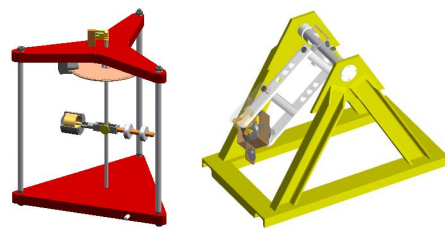


Ćwiczenie 7



WYZNACZANIE PRĘDKOŚCI PRECESJI ŻYROSKOPU. BADANIE MODELU STABILIZATORA ŻYROSKOPOWEGO

7.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zjawisk zachodzących w układach wyposażonych w żyroskop. Przeprowadzane pomiary (stanowisko 7A) mają na celu doświadczalne potwierdzenie zależności pomiędzy momentem sił zewnętrznych działających na żyroskop, a jego prędkością kątową precesji. Natomiast obserwacje przeprowadzane na modelu stabilizatora okrętowego (stanowisko 7B) pozwalają zrozumieć zasadę jego działania.

7.2. Wprowadzenie

Żyroskopem (albo giroskopem) nazywa się układ złożony z wirnika wykonującego ruch obrotowy wokół swojej osi z dużą szybkością oraz odpowiedniego układu zawieszenia. Zwieszenie ma umożliwić ruch kulisty wirnika, przy czym środek ruchu kulistego znajduje się na osi wirnika.

Charakterystycznym zjawiskiem dla żyroskopów – z pozoru paradoksalnym – jest efekt żyroskopowy. Zaskakujący sens fizyczny efektu żyroskopowego polega na tym, że do obrócenia wirującego ciała wokół wybranej osi trzeba przyłożyć obciążenie, dla którego wektor momentu ma kierunek prostopadły do osi zamierzonego obrotu oraz do osi wirowania.

Podstawowe cechy ruchu żyroskopów to:

- precesja żyroskopu wywołana działaniem momentu pochodzącego od sił zewnętrznych czynnych,
- zdolność zachowania niezmienniej orientacji przestrzennej osi wirnika.

W zastosowaniach technicznych są używane żyroskopy o wirnikach wykonujących od 20 do 50 tysięcy obrotów na minutę. Występowanie względnie dużego momentu żyroskopowego jest wykorzystywane szeroko w wielu urządzeniach - na przykład żyrokompassy i stabilizatory okrętowe. Jednak nie zawsze istnienie tego momentu jest mile widziane i musi być on brany pod uwagę przy projektowaniu łożysk podpierających wirujące wały, na przykład wirnik silnika lotniczego.

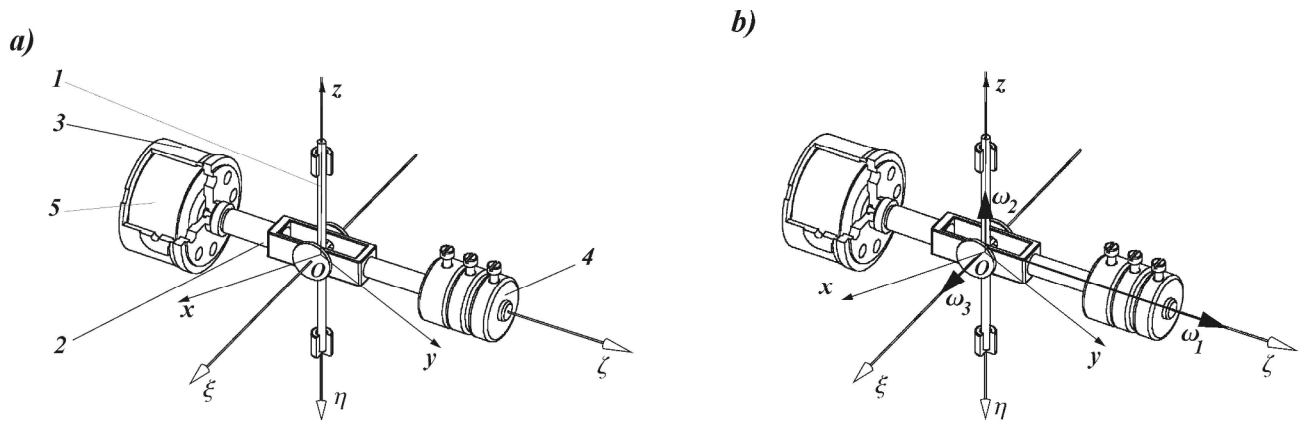
W ćwiczeniu wykorzystywane są dwa stanowiska doświadczalne:

- układ żyroskopowy służący do badania wpływu momentu przyłożonych sił zewnętrznych na prędkość kątową precesji układu (stanowisko 7A),
- wahadło wyposażone w stabilizator żyroskopowy (stanowisko 7B).

7.3. Teoretyczny opis zjawiska

Rozpatrywany jest układ (rys.7.1-a) złożony z pionowej osi (1) i zamocowanym na niej pręcie (2), na którego jednym z końców jest osadzona obudowa silnika (3), a na drugim umieszczane są obciążniki (4). Pręt (2) jest połączony z pionową osią za pomocą łożysk, które umożliwiają obrót pręta wokół osi (x) - poziomej i jednocześnie prostopadłej do osi (z). Zasadniczym elementem układu jest wirnik (5) silnika.

Ruch układu odbywa się w taki sposób, że wirnik obraca się wokół osi Oz (rys.7.1-b). Oś ta ma swobodę obrotu wokół pionowej osi Oz , jak również wokół poziomej osi Ox .



Rys. 7.1. Oznaczenia elementów (a); układy współrzędnych: nieruchomy (Oxyz) i ruchomy (Oxhz) oraz wektory prędkości kątowych (b)

Prędkość kątowa obrotu własnego $\dot{\omega}_1$ wirnika analizowanego modelu ma wartość o kilka rzędów większą od wartości prędkości kątowej $\dot{\omega}_2$, z jaką cały układ wiruje wokół pionowej osi Oz. Analogiczna relacja zachodzi pomiędzy prędkością $\dot{\omega}_1$ a prędkością $\dot{\omega}_3$, z jaką obudowa silnika może obracać się wokół poziomej osi Ox.

Ruch wirnika jest ruchem złożonym z trzech ruchów obrotowych, zatem jego całkowita prędkość kątowa ($\dot{\omega}$) jest sumą wektorów prędkości składowych

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_2 + \dot{\omega}_3 . \quad (7.1)$$

Należy nadmienić, że dokładna analiza ruchu takiego ciała jest zagadnieniem skomplikowanym.

W przybliżonej teorii zjawisk żyroskopowych, która w zadowalający sposób wyjaśnia szereg zjawisk charakterystycznych dla układów wyposażonych w żyroskopy, zakłada się, że całkowita prędkość kątowa wirnika ($\dot{\omega}$) różni się nieznacznie od prędkości obrotu własnego wirnika ($\dot{\omega}_1$), to znaczy

$$\dot{\omega} \cong \dot{\omega}_1 . \quad (7.2)$$

Kolejne założenie dotyczące badanego modelu odnosi się do wartości prędkości kątowej obrotu własnego – przyjmuje się, że

$$\omega_1 = \text{const} . \quad (7.3)$$

W analizie ruchu modelu żyroskopu wykorzystuje się¹ twierdzenie o pochodnej względem czasu wektora krętu $\mathbf{r}$ $\mathbf{K}_O$ (określonego względem nieruchomego bieguna O)

$$\boxed{\frac{d \mathbf{K}_O}{d t} = \mathbf{r} \times \dot{\mathbf{K}}_O} . \quad (7.4)$$

Pochodną dowolnego wektora (na przykład $\dot{\mathbf{a}}(t)$), zmieniającego w czasie swoją długość (moduł) i kierunek, wyznacza się z zależności

$$\frac{d \dot{\mathbf{a}}}{d t} = \frac{d' \dot{\mathbf{a}}}{d t} + \dot{\omega}_a \times \dot{\mathbf{a}} .$$

We powyższym wzorze pierwszy składnik $\frac{d' \dot{\mathbf{a}}}{d t}$ jest pochodną lokalną, która określa szybkość zmiany długości wektora $\dot{\mathbf{a}}$, natomiast drugi składnik ($\dot{\omega}_a \times \dot{\mathbf{a}}$) wynika ze zmiany kierunku wektora $\dot{\mathbf{a}}$ - opisanej prędkością obrotu ($\dot{\omega}_a$) tego wektora.

¹ Do tego celu mogą być również użyte równania Eulera.

W przypadku wektora $\dot{\mathbf{a}}(t)$, którego długość nie ulega zmianie ($a(t)=const$) pochodna lokalna jest równy zero i powyższa zależność przyjmuje postać

$$\frac{d\dot{\mathbf{a}}}{dt} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_a \times \mathbf{a} \quad (\text{dla } a(t)=const).$$

Przy analizie ruchu modelu żyroskopu badanego na stanowisku doświadczalnym założono, że kręt całego układu tylko nieznacznie różni się od krętu samego wirnika żyroskopu. Ponadto przyjmuje się, że spełniony jest warunek (7.2). Oznacza to, że kręt analizowanego układu można określić na podstawie przybliżonego wzoru jako

$$\dot{\mathbf{K}}_O = J_1 \dot{\boldsymbol{\omega}}_1, \quad K_O = J_1 \omega_1, \quad (7.5)$$

przy czym ω_1 [rad/s] oznacza wartość prędkości kątowej obrotu własnego, a J_1 [kgm²] jest głównym momentem bezwładności wirnika żyroskopu względem jego osi obrotu własnego (Oz). Przy tak przyjętych założeniach wektor krętu układu ($\dot{\mathbf{K}}_O$) leży na osi Oz i ma stałą wartość. Jego pochodna jest określona zależnością

$$\frac{d\dot{\mathbf{K}}_O}{dt} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_K \times \mathbf{K}_O \quad (\text{dla } K_O = const), \quad (7.6)$$

gdzie $\dot{\boldsymbol{\omega}}_K$ oznacza prędkość kątową, z jaką obraca się wektor krętu układu.

W dalszej części rozważane są trzy przypadki:

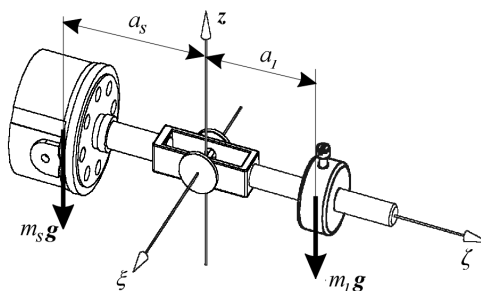
- wyznaczanie położenia równowagi osi żyroskopu przy nieobracającym się wirniku (rys.7.2),
- ruch układu pod działaniem momentu sił zewnętrznych o wektorze skierowanym wzdłuż osi Oz (rys. 7.3),
- ruch układu pod działaniem momentu sił zewnętrznych o kierunku osi Ox (rys. 7.4).

7.3.1. Układ z nieruchomym wirnikiem – położenie równowagi

W badanym modelu istotne jest położenie równowagi układu w sytuacji, gdy wirnik nie obraca się wokół własnej osi. Położenie równowagi przy poziomym kierunku osi własnej wirnika (rys. 7.2) uzyskuje się wtedy, gdy suma momentów sił ciężkości względem osi Ox jest równa zero

$$\sum M_x : m_s g a_s - m_l g a_l = 0. \quad (7.7)$$

Użyte zostały następujące oznaczenia: m_s – masa silnika (wraz z masą pręta, na którym jest on osadzony), a_s – odległość środka masy silnika (wraz z prętem) od punktu O, m_l – masa obciążnika (tulei zakładanej na część pręta znajdującą się po przeciwnej stronie silnika), a_l – odległość środka masy obciążnika od punktu O, g – przyspieszenie ziemskie.



Rys. 7.2. Poziome położenie równowagi pręta

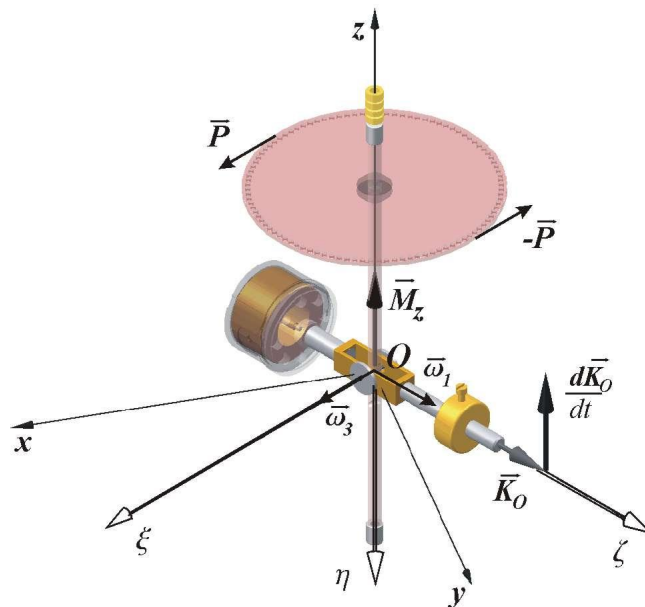
Wprowadzając oznaczenie $M_s = m_s g a_s$, łatwo stwierdzić, że w położeniu równowagi

$$M_s = m_l g a_l. \quad (7.8)$$

Położenie (a_l) obciążnika o masie m_l , które zapewnia poziome położenie równowagi układu (przy nieruchomym wirniku) jest wyznaczane doświadczalnie.

7.3.2. Zjawiska zachodzące w żyroskopie pod działaniem momentu zewnętrznego względem osi pionowej (Oz)

Rozważa się przypadek, gdy wirnik kręci się wokół poziomej osi i zostanie przyłożona do układu para sił $\vec{P}$, $-\vec{P}$ jak pokazano na rys.7.3.



Rys. 7.3. Moment zewnętrzny (M_z) działające na żyroskop oraz wektory: prędkości kątowych, krętu i jego pochodnej

Wektor momentu pary jest skierowany wzdłuż osi Oz, to znaczy $\vec{M}_O = \vec{k}M_z$ i wektor krętu $\vec{K}_O$, zgodnie z prawem (7.4), musi doznać przyrostu.

Otrzymuje się zatem następującą zależność

$$\frac{d\vec{K}_O}{dt} = \vec{r}M_z \quad (7.9)$$

Kierunek i zwrot wektora momentu $\vec{M}_O = \vec{k}M_z$ określa kierunek i zwrot wektora przyrostu krętu. Oznacza to, że przyrost (i pochodna) wektora krętu będzie wektorem o kierunku i zwrocie wiersora $\vec{k}$ osi z. Wynika stąd, że pojawi się prędkość kątowa wokół osi Ox ($\vec{\omega}_\xi = \vec{\omega}_3$). Ruch żyroskopu wokół osi Ox jest nazywany *nutacją*, a prędkość z jaką się on odbywa - prędkością nutacji ($\vec{\omega}_\xi$).

Pochodna wektora krętu jest określona zależnością (7.6), w której w miejsce $\vec{\omega}_K$ należy wstawić $\vec{\omega}_3$, to znaczy

$$\frac{d\vec{K}_O}{dt} = \vec{\omega}_3 \times \vec{K}_O = \vec{\omega}_3 \times J_1 \vec{\omega}_1 = J_1 \vec{\omega}_3 \times \vec{\omega}_1 \quad (7.10)$$

Porównując wartość pochodnej krętu z wartością momentu sił zewnętrznych otrzymuje się równanie

$$J_1 \omega_3 \omega_1 \sin \frac{p}{2} = M_z \quad (7.11)$$

na podstawie którego wartość liczbową prędkości kątowej nutacji wyniesie

$$\boxed{\omega_3 = \frac{M_z}{J_1 \omega_1}} \quad (7.12)$$

Jeśli równanie (7.4) zostanie przedstawione w formie

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{M}_O - \frac{d \mathbf{K}_O}{dt} = 0 \quad (7.13)$$

i zastosuje się oznaczenie $\mathbf{M}_g = -\frac{d \mathbf{K}_O}{dt}$, to będzie można powiedzieć, że wprowadzony w ten sposób moment żyroskopowy ($\mathbf{M}_g$) jest miarą bezwładności układu (a równanie przybiera formę $\mathbf{M}_O + \mathbf{M}_g = 0$). Można go określić jako

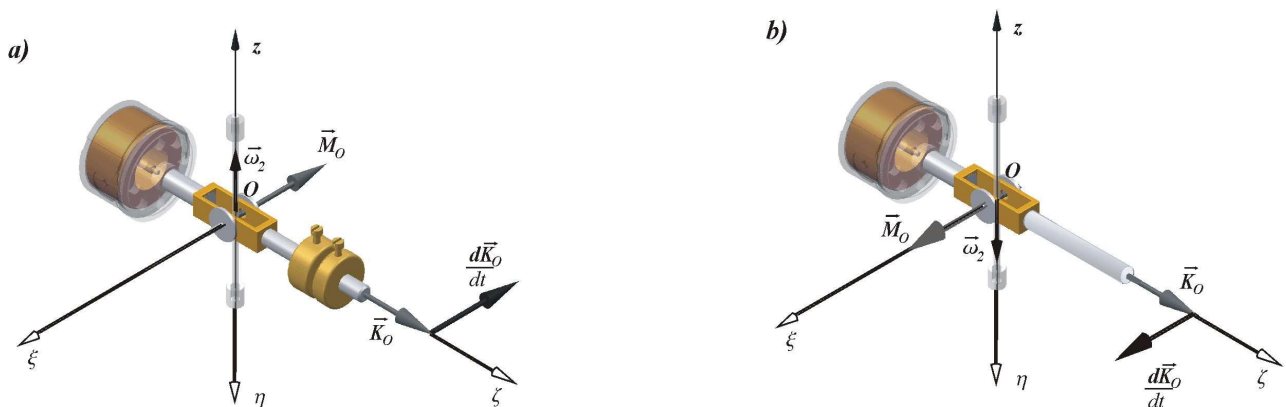
$$\mathbf{M}_g = -\frac{d \mathbf{K}_O}{dt} = -J_1 \boldsymbol{\omega}_3 \times \boldsymbol{\omega}_1 = J_1 \boldsymbol{\omega}_1 \times \boldsymbol{\omega}_3. \quad (7.14)$$

Opór, jaki stawia układ przy próbie obrotu wokół osi, Oz wyjaśnia występowanie momentu żyroskopowego.

7.3.3. Zjawiska zachodzące w modelu pod działaniem momentu zewnętrznego względem osi poziomej Ox

Przez założenie dodatkowego przeciwcieżaru (rys. 7.4 lewa strona) – albo zdjęcie wszystkich przeciwcieżarów (rys. 7.4 prawa strona) – powstaje niezrównoważony moment sił zewnętrznych względem osi Ox . Oznacza to, że w takim przypadku na układ działa moment $\mathbf{M}_O$ (wywołany siłami ciężkości) o kierunku osi Ox i wartości

$$M_O = \left| M_s - \sum_i m_i g a_i \right|. \quad (7.15)$$



Rys. 7.4. Schemat obliczeniowy przy obciążeniu momentem względem osi x

Szybkość zmian wektora krętu, zgodnie z zależnością (7.4) musi być równy momentowi $\mathbf{M}_O$, to znaczy, że wektor $\frac{d \mathbf{K}_O}{dt}$ będzie mieć ten sam kierunek i zwrot, co $\mathbf{M}_O$ (w tym przypadku zgodny z osią Ox). Wektor krętu $\mathbf{K}_O$ może doznać przyrostu jedynie w wyniku obrotu całego układu dookoła pionowej osi Oz . Prędkość kątowa $\boldsymbol{\omega}_2$ tego obrotu jest nazywana prędkością *precesji*.

Pochodna wektora krętu może być wyznaczona z zależności (7.6), po wstawieniu $\boldsymbol{\omega}_2$ w miejsce wektora $\boldsymbol{\omega}_K$

$$\frac{d \mathbf{K}_O}{dt} = \boldsymbol{\omega}_2 \times \mathbf{K}_O = \boldsymbol{\omega}_2 \times J_1 \boldsymbol{\omega}_1 = J_1 \boldsymbol{\omega}_2 \times \boldsymbol{\omega}_1. \quad (7.16)$$

Przez porównanie wartości tej pochodnej z momentem M_O otrzymuje się zależność

$$\boxed{w_2 = \frac{M_O}{J_1 w_1}}. \quad (7.17)$$

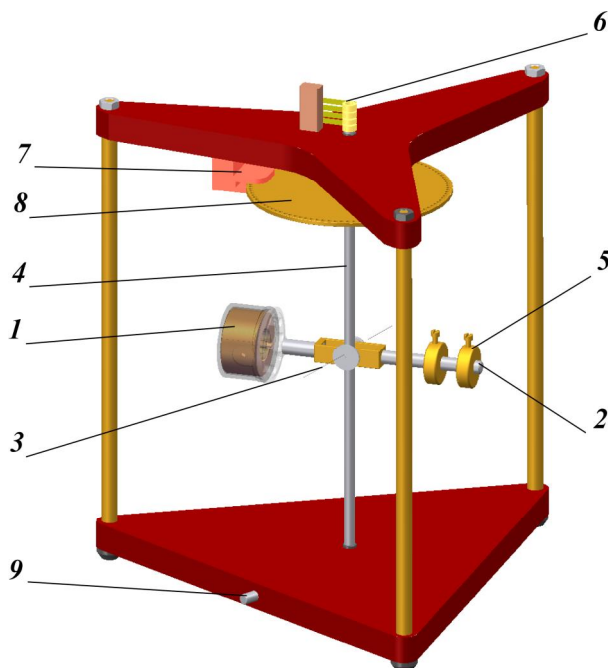
Moment żyroskopowy ($\dot{\mathbf{M}}_g$) w tym przypadku jest równy

$$\dot{\mathbf{M}}_g = -\frac{d\mathbf{K}_o}{dt} = -J_1 \dot{\boldsymbol{\omega}}_2 \times \boldsymbol{\omega}_1 = J_1 \dot{\boldsymbol{\omega}}_1 \times \boldsymbol{\omega}_2. \quad (7.18)$$

7.4. Opis stanowisk badawczych

7.4.1. Stanowiska do pomiaru prędkości kątowej precesji żyroskopu 7A

Na rys. 7.5 przedstawiony jest widok stanowiska z układem żyroskopowym o trzech stopniach swobody.



Rys. 7.5. Elementy stanowiska pomiarowego 7A

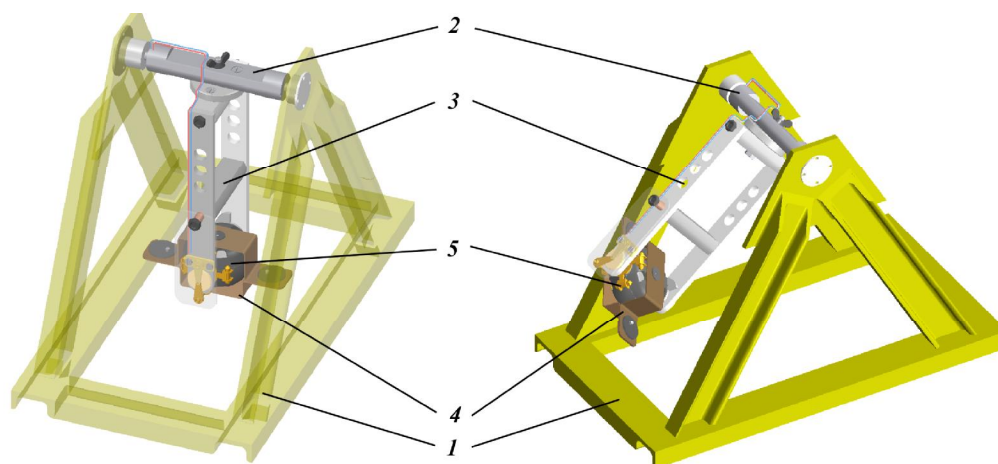
Silnik żyroskopowy (1), którego wirnik wykonuje ok. 26 tysięcy obrotów na minutę jest sztywno związany z prętem (2), będącym przedłużeniem osi własnej wirnika. Pręt ten może obracać się wokół osi poziomej (3) i pionowej osi (4) – umieszczonej w łożyskach ostoi.

Statyczne zrównoważenie układu (poziome położenie pręta (2) przy nieruchomym wirniku) umożliwiają przesuwne przeci ciężary (5). Silnik jest zasilany z przetwornicy napięcia przez szczotki i pierścienie (6). Przetwornica zasilą silnik żyroskopu prądem trójfazowym o napięciu 36 V i częstotliwości około 400 Hz.

Do pomiaru wartości prędkości kątowej precesji ($\dot{\boldsymbol{\omega}}_2$) – to znaczy obrotu wokół osi pionowej (4) – został zastosowany czujnik optyczny (7) i tarcza (8) o 100 otworach na obwodzie. Pomiar wartości prędkości kątowej obrotów własnych ($\dot{\boldsymbol{\omega}}_1$) wirnika żyroskopu odbywa się w ten sposób, że po wyłączeniu zasilania silnika - przycisk (9) WYCIŚNIEŹY - pracuje on jako prądnicę. Zmiany napięcia prądu generowanego przez prądnicę są zliczane przez miernik. Ponieważ stojan silnika jest dwubiegunowy, to miernik rejestruje jeden impuls na jeden obrót wirnika. Do pomiaru szybkości precesji i obrotu własnego służy ten sam miernik (licznik uniwersalny).

7.4.2. Model stabilizatora żyroskopowego - opis stanowiska 7B

Rozpatrywany układ (rys. 7.6) jest wahadłem wyposażonym w stabilizator żyroskopowy.



Rys. 7.6. Wahadło stabilizowane żyroskopem - widok stanowiska badawczego 7B

W ramie (1) są osadzone łożyska wałka (2). Do wałka jest przymocowana ramka (3) – nazywana ramką zewnętrzną. W ramce zewnętrznej jest umieszczona ramka wewnętrzna (4) z osadzonym w niej silnikiem „żyroskopowym” (5). Ramka wewnętrzna wraz z osią własną silnika (wirnika) może zmieniać położenie o około $\pm 90^\circ$ względem ramki zewnętrznej. Zasilanie silnika jest takie samo, jak w stoisku 7A.

W sytuacji, gdy wirnik nie obraca się wokół własnej osi, zachowanie układu (to jest położenia równowagi, ruch) jest takie jak zwykłego wahadła fizycznego. Jeśli wirnik obraca się ze znaczną szybkością wokół własnej osi, to ruch ten działa stabilizująco na wahadło (na przykład umożliwia ustawienie go w niestatecznym górnym położeniu równowagi).

7.5. Sposób przeprowadzenia eksperymentów

W pierwszej kolejności dokonywane są pomiary szybkości precesji na stanowisku 7A. Następnie badane jest zachowanie się stabilizatora żyroskopowego na stanowisku 7B. Wyniki pomiarów i obliczeń rejestrowane są w tabeli 7.1 i na rysunku 7.7.

7.5.1. Pomiary szybkości precesji

1. Zrównoważyć oś wirnika (rys.7.2) w jej położeniu poziomym za pomocą przeci ciężaru. Zmierzyć odległość środka przeci ciężaru od osi pionowej obrotu (a_1) i zanotować ją oraz masę przeci ciężaru (m_1) - podana jest na obciążnikach - w tabeli 7.1.
2. Włączyć do sieci miernik (częstościomierz) i wcisnąć klawisz podstawy czasu 1 s.
3. Włączyć prostownik, ustawić przełącznika na zasilanie stoiska 7A i włączyć silnik - przycisk (9) WCIŚNIĘTY.
4. Odczekać około 2 minuty, aby żyroskop osiągnął obroty nominalne i ustawić pręt z umocowanym do niego silnikiem poziomo. Przyłożyć palce do obrzeża brązowej tarczy i próbować obracać ją w jedną i drugą stronę (starać się obracać przez wywarcie nacisku, ale bez wywołania widocznego obrotu). Zaobserwować kierunek wychylania się pręta (osi wirnika) w zależności od kierunku działania momentu.
5. Utrzymując pręt z silnikiem (oś Oz) poziomo założyć na pręt dodatkowy ciężarek (lub przesunąć w stronę końca pręta ten ciężarek, który już był założony), jak to pokazują schematy w tabeli 7.1.
6. Zmierzyć odległość a_i ; zanotować zmierzoną wartość jak i odczytaną masę (m_i) w tabeli 7.1.
7. Ustawić pręt poziomo, pozostawić układ samemu sobie i obserwować jego ruch.
8. Odczytać wskazanie miernika prędkości kątowej precesji w_2 i zapisać je w tabeli 7.1. Narysować na odpowiednich schematach umieszczonych w tabeli 7.1 wektory: momentu M_O , prędkości kątowych w_1 i w_2 .

Uwaga: W czasie pomiaru oś wirnika powinna pozostawać w położeniu bliskim poziomemu. Prędkość kątową precesji mierzyć przy nastawie podstawy czasu 10 s (uzyskuje się wtedy większą dokładność).

- Wykonać pomiar prędkości obrotowej wirnika żyroskopu w_1 . W tym celu należy WYCISNAĆ na chwilę przycisk (9); zapisać wskazanie miernika w tabeli 7.1.

Uwaga: W czasie pomiaru oś wirnika powinna pozostawać w położeniu bliskim poziomemu.

Prędkość obrotu wirnika mierzyć przy nastawie podstawy czasu 1 s.

Włączenie pomiaru prędkości wirnika powoduje wyłączenie zasilania silnika, a więc jego obroty maleją w czasie pomiaru. Zatem najwyższy odczyt (zwykle pierwszy) uznajemy za najdokładniejszy.

- Przyciskiem (9) włączyć ponownie zasilanie silnika i przestawić podstawę czasu licznika na **10 s**.
- Powtórzyć pomiary (punkty 5 – 10) dla różnych wartości momentu M_O , wg schematów z tabeli 7.1.
- Wyłączyć zasilanie przetwornicy i miernik prędkości.

7.5.2. Badanie modelu stabilizatora żyroskopowego

- Przy nieruchomym wirniku silnika wprowadzić w ruch wahadłowy ramkę zewnętrzną i wewnętrzną w celu sprawdzenia, że opory łożysk i komutatorów są minimalne.
- Zatrzymać wahadło w położeniu równowagi trwalej (patrz rys.7.6 – po lewej).
- Włączyć zasilanie przetwornicy, ustawić przełącznik na zasilanie stoiska **7B** i odczekać ok. 2 minut.
- Ustawić oś wirnika pionowo, wykonać łagodne próby obrócenia ramki zewnętrznej w jedną i drugą stronę. Obserwować ruchy obu ramek. Zwrócić uwagę na wielkość oporu, jaki stawia ramka zewnętrzna przy próbnym jej poruszeniu. Zanotować kierunek momentu przyłożonego do ramki zewnętrznej i kierunek powstałej precesji ramki wewnętrznej (obudowa silnika).
- Przestawić łagodnie wahadło w górne położenie pionowe (tzn. w położenie równowagi nietrwalej zwykłego wahadła); ustawić oś wirnika żyroskopu pionowo.
- Wykonać próby odchylenia wahadła od pionu w obu kierunkach. Zwrócić uwagę na wielkość oporu, jaki stawia ramka zewnętrzna przy próbnym jej poruszeniu.
- Wykonać próby odchylenia ramki wewnętrznej (obudowy silnika) od pionu w obu kierunkach. Zanotować kierunek powstałego obrotu ramki zewnętrznej (wahadła); nanieść to na schemacie układu (rys.7.7 b).
- Opuścić wahadło, wyłączyć prostownik oraz uporządkować stoisko.

7.6. Opracowanie wyników pomiarów i sprawozdanie

7.6.1. Obliczenia pomocnicze

Po zakończeniu pomiarów i obserwacji należy przystąpić do wykonania obliczeń niezbędnych do wypełnienia pozostałych rubryk tabeli 7.1. Przy obliczaniu momentu zewnętrznego należy przyjąć $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Natomiast w obliczeniach momentu żyroskopowego przyjąć wartość moment bezwładności wirnika $J_z = 0,816 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^2$.

7.6.2. Sprawozdanie z ćwiczenia

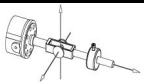
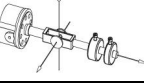
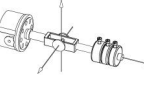
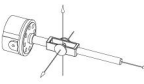
W sprawozdaniu należy zamieścić:

- temat i cel ćwiczenia,
- wyniki pomiarów, obserwacji i obliczeń zestawione w tabeli 7.1,
- szkice z objaśnieniami zjawisk występujących w ćwiczeniu,
- obserwacje i wnioski.

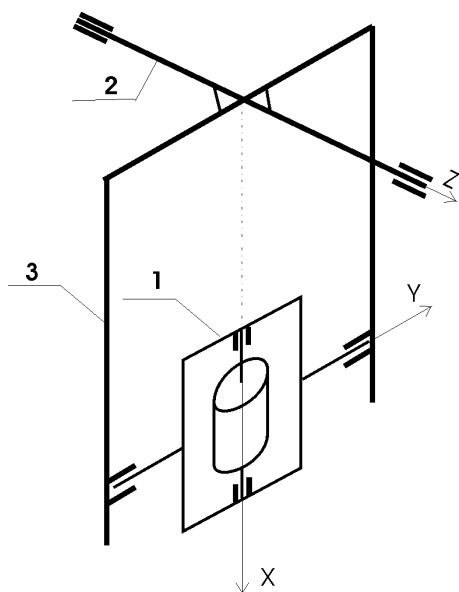
7.7. Pytania sprawdzające

- Co to jest żyroskop?
- Co to jest efekt żyroskopowy?
- Na czym polega uproszczenie przyjmowane w „przybliżonej teorii żyroskopu”?
- Przytoczyć sformułowanie twierdzenia o pochodnej krętu.
- Podać kilka przykładów korzystnego i niekorzystnego działania efektu żyroskopowego.

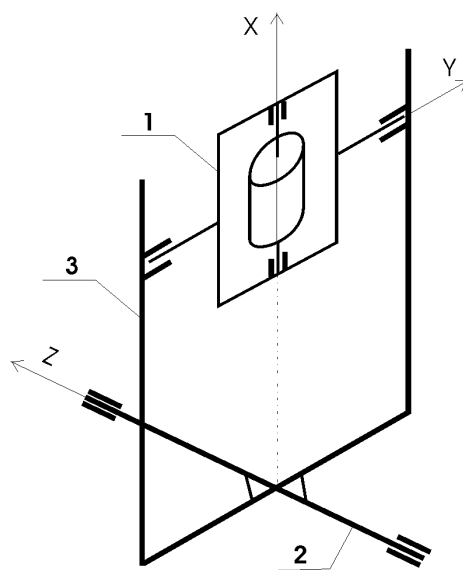
Tabela 7.1 Wyniki pomiarów i obliczeń

Nr	Warianty obciążenia Wektory momentu sił zewnętrznych. Wektory obrotu prędkości kątowych	Masa obciążników	Odległość od osi pionowej	Momenty sił ciężkości obciążników	Moment zewnętrzny	Szybkość precesji		Szybkość wirowania		Moment żyroskopowy
		m_i	a_i	$M_i = g m_i a_i$	M_O	Odczyt z miernika n_2	$w_2 = \frac{2p n_2}{100}$	Odczyt z miernika n_1	$w_1 = 2p n_1$	$M_g = J_1 w_1 w_2$
		kg	mm	Nm	Nm	imp/s	rad/s	obr/s	rad/s	Nm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		$m_1 = 0,347$	$a_1 =$	$M_1 =$	$0,00$					
2		$m_2 =$	$a_2 =$	$M_2 =$	$M_2 =$					
3		$m_2 =$ $m_3 =$	$a_2 =$ $a_3 =$	$M_2 =$ $M_3 =$	$M_2 + M_3 =$					
4					$M_1 =$					

a)



b)



Rys. 7.7. Schemat stabilizatora żyroskopowego