

WYBRANE ZASTOSOWANIA ŁOŻYSK MAGNETYCZNYCH

W referacie przedstawiono kilka nietypowych zastosowań łożysk magnetycznych. W tych zastosowaniach łożyska magnetyczne nie tylko pełnią typową dla łożysk funkcję, ale są również wykorzystywane do innych celów jak: pomiar sił bezwładności, generowanie sił wymuszających na potrzeby identyfikacji dynamiki, przejęcie roli silnika elektrycznego, itd.

SAME APPLICATIONS OF MAGNETIC BEARINGS

Unusual applications of magnetic bearings are presented in the paper. Beside of the supporting of the rotor in these applications the magnetic bearings are used to: measure the inertial force, generate the excitation forces in identification experiments, drive the rotor as an electric motor, etc.

1. WPROWADZENIE

W wielu zastosowaniach łożyska magnetyczne mają spełniać te same zadania co łożyska ślizgowe i toczne, tzn:

- zmniejszać opory ruchu pomiędzy częściami obrotowymi i częściami nieobrotowymi,
- przenosić siły z części obrotowych do nieobrotowych i odwrotnie.

Dodatkowe zalety łożysk magnetycznych przy realizacji powyższych zadań są następujące: wyeliminowanie smarowania, możliwość pracy w głębokiej próżni, możliwość samocentrowania wału, automatycznego wyważania, monitorowania stanu maszyny wirnikowej. Jednak obok realizacji funkcji, które są oczywiste dla łożysk, można zawieszenia magnetyczne wykorzystać do wielu innych celów. W niniejszym rozdziale podanych zostanie kilka właśnie takich nietypowych zastosowań.

2. GENERATOR WIRUJĄCEJ SIŁY WYMUSZAJĄCEJ

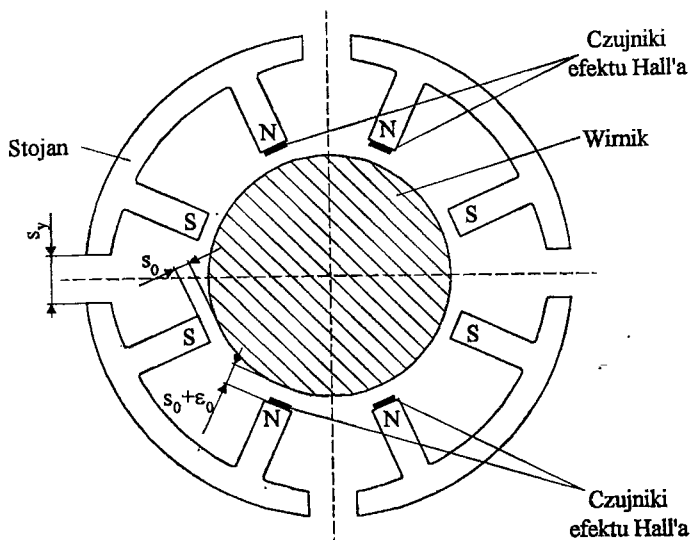
Metody identyfikacji modalnej układów mechanicznych służą przede wszystkim do dopasowania dynamiki modelu obiektu otrzymanego np. Metodą Elementów Skończonych do dynamiki obiektu rzeczywistego. Dla niewirujących układów są one dobrze rozwinięte. W eksperymencie trwale pobudza się obiekt standardowymi sygnałami typu: impuls, biały szum. Na podstawie zmierzonych sygnałów pobudzenia i odpowiedzi na pobudzenie wyznacza się postacie drgań i parametry modalne: częstotliwości i współczynniki tłumienia.

Ten prosty schemat identyfikacji nie jest wystarczający w przypadku układów wirujących [1], [2]. Wirnik jest konstrukcją „aktywną” w przeciwieństwie do innych mechanicznych obiektów, które są konstrukcjami „pasywnymi”. Struktury pasywne nie podlegają ruchowi w stanie równowagi statycznej, podczas gdy przez stan ustalony wirnika rozumie się jego ruch obrotowy bez nakładających się na niego drgań. „Aktywność” polega na istotnym wpływie

ruchu obrotowego na drgania wirnika, szczególnie w kierunkach poprzecznych do osi wirnika.

Ze względu na istnienie podobnych więzów wirnika w dwóch ortogonalnych kierunkach poprzecznych (x, y) i bliskość postaci drgań w tych dwóch kierunkach, najlepszymi sygnałami testującymi są siły wirujące w płaszczyźnie prostopadłej do osi wirnika. Takim naturalnym sygnałem testującym jest siła bezwładności od niewyważenia samego wału. Ten typ wymuszenia nazywany jest perturbacją synchroniczną. Podczas rozruchu i wybiegu mierzymy siły bezwładności od niewyważenia oraz ruch wirnika przy różnych prędkościach obrotowych. Stosunek tych sygnałów (wielkość zespolona) nazywany jest funkcją przejścia. Ograniczenia tego sygnału testującego są oczywiste. Siła bezwładności od niewyważenia jest proporcjonalna do kwadratu prędkości obrotowej, a tym samym amplituda sygnału testującego może być zbyt mała przy małych prędkościach obrotowych oraz zbyt duża przy dużych prędkościach. Lecz największe ograniczenie wynika z faktu, że niewyważenie wywołuje wyłącznie precesję synchroniczną i generuje ruch współbieżny. Nie są pobudzone postacie ruchu przeciwbieżnego. Tym samym identyfikacja nie jest pełna.

Znacznie lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie siły, która może wirować względem wirnika z prędkością kątową różną od prędkości kątowej wirnika w kierunku zarówno zgodnym jak i przeciwnym do kierunku ruchu roboczego wirnika. Takie wymuszenie nazywane jest perturbacją asynchroniczną [1] i umożliwia ono identyfikację parametrów wirnika zarówno podczas postoju jak i podczas stałych obrotów. Ponadto taki sygnał pozwala uaktywnić zarówno postacie współbieżne jak i przeciwbieżne, a tym samym zidentyfikować wszystkie postacie i ich parametry modalne.



Rys. 1. Konstrukcja łożyska magnetycznego jako generatora siły wymuszającej.

Jako generator asynchronicznej siły wymuszającej można zastosować promieniowe łożyska magnetyczne. Taki generator został wykonany i był badany w ramach projektu Unii Europejskiej - MARS (Modal Analysis of Rotating Structures) [3], [4]. Podstawowym kryterium, którym się kierowano przy projektowaniu i wykonaniu generatora było osiągnięcie

jak najwyższej dokładności zarówno przy zadawaniu siły jak i przy jej mierzeniu. Cel osiągnięto (rys. 1) przez:

- zastosowanie w każdej parze elektromagnesów na biegunie północnym czujników Halla do pomiaru gęstości strumienia magnetycznego (wielkość ta jest proporcjonalna do siły sterującej),
- minimalizację sprzężeń skrośnych przez segmentowanie obwodu magnetycznego (szczeliny s na rys. 1),
- precyzyjne modelowanie i identyfikację siły generowanej przez łożysko w funkcji prądu sterującego, położenia wału wirnika i geometrii łożyska.

3. BEZŁOŻYSKOWE SILNIKI ELEKTRYCZNE

Ponieważ struktura łożysk magnetycznych przypomina strukturę silników prądu stałego, to od kilku lat intensywnie bada się możliwość połączenia funkcji silnika elektrycznego - jako generatora momentu napędowego wirnika, z funkcją łożyska magnetycznego - jako urządzenia zapewniającego lewitację wirnika. Korzyści są oczywiste; funkcję jednego lub obu łożysk promieniowych przejmuje uzwojenie silnika - tym samym może ulec skróceniu wirnik, co pozwala poprawić jego dynamikę i podnieść prędkość obrotową.

Po raz pierwszy pojęcie silnika bezłożyskowego zostało użyte w [5], a obecnie szczególnie intensywnie badania w tym zakresie trwają w Japonii [6], [7], [8] i w Szwajcarii [9], [10]. Proponowane w tych pracach rozwiązania polegają na nałożeniu na uzwojenie silnika dodatkowej funkcji lewitacji wirnika.

Rozpatrzmy bezłożyskowy silnik synchroniczny z wirnikiem z trwałych magnesów [8], którego przekrój pokazany jest na rys. 2. Niech M oznacza liczbę par biegunów wirnika, a N liczbę par biegunów statora.

Magnesy wirnika generują strumień magnetyczny o gęstości:

$$B_r(\theta, t) = B_R(\Omega t - M\theta), \quad (1)$$

gdzie: B_R - amplituda gęstości strumienia magnetycznego, Ω - prędkość kątowa wirnika, θ - współrzędna kątowa.

Moment napędowy generowany jest przez zmienny prąd w uzwojeniu statora, który w funkcji czasu i położenia kątowego określa następująca zależność:

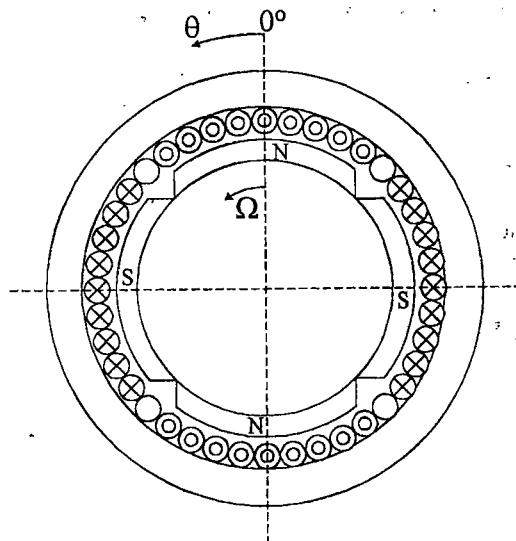
$$i_m(\theta, t) = I_M \cos(\Omega t - M\theta - \phi), \quad (2)$$

gdzie: I_M - amplituda prądu, ϕ - przesunięcie fazowe. Dla $\phi \approx 90^\circ$ - silnik jest silnikiem synchronicznym, dla $\phi \approx 0^\circ$ - silnik jest serwowotorem.

Oprócz prądu sterującego momentem napędowym potrzebny jest prąd sterujący lewitacją. Załóżmy, że prądy te generują w $2N$ biegunowym statorze strumień magnetyczny o gęstości:

$$B_f(\theta, t) = -B_{F1} \cos(\Omega t - N\theta) - B_{F2} \sin(\Omega t - N\theta), \quad (3)$$

gdzie: B_{F1}, B_{F2} są amplitudami gęstości dwóch składowych strumieni magnetycznego. Różnica gęstości strumieni magnetycznych wirnika i statora $B = B_r - B_f$ generuje na elementarnej powierzchni ΔS w kierunku θ siłę przyciągania:



Rys.2. Konfiguracja silnika elektrycznego synchronicznego z wirnikiem z trwałych magnesów.

$$\Delta F(\theta) = \frac{B^2}{2\mu_0} \Delta S \quad (4)$$

Wypadkowa elementarnych sił na kierunku y ($\theta=0$) wynosi:

$$F_y = \int_0^{2\pi} \int_0^L \Delta F(\theta) \cos\theta = \frac{B_R B_{F1} D L}{4\mu_0} \int_0^{2\pi} [\cos\{(M-N-1)\theta\} + \cos\{(M-N+1)\theta\}] d\theta, \quad (5)$$

gdzie: L - długość wirnika, D - średnica wirnika, μ - przenikalność magnetyczna próżni.

Należy zauważyć, że dla $M-N = \pm 1$ powyższa zależność staje się wielkością stałą i wynosi:

$$F_y = \frac{\pi B_R D L}{2\mu_0} B_{F1}. \quad (6)$$

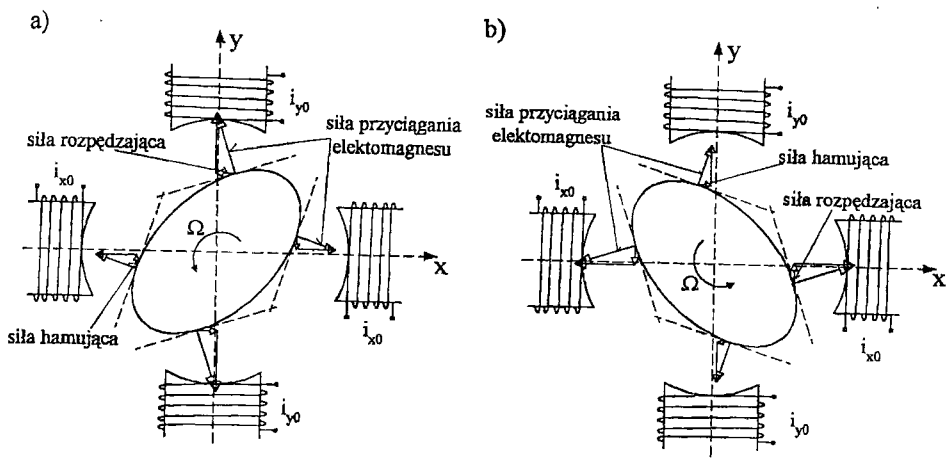
W podobny sposób można obliczyć składową w kierunku x . Powyższe rozważania prowadzą do wniosku, że można sterować położeniem wirnika przez zmianę strumieni magnetycznych: B_{F1}, B_{F2} , przy czym jest wskazane zastosowanie rozwiązań konstrukcyjnych spełniających związek: $M-N = \pm 1$.

Podobne rozwiązania można znaleźć dla innych typów silników elektrycznych, np. indukcyjnego.

4. BEZSILNIKOWA MASZYNA WIRNIKOWA

Rozwiązanie z poprzedniego punktu jest słuszne w przypadku, gdy wymagany jest znaczny moment napędowy. W przypadku, gdy moment napędowy ma służyć jedynie do

podtrzymania prędkości obrotowej nie obciążonego wirnika (np. w giroskopach) możliwe jest inne rozwiązanie [11], [12]. Polega ono na wyeliminowaniu silnika elektrycznego i przejęciu jego funkcji przez jedno lub dwa łożyska magnetyczne. To podejście można wykorzystać także w mikromechanice [13].



Rys.3. Maszyna bezsilnikowa; wirnik rozpędzany jest przez elektromagnesy działające: a) w kierunku osi y, b) w kierunku osi x.

W tym celu należy (rys.3) wykonać czop wału pod łożyskiem o przekroju eliptycznym bliskim kołowego i wprowadzić okresową zmianę wartości prądu punktu pracy i_o . Okres związany jest z aktualną wartością prędkości obrotowej wirnika. Przyjmijmy, że przekrój wirującego wirnika w układzie współrzędnych związanych ze statorem ma kontur opisany w przybliżeniu zależnością:

$$\begin{aligned} x &= r_o + r_1 \cos 2(\theta + \Omega t), \\ y &= r_o + r_1 \cos 2(\theta + \Omega t + \pi/4). \end{aligned} \tag{7}$$

Aby zapewnić generowanie (niezerującego się w czasie jednego obrotu) momentu obrotowego w kierunku np. przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, należy zwiększać wówczas siły przyciągania, gdy wirnik znajduje się w położeniu z rys.3a (składowa obwodowa siły generuje moment napędowy), a zmniejszać - gdy wirnik znajduje się w położeniu z rys.3b (składowa obwodowa generuje moment hamujący). Osiągnąć to można przez uzmiennienie prądu punktu pracy według zależności:

$$\begin{aligned} i_{x0} &= i_o + i_1 \cos 2(\Omega t + \phi), \\ i_{y0} &= i_o + i_1 \cos 2(\Omega t + \pi/4 + \phi). \end{aligned} \tag{8}$$

Projektowanie układu sprowadza się do znalezienia takich wartości: r_1, i_1, ϕ , aby maksymalizować pracę składowej obwodowej sił przyciągania łożyska w czasie jednego obrotu wirnika.

5. PRZYSPIESZENIOMIERZ LOTNICZY I GIROSKOP

Z analizy błędów klasycznego przyspieszeniomierza (kompensacyjnego, wahadłowego) wynika [14], że możliwości poprawy dokładności pomiaru przyspieszenia można poszukiwać w zmniejszeniu sił i momentów sił tarcia w układach (parach kinematycznych) zawieszenia inercyjnej masy pomiarowej (MP). Jednym ze sposobów jest zastosowanie aktywnego zawieszenia magnetycznego. W pracy doktorskiej [14] rozważano zastosowanie zawieszenia magnetycznego w trójosiowym niskoczęstotliwościowym przyspieszeniomierzu lotniczym.

Zasada działania przyspieszeniomierza z bezstykowo zawieszoną masą pomiarową w sterowanym polu magnetycznym nie różni się od zasady działania przyrządów klasycznych. W obu przypadkach wartość przyspieszenia określana jest pośrednio poprzez pomiar siły bezwładności MP w czasie ruchu statku powietrznego (SP) ze zmienną prędkością. W zależności od przyjętego algorytmu sterowania masą się tę, a zarazem wartość przyspieszenia obiektu, można wyznaczać na podstawie pomiaru wartości prądów, przemieszczenia masy lub indukcji magnetycznej w szczelinie.

Układ aktywnego zawieszenia magnetycznego MP, składający się z: czujnika, regulatora, wzmacniacza i elementu wykonawczego - siłownika w postaci zespołu elektromagnesów w rozpatrywanym przyrządzie pełni potrójną rolę:

- sprężystego, bezstykowego zawieszenia MP,
- kompensatora siły bezwładności przywracającego, w zamkniętym układzie sterowania, masę do położenia centralnego w czasie przyspieszania SP,
- przetwornika pomiarowego, będącego źródłem elektrycznego sygnału proporcjonalnego do przyspieszenia.

Objęcie niestabilnego układu otwartego regulacyjną pętlą sprzężenia zwrotnego ma na celu jego stabilizację oraz utrzymanie masy w położeniu centralnym niezależnie od wymuszeń zewnętrznych, co jest warunkiem koniecznym, aby poprzez pomiar prądów można było oceniać wartość przyspieszenia.

Wartość wypadkowej siły F_e generowanej przez elektromagnesy określa następująca ogólna zależność [15]. W stanie ustalonym jest: $\dot{x} = 0$; wówczas mamy:

$$F_e = k_i i. \quad (9)$$

Siły wynikające z ruchu translacyjnego oznaczymy indeksem t , a siły wynikające z ruchu rotacyjnego oznaczymy indeksem r . Rozpatrując wypadkowe siły elektromagnesów F_{eyl} i F_{eyp} na kierunku osi Oy (rys.4) w czasie ruchu SP z liniowym przyspieszeniem unoszenia a_{oy} oraz przyspieszeniem kątowym $\dot{\omega}_z$, można zapisać warunki równowagi:

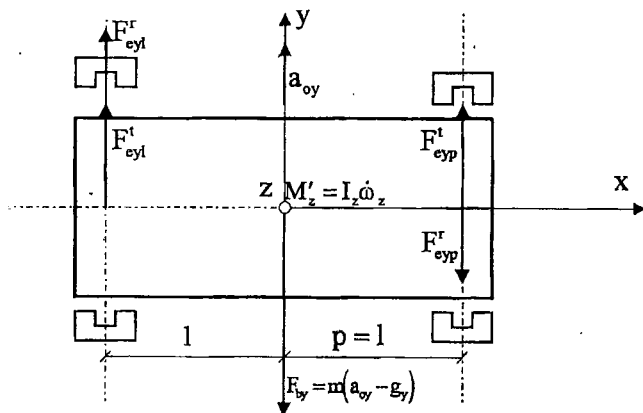
$$F_{by} = m(a_{oy} - g_y) = F_{eyl}^t + F_{eyp}^t = 2F_{ey}^t, \quad (10a)$$

$$M_z^w = I_z \dot{\omega}_z = F_{eyl}^r l + F_{eyp}^r p = 2F_{ey}^r l. \quad (10b)$$

Wypadkowe siły: lewego elektromagnesu F_{eyl} i prawego F_{eyp} wynoszą odpowiednio:

$$F_{eyl} = F_{eyl}^t + F_{eyl}^r, \quad (11a)$$

$$F_{eyp} = F_{eyl}^t - F_{eyl}^r. M_z^w = I_z \dot{\omega}_z = F_{eyl}^r l + F_{eyp}^r p = 2F_{ey}^r l. \quad (11b)$$



Rys. 4. Równowaga sił i momentów sił elektromagnesów na kierunku osi Oy .

Uwzględniając zależności (10) i (12) otrzymano sił: translacyjną i rotacyjną:

$$F_{ey}^r = \frac{F_{eyl}^r - F_{eyp}^r}{2} = \frac{(k_i i_{yl} - k_i i_{yp})}{2} = \frac{k_i}{2} (i_{yl} - i_{yp}). \quad (12a)$$

$$F_{ey}^t = \frac{F_{eyl}^t + F_{eyp}^t}{2} = \frac{k_i}{2} (i_{yl} + i_{yp}). \quad (12b)$$

Podstawiając do powyższych zależności wzory (11a) i (11b) otrzymamy możliwość określenia a_{oy} i $\dot{\omega}_z$ poprzez pomiar prądów i_{yl} i i_{yp} :

$$a_{oy} = \frac{k_i}{m} (i_{yl} + i_{yp}) + g_y, \quad (13a)$$

$$\dot{\omega}_z = \frac{k_i}{I_z} (i_{yl} - i_{yp}). \quad (13b)$$

Podobne wzory określają składową przyspieszenia a_{oz} i składową przyspieszenia $\dot{\omega}_y$ poprzez pomiar prądów i_{zl} oraz i_{zp} , oraz pomiar przyspieszenia a_{ox} poprzez pomiar prądów i_{xl} oraz i_{xp} , co powoduje, że układ taki można traktować jako czujnik dwuosiowy.

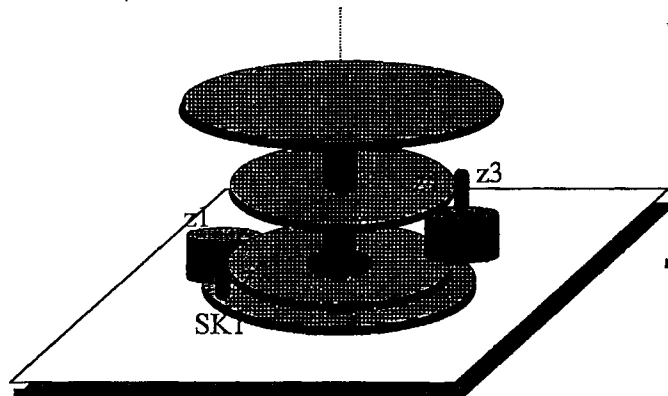
Jeśli masę pomiarową z rys. 4 wprawi się w ruch obrotowy, to przyrząd z tego rysunku można wykorzystać jako dwuosiowy giroskop, służący do pomiaru składowych prędkości kątowej [16]. Należy zauważyć, że możliwe jest połączenie dwuosiowego giroskopu i trzyosiowego przyspieszeniomierza w jeden przyrząd nawigacyjny [17].

6. STÓŁ OBROTOWY DO BADANIA GIROSKOPÓW

W Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych opracowano stół obrotowy do badania giroskopów [18] w szerokim zakresie częstości od 1 obr./miesiąc do 2 obr./sek., czyli w zakresie pomiarowym lotniczych giroskopów prędkościowych. Aby zapewnić tak duży przedział prędkości zastosowano dwa silniki skokowe napędzające stół obrotowy przez przekładnię mechaniczną w sposób współbieżny i przeciwbieżny (rys. 5).

Zastosowane silniki skokowe oraz koła zębate przekładni są identyczne, przy czym koła duże różnią się między sobą o jeden ząb. Silniki połączone są w układzie szeregowym zasilania. Silnik pierwszy (SK1) umieszczony na nieruchomej podstawie z kołem zębatym (zębniem z1) napędza duże koło z2, stanowiąc dużą przekładnię mechaniczną jednostopniową. Na kole tym (z2) zabudowany jest drugi silnik (SK2) i wraz z kołem z2 porusza się on wokół wspólnej osi układu. Silnik ten (SK2) napędza, poprzez znajdujący się na jego wirniku zębni z3, duże koło zębate z4 (niezależnie łożyskowane względem koła z2), które jest sztywno związane z kołem wyjściowym (stołem pomiarowym) stanowiska.

Oba silniki połączone są do wspólnego sterownika układu zasilania, w wyniku czego oba silniki poruszają się z jednakową prędkością kątową, a poprzez ich szeregowe połączenie uzwojeń osiąga się te same wartości płynących prądów w odpowiednich uzwojeniach silników, co pozwala na otrzymanie zbliżonych wartości chwilowych momentów oraz chwilowych wartości prędkości wirników silników napędzających.



Rys.5. Schemat poglądowy stanowiska przeciwbieżnego.

Jednakże ze względu na tryb pracy silników skokowych i przekładni mechanicznych ruch tego stołu nie jest gładki - występują skoki - szczególnie dla bardzo małych prędkości.

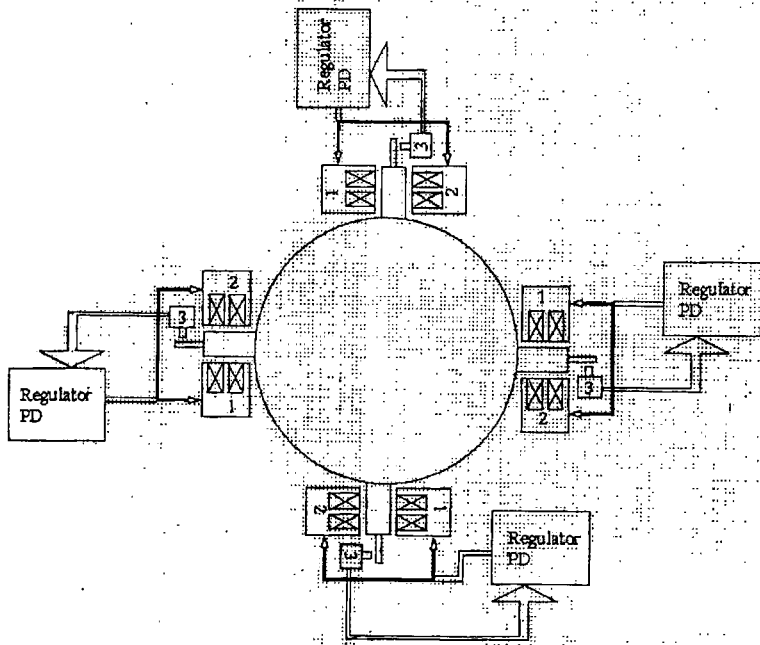
W pracy dyplomowej [19] zaproponowano zawieszenie na istniejącym stole dodatkowej platformy, której ruch będzie wygładzany przez aktywny tłumik drgań skrętnych (rys. 6). Tłumik ten jest aktywnym zawieszeniem magnetycznym, który działa jak filtr dolnoprzepustowy o bardzo wąskim paśmie przenoszenia. Badania symulacyjne wykazały, że dla wymuszenia losowego generowanego przez ruch pierwotnego stołu amplituda drgań skrętnych dodatkowej platformy małe o cztery rzędy wielkości.

W celu zapewnienia współosiowości stołu ze stabilizowaną platformą należy użyć takiej ilości siłowników by zapewnić stabilizację w dwóch prostopadłych osiach wykorzystując 2, 3 lub 4 siłowniki np. jak na rys.6.

7. TURBINOWE SILNIKI ODRZUTOWE

Jeden z największych problemów konstrukcyjnych sprawiają węzły łożyskowe w części gorącej turbinowych silników odrzutowych (w pobliżu komory spalania i turbiny). W wysokich temperaturach łożyska ulegają przyspieszonemu zużyciu oraz ich smarowanie zazwyczaj odbywa się układzie otwartym, tzn. podgrzany olej jest upuszczany do atmosfery.

Wielkie koncerny przemysłu silnikowego (General Electric, Royce Rolls) badają więc możliwość zastąpienia klasycznych łożysk tocznych łożyskami magnetycznymi. Pierwsze wyniki badań zostały opublikowane w pracach [20], [21]. Oczywiście takie łożyska będą miały zastosowania również w innych maszynach cieplnych [20].



Rys.6. Układ czterech siłowników zapewniających stabilizację względem dwóch osi. Oznaczenia: 1,2 – elektromagnesy, 3 – czujnik przemieszczenia.

LITERATURA

- [1] Muszyńska A.: *Modal Testing of Rotor/Bearing Systems*. Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, Vol.1, No 3, July 1986.
- [2] Gosiewski Z., Muszyńska A.: *Dynamika maszyn wirnikowych*. Skrypt Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Koszalin, 1992.
- [3] Forch P., Gahler C., Nordmann R.: *AMB System for Rotordynamic Experiments: Calibration Results and Control*. Proc. 5th International Symposium on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, 1996, pp.171-178.
- [4] Gahler C., Forch P.: *A Precise Magnetic Bearing Exciter for Rotordynamic Experiments*. Proc. 4th International Symposium on Magnetic Bearings, ETH Zurich, 1994, pp.193-200.
- [5] Bischel J.: *Beitrage zum lagerlosen Elektromotor*, Dissertation, ETH Zurich, 1990.
- [6] Chiba A., Rahman A, and Fukao T.: *Radial Force in a Bearingless Reluktance Motor*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No.2, March 1991, pp.786-791.
- [7] Ohishi T., Okada Y., Miyamoto S.: *Levitation Control of IPM Type Rotating Motor*. Proc. Fifth Int. Symposium on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, 1996, pp.327-332.

- [8] Mori S., Satoh T., Ohsawa M.: *Experiments on Bearingless Synchronous Reluctance Motor with Load*. Proc. Fifth Int. Symposium on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, 1996, pp.339-343.
- [9] Schob R., Barletta N.: *Principle and Application of a Bearingless Slice Motor*. Proc. Fifth Int. Symposium on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, 1996, pp.313-318.
- [10] Gempp T., Schob R.: *Design of Bearingless Canned Motor Pump*. Proc. Fifth Int. Symposium on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, 1996, pp.333-338.
- [11] Mueller R., Bleuler H., Schlaepfer U., Mathijs van der Meer: *Active Micro Motor Bearing*. Proc. Fifth Int. Symposium on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, 1996, pp.401-404.
- [12] Harmoza R.: *Projekt wstępny bezsilnikowego giroskopu prędkościowego z wirnikiem łożyskowanym magnetycznie*. Praca magisterska, WAT Warszawa, 1997.
- [13] Bleuler H., Kawakatsu H.: *Micromachined Active Magnetic Bearings*. Proc. 4th International Symposium on Magnetic Bearings, ETH Zurich, 1994, pp.349-352.
- [14] Grzegorzczak T.: *Opracowanie modelu i badanie przyspieszeniomierza lotniczego z zawieszoną magnetycznie masą pomiarową*. Praca doktorska, WAT, Warszawa, 1998
- [15] Gosiewski Z.: *Łożyska magnetyczne dla maszyn wirnikowych; Sterowanie i badanie*. Monografia z serii "Biblioteka Naukowa Instytutu Lotnictwa", 1999.
- [16] Gosiewski Z., Falkowski K.: *Two-Axial Gyroscope with Magnetically Supported Rotor*. Proc. Fifth International Symposium on Magnetic Bearings, Kanazawa, Japan, August 1996, pp. 65-70.
- [17] Gosiewski Z., Grzegorzczak T., Falkowski K.: *Navigational Instruments with Magnetically Suspended Inertial Masses*. Proc. Conference ISROMAC-6, Honolulu, February 1996.
- [18] Dulewicz W., Szelmanowski A., Raczyński E.: *Stanowisko przeciwbieżne do wytwarzania małych prędkości kątowych*. Sprawozdanie nr 2/422/95. Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Warszawa 1995.
- [19] Mazurek G.: *Projekt koncepcyjny stołu obrotowego do badań giroskopów*. Praca magisterska, WAT Warszawa, 1997.
- [20] Ohsawa M., et al: *High-Temperature Blower for Molten Carbonate Fuel Cell Supported by Magnetic Bearings*. Proc. 6th International Symposium on Magnetic Bearings, Cambridge, USA, 1998, pp.32-41.
- [21] Field R.J., Iannello V.: *A Reliable Magnetic Bearing System*. Proc. 6th International Symposium on Magnetic Bearings, Cambridge, USA, 1998, pp.42-51.