

Zdzisław GOSIEWSKI¹, Krzysztof FALKOWSKI¹, Bronisław TOMCZUK², Jan ZIMON²

¹POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, KATEDRA TECHNIK AUTOMATYZACJI

²POLITECHNIKA OPOLSKA, KATEDRA AUTOMATYZACJI I DIAGNOSTYKI UKŁADÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Obliczenia elektromagnetyczne i weryfikacja pomiarowa wybranych parametrów aktywnego łożyska magnetycznego

Prof. Zdzisław GOSIEWSKI

Ukończył Politechnikę Gdańską (1974), doktoryzował się w Instytucie Podstawowych Problemów PAN (1981), a habilitował na Politechnice Warszawskiej, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych (1990). Tytuł profesora nauk technicznych uzyskał w 1999r. Specjalizuje się w mechatronice, a w szczególności zajmuje się sterowaniem ruchem i drganiami, identyfikacją i diagnostyką maszyn wirnikowych. Od kilkunastu lat prowadzi również badania w zakresie nawigacji obiektów ruchomych. Jest autorem i współautorem 6-ciu książek, około 150 artykułów i referatów. Wypromował 6-ciu doktorów nauk technicznych.



e-mail: gosiewski@post.pl

Dr inż. Krzysztof FALKOWSKI

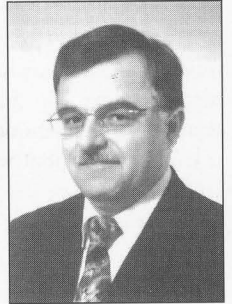
Jest absolwentem Wojskowej Akademii Technicznej (1993). Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 1999r. Zajmuje się badaniem i projektowaniem złożonych systemów mechatronicznych, teorią sterowania i cyfrowym przetwarzaniem sygnałów. Specjalizuje się w sterowaniu układów mechatronicznych ze szczególnym uwzględnieniem łożysk magnetycznych. Jest współautorem i autorem 28 publikacji poświęconych przede wszystkim aktywnym zawieszonym magnetycznym.



e-mail: kfalk@poczta.onet.pl

Dr hab. inż. Bronisław TOMCZUK

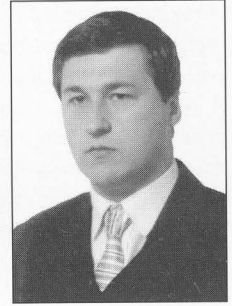
Od 1996 profesor nadzwyczajny w Politechnice Opolskiej, Wydział Elektrotechniki i Automatyki. Prace w dziedzinie komputerowego modelowania i weryfikacji pomiarowej pola elektromagnetycznego w celu optymalizacji konstrukcji układów transformatorowych i elektromechanicznych. Doktorat i habilitacja na Wydz. Elektrotech. i Elektron. Pol. Łódzkiej. Biografia zawodowa zamieszczona w "Who's Who in the World". Ponad 80 publikacji w renomowanych czasopismach zagr. i krajowych jak: IEEE Trans. on Magn. (USA), Compel (Londyn), Electrical Engineering (Berlin) i krajowych jak Archiwum Elektrotechniki, Przegląd elektrotechniczny, Energetyka, Członek SEP, PTETIS, Compumag Society (Londyn).



e-mail: tomczuk@po.opole.pl

Mgr inż. Jan ZIMON

Ukończył studia magisterskie w roku 2002 na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Pol. Opolskiej. Obecnie student studiów doktoranckich. Zajmuje się komputerowym modelowaniem i weryfikacją pomiarową układów transformatorowych i elektromechanicznych. Jego praca naukowo-badawcza jest związana z modelowaniem numerycznym systemu zawieszonych elektromagnetycznych. Jest prezesem Koła Naukowego ELEDYN działającego przy Katedrze Automatyki i Diagnostyki Układów Elektromechanicznych Politechniki Opolskiej.



e-mail: jz@po.opole.pl

Streszczenie

W niniejszej pracy wykonano obliczenia łożyska magnetycznego typu LM 48/90/40, które było wykonane w WAT. Przedstawiono geometrię konstrukcji tego łożyska oraz wyniki analizy numerycznej pola magnetycznego, które zweryfikowano pomiarowo. Przedstawiono również wyniki badań eksperymentalnych dla stanów niustalonych pracy siłownika elektromechanicznego.

Abstract

A paper presents the project of magnetic bearing LM 48/90/40. This bearing was made in the Military University of Technology in Warsaw. There is presented a construction, numerical analysis and an experimental verification of magnetic bearing. For an electromagnetic actuator of the magnetic bearing shows frequency response (Bode Diagram) and trajectory of rotor in a bearing plane.

Słowa kluczowe: Łożyska magnetyczne, sterowanie, obliczenia polowe

Keywords: magnetic bearing, control, field computing .

1. Wstęp

Podstawowym problemem łożyskowania wirników jest tarcie występujące między współpracującymi parami kinematycznymi. Konsekwencją tarcia jest wydzielanie się znacznych ilości ciepła oraz zużywanie współpracujących elementów, a tym samym zużywanie (niszczenie) współpracujących elementów. Większość podejmowanych przez konstruktorów działań sprowadzała się do zmniejszenia tarcia w łożyskach. Drugim poważnym problemem jest zbudowanie łożysk pracujących przy bardzo dużych prędkościach obrotowych, co jest niezmiernie istotne przy obróbce powierzchni w technice obróbki High Speed Machining HSM lub High Speed Cutting HSC.

Łożysko magnetyczne, jako układ otwarty, zaliczane jest do grupy układów strukturalnie niestabilnych, czyli tych, które nie mogą stabilnie pracować bez ingerencji regulatorów zapewniających im sztucznie stabilność. Proces projektowania łożyska magnetycznego oraz dostrojenie regulatora do siłownika łożyska magnetycznego jest procesem złożonym wymagającym zespołu pracowników z takich dziedzin jak elektromechanika, automatyka, elektronika i in-

formatyka. Dlatego przygotowanie typoszeregów gotowych łożysk magnetycznych dobranych do zadanych maszyn wirujących znacznie ułatwia wdrożenie tego typu napędów.

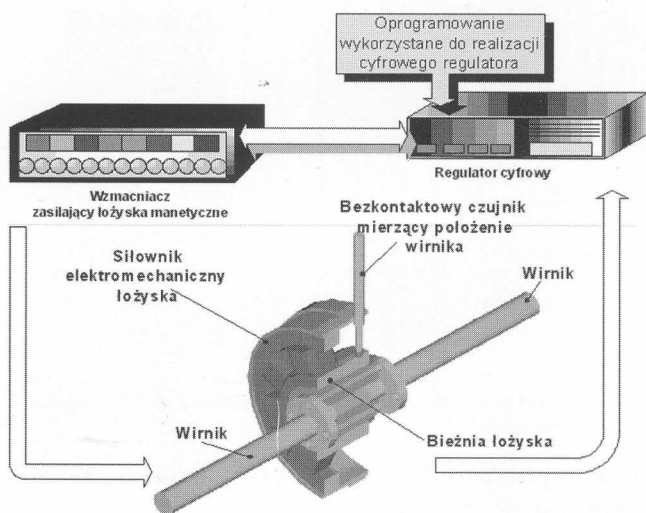
Przyczynkiem do opracowania typoszeregu łożysk magnetycznych w kraju było wykonanie prototypu łożyska magnetycznego LM 48/90/40, które jest przeznaczone do generowania stosunkowo dużych sił elektromagnetycznych (o wartościach maksymalnych do 400 N). Łożysko to zostało zaprojektowane w Zakładzie Awioniki WAT [5]. Przy projektowaniu tego łożyska skupiono się na opracowaniu algorytmu projektowania łożysk. Uwzględniono adaptacyjne prawo sterowania zależne od warunków pracy oraz systemu autodiagnostycznego weryfikującego parametry pracy łożyska i łożyskowanego wirnika.

Ze względu na potrzebę dostosowania łożyska do zmieniających się warunków pracy opracowano metodę polowego obliczenia parametrów elektromagnetycznych. W niniejszej pracy wykonano obliczenia łożyska magnetycznego typu LM 48/90/40, które było wykonane w WAT. Przedstawiono geometrię konstrukcji tego łożyska oraz wyniki analizy numerycznej pola magnetycznego, które zweryfikowano pomiarowo. Przedstawiono również wyniki badań eksperymentalnych dla stanów niustalonych pracy siłownika elektromechanicznego.

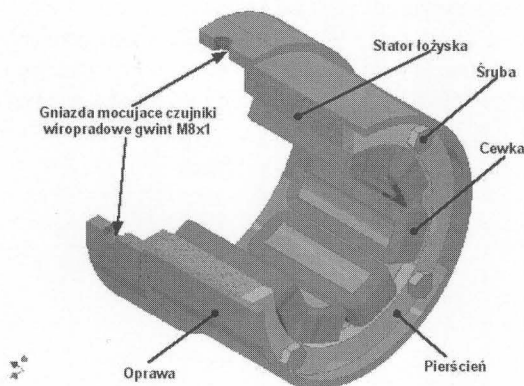
2. Budowa siłownika elektromechanicznego aktywnego łożyska magnetycznego LM 48/90/40

Na rysunku 1 przedstawiono strukturę łożyska magnetycznego. Zgodnie z podanym poniżej opisem, do konstrukcji łożyska zalicza się ferromagnetyczną bieżnię, która znajduje się na łożyskowanym wirniku (rys.1). Bieżnia ta jest częścią składową głównego elementu elektromagnetycznego jakim jest wał łożyska. Indukowanie się prądów wirowych, w obracającym się z dużą prędkością wirniku, jest zjawiskiem niekorzystnym w systemach łożyskowania magnetycznego. Zjawisku temu można przeciwdziałać poprzez wykonanie tej bieżni z pakietów blach transformatorowych.

Łożysko magnetyczne LM-48/90/40 generuje siły elektromagnetyczne o wartościach dochodzących do 400 N. Jest ono przeznaczone



Rys. 1. Struktura łożyska magnetycznego.

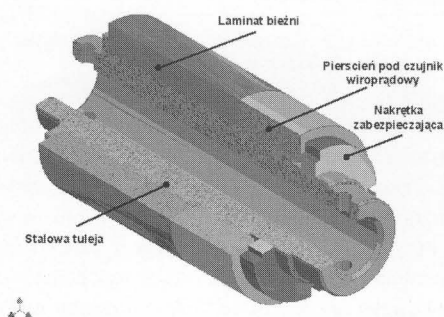


Rys. 2. Konstrukcja łożyska LM_48/90/40.

do łożyskowania wirników o średnicy do 47,5 mm. Średnica zewnętrzna wynosi 96 mm. Maksymalny prąd, który przepływa przez cewki elektromagnesów wynosi 8 A. Stator łożyska wykonano z zimnowalcowanych, krzemowych blach transformatorowych o grubości 0,3 mm (rys. 2). Średnica wewnętrzna siłownika odpowiada średnicy wewnętrznej łożyska, natomiast średnica zewnętrzna jest równa 90 mm. Podstawowe wymiary siłownika podano w tabeli 1.

Tab. 1. Podstawowe wymiary łożyska LM-48/90/40

Parametr	Wartość
Średnica wewnętrzna	$d_1 = 48$ mm
Średnica zewnętrzna	$d_2 = 96$ mm
Szerokość nabiegownika	$a = 9,36$ mm
Wysokość jarzma łożyska	$h_j = 9,36$ mm
Wysokość nabiegownika	$h_N = 11,45$ mm
Długość łożyska	$b = 40$ mm
Pole przekroju nabiegownika	$A = 374,4$ mm ²



Rys. 3. Bieżnia łożyska magnetycznego przeznaczona do łożyskowania wirników giętkich.

Na statorze umieszczono osiem cewek (po 30 zwojów każda), wykonanych z drutu nawojowego DNE 155 o średnicy 1,2 mm. Stator z cewkami elektromagnesów umieszczono w aluminiowej obudowie. Obudowa ta posiada nagwintowane otwory M8x1 przeznaczone do mocowania wiroprowadowych czujników mierzących położenie wirnika w szczelinie powietrznej (rys. 2). Podstawowe parametry elektryczne i mechaniczne podano w tabeli 2.

Tab. 2. Parametry elektryczne i mechaniczne łożyska LM-48/90/40 [5]

Parametr	Symbol	Wartość
Maksymalna siła elektromagnetyczna generowana przez siłownik łożyska	F_{max}	400 N
Maksymalny prąd płynący przez cewki	i_{max}	8 A
Liczba zwojów cewki elektromagnetycznej	N	60
Stała obliczeniowa łożyska	K	$1,69 \cdot 10^{-6}$ Nm ² /A ²

3. Model numeryczny łożyska magnetycznego

Wykonano dwa modele matematyczne łożyska magnetycznego LM-48/90/48: model dwu- i trójwymiarowy. Model 3D analizowano w programie Elektra komercyjnego pakietu Opera 3D [7], zaś model 2D wykonano w pakiecie FEMM [8].

3.1. Polowy model 3D badanego łożyska magnetycznego

W celu analizy polowej układu łożyska magnetycznego wykonano 3-wymiarowy model obliczeniowy z wykorzystaniem pakietu Opera 3D. Program ELEKTRA pakietu OPERA 3D wykorzystuje kombinację potencjałów magnetycznych skalarnych i potencjału magnetycznego wektorowego [6]. Dla ośrodków przewodzących prądy wirowe wprowadza się potencjał wektorowy, na podstawie którego oblicza się rozkład pola magnetycznego. W obszarach tych rozwiązywane są równania Maxwella:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\vec{J} = \gamma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

γ - przewodność elektryczna,
 \vec{v} - prędkość przemieszczania się pola magnetycznego względem układu. W analizowanym układzie prędkość $\vec{v} = 0$.

Przy założeniu, że $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ oraz $\vec{B} = \mu \vec{H}$, na podstawie zależności (1-3) otrzymuje się:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} = -\gamma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V \right) \quad (4)$$

Uwzględniając własność potencjału wektorowego \vec{A} ,

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad (5)$$

otrzymuje się równanie:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - \nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \cdot \vec{A} + \gamma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V \right) = 0 \quad (6)$$

Program ELEKTRA z pakietu Opera-3D rozwiązuje oprócz równania (6) także równanie dotyczące obszaru przewodzącego prądy wirowe:

$$\nabla \cdot \gamma \nabla V + \nabla \cdot \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

W obszarze przewodzącym, w którym analizuje się prądy wirowe, zadano potencjał wektorowy [7]. W podobnym obszarze otaczającym ten obszar zadano potencjał totalny ψ .

W obszarze z zadaniem potencjałem totalnym, natężenie pola magnetycznego H określone jest zależnością:

$$\vec{H} = \vec{H}_m + \vec{H}_e + \vec{H}_s \quad (8)$$

gdzie:

H_m - natężenie pola magnetycznego związanego z wektorem magnetyzacji,

H_e - natężenie pola magnetycznego pochodzącego od prądów wirowych

H_s - natężenie pola magnetycznego pochodzącego od cewki

$$\vec{H}_s = \int_{\Omega_j} \frac{\vec{J} \times \vec{R}}{|\vec{R}|^3} d\Omega_j \quad (9)$$

W pozostałych podobzariach, określa się zmienną ϕ , która jest zredukowanym magnetycznym potencjałem skalarnym, zdefiniowanym jako:

$$\vec{H} = \vec{H}_s - \nabla\Phi \quad (10)$$

Uwzględniając natężenie pola H_s , obliczone z prawa Biota-Savarta-Laplace'a, z powyższego wyrażenia można obliczyć natężenie pola w nieprzewodzących i niemagnetycznych materiałach.

Ze względu na symetrię geometryczną łożyska, analizowano jedynie $1/2$ modelu geometrycznego. Z uwagi na małą wartość indukcji magnetycznej, w analizowanym modelu matematycznym pominięto straty histerezowe w żelazie. Natomiast, z uwagi na zastosowanie pakietowanego siłownika łożyska magnetycznego oraz stosunkowo niską prędkość obrotową wirnika pominięto znikomą wpływ prądów wirowych na zasadnicze pole siłownika.

Obszar obliczeniowy zdyskretyzowano 124924 elementami prostopadłociennymi, zagęszczając siatkę w obszarach, w których przewidyje się dużą zmianę wartości indukcji magnetycznej, oraz w obszarach na granicy środowisk. Na zewnętrznych powierzchniach obszaru obliczeniowego założono zerowy warunek brzegowy Dirichleta.

3.2. Polowy model dwuwymiarowy (2D) badania łożyska magnetycznego

W pakiecie FEMM [8] utworzony został model 2-wymiarowy, odpowiadający płaszczyźnie podstawowej modelu 3D. Algorytm programu FEMM oparty jest na zastosowaniu Metody Elementów Skończonych w ujęciu dwuwymiarowym. W programie rozwiązywane jest równanie dla wektorowego potencjału magnetycznego \vec{A} w postaci:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \gamma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{J}_o \quad (11)$$

gdzie J_0 reprezentuje gęstość prądu, wymuszającego pole wzbudzające prądy wirowe.

Rozwiązanie równania (11) pozwala na wyodrębnienie części rzeczywistej zespolonego potencjału wektorowego \vec{A} , która jest obliczana z zależności:

$$\vec{A}_1 = \text{Re} [\vec{A}(\cos \omega t + j \sin \omega t)] = \text{Re} [\vec{A}e^{j\omega t}] \quad (12)$$

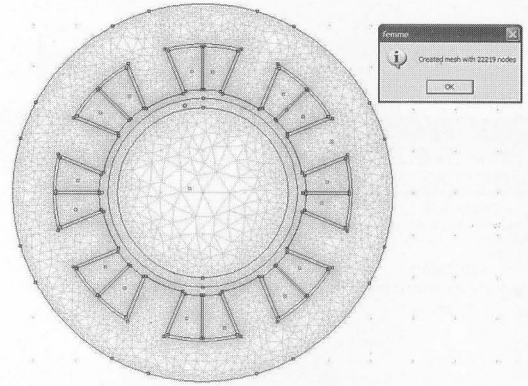
oraz części urojonej potencjału wektorowego \vec{A} obliczanej z zależności:

$$\vec{A}_2 = \text{Im} [\vec{A}(\cos \omega t + j \sin \omega t)] = \text{Im} [\vec{A}e^{j\omega t}] \quad (13)$$

Tak więc, równanie (11) jest rozwiązywane zarówno dla składowej rzeczywistej jak i również urojonej potencjału wektorowego

Wykonując model 2D zakłada się brak wpływu efektów krańcowych na rozkład pola magnetycznego

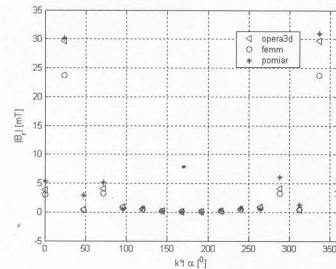
Układ zdyskretyzowano 44068 elementami trójkątnymi. Fragment siatki dyskretyzacyjnej przedstawiono na rysunku 4. Podobnie jak w przypadku modelu 3D, na brzegach obszaru obliczeniowego zadano zerowe warunki Dirichleta.



Rys. 4. Przekrój poprzeczny łożyska magnetycznego i jego dyskretyzacja w przestrzeni 2D.

3.3. Weryfikacja obliczonego rozkładu pola magnetycznego

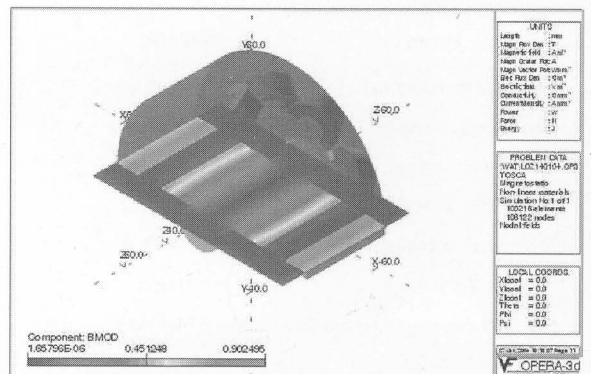
Wykonano weryfikację pomiarową indukcji magnetycznej siłownika łożyska magnetycznego zasilając odpowiednie uzwojenia. Pomiary wykonano teslometrem F.W.BELL 4048. W czasie pomiaru wał był wyjęty ze statora. Wyniki pomiarów porównano z wynikami obliczeń numerycznych dwu- i trój- wymiarowymi, co przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Rozkład modułu składowej B_r indukcji magnetycznej w odległości 2mm od zębów statora.

Wykonano dodatkowe obliczenia (dla modelu 3D) zakładając skończoną długość wirnika. Założono, że długość ta jest większa od powierzchni nośnej statora modelowanego łożyska magnetycznego. Założono prąd płynący w cewkach $I = 2A$.

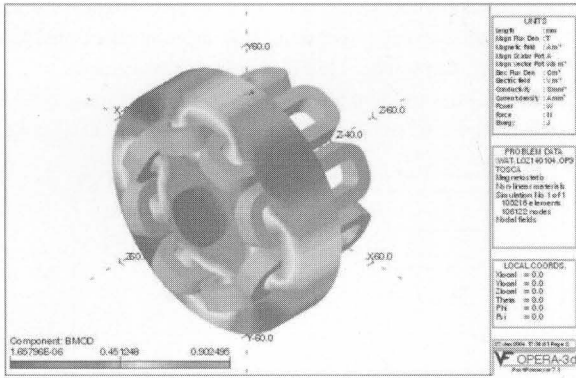
Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wyniki obliczeń w postaci map modułów indukcji magnetycznej B_{mod} :



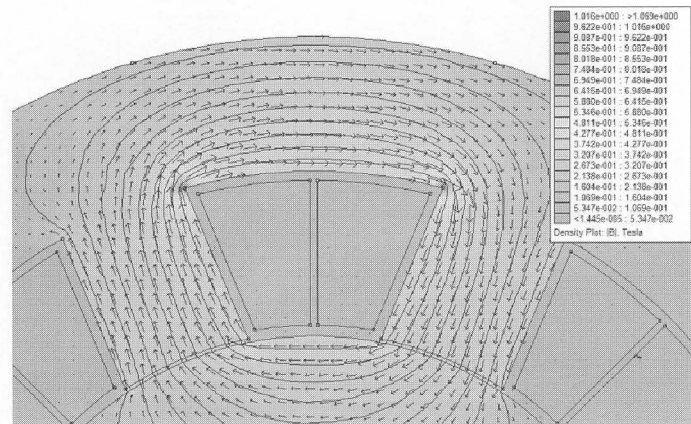
Rys. 6. Mapa modułu indukcji magnetycznej przekroju łożyska magnetycznego w płaszczyźnie XY

Na podstawie rysunku 6 można przyjąć, że część strumienia rozproszenia łożyska magnetycznego, związanego z wystającą z siłownika częścią wału jest znikoma, i można ją pominąć w dalszych obliczeniach. Dlatego uproszczenia stosowane w modelu 2-wymiarowym również umożliwiają poprawną analizę łożyska magnetycznego. Przykładowo, obraz pola wokół jednej cewki statora przedstawiono na rys. 8.

Na przedstawionej przestrzennej mapie modułu indukcji magnetycznej (rys. 7) widać, że w przestrzeniach między elektromagnetykami indukcja magnetyczna przyjmuje wartości minimalne. Pozwa-



Rys. 7. Przestrzenna mapa modułu indukcji magnetycznej przekroju łożyska magnetycznego.



Rys. 8. Mapa modułu indukcji magnetycznej jednego elektromagnesu łożyska magnetycznego wraz z wektorami indukcji magnetycznej

la to stwierdzić, że występujące sprzężenia między cewkami elektromagnesów są pomijalnie małe. Zatem do obliczeń dynamiki łożyska magnetycznego LM-48/90/40 można pominąć indukcyjności wzajemne między cewkami elektromagnesów.

W celu weryfikacji pomiarowej modelu matematycznego, przeprowadzono również obliczenia indukcyjności cewek siłownika (LM 48/90/40) z wimikiem umieszczonym wewnątrz statora. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 3. W modelu założono, że wszystkie cewki elektromagnesów są jednakowe. Dlatego też wykonano obliczenia indukcyjności dla jednej cewki siłownika. Obliczoną wartość indukcyjności porównano z wartościami zmierzonymi, które (ze względu na niedokładności wykonania statora oraz decentryczność wimika) są różne.

Tab. 3.

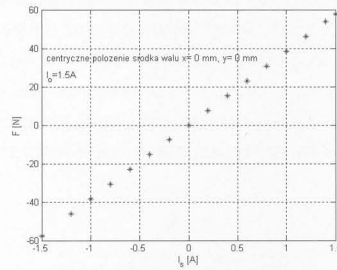
Model 3D	Model 2D	Indukcyjność rzeczywista [5]
3,05 mH	3,6mH	cewki górna $L_{z+} = 3,17$ mH cewki dolna $L_{z-} = 3,11$ mH cewki prawa $L_{y+} = 2,45$ mH cewki lewa $L_{y-} = 3,4$ mH

Wyniki pomiarów indukcyjności cewki górnej i dolnej są zbliżone, ponieważ możliwe było dokładne, współosiowe ustawienie wału względem cewki górnej i dolnej statora.

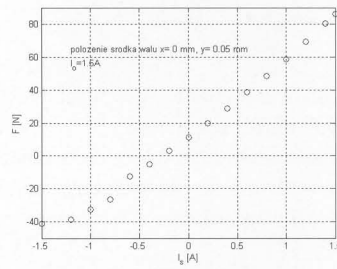
Rozbieżności między indukcyjnościami cewek prawej i lewej wynikają z trudności utrzymania wału w punkcie centralnym siłownika łożyska magnetycznego podczas pomiaru indukcyjności. Jednakże, zbliżone wartości uzyskane z obliczeń i wyniki pomiarów pozwalają na stwierdzenie, że oba założone połowe modele obliczeniowe są poprawne. Wyniki obliczeń 3D są w analizowanym przypadku bardziej zbliżone do pomiarów, ponieważ długość wimika jest większa od długości statora. W tym przypadku oddziaływanie pola magnetycznego odcinków czołowych cewek statora jest znaczące.

Ponadto wykonano obliczenia siły działającej na wał łożyska magnetycznego. Obliczenia przeprowadzono z użyciem programu FEMM.

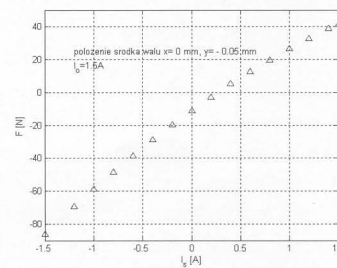
Z wykresów przedstawionych na rysunkach 9a - c) wynika, że zależność siły działającej na łożyskowy wał zmienia się niemal liniowo w całym zakresie prądu sterowania.



Rys. 9a. Obliczone wartości siły działającej na wał w zależności od wartości prądu sterowania. (centryczne położenie środka wału)



Rys. 9b. Obliczone wartości siły działającej na wał w zależności od wartości prądu sterowania. (przesunięcie środka w wału w górę, x=0, y=0,05mm)



Rys. 9c. Obliczone wartości siły działającej na wał w zależności od wartości prądu sterowania. (przesunięcie środka w wału w dół x=0, y=-0,05mm)

Na podstawie charakterystyki $F = f(I_s)$ przedstawionej na rysunku 9a) można wyznaczyć wartość sztywności prądowej z zależności

$$k_i = \frac{\Delta F}{\Delta I_s} \Big|_{x_0}$$

Należy podkreślić, że współczynnik ten dla położenia centrycznego ma niemal stałą wartość. Przesunięcie środka wału o 50μm przy stałym prądzie sterowania powoduje wzrost siły o 12,4 N (Rys. 9a i b). Pozwala to na wyznaczenie sztywności przemieszczeniowej łożyska magnetycznego z zależności:

$$k_x = \frac{\Delta F}{\Delta x} \Big|_{I=const}$$

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 4.

Tab. 4. Wartości współczynników sztywności

Obliczona sztywność prądowa	k_i	40,67 N/A dla $i_0=1,5$ A, $x_0=0,25$ mm
Obliczona sztywność przemieszczeniowa	k_x	$2,44 \cdot 10^5$ N/m dla $i_0=1,5$ A, $x_0=0,25$ mm

4. Badania eksperymentalne i symulacyjne łożyska magnetycznego LM 48/90/40

Do sterowania siłownikiem elektromechanicznym łożyska magnetycznego wykorzystany został regulator cyfrowy zrealizowany w module mikroprocesorowym SBC67, który wyposażony jest w procesor sygnałowy TMS320C6701 oraz w moduł wejść i wyjść analogowych. W procesorze zaimplementowany został algorytm sterowania regulatora typu PD i PID. Następnie łożysko poddano

badaniom eksperymentalnym i porównano je z symulacjami komputerowymi modelu łożyska, który opracowano na podstawie danych konstrukcyjnych łożyska magnetycznego LM 48/90/40.

Do opisu łożyska magnetycznego wykorzystano transmitancję między przemieszczeniem wirnika i wartością prądu zadanego. Zależnie od typu użytego regulatora transmitancja opisana jest zależnością: z regulatorem PD

$$G_{PD}(s) = \frac{k_0}{ms^2 + k_0 k_d s + k_0 k_p - k_x} \quad (14)$$

regulatorem PID

$$G_{PID}(s) = \frac{k_0 s}{ms^3 + k_0 k_d s^2 + (k_0 k_p - k_x) s + k_0 k_i} \quad (15)$$

gdzie:

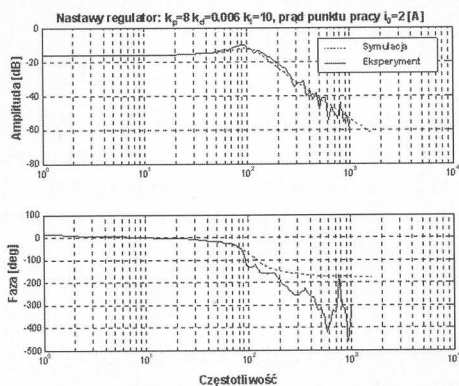
k_p , k_d , k_i - odpowiednio wzmocnienie w części proporcjonalnej, różniczkującej i całkującej regulatora,
 k_x - sztywność przemieszczeniowa siłownika elektromechanicznego,
 m - masa wirnika sprowadzona do płaszczyzny łożyskowania,
 k_0 - stała która uwzględnia wzmocnienia w torze sterowania łożyska:

$$k_0 = k_w k_k k_{cz} k_i$$

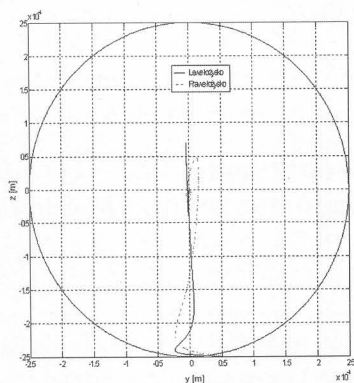
k_w - wzmocnienie zasilacza łożyska,
 k_k - wzmocnienie karty wyjść analogowych,
 k_i - sztywność prądowa siłownika,
 k_{cz} - wzmocnienie czujnika wiropędowego.

Na rysunku 10 przedstawiono charakterystykę częstotliwościową łożyska magnetycznego sterowanego przez regulator PID. Charakterystyki modelu i łożyska są bardzo zbliżone. Tym samym można przyjąć, że przyjęte założenia konstrukcyjne zostały spełnione.

Gdy prąd sterujący łożyska jest wyłączony, wirnik opiera się o dolny elektromagnes. Szczelina nad dolnym elektromagnesem posiada niewielką wartość, natomiast pod górnym elektromagnesem jest znacząca. Proces włączenia łożyska magnetycznego musi umożliwić wprowadzenie wirnika do punktu pracy. Na rysunku 11 przedstawiona jest trajektoria ruchu wirnika po włączeniu łożyska względem luzu promieniowego.



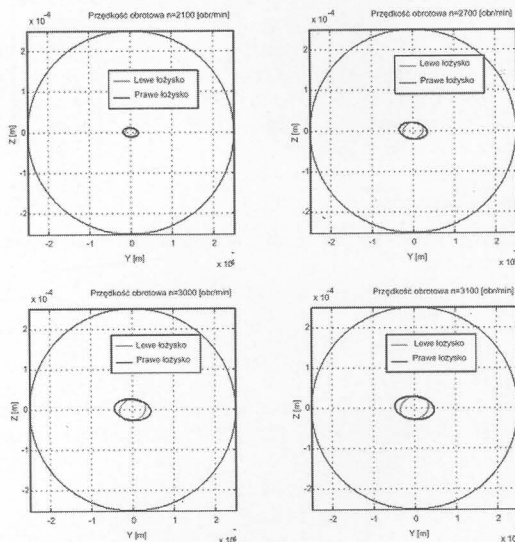
Rys. 10. Charakterystyka Bodego modelu (linia przerywana) i badanego łożyska magnetycznego (linia ciągła) z regulatorem PID.



Rys. 11. Trajektoria ruchu środka wirnika po włączeniu łożyska do pracy.

Promień okręgu odpowiada wielkości szczeliny powietrznej w punkcie pracy łożyska magnetycznego, natomiast wyznaczone linie przedstawiają ruch środka wirnika po włączeniu łożyska magnetycznego.

Trajektoria środka wirnika w lewej i prawej płaszczyźnie łożyskowania dla czterech prędkości obrotowych przedstawiona jest na rysunku 12.



Rys. 12. Trajektorie ruchu środka wirnika w odniesieniu do szczelin powietrznych dla wybranych prędkości obrotowych

5. Podsumowanie

Przedstawiony prototyp łożyska magnetycznego może zostać wykorzystany do budowy węzłów łożyskowych w maszynach wirnikowych, które przenoszą obciążenia promieniowe do 800 N (dwa promieniowe łożyska przy symetrycznym rozmieszczeniu masy wirnika).

Zarówno model dwu- jak i trójwymiarowy łożyska magnetycznego dają zbliżone wyniki obliczeń z wynikami pomiarów. Błędy między wynikami pomiarów a obliczeniami indukcji magnetycznej wynikają z błędów związanych z dyskretyzacją siatką elementów skończonych.

Opracowany algorytm projektowania elektromagnetycznych elementów siłownika elektromechanicznego jest obiecujący i pozwala na symulację parametrów w zależności od przemieszczenia wału łożyska, lub też w zależności od parametrów sterowania, np. prądów wzbudzenia cewek.

Urządzenia tj. wzmacniacze mocy, cyfrowy regulator oraz czujniki położenia zastosowane w analizowanym przypadku, mogą być wykorzystane do badania łożysk zasilanych prądem do 8 A i prędkościach obrotowych do 10000 obr/min.

6. Literatura

- [1] Gosiewski Z., Falkowski K., Sawicki Z.: Introduction to Smart Magnetic Bearings Design, 7th International Symposium on Magnetic Bearings, Zurich, 2000.
- [2] Gosiewski Z., Falkowski K.: „Wielofunkcyjne łożyska magnetyczne“ - Monografia, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Lotnictwa, Warszawa, 2003.
- [3] K. Falkowski: Opracowanie laboratoryjnego modelu giroskopu z magnetycznie zawieszonym wirnikiem i jego badanie, Rozprawa doktorska, Warszawa, 1999.
- [4] G. Schweitzer, A. Traxler, H. Bleuler: Magnetlager, Springer Verlag, Heidelberg, 1993.
- [5] Sprawozdanie z realizacji pracy badawczej Nr 7T07C03617: „Inteligentne“ łożyska magnetyczne, pod kierownictwem prof. Z. Gosiewskiego, Warszawa 2002.
- [6] K. J. Binns, P. J. Lawrenson, C. W. Trowbridge: "The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields", J. Wiley & Sons, Chichester, 1995.
- [7] OPERA - 3D, User Guide, Vector Fields Ltd, Oxford, 1999.
- [8] FEMM 4.0, User's Guide, Virginia, 2004.

Title: Electromagnetic calculation and experimental verification of selective parameters of magnetic bearing.

Artykuł recenzowany