Polowe wyznaczanie parametrów łożyska magnetycznego w przypadku różnych uzwojeń stojana

Bronisław Tomczuk, Jan Zimon, Dawid Wajnert

1. Wstęp

Problemy łożyskowania wysokoobrotowych maszyn elektrycznych należą do ważnych zagadnień naukowo-technicznych. W napędach pomp próżniowych, wysoko wydajnych obrabiarkach mechanicznych oraz w sprzęcie medycznym coraz większą rolę odgrywają łożyska magnetyczne. Wśród wielu konstrukcji łożysk magnetycznych najczęściej stosuje się takie, których własności ruchowe można kontrolować i zmieniać z wykorzystaniem zaawansowanych układów sterowania [3]. Są to tak zwane aktywne łożyska magnetyczne, które najczęściej pracują w symetrycznej konfiguracji czterech elektromagnesów. W konfiguracji tej strumienie magnetyczne, wzbudzane przez uzwojenia, tworzą cztery jednakowe elektromagnesy. Jednakże w wielu aplikacjach [1, 2] można spotkać rozwiązania konstrukcyjne oparte o trzy elektromagnesy. Dlatego też w pracy przedstawiono porównanie parametrów całkowych pola magnetycznego dla dwóch wariantów konstrukcyjnych łożysk: z trzema oraz czterema sekcjami uzwojeń. Siłowniki te zostały zbudowane w Katedrze Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Opolskiej, a wspólną cechą tych wariantów jest ten sam pakiet stojana.

2. Opis konstrukcji siłownika

Stojan oraz wirnik siłownika łożyska magnetycznego zbudowany jest z pakietu blach elektrotechnicznych M600-50A, których charakterystykę magnesowania przedstawiono na rys. 1. Stojan analizowanego łożyska posiada dwanaście symetrycznie rozmieszczonych cewek, natomiast każda cewka składa się z 40 zwojów. Cewki te w zależności od sposobu połączenia mogą



Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analizy parametrów siłownika łożyska magnetycznego dla dwóch konfiguracji uzwojeń stojana. Zaprezentowano uzyskane na drodze symulacji komputerowej rozkłady pola magnetycznego dla analizowanych wariantów. Wyznaczono i przedstawiono wykresy indukcyjności dynamicznej, siły magnetycznej, jak i sztywności prądowej oraz przemieszczeniowej w funkcji prądu sterującego oraz przemieszczenia wału. Matematyczne modelowanie rozkładu pola magnetycznego oparto na metodzie elementów skończonych (MES).

MAGNETIC FIELD PARAMETERS ESTIMATION FOR VARIOUS WINDINGS CONNECTION IN THE MAGNETIC BEARING

Abstract: In this work we compared the results of analyses for two kinds of windings connection in active magnetic bearing (AMB). The magnetic flux density of each active magnetic bearing is determined. The dynamic inductance, magnetic force as well as current and position stiffness as a function of control current and rotor position also have been calculated and presented. Mathematical modeling of magnetic field distribution was based on the finite element method (FEM).

być konfigurowane w 3, 4 lub 6 sekcji uzwojeń wzbudzających pole magnetyczne.

W pracy przeanalizowano dwa warianty konfiguracji uzwojeń:

wariant 1 – posiada trzy sekcje uzwojeń;

wariant 2 – posiada cztery sekcje uzwojeń.

W pierwszym wariancie konfiguracji połączeń cewek występują trzy sekcje uzwojeń rozmieszczonych symetrycznie na obwodzie stojana. Powoduje to powstanie trzech osi przesuniętych względem siebie o 120° (a, b, c), w kierunku których generowana jest siła magnetyczna (rys. 2 a). W tym wariancie prądy wymuszane w poszczególnych elektromagnesach określone są następująco:

$$i_1 = I_b + i_{ca} \tag{1 a}$$

$$i_2 = I_b + i_{cb} \tag{1 b}$$

$$i_3 = I_b + i_{cc} \tag{1 c}$$

gdzie: I_b – prąd bazowy; i_{ca} , i_{cb} , i_{cc} – prądy sterujące w osiach a, b, c.



W drugim wariancie cewki połączone są w taki sposób, że tworzą dwie osie, w kierunku których generowana jest siła magnetyczna (rys. 2 b).

Należy zwrócić uwagę, że w konfiguracji tej niesymetrycznie rozmieszczone są elektromagnesy. Oznacza to, że w osi *y* otrzymuje się cztery elektromagnesy, zaś w osi *x* tylko dwa. Wówczas podstawowe parametry łożyska w każdej z osi są różne. Jednakże pozwala to na tzw. "klasyczne" zasilanie łożyska magnetycznego, które polega na różnicowym sterowaniu sekcji pierwszego i trzeciego uzwojenia, jak również drugiego i czwartego – zgodnie z zależnościami:

$$i_1 = I_b + i_{cy} \tag{2 a}$$

$$i_2 = I_b + i_{cx} \tag{2 b}$$

$$i_3 = I_b - i_{cy} \tag{2 c}$$

$$i_4 = I_b - i_{cx} \tag{2 d}$$

gdzie: i_{cx} , i_{cy} – prądy sterujące w osiach x, y.

3. Model matematyczny

Model obliczeniowy aktywnego łożyska magnetycznego wykonano, wykorzystując Metodę Elementów Skończonych (MES). Zastosowanie pakietowanego stojana oraz wirnika do budowy siłownika znacznie ograniczyło wpływ prądów wirowych, dlatego też pominięto je w obliczeniach. Rozkład pola magnetycznego wyznaczono na podstawie analizy przekroju poprzecznego siłownika łożyska magnetycznego. W obszarze dyskretyzowanym siatką elementów skończonych wyznaczono pole magnetyczne na podstawie nieliniowego równania Poissona dla składowej A_z potencjału wektorowego, które w układzie płasko-równoległym przyjmuje następującą postać [1]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \tag{3}$$

gdzie: $\mu(B)$ – przenikalność magnetyczna; A_z – wektorowy potencjał magnetyczny; J_z – gęstość prądu.

W obliczeniach uwzględniono nieliniową charakterystykę $\mu(B)$ magnesowania stali M600-50A, którą przedstawiono na rys. 1. Rozwiązanie równania (1) pozwala na wyznaczenie rozkładu potencjału wektorowego \vec{A} w analizowanym obszarze, na podstawie którego obliczono składowe wektora indukcji magnetycznej \vec{B} zgodnie ze wzorem [1]:

$$\vec{B} = \frac{\partial A_z}{\partial y} \vec{l}_x - \frac{\partial A_z}{\partial x} \vec{l}_y$$
(4)

gdzie \vec{l}_x , \vec{l}_y to wektory jednostkowe w płasko-równoległym układzie współrzędnych.

Do parametrów całkowych pola magnetycznego należy strumień magnetyczny skojarzony z poszczególnymi uzwojeniami oraz siła magnetyczna działająca na wirnik. Strumień magnetyczny wyznaczono na podstawie zależności [1]:

$$\Psi = \sum_{k=1}^{N} \iint_{S} \vec{B} \cdot d\vec{S}$$
⁽⁵⁾

gdzie Ψ to strumień magnetyczny skojarzony z uzwojeniem o N zwojach, a S to powierzchnia ograniczona tym uzwojeniem.

Siłę magnetyczną działającą na wał siłownika wyznaczono korzystając z tensora naprężeń Maxwella, zgodnie ze wzorem [1]:

$$F = \frac{1}{2} \oint_{S} \left\{ \vec{H} (\vec{n} \cdot \vec{B}) + \vec{B} (\vec{n} \cdot \vec{H}) - \vec{n} (\vec{H} \cdot \vec{B}) \right\} d\vec{S}$$
(6)

gdzie: \vec{n} to wektor normalny do powierzchni całkowania, \vec{H} to wektor natężenia pola magnetycznego.

Do parametrów siłownika łożyska magnetycznego należą indukcyjność dynamiczna, sztywność prądowa oraz sztywność przemieszczeniowa. Indukcyjność dynamiczna określona jest jako pochodna strumienia magnetycznego Ψ względem prądu wymuszanego w danym uzwojeniu *i* [1]:

$$L_d = \frac{\partial \Psi}{\partial i} \tag{7}$$



Rys. 3. Fragment siatki dyskretyzacyjnej modelu

Sztywność prądowa k_i określa zmianę siły magnetycznej pod wpływem zmiany prądu sterującego dla stałego położenia wirnika [1]:

$$k_i = \frac{\partial F}{\partial i_c}\Big|_{p=const}$$
(8)

Natomiast sztywność przemieszczeniowa k_s odnosi się do zmiany siły w wyniku zmiany położenia wirnika w przypadku niezmiennego prądu sterującego [1]:

$$k_s = \frac{\partial F}{\partial p}\Big|_{i_s = const} \tag{9}$$

Dwuwymiarowy obszar obliczeniowy siłownika został dyskretyzowany przy pomocy ok. 60 tys. elementów skończonych pierwszego rzędu. Obliczanie siły z wykorzystaniem tensora naprężeń Maxwella wymaga zagęszczenia siatki w szczelinie powietrznej [1], dlatego też szczególną uwagę zwrócono na dyskretyzację modelu obliczeniowego w tym obszarze (rys. 3). Na zewnętrznych krawędziach obszaru obliczeniowego założono zerowe warunki brzegowe Dirichleta dla potencjału wektorowego \vec{A} .

4. Analiza pola w łożysku magnetycznym

W wyniku obliczeń polowych otrzymano rozkłady indukcji dla szeregu zadanych prądów płynących w uzwojeniach łożyska oraz położeń wirnika. Na rys. 4 a i 4 b przedstawiono rozkłady indukcji magnetycznej w siłowniku łożyska dla centralnego położenia wirnika prądu bazowego $I_b = 5$ A oraz prądu sterującego równego $i_{ca} = 5$ A dla konfiguracji trzech sekcji uzwojeń oraz $i_{cy} = 5$ A dla konfiguracji czterech sekcji uzwojeń. W przypadku trzech sekcji uzwojeń załączenie prądu sterującego powoduje nieznaczną zmianę rozkładu pola magnetycznego w siłowniku (rys. 4 a) oraz wygenerowanie w kierunku osi *a* siły o wartości 83 N. Natomiast w układzie konfiguracji czterech sekcji uzwojeń wymuszenie prądu sterowania powoduje zanik strumienia magnetycznego w trzecim elektromagnesie (rys. 4 b) oraz wygenerowanie siły w kierunku osi *y* równej 112 N.

W wyniku parametrycznej analizy pola magnetycznego wyznaczono parametry całkowe w zakresie pracy łożyska magnetycznego, czyli $p \in (-0,25 \text{ mm}, 0,25 \text{ mm})$ oraz $i_c \in (-5 \text{ A}, 5 \text{ A})$. Jednym z tych parametrów jest indukcyjność dynamicz-



- reklama

na uzwojeń. Na rys. 5 a i 5 b przedstawiono indukcyjność dynamiczną pierwszego elektromagnesu dla analizowanych konfiguracji uzwojeń stojana, natomiast na rys. 5 c przedstawiono indukcyjność dynamiczną drugiego elektromagnesu dla 2 wariantu konfiguracji uzwojeń.

W przypadku konfiguracji z trzema sekcjami uzwojeń indukcyjność dynamiczna jest taka sama dla wszystkich trzech elektromagnesów. Natomiast w przypadku konfiguracji z czterema sekcjami uzwojeń indukcyjność dynamiczna elektromagnesów 1 i 3 jest dwa razy większa w stosunku do elektromagnesów 2 i 4 (por. rys. 5 b i 5 c).

Kolejnym z parametrów całkowych pola jest siła działająca na wał łożyska magnetycznego. Charakterystyki siły dla obydwu konfiguracji uzwojeń różnią się co do kształtu i co do wartości. Należy zauważyć, że w przypadku pierwszego wariantu połączeń uzwojeń wykres siły jest niesymetryczny, a wartości zmieniają się w zakresie od F = -45 N do F = 145 N. W przypadku drugiego wariantu konfiguracji uzwojeń otrzymano wykres symetryczny, gdzie siły zmieniają się od wartości –170 N do 170 N dla osi *y* sterowania (rys. 6 b) oraz odpowiednio o połowę mniejsze sterowania w osi *x* (rys. 6 c).





napędy i sterowanie





a) w osi *a* dla wariantu 1; b) w osi *y* dla wariantu 2; c) w osi *x* dla wariantu 2

Na podstawie obliczeń siły wyznaczono wartości sztywności prądowych i przemieszczeniowych dla rozważanych konfiguracji siłowników (rys. 7 i 8).

Jak należało przypuszczać, w przypadku wariantu 2 uzwojeń siłownika otrzymano wykresy symetryczne zarówno dla sztywności prądowej, jak i przemieszczeniowej. Należy podkreślić, że dla łożyska z trzema sekcjami uzwojeń otrzymuje się większą zmienność wartości sztywności niż w siłowniku łożyska z czterema sekcjami uzwojeń.

6. Uwagi i wnioski

Budowa analizowanego łożyska magnetycznego pozwala na zrealizowanie kilku wariantów jego zasilania. Porównano konfiguracje z trzema i czterema sekcjami uzwojeń siłownika. Z punktu widzenia kosztów aplikacji konfiguracja z trzema sekcjami uzwojeń wydaje się być atrakcyjniejsza ze względu na mniejszą liczbę układów sterowania siłownikiem łożyska. Jednakże wadą tego rozwiązania jest istnienie silnych sprzężeń pomiędzy osiami sterowania, co utrudnia regulację położenia wału.

W przypadku konfiguracji z czterema sekcjami uzwojeń możliwe jest zaimplementowanie układu różnicowego zasilania łożyska. Zjawiskiem niekorzystnym takiej konfiguracji jest silna nieliniowość współczynników sztywności prądowej i przemieszczeniowej łożyska w funkcji prądu sterującego oraz przemieszczenia wirnika.

Literatura

- [1] ZIMON J.: Analiza pola i obliczanie parametrów aktywnego łożyska magnetycznego. Praca doktorska, Opole 2009.
- [2] PIŁAT A.: PD Control Strategy for 3 Coils AMB. The Tenth International Symposium on Magnetic Bearing, 21–23.08.2006, Szwajcaria.
- [3] SCHWEITZER G., MASLEN E.: *Magnetic Bearings, Theory, Design and Application to Rotating Machinery* Springer, Berlin 2009.
- [4] GOSIEWSKI Z., FALKOWSKI K., TOMCZUK B., ZIMON J.: Obliczenia elektromagnetyczne i weryfikacja pomiarowa wybranych parametrów aktywnego łożyska magnetycznego. "Pomiary. Automatyka. Kontrola", 10/2005, s. 12–16.

Praca współfinansowana z grantu badawczego nr NN510 533739 oraz ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego.

prof. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk, dr inż. Jan Zimon, mgr inż. Dawid Wajnert – Katedra Elektrotechniki Przemysłowej, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska, ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole, tel. 77-453 84 48 w. 148, b.tomczuk@po.opole.pl

artykuł recenzowany