

Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.

Ćwiczenie 5 WYRÓWNOWAŻANIE STATYCZNE I DYNAMICZNE ELEMENTÓW WIRUJĄCYCH

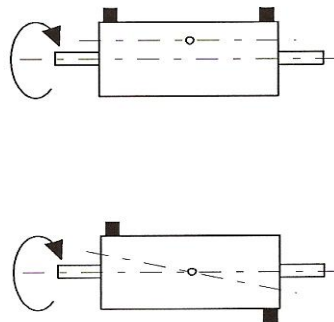
5.1. WSTĘP

Ćwiczenie zostanie wykonane na stanowisku pomiarowym firmy GUNT-Hamburg [1] przeznaczonym do demonstracji wyrównowazania statycznego i dynamicznego elementów wirujących. Wyrównowazanie jest bardzo ważnym aspektem w praktyce inżynierskiej. We wszystkich urządzeniach, w których elementy wirują z dużymi prędkościami obrotowymi, występuje konieczność ich wyrównowazania. Elementy niewłaściwie wyrównowazone poddane są działaniu sił bezwładności prowadzących do wzrostu naprężeń w łożyskach, nadmiernych szumów i drgań. Przykładami elementów wymagających wyrównowazania są m.in.

- koła samochodowe,
- silniki elektryczne,
- tarcze szlifierskie,
- turbiny.

Prezentowane urządzenie pozwala zilustrować różnice pomiędzy wyrównowazaniem statycznym, dynamicznym i ogólnym (tj. statycznym i dynamicznym równocześnie – przypadek najczęściej występujący w praktyce).

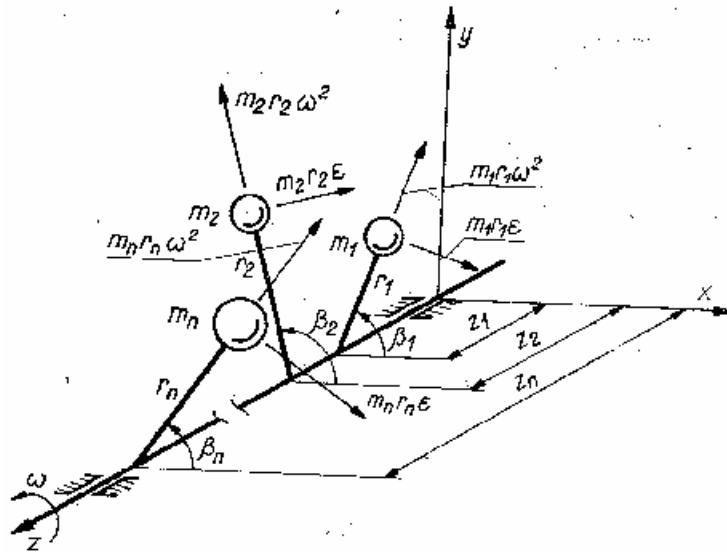
Na rys. 5.1 pokazano dla przykładu dwa wirniki osiowo symetryczne, do których dołączono dodatkowo dwie jednakowe masy. Na skutek tego, w pierwszym przypadku środek masy układu jest przesunięty względem osi obrotu. Oś centralna główna jest równoległa do osi obrotu. Ma tu miejsce niewyrównowazanie statyczne. W drugim, środek masy leży na osi obrotu, lecz oś centralna główna układu tworzy pewien kąt z osią obrotu wirnika. Oś obrotu wirnika jest osią centralną, ale nie jest osią główną. Układ jest wyrównowazony statycznie i niewyrównowazony dynamicznie.



Rys. 5.1. Przykłady niewyrównowazania wirującego elementu

Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.

5.2 WPROWADZENIE TEORETYCZNE



Rys. 5.2. Wirnik z rozmieszczonymi dodatkowymi masami skupionymi.

Rozważmy wirnik w postaci układu mas dyskretnych umieszczonych na sztywnych, nieważkich prętach, które są zamocowane na nieważkim, sztywnym wale [2].

Prędkość kątową wału jest równa - ω a jego przyspieszenie kątowe - ε . Na każdą z mas działa siła bezwładności o składowych:

normalnej - $m_i r_i \omega^2$,

oraz stycznej - $m_i r_i \varepsilon$,

gdzie: m_i - masa skupiona, r_i - odległość i-tej masy od osi obrotu.

W układzie prostokątnym związanym sztywno z wirnikiem $(x, y, z) = (x', y', z')$, którego oś z pokrywa się z osią obrotu wirnika, położenie każdej z mas określone jest stałym kątem β_i .

Po rzutowaniu wszystkich sił bezwładności na osie układu x', y', z' i wyznaczeniu momentów tych sił względem osi x', y', z' otrzymujemy układ równań

$$\sum_{i=1}^{i=n} F_{ix'} = \omega^2 \sum_{i=1}^{i=n} m_i x'_i + \varepsilon \sum_{i=1}^{i=n} m_i y'_i \quad (5.1)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} F_{iy'} = \omega^2 \sum_{i=1}^{i=n} m_i y'_i - \varepsilon \sum_{i=1}^{i=n} m_i x'_i \quad (5.2)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} M_{ix'} = -\omega^2 \sum_{i=1}^{i=n} m_i y'_i z_i + \varepsilon \sum_{i=1}^{i=n} m_i x'_i z_i = -\omega^2 I'_{yz} + \varepsilon I'_{xz} \quad (5.3)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} M_{iy'} = \omega^2 \sum_{i=1}^{i=n} m_i x'_i z_i + \varepsilon \sum_{i=1}^{i=n} m_i y'_i z_i = \omega^2 I'_{xz} + \varepsilon I'_{yz} \quad (5.4)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} M_{iz'} = -\varepsilon \sum_{i=1}^{i=n} m_i x_i'^2 - \varepsilon \sum_{i=1}^{i=n} m_i y_i'^2 = -\varepsilon I_z \quad (5.5)$$

Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.

gdzie: $x'_i = r_i \cos \beta_i$; $y'_i = r_i \sin \beta_i$; z_i - współrzędne prostokątne określające położenie i -tej masy w układzie x', y', z' .

Składowe opisane dwoma pierwszymi równaniami (5.1) i (5.2) są zerowe gdy

$$\sum_i m_i x'_i = 0 \text{ oraz } \sum_i m_i y'_i = 0. \quad (5.6)$$

co jest równoważne zależnościom

$$Mx'_o = 0 \text{ oraz } My'_o = 0 \quad (5.7)$$

gdzie $M = \sum_i m_i$ - suma wszystkich mas, x'_o, y'_o - współrzędne środka masy układu mas dyskretnych. Dla spełnienia warunków (5.6) bądź (5.7) niezbędne jest, aby oś obrotu z przechodziła przez środek masy układu.

Układ mas, który spełnia ten warunek jest wyrównowazony, co do środka masy a oś obrotu nazywa się centralną.

W praktyce ten przypadek nazywa się wyrównoważeniem statycznym.

Przyrównanie do zera składowych $\sum_i M_{ix'}$ oraz $\sum_i M_{iy'}$ we wzorach (5.3) i (5.4) daje warunek

$$I'_{yz} = I'_{xz} = 0 \quad (5.8)$$

Oznacza to, że składowe momentów sił są równe zero tylko wtedy, gdy momenty dewiacyjne (odśrodkowe) układu mas dyskretnych I'_{yz} i I'_{xz} są równe zero. Warunek ten jest spełniony, gdy oś obrotu z jest główną osią bezwładności układu.

Układ mas, który wiruje dookoła swej centralnej głównej osi bezwładności jest wyrównowazony dynamicznie.

W praktyce mamy zwykle do czynienia z obu rodzajami niewyrównoważenia.

Można dowieść twierdzenie, iż dowolny wirnik sztywny można całkowicie wyrównoważyć (statycznie i dynamicznie) przez umieszczenie dwóch dowolnych mas korekcyjnych w dwóch dowolnych, niepokrywających się płaszczyznach prostopadłych do osi obrotu wirnika.

Położenia katowe tych mas i promienie, na których mają być one umieszczone wynikają z wielkości niewyrównoważeń wirnika.

5.3. OPIS STANOWISKA

Podstawowym elementem stanowiska (rys. 5.3) jest gładki wał (1), na którym umieszczone są cztery dyskretne masy w postaci płaskowników (5), wywołujące niewyrównoważenie wału. Masy te mogą być sytuowane w dowolnym położeniu katowym i liniowym wzdłuż wału. Wał ten będziemy nazywali **wirnikiem**.

Wirnik jest łożyskowany w dwu łożyskach kulkowych. Podstawa wirnika (2) jest oparta na elastycznych podkładkach gumowych (3) spoczywających na podstawie stanowiska (4).

Wirnik napędzany jest za pomocą odłączalnego paska napędowego (12) i silnika o regulowanej prędkości obrotowej umieszczonego w podstawie stanowiska (4).

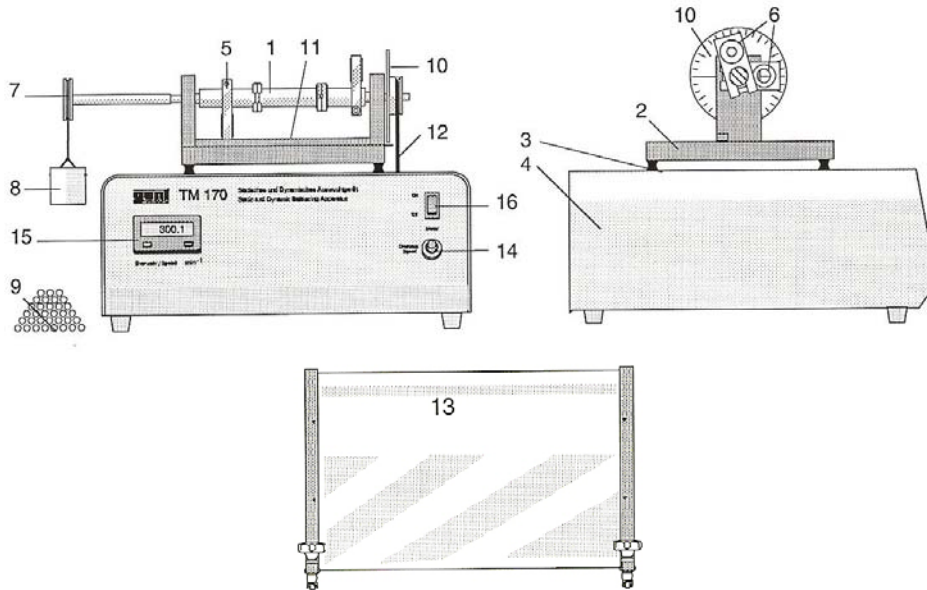
Silnik jest wł./wył. za pomocą wyłącznika (16). Potencjometr 10-obrotowy (14) pozwala precyzyjnie regulować prędkość obrotową silnika w zakresie 0-1400 obr/min.

Prędkość obrotowa silnika wskazywana jest przez cyfrowy licznik obrotów (15).

Skale katowa (10) i liniowa (11) pozwalają na odpowiednie rozmieszczenie niewyrównowazonych mas. Krążek linowy (7) i koszyk na kulki obciążeniowe (8) służą do wyznaczenia wartości niewyrównoważenia.

Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.

Masy dodatkowe (6) (w postaci krążków lub pierścieni) mogą być umieszczane w przeznaczonych do tego celu otworach w płaskownikach (5) zwiększając tym samym niewyrównoważenie wirnika.



Rys. 5.3. Stanowisko doświadczalne

Elementy stanowiska:

- 1 - wał,
- 2 - podstawa wału,
- 3 - elementy gumowe,
- 4 - podstawa stanowiska,
- 5 - niewyrównowazona masa w postaci płaskownika,
- 6 - masa dodatkowa,
- 7 - krążek linowy na wałku z łącznikiem,
- 8 - koszyk na kulki obciążeniowe,
- 9 - kulki obciążeniowe,
- 10 - skala kątowa,
- 11 - skala liniowa,
- 12 - pasek napędowy,
- 13 - pokrywa ochronna,
- 14 - pokrętło regulatora prędkości,
- 15 - licznik prędkości obrotowej,
- 16 - wł./wył.

5.4. OPIS WYRÓWNOWAŻANIA STATYCZNEGO, DYNAMICZNEGO i OGÓLNEGO

5.4.1. Pomiar niewyrównoważenia. Uwagi ogólne

Dla ułatwienia dalszych rozważań wyróżnimy dwie konfiguracje mas wywołujących niewyrównoważenie:

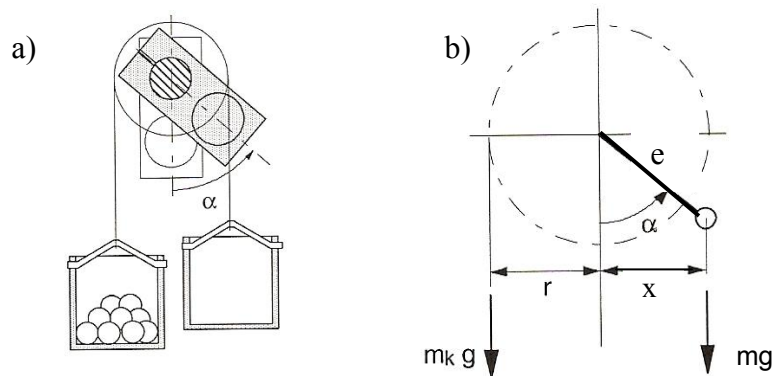
- płaskownik bez masy dodatkowej (oznaczenie graficzne – białe kółko na końcu nieważkiego pręta) – powoduje mniejsze niewyrównoważenie,
- płaskownik z dodatkową masą (oznaczenie graficzne – czarne kółko na końcu nieważkiego pręta) – powoduje większe niewyrównoważenie.

Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.

Płaskownik ma kształt prostokąta z dwoma otworami o osiach leżących w jego płaszczyźnie symetrii (rys.5.4a). Jeden otwór służy do nałożenia (bez luzu) płaskownika na bardzo dokładnie wyrównowany sztywny wał. W drugi otwór można wstawić i przymocować dodatkową masę w kształcie tarczy kołowej lub pierścienia.

Przyjmujemy, że dwa płaskowniki bez masy dodatkowej są rozmieszczone na końcach wału a dwa pozostałe z dodatkowymi masami w środku. W tym ćwiczeniu, wirnikiem nazywamy wał wraz nałożonymi na nim czterema płaskownikami.

Dla określenia niewyrównowazenia wirnika po pierwsze należy mu pozwolić osiągnąć w sposób naturalny położenie równowagi. Niewyrównowazone masy zajmą dolne położenia. Następnie zostaje przyłożony zewnętrzny moment przy użyciu krążka linowego i koszyków na kulki obciążeniowe. Po włożeniu kulek do jednego z koszyków wirnik doznaje obrotu o pewien kąt α i przyjmuje nową pozycję równowagi (rys.5.4b).



Rys. 5.4. Pomiar niewyrównowazenia

Niewyrównowazenie może być określone z warunku równowagi momentów sił względem osi obrotu wirnika l :

$$\sum_i M_i = m_k g r - 2 m g e \sin \alpha = 0 \quad (5.9)$$

gdzie:

- m_k - suma mas kulek obciążeniowych, znajdujących się w koszyku,
- r - promień krążka linowego,
- m - niewyrównowazona masa płaskownika,
- e - mimośród,
- α - kąt obrotu.

Drugi wyraz równania równowagi jest pomnożony przez dwa, ponieważ występują dwa płaskowniki ustawione w tej samej pozycji kątowej.

Niewyrównowazenie (moment statyczny) U jest definiowane jako iloczyn masy i mimośrodu

$$U = m e \quad (5.10)$$

tak więc, poszukiwane niewyrównowazenie jednego płaskownika jest określone wzorem

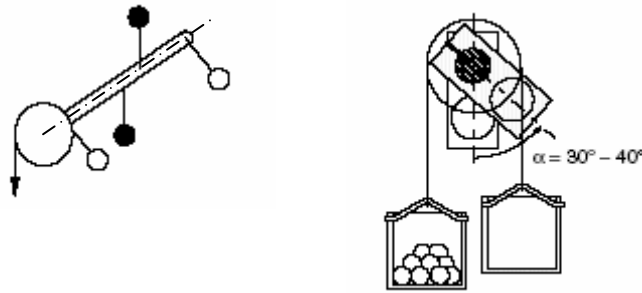
$$U = \frac{m_k r}{2 \sin \alpha} \quad (5.11)$$

5.4.2. Pomiar niewyrównowazenia płaskownika bez dodatkowej masy

Konfiguracja płaskowników na wale urządzenia jest pokazana na rys. 5.5. Przyjmijmy nazwy skrótowe płaskowników:

- masa mniejsza** – płaskownik bez dodatkowej masy,
- masa większa** – płaskownik z dodatkową masą.

Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.



Rys. 5.5. Pomiar niewyrównowazenia masy mniejszej.

Kolejność postępowania jest opisana niżej.

- Ustawić dwie mniejsze masy (białe kółka) w tym samym położeniu kątowym (kat 0°).
- Ustawić dwie większe masy (czarne kółka) w przeciwnych położeniach (kat 180°). Momenty ich sił ciężkości równoważą się a ich środek masy leży na osi obrotu wału. Masy te, są więc zrównoważone statycznie.
- Zdjąć pasek napędowy.
- Dołączyć krążek linowy i założyć na krążek puste koszyki na kulki obciążeniowe. Wirnik winien przyjąć pozycję spoczynkową taką, że niezrównoważone mniejsze masy przyjmą dolne położenie. Odczyt na skali kątowej powinien być 0° .
- Włożyć kulki obciążeniowe do jednego z koszyków, co spowoduje wychylenie kątowne wirnika z położenia spoczynkowego. Dodając ostrożnie kulki doprowadzić do wychylenia o kąt $\alpha = 30^\circ \div 40^\circ$.

Przykładowe wyniki pomiaru są następujące:

- 12 kulek o masie 3g każda, $\alpha = 37^\circ$,
- suma mas kulek: $m_k = 12 \cdot 3 = 36\text{g}$,
- promień krążka: $r = 3,33\text{cm}$.

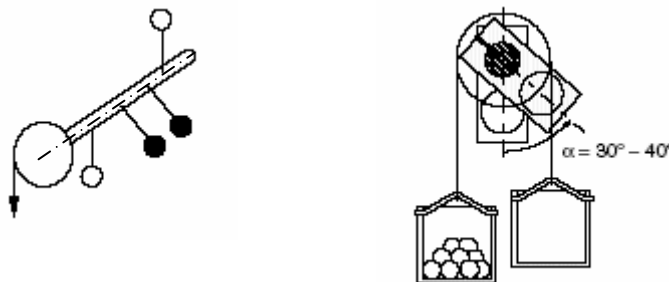
Korzystając z równania (5.11) otrzymamy niewyrównowazenie masy mniejszej

$$U_1 = \frac{m_k r}{2 \sin \alpha} = \frac{36 \cdot 3,33}{2 \cdot \sin 37^\circ} = 100\text{gcm} \quad (5.12)$$

Chcąc otrzymać wyższą dokładność należy powtórzyć pomiary dla wychylenia wirnika np. w przeciwnym kierunku i określić średnią obu wyników.

5.4.3. Pomiar niewyrównowazenia płaskownika z dodatkową masą

Konfiguracja płaskowników na wale urządzenia jest pokazana na rys. 5.6.



Rys. 5.6. Pomiar niewyrównowazenia masy większej.

Kolejność postępowania jest opisana niżej.

Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.

- Ustawić dwie większe masy (czarne kółka na schemacie) w tym samym położeniu kątowym (kat 0°).
- Ustawić dwie mniejsze masy (białe kółka) w przeciwnych położeniach (kat 180°). Momenty ich sił ciężkości równoważą się a ich środek masy leży na osi obrotu wału. Masy te, są więc zrównoważone statycznie.
- Zdjąć pasek napędowy.
- Dołączyć krążek linowy i założyć na krążek puste koszyki na kulki obciążeniowe. Wirnik winien przyjąć pozycję spoczynkową taką iż większe nierównoważone masy przyjmą dolne pionowe położenie. Odczyt na skali kątowej powinien być 0° .
- Włożyć kulki obciążeniowe do jednego z koszyków, co spowoduje wychylenie kątowe wirnika z położenia spoczynkowego. Dodając ostrożnie kulki doprowadzić do wychylenia $\alpha=30^\circ\div 40^\circ$.

Przykładowe wyniki pomiaru są następujące:

- 25 kulek o masie 3g każda, $\alpha=36,5^\circ$,
- suma mas kulek: $m_k = 25 \cdot 3 = 75$ g,
- promień krążka: $r = 3,33$ cm.

Zatem niewyrównoważenie masy większej wynosi

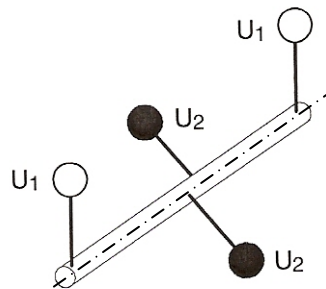
$$U_2 = \frac{m_k \cdot r}{2 \sin \alpha} = \frac{75 \cdot 3,33}{2 \cdot \sin 36,5^\circ} = 210 \text{gcm} \quad (5.13)$$

Chcąc otrzymać wyższą dokładność należy powtórzyć pomiary dla wychylenia wirnika, np w przeciwnym kierunku i określić średnią obu wyników.

Można sprawdzić, że zmiana masy m_k a w konsekwencji zmiana kąta wychylenia układu α , nie ma wpływu na wynik obliczeń wartości U_1 i U_2 .

5.4.4. Skutki niewyrównoważenia statycznego podczas ruchu obrotowego wirnika (przykład)

Schemat ustawienia mas do demonstracji niewyrównoważenia statycznego za pomocą urządzenia z wirnikiem pokazano na rys. 5.7.



Rys. 5.7. Przykład ustawienia mas do demonstracji niewyrównoważenia statycznego.

Kolejność postępowania opisano niżej.

- Zamocować mniejsze masy U_1 na końcach wirnika w tym samym położeniu kątowym (kat między nimi 0°).
- Przesunąć obie większe masy U_2 do środka wirnika i zamocować je w położeniach przeciwnych (kat między nimi wynosi 180°). Działania ich równoważą się. Bez paska napędowego wirnik przyjmie położenie w taki sposób, iż mniejsze nierównoważone masy zajmą dolne położenie. Położenie kątowe mas większych względem mas mniejszych może być dowolne.
- Założyć pasek napędowy.

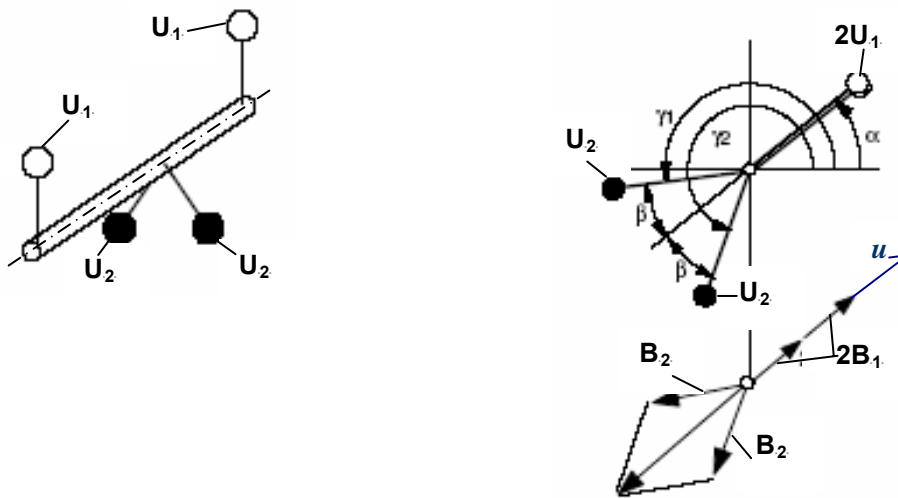
Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.

- Założyć pokrywę ochronną i przekreślić zatrzaski mocujące.
- Włączyć silnik.
- Ostrożnie zwiększać obroty silnika za pomocą potencjometru.

Dla prędkości ok. 1000 obr/min, drgania wywołane niewyrównoważeniem osiągną poziom, który nie może być akceptowany – eksperyment powinien być przerwany!

5.4.5. Wyrównoważanie statyczne wirnika za pomocą większych mas U_2 (przykład)

Zadanie polega na takim ustawieniu mas większych U_2 (zwanymi równoważącymi), aby wypadkowa siła odśrodkowa od tych mas (w czasie obrotów wirnika) równoważyła wypadkową siłę odśrodkową, pochodzącą od niewyrównoważonych mas mniejszych U_1 . Ustawienie mas i układ sił bezwładności pokazano na rys. 5.8.



Rys. 5.8. Przykład ustawienia mas i układ sił bezwładności.

Siła bezwładności od masy mniejszej wynosi $B_1=U_1 \cdot \omega^2$, zaś od masy większej $B_2=U_2 \cdot \omega^2$. Z warunku równowagi układu sił, po ich zrzutowaniu na oś u otrzymamy

$$\sum_i B_{iu} = 2U_1\omega^2 - 2U_2\omega^2 \cos\beta = 0 \quad (5.14)$$

To pozwala obliczyć kat β pomiędzy masami równoważącymi U_2 . Mianowicie

$$\beta = \arccos \frac{U_1}{U_2} = \arccos \frac{100}{210} = 61.5^\circ \quad (5.15)$$

Dla praktycznego ułatwienia postępowania, mniejsze masy można ustawić w pozycji pionowej górnej lub dolnej i dla takiego położenia nastawić kąt $\alpha=90^\circ$ lub $\alpha=270^\circ$. Następnie względem tego położenia odmierzać kąty ustawienia mas równoważących U_2 .

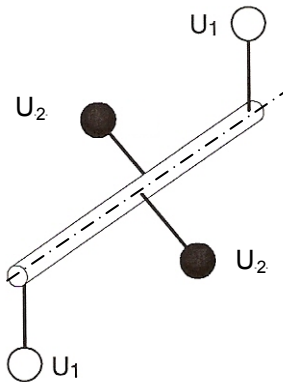
Uwaga: masy równoważące U_2 powinny być usytuowane w środku długości wirnika, aby siły reakcji łożysk były równe.

Po precyzyjnym ustawieniu mas, zgodnie z obliczonymi kątami, wirnik może obracać się aż do 1400 obr/min z akceptowalnym poziomem drgań.

5.4.6. Skutki niewyrównoważenia dynamicznego podczas ruchu obrotowego wirnika (przykład)

Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.

Schemat ustawienia mas do demonstracji niewyrównoważenia dynamicznego wirnika pokazano na rys. 5.9.



Rys. 5.9. Przykład ustawienia mas do demonstracji niewyrównoważenia dynamicznego

Kolejność postępowania opisano niżej.

- Zamocować mniejsze masy U_1 na końcach wirnika w przeciwnych położeniach (kąt między nimi wynosi 180°).
- Przesunąć obie większe masy U_2 do środka wirnika i zamocować je w położeniach przeciwnych (kąt między nimi wynosi 180°). Działania ich równoważą się. Bez paska napędowego wirnik na wolnych obrotach obraca się gładko nie osiągając wyraźnego położenia spoczynkowego – jest wyrównoważony statycznie. Położenie katowe mas większych względem mas mniejszych może być dowolne.
- Założyć pasek napędowy.
- Założyć pokrywę ochronną i przekręcić zatrzaski mocujące.
- Włączyć silnik.
- Ostrożnie zwiększać obroty silnika za pomocą potencjometru.

Dla prędkości ok. 1000 obr/min, drgania wywołane niewyrównoważeniem osiągają poziom, który nie może być akceptowany – eksperyment powinien być przerwany!

Podstawa urządzenia doznaje znaczących oscylacji, co jest wywołane działaniem nierównoważonych momentów par sił bezwładności.

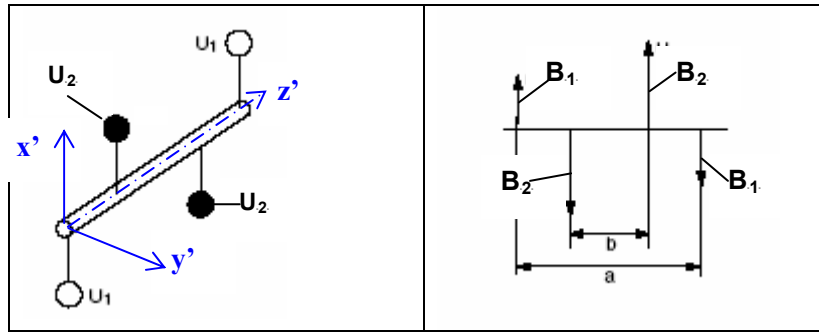
5.4.7. Wyrównoważanie dynamiczne wirnika za pomocą większych mas U_2 (przykład)

Wyrównoważenia dokonamy przy użyciu dwu większych mas U_2 (rys. 5.10).

Środki wszystkich mas muszą znajdować się w jednej płaszczyźnie a masy powinny być ustawione tak, jak pokazano na rys. 5.10.

Moment pary odśrodkowych sił bezwładności większych mas U_2 powinien zrównoważyć moment pary odśrodkowych sił bezwładności mniejszych mas U_1 .

Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.



Rys. 5.10. Przykład ustawienia mas i układ par sił bezwładności

Równowagę momentów tych sił względem osi - y' przedstawia równanie (rys. 5.10)

$$\sum_i M_{iy'} = U_1 \omega^2 a - U_2 \omega^2 b = 0 \quad (5.16)$$

Założona odległość $a=190\text{mm}$ między masami U_1 pozwala na obliczenie odpowiedniej odległości b między masami U_2 .

Po przekształceniu równania (5.16), wyznaczamy odległość b między masami U_2 .

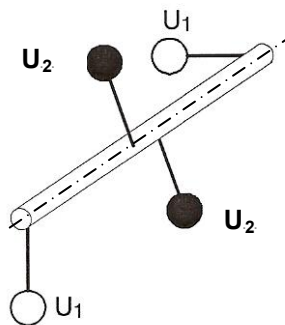
$$b = \frac{U_1}{U_2} a = 90\text{mm}$$

Można także postępować odwrotnie; najpierw założyć wartość b a następnie z równania (5.16) obliczyć wartość a .

Po precyzyjnym ustawieniu odległości a i b wirnik może obracać się aż do 1400obr/min z akceptowalnym poziomem drgań.

5.4.8 Skutki niewyrównoważenia ogólnego podczas ruchu obrotowego wirnika (przykład)

Niewyrównoważenie ogólne jest kombinacją niewyrównoważenia statycznego i dynamicznego. Przykład ustawienia mas U_1 i U_2 wirnika powodujący jego niewyrównoważenie ogólne jest pokazany na rys. 5.11.



Rys. 5.11. Przykład ustawienia mas do demonstracji niewyrównoważenia ogólnego

Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.

Kolejne czynności są podobne do tych z poprzednich przykładów.

- Zamocować obie masy U_1 na końcach wirnika obrócone względem siebie o kąt 90° .
- Zamocować obie masy U_2 na środku wału obrócone względem siebie o kąt 180° . Po zdjęciu paska napędowego wirnik osiąga wyraźny stan równowagi. Jest, więc statycznie niewyrównoważony.
- Założyć następnie pasek napędowy.
- Założyć i zamocować pokrywę ochronną.
- Włączyć silnik.
- Ostrożnie zwiększać obroty silnika za pomocą potencjometru.

Przy ok. 1000 obr/min, drgania wywołane niewyrównoważeniem osiągają poziom, który nie może być akceptowany – eksperyment powinien być przerwany!

5.4.9. Wyrównoważanie ogólne wirnika za pomocą większych mas U_2 (przykład)

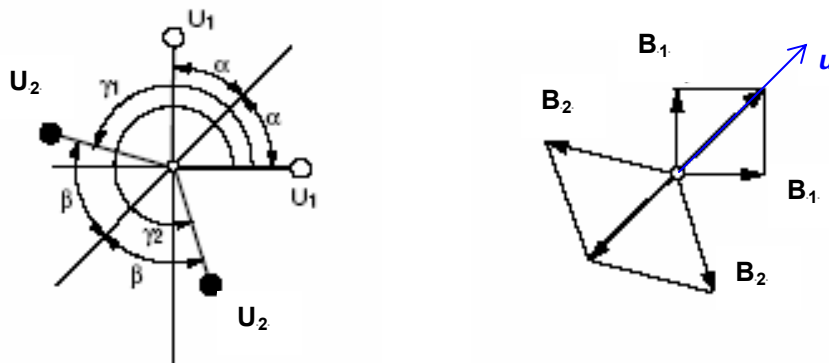
Dwa warunki równowagi muszą być spełnione, aby skompensować niewyrównoważenie ogólne:

- **równowaga odśrodkowych sił bezwładności** - dla statycznego wyrównoważenia wirnika,
- **równowaga momentów odśrodkowych sił bezwładności** - dla dynamicznego wyrównoważenia wirnika.

Wyrównoważanie statyczne

W tym przypadku wypadkowa siła odśrodkowa mas równoważących musi kompensować tę od dwu niewyrównoważonych mas.

Konfiguracja mas U_1 i U_2 w rzucie czołowym oraz odpowiedni układ sił bezwładności jest pokazany na rys. 5.12.



Rys. 5.12. Konfiguracja mas i układ sił bezwładności.

Równanie równowagi sił bezwładności na oś u ma postać (rys.5.12):

$$\sum_i B_{iu} = 2U_1\omega^2 \cos \alpha - 2U_2\omega^2 \cos \beta = 0 \quad (5.17)$$

Zakładając kąt $2\alpha = 90^\circ$, kąt β określający położenie mas równoważących określa zależność

$$\beta = \arccos\left(\frac{U_1 \cos \alpha}{U_2}\right) = \arccos\left(\frac{100 \cdot \cos 45^\circ}{210}\right) = 70^\circ$$

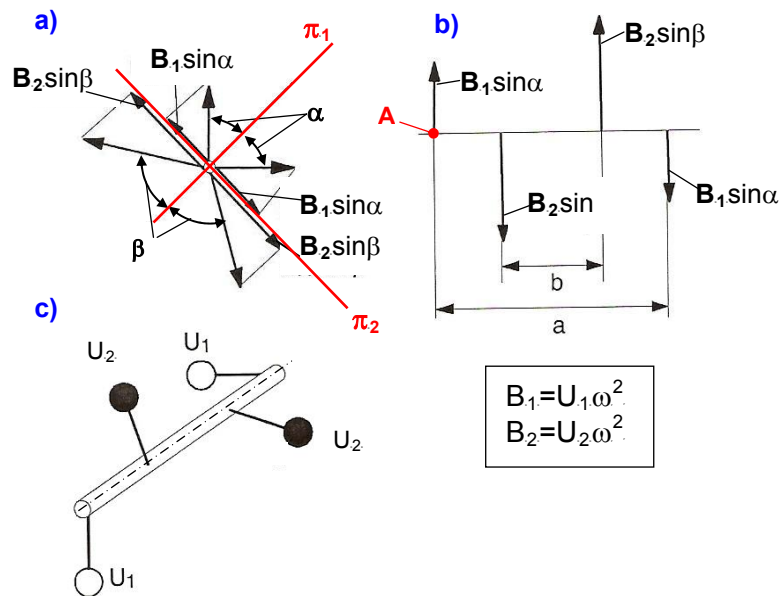
Po ustawieniu kątowym mas według powyższych obliczeń wirnik jest wyrównoważony statycznie.

Wyrównoważanie dynamiczne

Układ sił bezwładności w rzucie czołowym i na płaszczyznę π_2 oraz konfiguracja mas po wyrównoważeniu dynamicznym są przedstawione na rys. 5.13. Kąty α i β zaznaczone na

Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.

rysunku 5.13a są kątami między odpowiednimi płaszczyznami poprowadzonymi przez oś obrotu i dany wektor B_1 lub B_2 a płaszczyzną dwusieczną π_1 .



Rys. 5.13. Układ sił bezwładności i konfiguracja mas wirnika;

- a) – układ sił w rzucie czołowym, b) – układ sił w rzucie na płaszczyznę π_2 ,
c) – konfiguracja mas po wyrównoważeniu

Niewyrównoważone momenty sił bezwładności mogą zostać skompensowane przez dobór odległości między dwiema masami równoważącymi.

Warunek równowagi momentów sił bezwładności można przedstawić dla rzutów tych sił na płaszczyznę π_2 (rys. 5.13b). Równanie równowagi momentów np. względem punktu A ma postać:

$$\sum_i M_{iA} = U_1 \omega^2 a \sin \alpha - U_2 \omega^2 b \sin \beta = 0 \quad (5.18)$$

Dla przyjętej odległości $a=190\text{mm}$ między masami U_1 , wyznaczamy z równania (5.18) poszukiwaną odległość b

$$b = \frac{U_1 \sin \alpha}{U_2 \sin \beta} a = 68\text{mm}$$

Następny test można przeprowadzić odwrotnie; najpierw założyć wartość b a następnie z równania (5.18) obliczyć wartość a .

Po starannym ustawieniu mas wirnik może osiągnąć prędkość 1400obr/min bez znaczących drgań.

Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.

5.5 PRZEBIEG ĆWICZENIA

W rozdziale przedstawiono wymagania techniczne i bezpieczeństwa, zestawienie ważniejszych parametrów urządzenia, zakres doświadczenia i zawartość sprawozdania.

Wymagania techniczne i bezpieczeństwa

- Przed uruchomieniem stanowiska i rozpoczęciem pomiarów konieczne jest zapoznanie się z instrukcją do ćwiczenia 5.
- Wykonywanie jakichkolwiek czynności poza przewidzianymi w instrukcji jest niedopuszczalne.
- Powstałe uszkodzenia lub braki w wyposażeniu stanowiska pomiarowego należy natychmiast zgłaszać osobie prowadzącej ćwiczenie. Członkowie zespołu studenckiego ponoszą odpowiedzialność w czasie realizacji ćwiczenia za nieprawidłowe posługiwanie się sprzętem i spowodowanie ewentualnych strat.
- Sprawdzić stan poszczególnych elementów mechanicznych oraz zasilania.
- Przed wykonaniem ustawiania i mocowania mas wirnika, upewnić się czy przełączniki elektryczne pomocniczy i główny urządzenia są wyłączone!
- Ustawianie i mocowanie płaskowników oraz mas dodatkowych musi być wykonane starannie i dokładnie.
- Po zakończeniu ustawiania płaskowników wirnika, założyć pasek na koło pasowe.
- Nałożyć na wirnik urządzenia i zamocować pokrywę ochronną.
- Ustawić przełącznik główny w pozycji włączony.
- Ustawić przełącznik pomocniczy (z przodu) w pozycji włączony.
- Uruchomić silnik, zwiększając powoli prędkość obrotową. W razie zaobserwowania narastających drgań podstawy wirnika, zmniejszać prędkość obrotową aż do zatrzymania silnika.
- Wyłączyć przełączniki pomocniczy i główny urządzenia.

Ważniejsze parametry urządzenia

Parametry wymieniono w tabeli 5.1. Część z nich nie jest potrzebna do przeprowadzenia doświadczenia. Mogą one być wykorzystane do różnych obliczeń teoretycznych w sprawozdaniu.

Tabela 5.1. Zestawienie parametrów

Nazwa	Oznaczenie	Wartość
Długość wału wirnika (bez czopów)	l_1	210mm
Odległość między środkami łożysk	l_2	230mm
Masa płaskownika (z pustym otworem)	m_1	92g
Wymiary płaskownika		68x30x11mm
Masa tarczy kołowej wypełniającej otwór	m_t	37g
Masa pierścienia wypełniającego otwór	m_p	18,5g
Odległość między osią wału i osią otworu płaskownika	c	30mm
Średnica wału	d_1	20mm
Średnica otworu płaskownika (na dodatkową masę)	d_2	25mm
Masa pojedynczej kulki (odważnika)	m_o	3g
Promień koła pasowego (do pomiaru U_1 i U_2)	r	3.33mm
Zakres prędkości obrotowej wirnika	n	0÷1400obr/min

***Uwaga!** Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.*

Zakres doświadczenia

Podany niżej zakres obejmuje wszystkie zadania, opisane w punkcie 5.4. Zespół studencki wykonuje tylko część z nich, według ustaleń z prowadzącym ćwiczenie.

- 1) Badanie niewyrównoważenia statycznego dla zadanej konfiguracji wirnika.
- 2) Badanie niewyrównoważenia dynamicznego dla zadanej konfiguracji wirnika
- 3) Przeprowadzenie wyrównoważenia ogólnego dla zadanej konfiguracji wirnika (patrz punkt 5.4.9).

Uwaga!

Przed uruchomieniem silnika urządzenia należy skonsultować z prowadzącym uzyskane wyniki obliczeń i ustawienie mas wirnika.

Opracowanie sprawozdania

Sprawozdanie należy wykonać w formie elektronicznej z numeracją stron i wydrukować na kartkach formatu A4. Kartki powinny być zszyte w lewym górnym rogu.

Sprawozdanie obejmuje:

- 1) Strona tytułowa wg ustalonego wzorca.
- 2) Opis wykonanych badań niewyrównoważenia wirnika.
- 3) Opis przeprowadzonego wyrównoważenia wirnika wraz z obliczeniami.
- 4) Obliczenia reakcji dynamicznych łożysk dla przypadków niewyrównoważenia wirnika z punktu 2.
- 5) Wnioski.
- 6) Protokół pomiarowy (zał.1).

LITERATURA

- [1] TM170 - Static and Dynamic Balancing Apparatus. Experimental instruction. GUNT Hamburg.
- [2] Ołędzki A.: Podstawy teorii maszyn i mechanizmów WNT, Warszawa.
- [3] Leyko J. Mechanika ogólna. PWN Warszawa, wszystkie wydania.

Uwaga! Przed rozpoczęciem ćwiczenia należy wypełnić tabelę 1 i wydrukować protokół pomiarowy.

Załącznik 1.

Protokół pomiarowy
Laboratorium Mechaniki Technicznej

Ćw.5. WYRÓWNOWAŻANIE STATYCZNE I DYNAMICZNE ELEMENTÓW WIRUJĄCYCH

Tabela 1. Dane osobowe zespołu.

Nazwisko i imię	Grupa	Zespół	Data ćwiczenia

Wykonanie doświadczenia

Parametry: $U_1 = \dots\dots\dots$ gcm, $U_2 = \dots\dots\dots$ gcm, patrz wzory (5.12) i (5.13).

Tabela 2. Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń (ozn. wg rys. 5.12).

Lp	Konfiguracja wirnika*)	Kąt 2α [°]	Kąt 2β [°]	Kąt γ_1 [°]	Kąt γ_2 [°]	Odl. a [mm]	Odl. b [mm]	n**)
1	Wirnik niewyrównoważony statycznie							
2	Wirnik niewyrównoważony dynamicznie							
3	Wirnik wyrównoważony dynamicznie							

*) Wykonać rysunki konfiguracji wirnika dla pozycji w tabeli 1÷5.

***) Podać minimalną prędkość obrotową wirnika, przy której występują znaczne drgania podstawy wirnika.

Podpis prowadzącego ćwiczenie

.....