

WYZNACZANIE REAKCJI DYNAMICZNYCH ŁOŻYSK WIRNIKA

8.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest eksperymentalne wyznaczenie reakcji dynamicznych, powstających w łożyskach wirnika umieszczonego na ruchomym obiekcie oraz porównanie ich wyników z rezultatami obliczeń teoretycznych.

8.2. Wprowadzenie

Omawiane i analizowane zjawiska dotyczą reakcji dynamicznych, które mogą pojawiać się w łożyskach pracujących maszyn wirnikowych (silniki, turbiny, pompy, itp.).

Przyczynami powstawania reakcji dynamicznych w łożyskach wirników są:

- statyczne niewyważenie wirnika (środek masy wirnika leży poza osią obrotu i doznaje wobec tego przyspieszenia),
- dynamiczne niewyważenie wirnika (oś obrotu nie jest osią główną bezwładności),
- obrót obiektu, na którym jest umieszczony wirnik (ruchomy obiekt – o niezerowej prędkości kątowej - jest układem unoszenia dla obracającego się względem niego wirnika). Jest to zjawisko związane z tak zwanym *efektem żyroskopowym*. Polega on na tym, że do obrócenia wirującego ciała wokół wybranej osi trzeba przyłożyć moment o wektorze prostopadłym do osi zamierzonego obrotu. W tym przypadku wyznaczany jest moment sił reakcji, które powstają wówczas, gdy wirnik doznaje obrotu wokół osi nachylonej do osi obrotu własnego. Poszukiwany wektor momentu sił reakcji ma kierunek prostopadły do osi obrotu układu unoszenia.

Reakcje spowodowane dwiema pierwszymi przyczynami mogą być zminimalizowane przez staranne wyważanie elementów wirujących maszyn i urządzeń. Trzecia przyczyna, to jest ruch obrotowy obiektu, na którym znajduje się wirnik jest nie do uniknięcia. Silniki, turbiny czy pompy, które stanowią wyposażenie szybkich pojazdów, samolotów itp. podlegają obciążeniom wywołanych ruchem obrotowym układu unoszenia. Przy doborze łożysk należy uwzględnić reakcje dynamiczne powstające w układzie; bez ich uwzględnienia nastąpi zmniejszenie trwałości łożysk.

Stanowisko laboratoryjne umożliwia wyznaczenie wartości reakcji dynamicznych w łożyskach wysokoobrotowego wirnika silnika elektrycznego, wywołanych ruchem obrotowym tarczy, na której umieszczony jest ten silnik.

Po wykonaniu pomiarów otrzymane wyniki porównuje się z rezultatami obliczeń teoretycznych, przeprowadzonych dla modelu fizycznego badanego układu.

8.3. Teoretyczny opis zjawiska

W badanym układzie silnik zamocowany jest w taki sposób, że środek masy wirnika nie zmienia swojego położenia – wirnik porusza się ruchem kulistym względem środka masy. Analizę dynamiki ciała poruszającego się ruchem kulistym można przeprowadzić wykorzystując twierdzenie o pochodnej względem czasu krętu układu względem dowolnego nieruchomego punktu jest równa sumie momentów sił zewnętrznych względem tego samego punktu.

8.3.1. Zależności ogólne

Podstawowe twierdzenie wykorzystywane w tym ćwiczeniu jest sformułowane następująco: *pochodna względem czasu krętu układu względem dowolnego nieruchomego punktu jest równa sumie momentów sił zewnętrznych względem tego samego punktu.*

Matematyczny zapis tego twierdzenia ma postać

$$\frac{d\dot{\mathbf{K}}_O}{dt} = \mathbf{r} \mathbf{M}_O \quad (8.1)$$

Kręt ciała ($\dot{\mathbf{K}}_O$) względem nieruchomego punktu O można przedstawić za pomocą składowych o kierunkach nieruchomych osi lub osi ruchomych związanych z poruszającym się ciałem. W niektórych przypadkach wygodne jest użycie osi ruchomych, ale nie wirujących razem z ciałem. Kręt ciała jest określony za pomocą składowych o kierunkach wprowadzonych osi (np. $Ox_1y_1z_1$)

$$\dot{\mathbf{K}}_O = \dot{k}_x \mathbf{k} + \dot{k}_y \mathbf{j} + \dot{k}_z \mathbf{k} \quad (8.2)$$

Pochodną krętu wyznacza się tak jak pochodną funkcji wektorowej z zależności

$$\frac{d\dot{\mathbf{K}}_O}{dt} = \frac{d'\dot{\mathbf{K}}_O}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{K}}_O \quad (8.3)$$

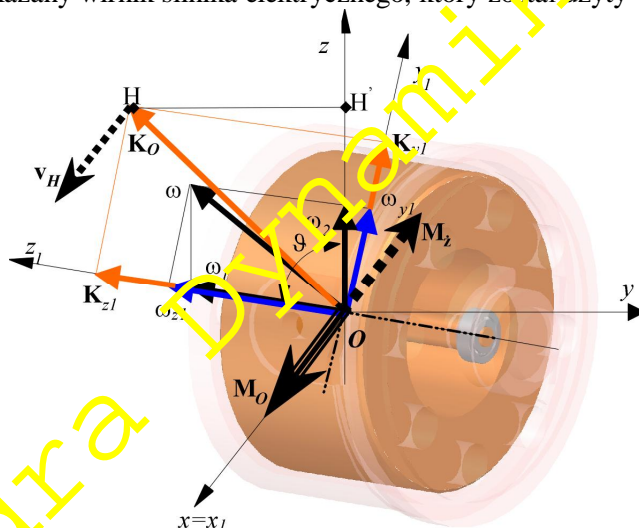
gdzie $\frac{d'\dot{\mathbf{K}}_O}{dt}$ jest pochodną lokalną wyznaczoną w układzie ruchomym, a iloczyn $\boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{K}}_O$ opisuje zmianę krętu spowodowaną obrotem układu ruchomego ($\boldsymbol{\omega}$ jest prędkością kątową tego układu). W przypadku, gdy w układzie ruchomym wektor $\dot{\mathbf{K}}_O$ nie zmienia się jego pochodna jest równa

$$\frac{d\dot{\mathbf{K}}_O}{dt} = \boldsymbol{\omega} \times \dot{\mathbf{K}}_O \quad (8.4)$$

Pochodną wektora można interpretować jako prędkość końca tego wektora po jego hodografie. W przypadku wektora o stałej długości prędkość końca wektora po hodografie wyznacza się tak jak prędkość punktu ciała poruszającego się ruchem obrotowym

8.3.2. Wyznaczenie reakcji łożysk wywołanych obrotem układu unoszenia

Na rys. 8.1 jest pokazany wirnik silnika elektrycznego, który został użyty w badaniach eksperymentalnych.



Rys. 8.1. Składowe wektorów prędkości kątownej ciała ($\boldsymbol{\omega}$) i krętu ($\dot{\mathbf{K}}_O$)

Wprowadzone zostały dwa układy współrzędnych: nieruchomy $Oxyz$ oraz ruchomy $Ox_1y_1z_1$, związany z układem unoszenia (z korpusem wirnika). Tak przyjęte osie ($Ox_1y_1z_1$) są głównymi osiami bezwładności wirnika (wirnik jest bryłą osiowo-symetryczną). Momenty bezwładności względem tych osi zostały oznaczone odpowiednio J_{x1} , J_{y1} , ($J_{y1} = J_{x1}$) oraz J_{z1} .

Prędkość kątowna obrotu własnego wirnika (wokół osi Oz_1) została oznaczona jako $\dot{\boldsymbol{\omega}}_1$, a prędkość kątowna precesji (wokół osi Oz) jako $\dot{\boldsymbol{\omega}}_2$. (Prędkość kątowna precesji jest prędkością kątowną układu unoszenia.) Rozpatrywany układ ma także możliwość ograniczonego obrotu wokół osi Ox , jednakże prędkość tego ruchu jest nieznaczna i została pominięta w dalszych rozważaniach ($\dot{\boldsymbol{\omega}}_3 \equiv \dot{\mathbf{0}}$). Całkowita prędkość kątowna wirnika ($\dot{\boldsymbol{\omega}}$) jest wypadkową prędkości kątownej obrotu własnego ($\dot{\boldsymbol{\omega}}_1$) i prędkości układu unoszenia ($\dot{\boldsymbol{\omega}}_2$)

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_1 + \dot{\boldsymbol{\omega}}_2, \quad (8.5)$$

a jej rzuty na osie Oy_1 oraz Oz_1 są następujące:

$$w_{y1} = w_2 \sin J, \quad w_{z1} = w_1 + w_2 \cos J. \quad (8.6)$$

Rzuty prędkości kątownej ($\dot{\boldsymbol{\omega}}_2$) na osie Oy_1 oraz Oz_1 są następujące:

$$w_{2y1} = w_2 \sin J, \quad w_{2z1} = w_2 \cos J. \quad (8.7)$$

Składowe krętu o kierunkach osi Oy_1 oraz Oz_1 wynoszą odpowiednio (rys.8.1):

$$K_{y1} = J_{y1} w_{y1} = J_{y1} w_2 \sin J, \quad K_{z1} = J_{z1} w_{z1} = J_{z1} (w_1 + w_2 \cos J), \quad (8.8)$$

a kręt jest równy

$$\dot{\mathbf{K}}_O = \dot{\mathbf{j}} K_{y1} + \dot{\mathbf{k}} K_{z1} = \dot{\mathbf{j}} J_{y1} w_2 \sin J + \dot{\mathbf{k}} J_{z1} (w_1 + w_2 \cos J), \quad (8.9)$$

gdzie $\dot{\mathbf{j}}$ i $\dot{\mathbf{k}}$ są wersorami osi y_1 i z_1 .

W przypadku, gdy wartości prędkości kątowych w_1 i w_2 są stałe wektor krętu ciała $\dot{\mathbf{K}}_O$ względem punktu O ma stałą wartość, a jego pochodną można wyznaczyć z zależności (8.4)

$$\frac{d\dot{\mathbf{K}}_O}{dt} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_2 \times \dot{\mathbf{K}}_O \equiv \mathbf{v}_H. \quad (8.10)$$

Do obliczenia iloczynu wektorowego we wzorze (8.10) wygodnie jest użyć wyznacznika

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_2 \times \dot{\mathbf{K}}_O = \begin{vmatrix} \dot{\mathbf{i}} & \dot{\mathbf{j}} & \dot{\mathbf{k}} \\ 0 & w_{2y1} & w_{2z1} \\ 0 & K_{y1} & K_{z1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{\mathbf{i}} & \dot{\mathbf{j}} & \dot{\mathbf{k}} \\ 0 & w_2 \sin J & w_2 \cos J \\ 0 & J_{y1} w_2 \sin J & J_{z1} (w_1 + w_2 \cos J) \end{vmatrix}, \quad (8.11)$$

skąd otrzymuje się

$$\frac{d\dot{\mathbf{K}}_O}{dt} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_2 \times \dot{\mathbf{K}}_O = \dot{\mathbf{i}} [J_{z1} (w_1 + w_2 \cos J) \sin J - J_{y1} w_2 \sin J \cos J] w_2. \quad (8.12)$$

Zatem, zgodnie z (8.1), moment sił zewnętrznych działających na wirnik jest równy

$$\dot{\mathbf{M}}_O = \dot{\mathbf{i}} [J_{z1} (w_1 + w_2 \cos J) \sin J - J_{y1} w_2 \sin J \cos J] w_2. \quad (8.13)$$

Uwaga:

Wektor momentu opisany wzorem (8.13) można zapisać jako

$$\dot{\mathbf{M}}_O = \dot{\mathbf{i}} \left[J_{z1} + (J_{z1} - J_{y1}) \frac{w_2}{w_1} \cos J \right] w_2 w_1 \sin J,$$

lub – po wykorzystaniu własności iloczynu wektorowego ($|\dot{\boldsymbol{\omega}}_2 \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_1| = w_2 w_1 \sin J$) można go przedstawić w formie

$$\dot{\mathbf{M}}_O = \left[J_{z1} + (J_{z1} - J_{y1}) \frac{w_2}{w_1} \cos J \right] \dot{\boldsymbol{\omega}}_2 \times \dot{\boldsymbol{\omega}}_1.$$

Jeżeli prędkość obrotu własnego znacznie przewyższa prędkość kątową układu unoszenia ($w_1 \gg w_2$), lub kąt $J \cong \frac{1}{2}p$ zależność (8.13) przyjmie postać

$$\dot{\mathbf{M}}_O \cong \dot{\mathbf{i}} J_{z1} w_1 w_2. \quad (8.14)$$

Moment $\dot{\mathbf{M}}_O$ jest momentem wszystkich sił zewnętrznych względem nieruchomego punktu O . Obciążenia zewnętrzne działające na wirnik to reakcje łożysk ($\dot{\mathbf{R}}_1, \dot{\mathbf{R}}_2$) podpierających wirnik (i siła ciężkości, która jest uwzględniana przy wyznaczaniu reakcji statycznych). Jeśli środek masy wirnika ma przyspieszenie równe zero, to suma reakcji łożysk jest równa zero ($\dot{\mathbf{R}}_1 + \dot{\mathbf{R}}_2 = \dot{\mathbf{0}}$), zatem stanowią one parę sił ($\dot{\mathbf{R}}_1 = -\dot{\mathbf{R}}_2$). Moment tej pary sił jest równy momentowi $\dot{\mathbf{M}}_O$ wyznaczonemu na podstawie twierdzenia o pochodnej krętu. Stąd wynika, że wartości sił reakcji dynamicznych łożysk są określone jako

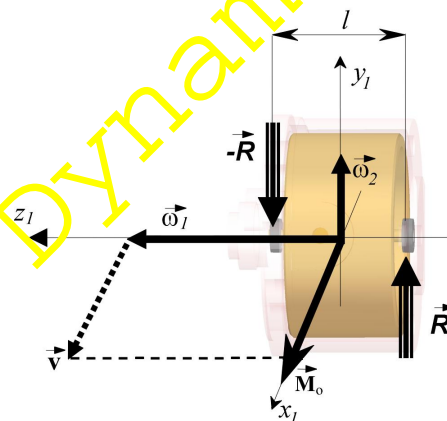
$$R_1 = R_2 = R = \frac{M_O}{l} = \frac{[J_{z1}(w_1 + w_2 \cos J) \sin J - J_{y1} w_2 \sin J \cos J] w_2}{l}, \quad (8.15)$$

gdzie l - rozstaw łożysk wirnika.

W przypadku, gdy $w_1 \gg w_2$ lub $J \cong \frac{1}{2}p$ (co ma właśnie miejsce dla badanego modelu) reakcje łożysk można zatem wyznaczyć z prostej zależności

$$R = \frac{M_O}{l} \cong \frac{J_{z1}}{l} w_1 w_2. \quad (8.16)$$

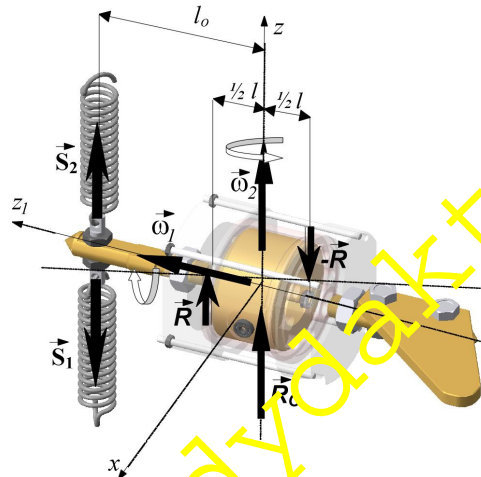
Na rysunku 8.2 zostały pokazane siły reakcji ($\dot{\mathbf{R}}$ i $-\dot{\mathbf{R}}$) powstające w łożyskach wirnika obracającego się wokół własnej osi z prędkością $\dot{\boldsymbol{\omega}}_1$, a umieszczonego na obiekcie, który obraca się z prędkością $\dot{\boldsymbol{\omega}}_2$. Wektory te przedstawiają reakcje, z jakimi łożyska oddziałują na wirnik.



Rys. 8.2. Reakcje dynamiczne działające na obracający się wirnik unoszony z prędkością $\dot{\boldsymbol{\omega}}_2$

Siły oddziaływania wirnika na korpus silnika (i obudowę) są przedstawione rys. 8.3.

Prócz reakcji ($\dot{\mathbf{R}}$ i $-\dot{\mathbf{R}}$) na obudowę silnika działają siły ($\dot{\mathbf{S}}_1$ i $\dot{\mathbf{S}}_2$) pochodzące od sprężyn oraz reakcja ($\dot{\mathbf{R}}_O$) oddziaływania łożysk obudowy silnika (obudowa ma możliwość obrotu wokół osi x).



Rys. 8.3. Siły działające na obudowę silnika

Na podstawie pokazanego układu sił można stwierdzić, że w położeniu równowagi (jaka ustali się, gdy prędkości kątowe układu będą pozostawać niezmiennic) spełnione będzie równanie

$$\Sigma M_x : (S_1 - S_2)l_o - Rl = 0. \quad (8.17)$$

Równanie to pozwala na wyznaczenie sił reakcji łożysk w przypadku, gdy znana jest wypadkowa siła oddziaływania sprężyn - o wartości $\Delta S = S_1 - S_2$.

Znając ΔS można wyznaczyć reakcje łożysk z zależności

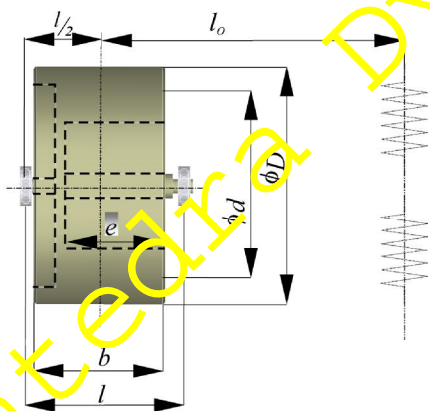
$$R = \frac{\Delta S l_o}{l} \quad (8.18)$$

W badaniach eksperymentalnych siła ΔS jest wyznaczana na podstawie pomiaru odchylenia pręta spowodowanego obrotem obudowy silnika wokół osi x .

8.4. Opis stanowiska badawczego

8.4.1. Opis elementów mechanicznych badanego obiektu

Na rys. 8.4. został przedstawiony widok badanego wirnika będącego elementem elektrycznego, asynchronicznego silnika trójfazowego.



Podstawowe dane wirnika:

masa $m = 0,185$ kg,

średnica $D = 48,0$ mm,

średnica $d = 25,5$ mm,

$J_{z1} = 0,81 \cdot 10^{-4}$ kg m²,

$e = 20,0$ mm,

$b = 26,5$ mm,

$l = 29,0$ mm,

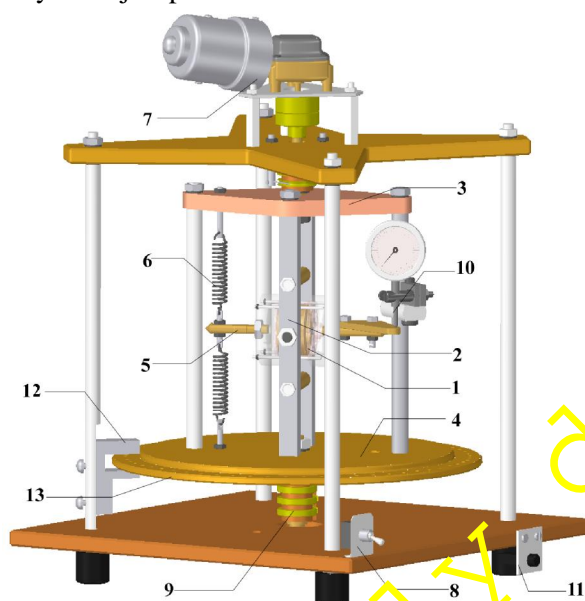
$l_o = 75,0$ mm,

(znamionowa prędkość kątowa wirnika $\omega_n = 2375$ rad/s).

Rys. 8.4. Wirnik silnika żyroskopowego

Wirnik ma kształt częściowo wydrążonego walca (stojan silnika wchodzi w to wydrążenie). Takie nietypowe rozwiązanie pozwala na uzyskanie stosunkowo dużego momentu bezwładności wirnika, przy niedużych wymiarach całego silnika.

Na rys.8.5. jest pokazane stanowisko do badań reakcji dynamicznych w łożyskach wirnika silnika elektrycznego.



1. silnik żyroskopowy
2. ramka (objęma) silnika
3. konstrukcja nośna
4. stolik obrotowy
5. pręt zespolony z obudową silnika
6. sprężyna
7. silnik napędu stolika wraz z przekładnią
8. przełącznik kierunku obrotów stolika
9. komutator
10. czujnik zegarowy
11. wyłącznik silnika żyroskopu
12. czujnik obrotów
13. tarcza stolika z otworami

Rys. 8.5. Widok stanowiska badawczego

Stanowisko składa się z silnika elektrycznego (1), którego obudowa może wychylać się (wokół poziomej osi) wewnątrz ramki (2) przymocowanej do konstrukcji nośnej (3) na obrotowym stoliku (4), który jest układem unoszenia wirnika. Do obudowy silnika zostały przymocowane wzdłuż linii wyznaczającej oś wirnika przęty (5). Koniec jednego z tych przętów przyłączono do konstrukcji nośnej (3) za pomocą sprężyny (6). Drugi z przętów, zakończony małą płytką służy jako element oddziaływania na czujnik zegarowy (10). Sprężyny mają zapewniony naciąg wstępny dzięki śrubom regulacyjnym. Powyższa konstrukcja pozwala na wychylanie się ramki z silnikiem (i wirnikiem) wokół osi poziomej i prostopadłej do osi wirnika.

Stolik obrotowy jest napędzany poprzez przekładnię i sprzęgło silnikiem prądu stałego (7), zasilanym z zasilacza o regulowanym napięciu wyjściowym (15) na rys. 8.6. Kierunek wirowania stolika ustala się przełącznikiem (8) zamocowanym na ramie stoiska. Na osi stolika obrotowego znajduje się komutator pierścieniowy (9), służący do podawania napięcia do silnika (1), stanowiący badany obiekt. Ponieważ jest to silnik trójfazowy asynchroniczny wymagane jest zastosowania przetwornicy (16) na rys. 8.7 zamieniającej prąd stały o napięciu 24 V na prąd trójfazowy o napięciu 36 V i częstotliwości 400 Hz. Prąd stały potrzebny do zasilania przetwornicy pobierany jest z oddzielnego zasilacza prostownikowego.

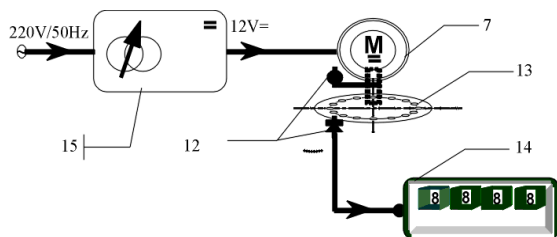
Na obrzeżu tarczy stolika obrotowego (13) znajdują się otwory, które są wykorzystywane do pomiaru (za pomocą czujnika fotoelektrycznego (12)) prędkości kątowej stolika (*prędkości kątowej układu unoszenia* albo *prędkości precesji*). Do podstawy stanowiska zamocowane są przyciski (11) służący do włączania silnika (1).

8.4.2. Przyrządy pomiarowe i sposób wykonywania pomiarów

Część pomiarowa stanowiska badawczego składa się z:

- obwodu pomiaru prędkości kątowej układu unoszenia (pomiar prędkości precesji) – rys. 8.6,
- obwodu pomiaru prędkości kątowej wirnika silnika (1) (prędkość obrotu własnego) – rys. 8.7,
- czujnika zegarowego (10) mierzącego wychylenie obudowy silnika (1) pod wpływem reakcji dynamicznych.

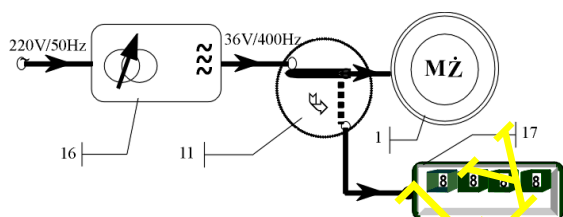
Pomiar prędkości kątowej stolika odbywa się za pomocą czujnika fotoelektrycznego (12). Tarcza perforowana (13) ma na obrzeżu 60 równomiernie rozmieszczonych otworów. Czujnik (12), reagując na wiązkę światła przechodzącą przez otwory w tarczy podaje sygnał na miernik częstotliwości (14), który mierzy prędkość układu unoszenia (prędkość obrotową precesji) w [obr/min].



- 7. silnik napędu stolika
- 12. czujnik fotoelektryczny
- 13. tarcza stolika z otworami
- 14. cyfrowy miernik prędkości kątowej układu unoszenia
- 15. regulowany zasilacz prądu stałego do 12V

Rys. 8.6. Schemat ideowy pomiaru prędkości kątowej układu unoszenia

Pomiar prędkości kątowej obrotów własnych wirnika zrealizowano w ten sposób, iż po odłączeniu przyciskiem (11) na krótką chwilę zasilania silnika, zamienia się go na generator (prądnicę dwubiegunową). Częstotliwość generowanego napięcia jest mierzona na osobnym mierniku częstotliwości (17).



- 1. silnik żyroskopowy
- 11. wyłącznik silnika
- 16. przetwornica napięcia 230V/50Hz na 38V/400Hz
- 17. cyfrowy miernik prędkości kątowej obrotu własnego (wirnika silnika)

Rys. 8.7. Schemat ideowy pomiaru prędkości obrotu własnego wirnika silnika

8.5. Przebieg pomiarów

Pomiar wychylenia ramki wraz z silnikiem pod wpływem sił reakcji odbywa się za pomocą czujnika zegarowego (10), przystawianego do płytki połączonej z obudową silnika.

1. Uruchomić przetwornicę (włącznik na *prawym* boku stołu, w głębi), włączyć zasilacz silnika, uruchomić silnik żyroskopowy (czarny przycisk (11) na froncie podstawy stoiska w pozycji WYCIŚNIĘTY) i odczekać ok. 2 minut celem ustabilizowania się obrotów wirnika.
2. Włączyć obydwa mierniki obrotów, sprawdzić ustawienie ich zakresów pomiarowych (wg wskazówek prowadzącego – zazwyczaj 1 s), a następnie wyzerować czujnik zegarowy poprzez obrót jego tarczy z podziałką.
3. Przełącznik (8) ustawić w pozycji: PRAWY.
4. Obracając pokrętkami regulacji napięcia zasilacza silnika ustawić szybkość wirowania stolika na około **10 obr/min** (odpowiada to wskazaniu górnego miernika **0,010 kHz**). Należy dokonać kilku kolejnych odczytów celem upewnienia się, że obroty stolika już się ustabilizowały, a następnie zanotować wskazanie miernika w kolumnie 2 tabeli 8.1.
5. Odczytać wskazanie czujnika zegarowego (zwrócić uwagę na kierunek obrotu wskazówki). Zanotować wskazanie czujnika i kierunek wychylenia końca pręta (od strony czujnika) odpowiednio w kolumnie 6 i 7 tabeli 8.1
6. Zmierzyć szybkość wirnika żyroskopu. W tym celu wcisnąć na kilka sekund czarny przycisk (11), odczytać wskazanie dolnego miernika (zanotować je w kolumnie 4 tabeli 8.1), a następnie wycisnąć wspomniany przycisk i odczekać kilkanaście sekund przed kontynuacją pomiarów.
7. Powtórzyć opisane wyżej czynności dla coraz większych szybkości wirowania stolika, a mianowicie: **20, 30 i 40 obr / min**.
8. Zmniejszać *stopniowo* (ze względu na przekładnię ślimakową użytą w układzie napędowym) napięcie silnika, aż do całkowitego zatrzymania stolika obrotowego.
9. Przy nieruchomym stoliku należy powtórnie wyzerować czujnik zegarowy.
10. Przesłać przełącznik (8) w pozycję LEWE i wykonać ponownie pomiary wg czynności opisanych w punktach 4 – 8.
11. Po zatrzymaniu się stolika wyłączyć silnik (czarny przycisk WYCIŚNIĘTY), wyłączyć mierniki, zasilacz oraz przetwornicę.

Prosimy nie zapomnieć o uporządkowaniu stanowiska, po zakończeniu eksperymentu.

Tabela 8.1. Wyniki pomiarów i obliczeń

| Obroty stolika | Nr pomiaru | Prędkość stolika (precesja) | | Prędkość wirnika (obrót własny) | | Wskazanie czujnika zegarowego | Wskazanie wychyle- nia końca pręta | Siła sprężyn | Reakcja dynamiczna łożysk | | Różnica procentowa |
|----------------|------------|--------------------------------|--|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------|---------------------------|--------|--------------------|
| | | wskazanie miernika | prędkość kątowna $w_2 = \frac{100p n_2}{3}$ | Wskazanie miernika | prędkość kątowna $w_1 = 2p n_1$ | | | | ekspe- ry- ment | teoria | |
| | | i | n_2 | w_2 | n_1 | | | | w_1 | a | |
| - | kHz | rad / s | Hz | rad / s | mm | - | N | N | N | % | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | |
| prawe | 1 | | | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | | | |
| | 4 | | | | | | | | | | |
| lewe | 1 | | | | | | | | | | |
| | 2 | | | | | | | | | | |
| | 3 | | | | | | | | | | |
| | 4 | | | | | | | | | | |

8.6. Opracowanie wyników pomiarów i sprawozdanie

8.6.1. Obliczenia pomocnicze

Po zakończeniu pomiarów należy wyznaczyć – za pomocą odpowiedniego diagramu znajdującego się na stoisku – wartości siły sprężyn S , a następnie obliczyć (wzór 8.18) odpowiadające im wartości reakcji dynamicznych R łożysk podpierających wirnik. Po wyznaczeniu wartości teoretycznych tych reakcji R_t (wzór 8.16) oblicza się różnice procentowe wartości eksperymentalnych i teoretycznych reakcji wg wzoru:

$$\delta = \frac{R - R_t}{R} 100\% , \quad (8.19)$$

Następnie należy wyznaczyć reakcje statyczne łożysk podpierających wirnik (niezbędne dane liczbowe znajdują się w p. 8.4.1, obok rysunku wirnika) oraz porównać ich wartości z reakcjami dynamicznymi.

Na koniec trzeba wskazać także (z uzasadnieniem), w którym z łożysk całkowita reakcja ma większą wartość przy obrotach stolika w *prawo*: w łożysku A (tym, od strony sprężyn), czy też w łożysku B.

8.6.2. Sprawozdanie

W sprawozdaniu, które musi być oddane na zakończenie zajęć należy zamieścić:

- temat i cel ćwiczenia,
- wypełnioną tabelę 8.1,
- wyniki obliczeń pomocniczych,
- obserwacje i wnioski.

8.7. Pytania sprawdzające

- Podać sformułowanie twierdzenia o pochodnej krętu układu materialnego.
- Objasnić efekt żyroskopowy.
- Podać kilka przykładów niekorzystnego działania efektu żyroskopowego.