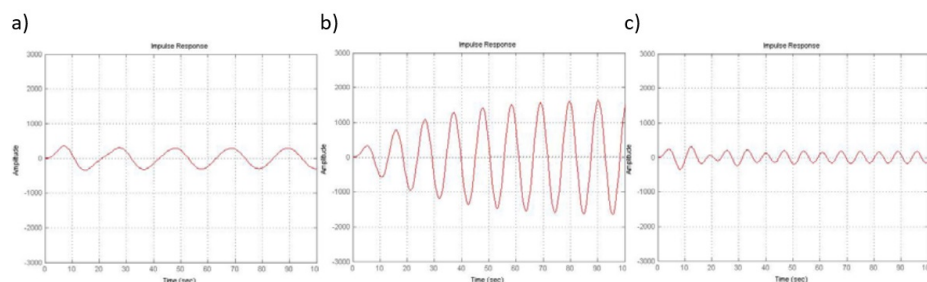


Rysunek 2: Zachowanie się układu po nagłej zmianie obciążenia

Ważne

Przy pracy z układami oscylacyjnymi należy zawsze pamiętać o zjawisku rezonansu. Istnieje pewna częstotliwość wymuszająca f_w która będzie powodowała, że obiekt będzie drgał z coraz większą amplitudą y . Ta szczególna częstotliwość została nazwana częstotliwością drgań swobodnych lub częstotliwością rezonansową f_r .

W naszym przykładzie częstotliwość wymuszająca to drgania pochodzące od silnika. Jeśli wirnik będzie się obracał z częstotliwością równą częstotliwości drgań swobodnych, to amplituda drgań platformy będzie ciągle rosła. W teoretycznych rozważaniach może dążyć do nieskończoności. W praktyce drgania będą niebezpiecznie duże, co w konsekwencji zazwyczaj kończy się uszkodzeniem lub zniszczeniem całej konstrukcji. Amplituda drgań platformy w zależności od częstotliwości wymuszającej odniesionej do częstotliwości rezonansowej zaprezentowana została na poniższym rysunku.



Rysunek 3: Drgania platformy z silnikiem w zależności od częstotliwości wymuszającej; a) $f_w < f_r$; b) $f_w = f_r$; c) $f_w > f_r$

Maszyny wirnikowe mogą generować drgania o różnych częstotliwościach, nie tylko równe obrotom silnika. Ma to miejsce, gdy na platformie z silnikiem zamontowane są przekładnie lub pasy, które powodują, że różne elementy układu drgają z różnymi prędkościami. Nie zawsze też można powiązać częstotliwość drgań z prędkością obrotową któregośkolwiek elementu urządzenia. Może mieć to miejsce w skomplikowanych układach, gdzie drgania nakładają się na siebie

Rezonans i związana z nim częstotliwość drgań swobodnych f_r opisuje poniższe równanie:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

Jak wynika z równania 2 częstotliwość drgań rezonansowych, zależy od współczynnika sprężystości oraz masy układu posadowionego na tych wibroizolatorach.

Znając masę platformy z silnikiem oraz współczynnik sprężystości można w łatwy sposób wyliczyć częstotliwość rezonansową. Znajomość częstotliwości rezonansowej jest konieczna, aby mieć pewność, że konstruowany układ nie będzie wpadał w niebezpieczne drgania. Jeśli okazałoby się, że silnik pracuje z częstotliwością zbliżoną do wartości częstotliwości drgań swobodnych to należałoby użyć wibroizolatora charakteryzującego się inną charakterystyką. Spowoduje to zmianę wartości drgań swobodnych układu zgodnie z zależnością 2.

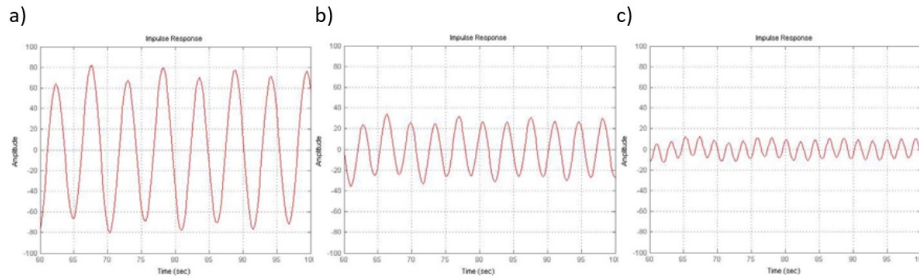
Niestety, okazuje się, że współczynnik sprężystości nie jest wielkością absolutną i stałą, niezależnie od warunków zewnętrznych. Wynika to z praw natury, które są zdecydowanie bardziej skomplikowane niż nasze modele. Akceptujemy jednak pewne uproszczenia, gdyż w praktycznych zastosowaniach osiągamy wystarczającą dokładność, a obliczenia pozostają wykonalne. Jednak faktem jest, że w warunkach drgań współczynnik sprężystości ulega zmianie. Wprowadźmy więc pojęcie stałej sprężystości statycznej k_{st} oraz

stałej sprężystości dynamicznej k_d . Nie możemy tym samym wyliczyć częstotliwości rezonansowej układu na podstawie współczynnika sprężystości statycznej, potrzebujemy do tego współczynnika sprężystości dynamicznej. Wyznaczenie k_{st} było stosunkowo proste, gdyż wystarczyło wartość siły obciążającej wibroizolator podzielić przez ugięcie, jakie ta siła wywołuje (Równanie 1, jednak wyznaczenie k_d wymaga zaawansowanego stanowiska pomiarowego przystosowanego do pracy w warunkach dynamicznych. W praktyce konstruktor dostaje od producenta wibroizolacji iloraz tych dwóch wielkości, dzięki czemu mając k_{st} , jest w stanie w prosty sposób wyznaczyć wartość k_d zgodnie z poniższą zależnością:

$$v = \frac{k_d}{k_{st}} \quad (3)$$

Ważne

Przyjmuje się, że częstotliwość wymuszająca f_w powinna być od 3 do 5 razy większa niż częstotliwość rezonansowa układu, ponieważ uzyskuje się wtedy wysoką skuteczność tłumienia drgań, co można zaobserwować na rysunku 4, przedstawiającym wpływ zależności amplitudy drgań w funkcji wielokrotności częstotliwości rezonansowej układu.



Rysunek 4: Drgania w zależności od wymuszenia będącego wielokrotnością częstotliwości rezonansowej; a) $f_w=2f_r$; b) $f_w=3f_r$; c) $f_w=5f_r$

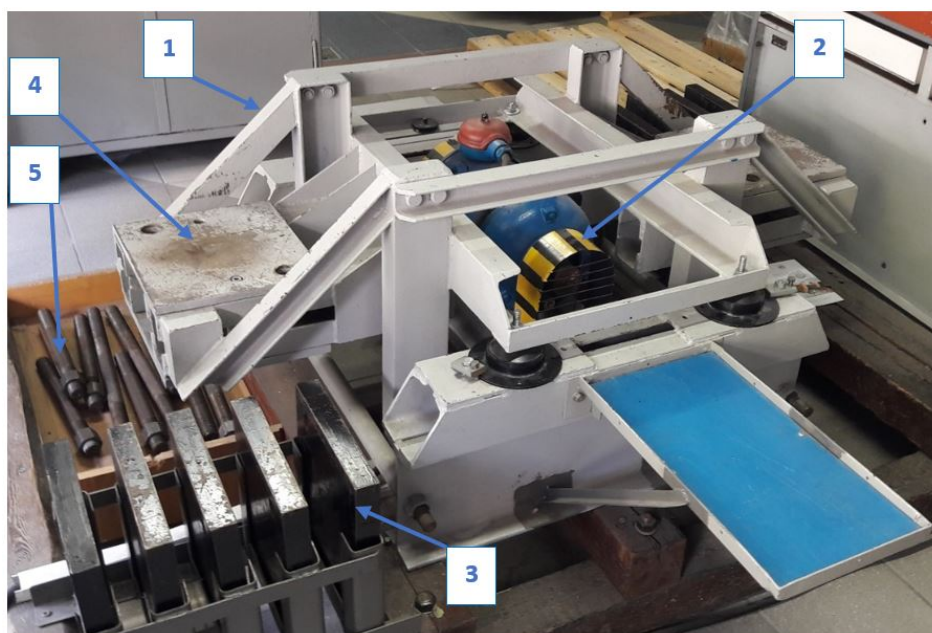
Do tej pory zakładaliśmy, że platforma z silnikiem drga wyłącznie w płaszczyźnie pionowej. Stałe sprężystości statycznej i dynamicznej oraz zjawisko rezonansu rozpatrywane były w odniesieniu tylko do tej płaszczyzny. Identyczne zjawiska występują również w płaszczyźnie poziomej. Obiekt może wpaść w rezonans również poprzez wymuszenie drganiami poziomymi, tym samym należy zapewnić, aby częstotliwość wymuszająca była 3-5 krotnie większa od częstotliwości rezonansowej poziomej f_{rx} . Oczywiście częstotliwość wymuszająca w dalszym ciągu pozostaje ta sama – drgania pionowe i poziome platformy z silnikiem mają ten sam charakter, więc tę samą wartość. Aby wyznaczyć f_{rx} należałoby mieć stałą sprężystości poziomej k_x , co znów

stanowi pewien problem. Dlatego też producent podaje wartość stosunku stałych sprężystości poziomej do stałej sprężystości pionowej w warunkach dynamicznych zgodnie z poniższym równaniem.

$$\eta = \frac{k_x}{k_d} \quad (4)$$

2.2 Przeprowadzenie badania

Konstrukcja stanowiska badawczego została zaprezentowana na rysunku 5. Platforma wibracyjna (1) wpada w drgania, ponieważ wał silnika (2) został celowo nierównomiernie obciążony, co powoduje powstawanie sił harmoniczných, których składowe można interpretować oddzielnie jako pionowe i poziome. Zmiany obciążenia stołu wibracyjnego dokonuje się za pomocą odważników (3), które montuje się na wspornikach (4). Aby konstrukcja była stabilna, odważniki należy zabezpieczyć przed zsunięciem śrubami (5).



Rysunek 5: Zdjęcie stanowiska badawczego. 1 – platforma wibracyjna; 2 – silnik; 3 – odważniki; 4 – wsporniki; 5 – śruby

Częstotliwość wymuszającą można regulować, zmieniając prędkość obrotową silnika przy użyciu autotransformatora. Z autotransformatora nie można jednak odczytać, z jaką prędkością obraca się wirnik. Aby poznać tę wielkość, odpowiadającą częstotliwości drgań, należy posłużyć się stroboskopem. Gdy oświetlona końcówka wału wydaje się nieruchoma, częstotliwość impulsów świetlnych stroboskopu jest równa prędkości obrotowej silnika. Po-

miar amplitudy drgań będzie wykonywany za pośrednictwem miernika drgań Lutron VB-8206SD.

Ważne

Końcówka wału będzie nieruchoma, gdy stroboskop będzie pracował z częstotliwością równą obrotom silnika, dwukrotnie większą niż obroty silnika, trzykrotnie większą etc. Podobne zjawisko będzie występowało, gdy stroboskop będzie pracował z częstotliwością niższą niż obroty silnika, z tą różnicą, że widoczny będzie więcej niż jeden wał. Oznacza to, że jeśli będzie oświetlał końcówkę wału z częstotliwością równą 1/2 obrotom silnika widoczne będą dwa wały, z częstotliwością 1/3 obrotów silnika widoczne będą 3 wały, etc.

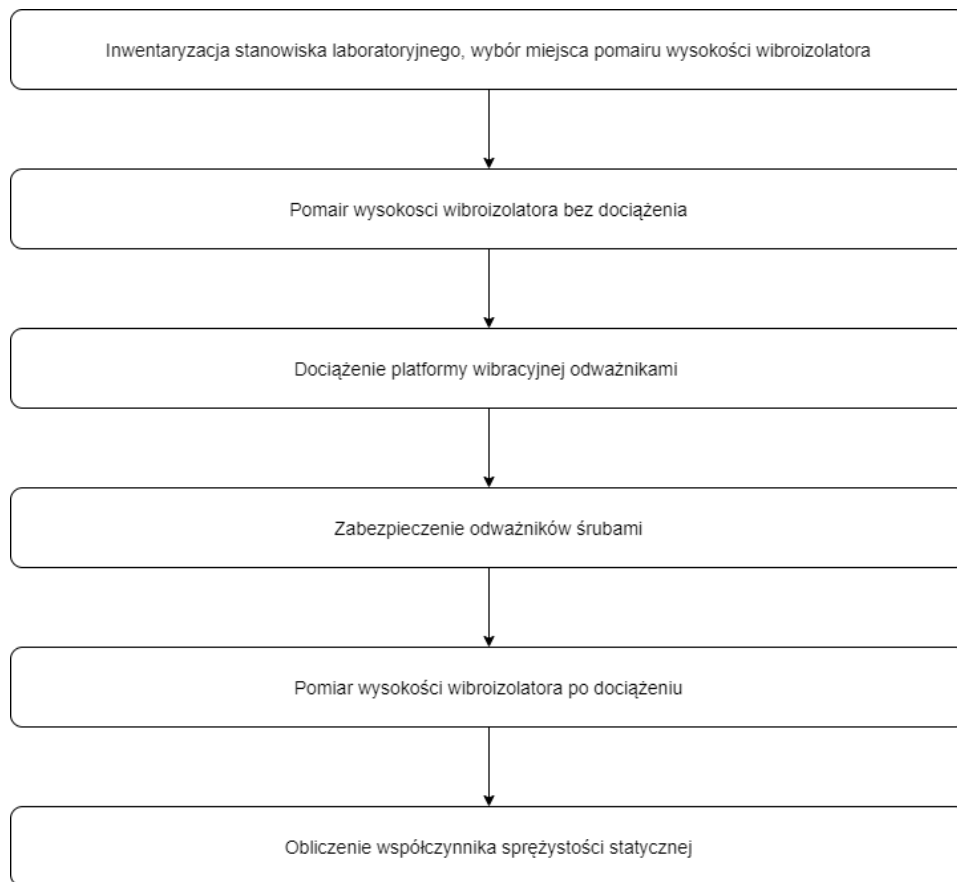
2.2.1 Wyznaczenie współczynnika sprężystości statycznej

W celu wyznaczenia współczynnika sprężystości statycznej wibroizolatorów, należy zmierzyć na stanowisku badawczym wartość ugięcia statycznego wibroizolatorów oraz określić masę układu.

Wyznaczenie wartości ugięcia statycznego wibroizolatorów należy rozpocząć od zmierzenia wysokości wibroizolatorów przed ich dociążeniem oraz po ich dociążeniu zgodnie z poniższym równaniem:

$$\delta = h_0 - h_1 \quad (5)$$

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż pomiar wysokości h_0 dokonywany jest już przy częściowo dociążonych wibroizolatorach (masa silnika oraz platformy). Fakt ten należy uwzględnić przy obliczaniu współczynnika sprężystości statycznej, który należy wyznaczyć zgodnie z równaniem 1. Jako wartość przyspieszenia ziemskiego należy przyjąć ($g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$).

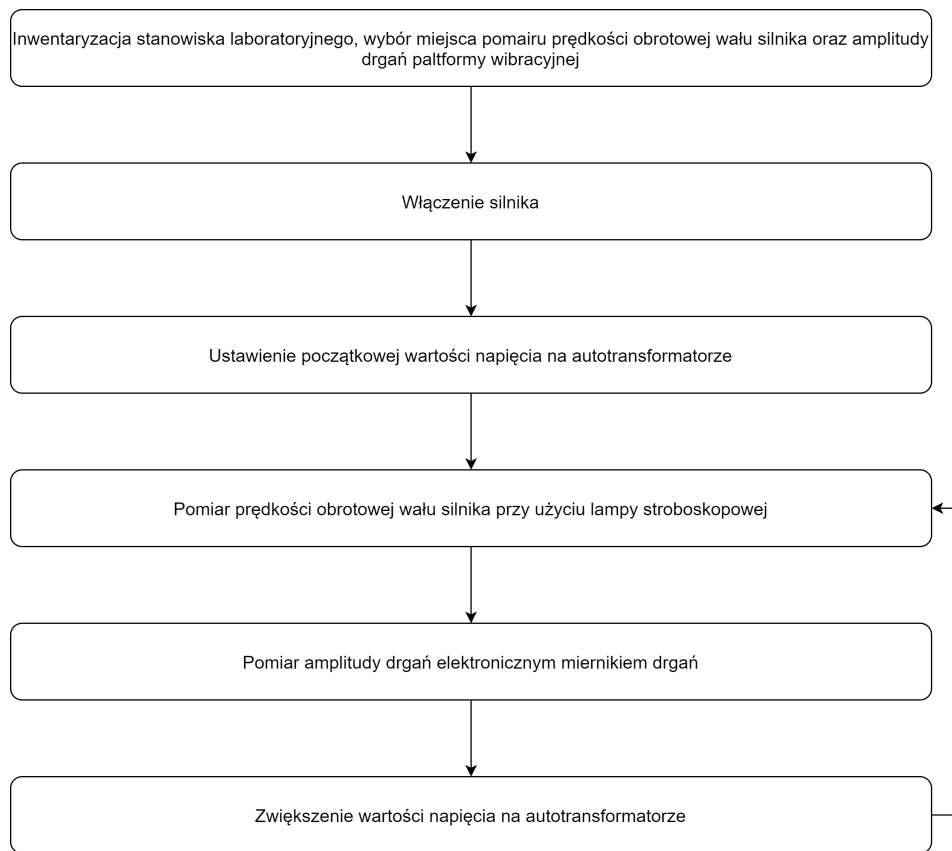


Rysunek 6: Diagram wyznaczenie współczynnika sprężystości statycznej wibroizolatora

2.2.2 Wyznaczenie współczynnika sprężystości dynamicznej

Aby było możliwe wyznaczenie współczynnika sprężystości dynamicznej wibroizolatorów, należy w pierwszej kolejności przystąpić do wyznaczenia częstotliwości rezonansowej układu. W tym celu należy uruchomić silnik i dla poszczególnych prędkości obrotowych wału silnika, należy zmierzyć drgania pionowe platformy za pomocą miernika drgań. Pomiarów dokonuje się w obszarze rezonansu. Po wykonaniu serii pomiarów, należy wyznaczyć wartość częstotliwości rezonansowej. Dokonując przekształcenia równania 2, można w prosty sposób przystąpić do obliczenia wartości współczynnika sprężystości dynamicznej.

$$k_d = (2\pi f_r)^2 m \quad (6)$$



Rysunek 7: Diagram wyznaczenia amplitudy drgań i częstotliwości wymuszającej

2.2.3 Wyznaczenie stosunku współczynnika sprężystości dynamicznej do statycznej

Aby wyznaczyć wartość ν można odpowiednio przekształcić równanie 3, aby wyeliminować z niego stałe sprężystości oraz masę, a pozostawić w nim ugięcia statyczne i dynamiczne, zgodnie z poniższą zależnością.

$$\nu = \frac{k_d}{k_{st}} = \frac{\frac{mg}{\delta_d}}{\frac{mg}{\delta'_{st}}} = \frac{\delta'_{st}(2\pi f_r)^2}{g} \quad (7)$$

W podobny sposób należy wyznaczać wartość η

3 Zakres opracowania

W sprawozdaniu należy zamieścić następujące elementy:

- strona tytułowa
- spis treści, ilustracji, tabel itd.,
- przedstawienie problematyki ćwiczeń laboratoryjnych wraz z realizowanym zakresem,
- przykład obliczeniowy, przedstawiony w jasny i zrozumiały sposób.

Ponadto dla każdego z przypadków badanych mas układu należy zawrzeć:

- obliczony współczynnik sprężystości dynamicznej oraz statycznej,
- obliczony współczynnik stosunku sprężystości dynamicznej do statycznej,
- wykres amplitudy drgań w zależności od częstości wymuszającej,
- zbiorczy wykres amplitudy drgań w funkcji częstotliwości wymuszającej dla badanych przypadków masy układu,
- ocenę wpływu masy obciążającej wibroizolację na wartość częstotliwości rezonansowej,
- indywidualne wnioski wraz z komentarzami do wykresów.

4 Oznaczenia

F - siła, N

k - współczynnik sprężystości, $N\ m^{-1}$

k_d - współczynnik sprężystości dynamicznej, $N\ m^{-1}$

k_{st} - współczynnik sprężystości statycznej, $N\ m^{-1}$

k_x - współczynnik sprężystości drgań poziomych, $N\ m^{-1}$

f_r - częstotliwość rezonansowa, s^{-1}

m - masa, kg

h_0 - wysokość wibroizolatora bez dociążenia, m

h_1 - wysokość wibroizolatora po dociążeniu, m

δ_{st} - ugięcie statyczne, m

δ'_{st} - ugięcia wibroizolatora przy masie całego układu, m

η - stosunek stałych sprężystości poziomej do stałej sprężystości pionowej
w warunkach dynamicznych