

Laboratorium Wentylacji i Klimatyzacji  
Ćwiczenie nr 2  
Wibroizolacja - Pomiar statyczne amortyzatorów  
Wyznaczanie częstości drgań swobodnych

Politechnika Wroclawska  
Wydział Inżynierii Środowiska

25 października 2021



## Spis treści

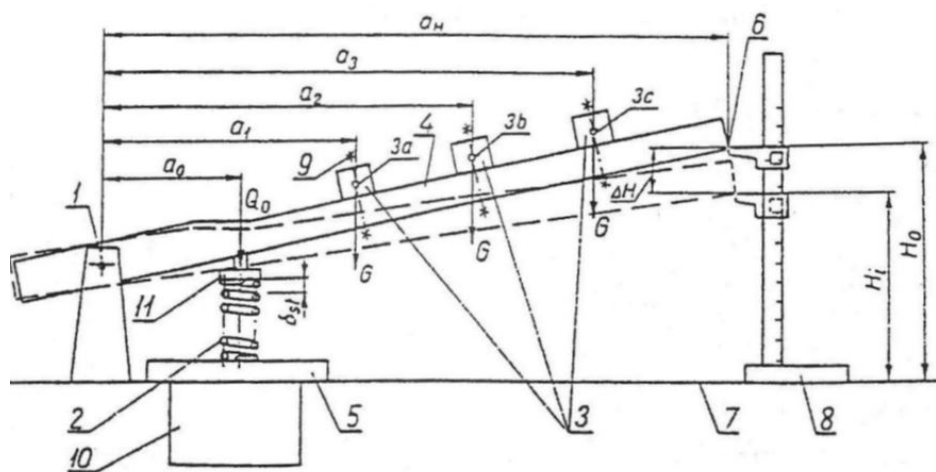
<b>1</b>	<b>Informacje podstawowe</b>	<b>2</b>
1.1	Sprzęt i narzędzia wykorzystywane podczas ćwiczenia . . . . .	2
1.2	Cel ćwiczenia . . . . .	2
1.3	Problematyka, przebieg ćwiczenia . . . . .	3
1.4	Jak się przygotować do ćwiczenia? . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Realizacja ćwiczenia</b>	<b>4</b>
2.1	Wprowadzenie do zagadnienia . . . . .	4
2.2	Przeprowadzenie badania . . . . .	6
2.2.1	Wyznaczenie ugięcia statycznego wibroizolatora . . . . .	6
2.2.2	Wyznczenie niepewności pomiarowej . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Zakres opracowania</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Oznaczenia</b>	<b>10</b>

# 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 laboratoryjne znajduje się w pomieszczeniu hali technologicznej, w budynku C-6. Stanowisko pomiarowe zwane prasą Hulla, której schemat został pokazany na rysunku 1.



Rysunek 1: Prasa Hulla, 1 – trzpień stożkowy, 2 – wibroizolator, 3 – miejsce mocowania ciężaru, 4 – ramię dźwigni, 5 – płyta, 6 – punkt pomiarowy, 7 – podstawa, 8 – wysokościomierz suwmiarkowy, 9 – śruba mocująca ciężar, 10 – wgłębienie pod dźwignią, 11 – trzpień dotykowy.

Pod trzpieniem (11) należy ustawić badany wibroizolator (2). Żądany nacisk na niego uzyskuje się za pomocą ciężarów, zabezpieczonych śrubą mocującą (9). Ciężary mocowane są w jednym z trzech położenia przygotowanych na ramieniu dźwigni (3a, 3b, 3c). Masy elementów obciążających, zarówno ciężarów jak i śrub zostały na nich opisane. Wartość ugięcia wibroizolatora, należy zmierzyć wysokościomierzem suwmiarkowym.

## 1.2 Cel ćwiczenia

Przeprowadzenie ćwiczenia wiąże się z realizacją następujących celów:

1. ugruntowanie wiedzy dotyczącej właściwości dynamicznych wibroizolatorów,

2. utrwalenie umiejętności korzystania z suwmiarki oraz wysokościomierza suwmiarkowego,
3. nabycie praktyki w zakresie wyznaczania współczynnika sprężystości statycznej wibroizolatorów,
4. zdobycie umiejętności opracowania danych pomiarowych,
5. poznanie właściwości wibroizolatorów o różnej konstrukcji.

### 1.3 Problematyka, przebieg ćwiczenia

Ćwiczenie polega na poznaniu doświadczalnej metody wyznaczania charakterystyk statycznych wibroizolatorów gumowych i sprężynowych. Na podstawie wykonanych pomiarów należy określić zależność ugięcia statycznego wibroizolatora od siły statycznej oddziałującej na wibroizolator  $\delta_{st} = f(Q)$  oraz stałej sprężystości w zależności od ugięcia statycznego wibroizolatora  $k_{st} = f(\delta_{st})$ .

#### Ważne

Ćwiczenie laboratoryjne dotyka 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 zastanowić się nad cechami charakterystycznymi dla wibroizolatorów gumowych oraz sprężynowych. Należy również zapoznać się z metodami statystycznego opracowania danych pomiarowych, w szczególności z metodą Studenta Fishera.

## 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 Wprowadzenie do zagadnienia

Każdy element obrotowy, taki jak wirnik, koło napędowe i wszelkiego rodzaju przekładnia pasowa, powinien być wykonany idealnie symetrycznie, tak aby jego masa rozłożona była równomiernie względem osi obrotu. Niestety w praktyce wytworzenie takiego idealnego elementu jest niewykonalne i zawsze pojawia się choćby drobne niewyważenie. Skutkiem takiego niewyważenia, czyli w praktyce efektem ubocznym ruchu obrotowego, są drgania konstrukcji nośnej, na której odbywa się ruch. Drgania te należy interpretować jako regularne uderzenia w podłoże, na którym znajduje się urządzenie. W celu ograniczenia wielkości sił dynamicznych przenoszonych na fundament, maszyny wirnikowe (np. pompy, wentylatory, sprężarki) instaluje się na elementach sprężystych zwanych wibroizolatorami.

Gdyby pompę o wydajności 500 m<sup>3</sup>/h zamocować w bezpośrednim kontakcie z elementami konstrukcyjnymi budynku, jest bardzo prawdopodobne, że drgania generowane przez urządzenie spowodowałyby pęknięcia w podłożu, lub na ścianach. Natomiast gdyby pompa została zamontowana do podłoża na warstwie materiału tłumiącego drgania (wibroizolatorach) to praca urządzenia powinna być bezpieczna dla konstrukcji budynku. W praktyce należy jednak zawsze pamiętać o możliwości wystąpienia zjawiska rezonansu.

Mianowicie, wibroizolator jest elementem sprężystym, ściśliwym. Sprężyna, która pochłonie energię i ugnie się pod wpływem działania siły, ma tę energię w większej części zmagazynowaną i musi ją kiedyś oddać. Ściśnięta sprężyna, w momencie rozluźnienia ucisku (gdy siła, która ją naciska przestanie działać) szybko wróci do swoich normalnych rozmiarów, zamieniając zgromadzoną w swoich zwojach energię potencjalną na kinetyczną. Pracę wibroizolatora można więc scharakteryzować jako cykliczne zachodzenie procesów pochłaniania energii i jej oddawania.

Wcześniej zwrócono uwagę, że wskutek niewyważenia maszyn wirnikowych uderzają one z pewną częstością w powierzchnię, z którą mają kontakt. Gdy do tego doda się fakt, że wibroizolacja pracuje w cyklach pochłaniania i oddawania energii, można zadać sobie pytanie czy oba te zjawiska nie niosą ze sobą pewnych niebezpieczeństw. Mianowicie musi istnieć taka częstość uderzeń generowanych przez urządzenie, że pokryje się ona idealnie z cyklem pracy wibroizolatora. Innymi słowy, kiedy sprężyna oddaje energię, maszyna emituje jedno drganie w tym samym kierunku. Kiedy sprężyna się ugina, czyli magazynuje energię, maszyna emituje drganie też w tym kie-

runku. Powoduje to, że siły się dodają i cały układ drga z jeszcze większą siłą.

#### Ważne

Rezonans jest to wzrost amplitud drgań układu, spowodowany wzbudzeniem go częstotliwością równą częstotliwości drgań własnych układu.

Parametrem wibroizolatora, pozwalającym określić częstotliwość drgań własnych układu o danej masie jest stała sprężystości (sztywności). Częstotliwość rezonansową można wyznaczyć przy użyciu poniższej zależności:

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

Możemy wyróżnić współczynnik sprężystości statycznej oraz dynamicznej. Pierwszy z nich odnosi się do warunków statycznych, czyli wibroizolator obciążony jest masą pozostającą w bezruchu. Drugi natomiast odnosi się do warunków dynamicznych, wyrażający wartość sprężystości w warunkach ruchu. W oparciu o współczynnik sprężystości dynamicznej należy wyznaczyć wartość częstotliwości rezonansowej układu.

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

Jeżeli wibroizolator został wykonany z materiałów praktycznie nieściśliwych, można przyjąć, że współczynnik sprężystości statycznej jest równy sprężystości dynamicznej. Natomiast jeżeli mamy do czynienia chociażby z wibroizolatorem gumowym (guma jest materiałem mocno ściśliwym) wtedy należy wyznaczyć współczynnik sprężystości dynamicznej oraz statycznej. 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:

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

Współczynnik sprężystości statycznej można wyznaczyć na podstawie poniższej zależności:

$$k_{st} = \frac{Q}{\delta_{st}} \quad (4)$$

Zależnie od typu wibroizolatora wartość ugięcia statycznego a przez to i współczynnik sprężystości statycznej może zmieniać się prostoliniowo (dla wibroizolatorów sprężynowych) lub krzywoliniowo (dla wibroizolatorów gumowych).

## 2.2 Przeprowadzenie badania

Pomiary przeprowadza się przy pomocy prasy Hulla. Wykorzystując efekt dźwigni, dzięki ramieniu prasy, można obciążać testowane wibroizolatory różną siłą wykorzystując tylko jeden odważnik. Odważnik umieszczony blisko osi obrotu prasy Hulla będzie naciskał na wibroizolator pewną siłą, przy czym wraz z odsuwaniem go od osi obrotu siła nacisku będzie wzrastać. W miejscach mocowania odważników podano przełożenie, jakie uzyskuje się w tych punktach. Na przykład 5 kg odważnik umieszczony w punkcie, w którym przełożenie wynosi 3 spowoduje obciążenie wibroizolatora masą 15 kg. W obliczeniach należy również wziąć pod uwagę ciężar samej dźwigni, który wynosi 315 N w miejscu kontaktu z testowanym elementem.

### 2.2.1 Wyznaczenie ugięcia statycznego wibroizolatora

Pomiary ugięcia statycznego  $\delta_{st}$  wykonuje się przy pomocy wysokościomierza suwmiarkowego (Rysunek 2). Zmiana położenia końca dźwigni o 12,1 cm to zmiana wysokości wibroizolatora o 1 cm. W związku z tym każdy wynik należy odpowiednio przeskalować dzieląc go przez przekładnię 12,1.

Ugięcie statyczne oblicza się z równania 5 natomiast siłę obciążającą testowanego elementu należy wyznaczyć z zależności 6.

$$\delta_{st} = \frac{H_0 - H_1}{a_d} \quad (5)$$

$$Q = a_i mg + Q_d \quad (6)$$

#### Ważne

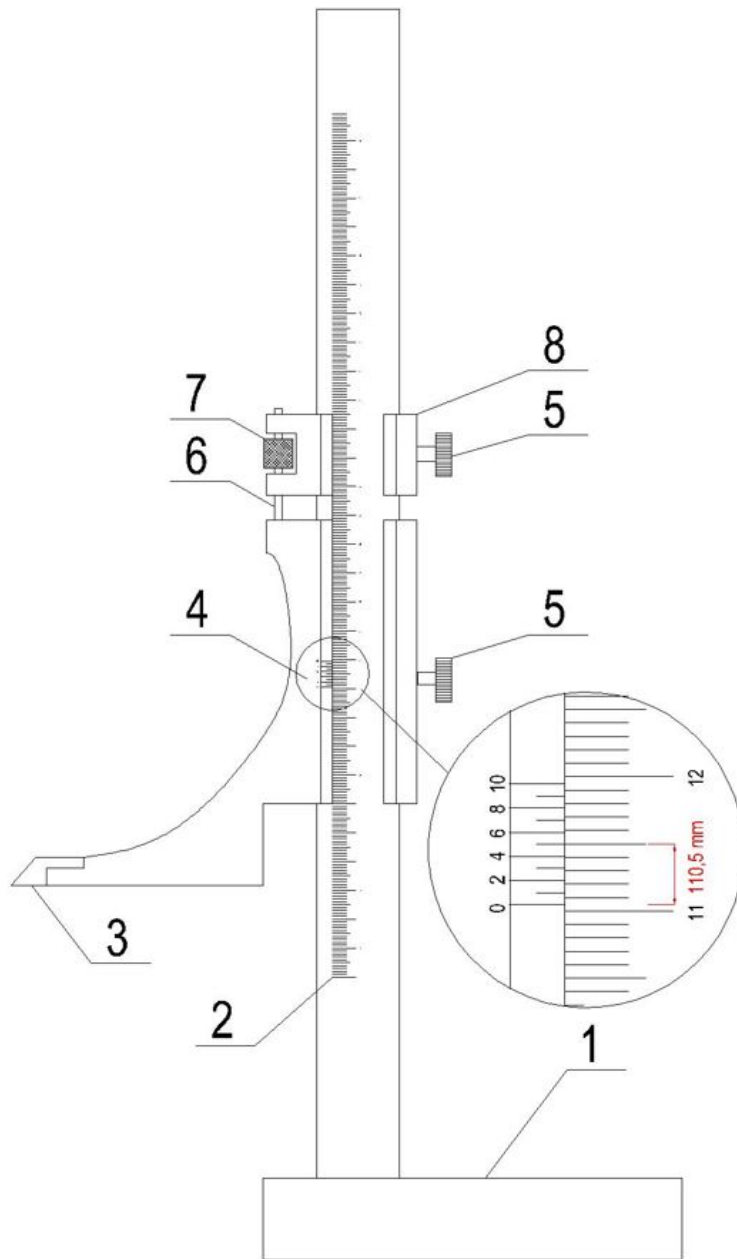
$H_0$  należy mierzyć, gdy prasa Hulla dotyka testowanego elementu, ale nie działa na niego żadną siłą. Pomocne w tym może być włożenie kartki papieru w miejsce styku obu części. Gdy prasa zaczyna lekko dociskać kartkę staje się ona nieruchoma, co będzie sygnałem do wykonania pomiaru  $H_0$

#### Ważne

**Należy wybrać jeden stały punkt pomiarowy na końcu dźwigni prasy Hulla i wszystkie pomiary wykonywać w tym samym punkcie.**

Wysokościomierz suwmiarkowy jest przyrządem pomiarowym, który służy do pomiaru wysokości określonego przedmiotu. Część pomiarowa składa się z prowadnicy z podziałką milimetrową oraz ruchomego suwaka z podziałką (noniuszem). Podziałka noniusza jest taka, że 10 kresk noniusza odpowiada co do długości 9 kreskom skali milimetrowej. Na poniższym rysunku

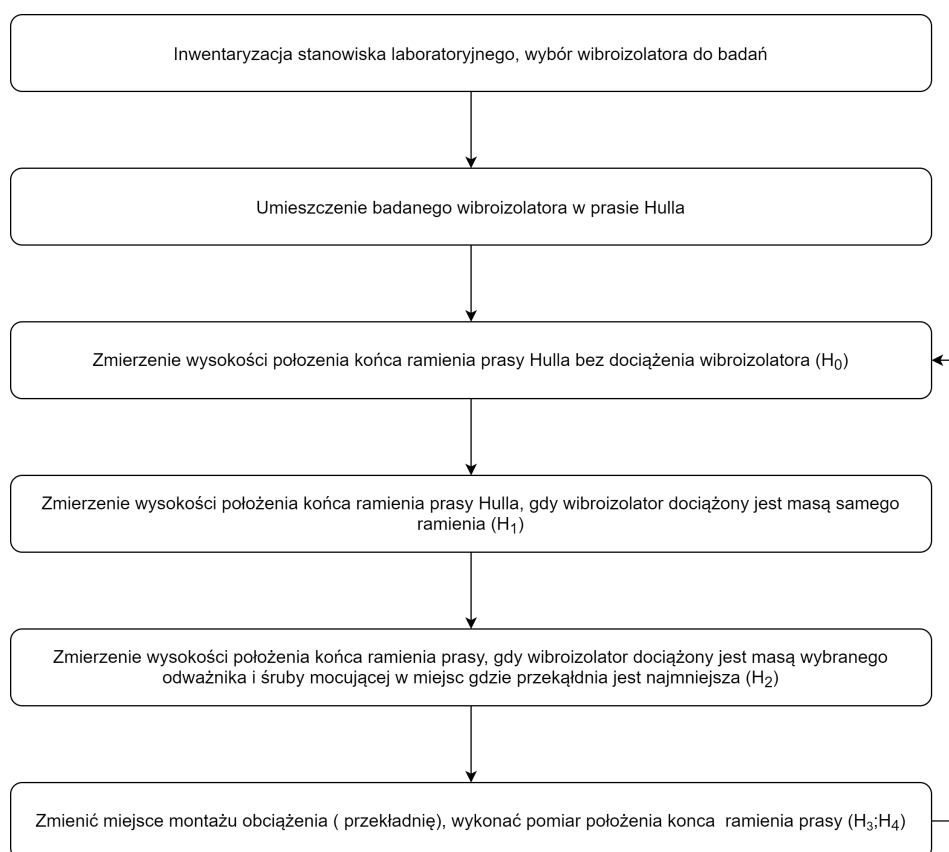
przedstawiono przykładowy wysokościomierz suwmiarkowy wraz z odczytaną wskazywaną przez niego wielkością.



Rysunek 2: Wysokościomierz suwmiarkowy wraz z sposobem odczytywania mierzonych wartości, 1 – podstawa, 2 – prowadnica z podziałką milimetrową, 3 – końcówka pomiarowa, 4 – noniusz, 5 – śruba mocująca, 6 – śruba nastawcza, 7 – nakrętka śruby nastawczej, 8 – dodatkowy suwak

### Zasada dokonywania odczytu wartości na wysokościomierzu suwmiarkowym

Liczbę całkowitą milimetrów wskazuje ostatnia kreska skali głównej przed zerową kreską noniusza, natomiast liczbę dziesiętnych części milimetra kreska noniusza, która pokrywa się w poziomie z jedną z kresek skali głównej.



Rysunek 3: Diagram wykonania pomiaru wysokości położenia końca prasy Hulla

#### 2.2.2 Wyznczenie niepewności pomiarowej

Pomiar ugięcia statycznego należy wykonać wielokrotnie dla tego samego obciążenia, umożliwi to wyznaczenie niepewności pomiarowych. Należy pamiętać, że wartość rzeczywista ugięcia wibroizolatora nie jest znana, poszczególnymi pomiarami poznajemy tylko jej oszacowanie. W celu połączenia wszystkich  $n$  pomiarów w całość i poznania najlepszego możliwego oszacowania należy obliczyć średnią arytmetyczną:



$$\bar{\delta}_{st} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_{st(i)}}{n} \quad (7)$$

Średnia arytmetyczna obserwowanych wartości parametru stanowi oszacowanie rzeczywistej (nieznanej precyzyjnie) wartości parametru. Jako miarę niepewność tego oszacowania przyjmujemy odchylenie standardowe obserwacji 8. Odchylenie standardowe można interpretować jako 'o ile średnio obserwacje różniły się od swojej średniej'. Duże odchylenie standardowe oznacza, że wyniki były niestabilne/rozproszone

$$s_{\bar{\delta}_{st}} = \frac{s_{\delta_{st}}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_{st(i)} - \bar{\delta}_{st})^2}{n(n-1)}} \quad (8)$$

Na podstawie rozkładu Studenta-Fishera należy określić przedział  $\delta_{st} = \bar{\delta}_{st} \pm \Delta\delta_{st}$  w którym wartość prawdziwa ugięcia statycznego mieści się z założonym prawdopodobieństwem.

$$\Delta\delta_{st} = t_p s_{\bar{\delta}_{st}} \quad (9)$$

Tablica 1: Tabela współczynników t Studenta-Fishera

n \ p	<b>0,6827</b>	<b>0,90</b>	<b>0,95</b>	<b>0,9545</b>	<b>0,99</b>	<b>0,9973</b>
<b>1</b>	1,8374	6,3138	12,706	13,968	63,657	235,78
<b>2</b>	1,3213	2,9200	4,3027	4,5266	7,7248	19,206
<b>3</b>	1,1969	2,3534	3,1824	3,3068	5,8409	9,2187
<b>4</b>	1,1417	2,1318	2,7764	2,8693	4,6041	6,6201
<b>5</b>	1,1105	2,0150	2,5706	2,6487	4,0321	5,5070
<b>6</b>	1,0906	1,9432	2,4469	2,5165	3,7074	4,9040
<b>7</b>	1,0767	1,8946	2,3646	2,4288	3,4995	4,5299
<b>8</b>	1,0666	1,8595	2,3060	2,3664	3,3554	4,2766
<b>9</b>	1,0588	1,8331	2,2622	2,3198	3,2498	4,0942
<b>10</b>	1,0526	1,8125	2,2281	2,2837	3,1693	3,9569

### Ważne

Należy pamiętać, aby zawsze podawać jednostki oraz zaokrąlać niepewność pomiarową do 1 cyfry znaczącej, chyba że pomiary wymagają niezwyklej dokładności, można wtedy przyjąć zaokrąglenie niepewności do 2 cyfry znaczącej. Niepewność zaokrąla się zawsze w górę. Oszacowanie wartości rzeczywistej, czyli średnia powinna być zaokrąglona z dokładnością do miejsca, na którym występuje ostatnia cyfra znacząca niepewności. Na przykład, jeśli średnia arytmetyczna wynosi 5,346 mm, a odchylenie standardowe 0,31378, to ostateczny zapis wyniku pomiaru to  $5,3 \pm 0,4$  mm.

### 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 dla jednego przypadku.

Ponadto dla każdego rodzaju badanych wibroizolatorów należy zamieścić:

- zestawienie tabelaryczne dokonanych pomiarów ugięć statycznych,
- zestawienie tabelaryczne średnich wartości ugięcia statycznego wraz z niepewnościami pomiarowymi,
- wykres ugięcia statycznego w funkcji siły dociążającej (z uwzględnieniem niepewności pomiarowych),
- zestawienie tabelaryczne obliczonych współczynników sprężystości i częstotliwości drgań własnych,
- wykres współczynnika sprężystości w funkcji siły dociążającej,
- wnioski oraz interpretację wykresów.

### 4 Oznaczenia

$a_d$  - przekładnia pozwalająca obliczyć rzeczywistą wartość ugięcia w miejscu nacisku prasy Hulla (12.1),

$a_i$  - przekładnia,

$f_r$  - częstotliwość rezonansowa,  $s^{-1}$

$g$  - przyspieszenie ziemskie,  $m s^{-2}$

$H$  - położenie końca dźwigni prasy Hulla,  $m$

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

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

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

$m$  - masa,  $kg$

$n$  - numer pomiaru w serii,  $kg$

$s$  - odchylenie standardowe,  $kg$

$t_p$  - współczynnik studenta,

$Q$  - siła dociążająca,  $N$

$Q_d$  - ciężar dźwigni,  $N$

$\delta_{st}$  - ugięcie statyczne,  $m$

$v$  - stosunek stałej sprężystości dynamicznej do statycznej,