

Bronisław Tomczuk, Jan Zimon, Dawid Wajnert
Politechnika Opolska

WPLYW POŁĄCZEŃ UZWOJEŃ BIEGUNÓW W AKTYWNYM ŁOŻYSKU MAGNETYCZNYM NA JEGO PARAMETRY ELEKTROMAGNETYCZNE

THE INFLUENCE OF WINDINGS CONNECTION IN ACTIVE MAGNETIC BEARING ON ITS ELECTROMAGNETIC PARAMETERS

Abstract: In this work we compared the results of analyses for two kinds of coil connection in active magnetic bearing (AMB). The magnetic flux of each magnetic poles of AMB is determined. Differences between the current and displacement stiffness for both coil configurations of the AMB are shown. Verification of the numerical model was executed by measurement of the coil inductance and the magnetic force acted on AMB shaft. A good agreement between results of numerical analysis and measurement verification has been achieved.

1. Wstęp

Problemy łożyskowania wysokoobrotowych maszyn elektrycznych należą do jednych z najważniejszych zagadnień naukowo-technicznych. W napędach pomp próżniowych, wysokowydajnych 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]. Tak zwane aktywne łożyska magnetyczne najczęściej spotyka się w symetrycznej konfiguracji czterobiegunowej, tzn. takiej, gdzie wyindukowane strumienie magnetyczne tworzą cztery jednakowe elektromagnesy podkowiaste. Jednakże w wielu opracowaniach [1], [2] można spotkać rozwiązania konstrukcyjne oparte o trójbiegunową konstrukcję aktywnego łożyska magnetycznego. W niniejszej pracy przedstawiono porównanie parametrów całkowitego pola magnetycznego dla łożysk 3 i 4 biegunowych (AMB12), zrealizowanych w Katedrze Elektrotechniki Przemysłowej na bazie tego samego pakietu blach stojana.

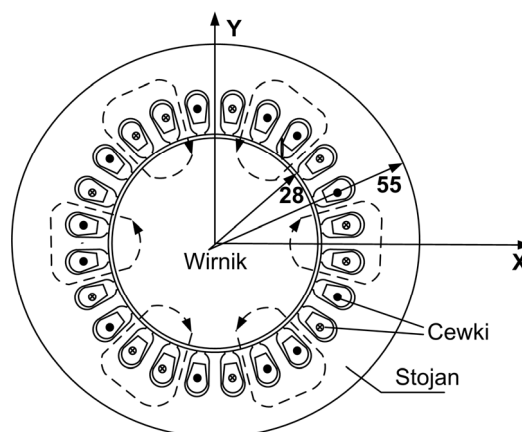
2. Opis konstrukcji silownika

Analizowane łożysko AMB12 posiada dwanaście cewek (o liczbie zwojów $N=40$), które w zależności od zastosowania i rodzaju połączenia oraz układu sterującego mogą być konfigurowane w 3, 4 lub 6 sekcji uzwojeń wzbudzających pole magnetyczne.

W pracy rozważano dwa warianty konfiguracji uzwojeń:

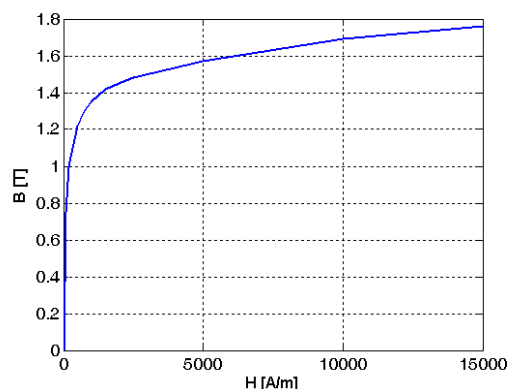
- wariant 1 – trzy sekcje uzwojenia,

- wariant 2 – cztery sekcje uzwojenia.



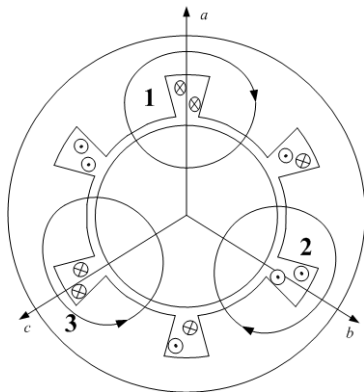
Rys. 1a. Przekrój aktywnego łożyska magnetycznego wraz z podstawowymi wymiarami

Pierwszy wariant, posiada trzy sekcje uzwojeń. Ich rozmieszczenie na obwodzie stojana wymusza przyjęcie trzech osi (A, B, C) „naciągu magnetycznego” wału łożyska. Osie te przesunięte są względem siebie o 120° , (Rys. 2a).

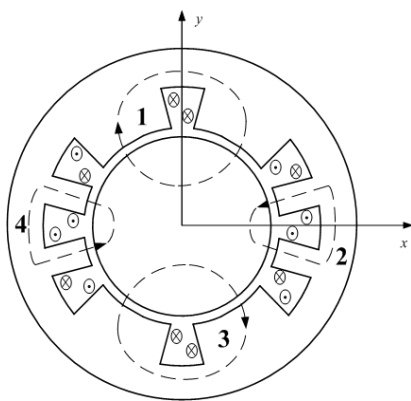


Rys. 1b. Charakterystyka magnesowania blach pakietu stojana i wirnika

a)



b)



Rys. 2. Warianty konfiguracji uzwojeń aktywnego łożyska magnetycznego:

a) wariant 1, b) wariant 2

Drugi wariant o konfiguracji uzwojeń jak na rysunku 2b dotyczy takiego połączenia cewek, w którym istnieją jedynie dwie osie naciągu magnetycznego. Należy zwrócić uwagę, że konfiguracja ta nie pozwala na symetryczne rozłożenie elektromagnesów w łożysku. Oznacza to, że w osi Y otrzymuje się cztery elektromagnesy, zaś w osi X tylko dwa, przeciwnie rozmieszczone. Wówczas, podstawowe parametry łożyska w każdej z osi sterowania są różne. Nie mniej jednak, pozwala to na tzw. „klasyczne” zasilanie łożyska magnetycznego, które polega na różnicowym sterowaniu sekcji górnej i dolnej jednego uzwojenia (zwanego pionowym), a także prawej i lewej (zwanego uzwojeniem poziomym). W wyniku tego otrzymuje się sumę lub różnicę prądu bazowego i sterowania:

$$i_g = i_{by} + i_{cy}, \quad i_d = i_{by} - i_{cy}.$$

3. Model matematyczny

Model obliczeniowy aktywnego łożyska magnetycznego wykonano wykorzystując Metodę Elementów Skończonych (MES). Z uwagi na

to, że stojan i bieżnia wirnika są pakietowane pominięto wpływ prądów wirowych. Rozkład pola magnetycznego wyznaczono na podstawie analizy w przekroju poprzecznym siłownika łożyska magnetycznego. W obszarze dyskretyzowanym siatką elementów skończonych rozwiązywane jest eliptyczne równanie różniczkowe cząstkowe względem wektorowego potencjału magnetycznego \vec{A} :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(\vec{B})} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (1)$$

gdzie: μ – przenikalność magnetyczna, \vec{B} – wektor indukcji pola magnetycznego, \vec{A} – wektorowy potencjał magnetyczny, \vec{J} – gęstość prądu.

W obliczeniach uwzględniono nieliniową charakterystykę $\mu(B)$ magnesowania stali M270-50A, (Rys. 1b). Rozwiązanie równania (1) pozwala na wyznaczenie nie tylko rozkładu pola, ale również parametrów całkowitego łożyska magnetycznego. Dotyczy to indukcyjności dynamicznej uzwojeń oraz sztywności prądowej i przemieszczeniowej [3]. Indukcyjność dynamiczną uzwojeń można obliczyć ze wzoru:

$$L_d = \frac{\partial \psi}{\partial i} = N \frac{\partial \Phi}{\partial i} = N \frac{\partial \left(\iint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \right)}{\partial i} \quad (2)$$

gdzie N jest liczbą zwojów uzwojenia, a Φ to strumień przenikający jeden zwoj.

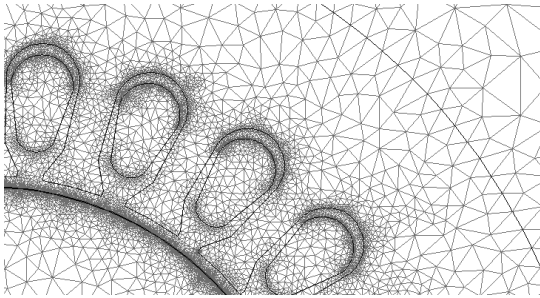
Tensor naprężeń Maxwella wykorzystywany jest do obliczeń siły działającej na wał łożyska. Całkowita siła magnetyczna wyrażona jest wzorem:

$$F = \frac{1}{2} \oint_s \left\{ \vec{H}(\vec{n} \cdot \vec{B}) + \vec{B}(\vec{n} \cdot \vec{H}) - \vec{n}(\vec{H} \cdot \vec{B}) \right\} d\vec{s} \quad (3)$$

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

Dwuwymiarowy obszar obliczeniowy siłownika został dyskretyzowany przy pomocy około 60 tysięcy elementów skończonych pierwszego rzędu (Rys. 3). Obliczanie siły z wykorzystaniem tensora naprężeń Maxwella wymaga miejscowego zagęszczenia siatki [1], dlatego też szczególną uwagę zwrócono na dyskretyzację

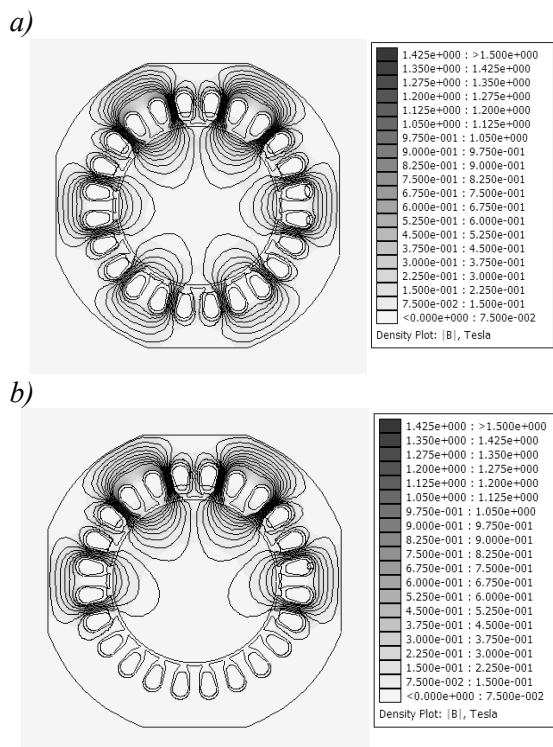
szczeliny powietrznej. Na zewnętrznych krawędziach obszaru obliczeniowego założono zerowe warunki brzegowe Dirichleta ($\vec{A} = 0$).



Rys. 3. Fragment siatki dyskretyzacyjnej modelu

4. Analiza pola w łożysku magnetycznym

W wyniku obliczeń polowych otrzymano rozkłady indukcji dla szeregu zadanych prądów płynących w uzwojeniach łożyska oraz położenia wirnika. Na rysunkach 4a i 4b porównano rozkłady indukcji magnetycznej w łożysku dla natężenia prądu sterowania równego $I_c = 5A$ w jednej z osi.



Rys. 4. Rozkład indukcji magnetycznej dla:
a) wariantu 1 oraz prądu sterującego $i_{ca} = 5A$,
b) wariantu 2 oraz prądu sterującego $i_{cy} = 5A$

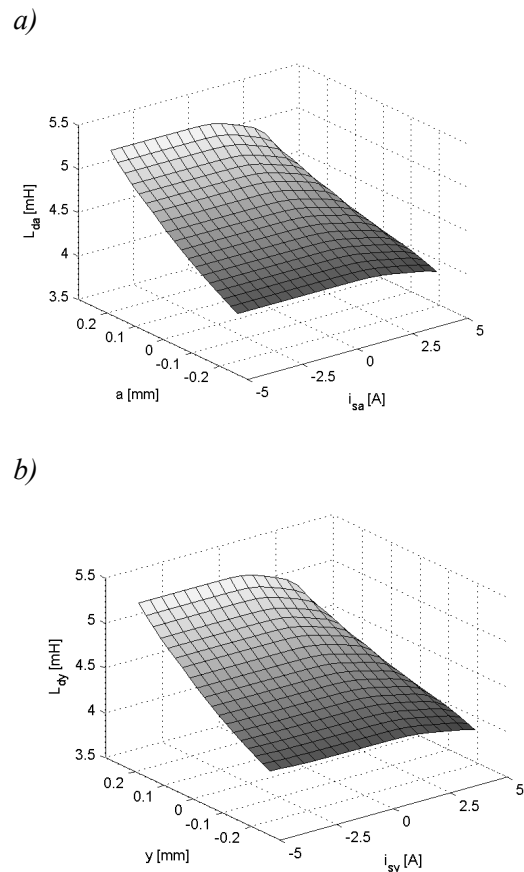
W układzie konfiguracji 3-biegunowej cewek przyjęto, że osie A, B i C są sterowane niezależnie. W chwili załączenia prądu sterowania w cewkach jednej osi magnetycznej wytwarza-

ne jest pole, które współdziała z polem pozostałych cewek, w których płynie jedynie prąd bazowy. W przypadku załączenia prądu sterowania o wartości maksymalnej $I_{ca} = 5A$, nieznacznie zostaje zmieniony rozkład indukcji magnetycznej w siłowniku (Rys. 4a).

W układzie konfiguracji 4-biegunowej, sterowanie odbywa się w sposób różnicowy. Gdy w cewkach elektromagnesu górnego płynie prąd sterowania o wartości równej prądowi bazowemu $I_{cx} = 5A$, strumień w elektromagnesie dolnym zanika.

W wyniku wielowariantowej analizy polowej łożysk wyznaczono parametry całkowite pola w zakresie pracy łożyska magnetycznego.

Jednym z tych parametrów jest indukcyjność dynamiczna cewek, którą wyznaczono na podstawie obliczeń strumieni magnetycznych płynących w stojanie łożyska.



Rys. 5 Indukcyjność dynamiczna uzwojenia: a) w osi „a” dla wariantu 1, b) w osi „y” dla wariantu 2

W przypadku konfiguracji 3-biegunowej indukcyjność dynamiczna jest taka sama dla wszystkich trzech uzwojeń rozłożonych symetrycznie co 120^0 . Natomiast w przypadku konfiguracji 4-

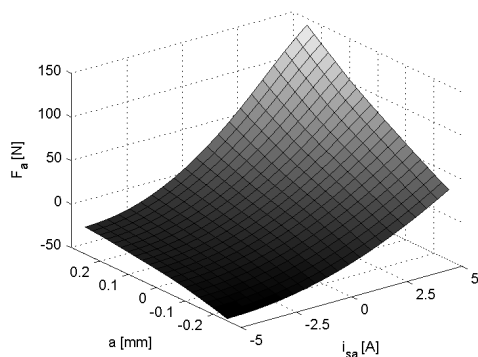
biegunowej indukcyjność dynamiczna w osi Y jest dwa razy większa w stosunku do indukcyjności w osi X, rys. 5.

W tabeli 1 przedstawiono porównanie wyników pomiarów indukcyjności statycznej dla konfiguracji 4-biegunowej.

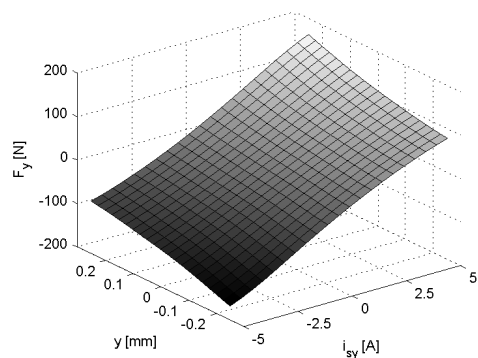
TABELA 1 Wartości indukcyjności uzwojeń

Sekcje uzwojeń bocznych		Sekcje uzwojenia górnego i dolnego	
obliczenia	pomiar	obliczenia	pomiar
3,7mH	3.8mH	7,9mH	8,37mH

a)



b)

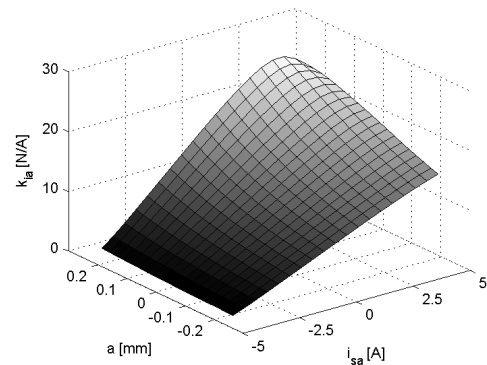


Rys. 6. Wartość siły działającej na wał w osi: a) „a” dla wariantu 1, b) „y” dla wariantu 2

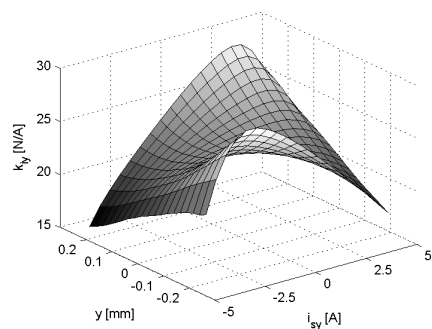
Kolejnym z parametrów całkowitych pola, jest siła działająca na wał w łożysku magnetycznym. Charakterystyki siły dla obydwu konfiguracji uzwojeń różnią się co do kształtu i co do wartości. Należy zauważyć, że w przypadku pierwszego wariantu połączeń uzwojeń wykres siły jest niesymetryczny, a wartości zmieniają się w zakresie od $F = -45\text{N}$ do $F = 145\text{N}$. W przypadku drugiego wariantu konfiguracji uzwojeń, otrzymano wykres symetryczny, gdzie siły zmieniają się od wartości -170N do 170N

dla osi „y” sterowania (Rys. 6b) oraz odpowiednio o połowę mniejsze sterowania w osi X. Na podstawie obliczeń siły wyznaczono wartości sztywności prądowych i przemieszczeniowych dla rozważanych konfiguracji uzwojeń, (Rys. 7 i 8).

a)



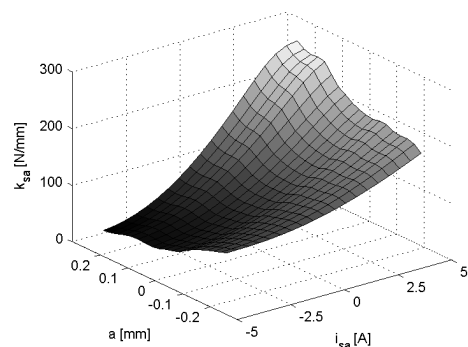
b)



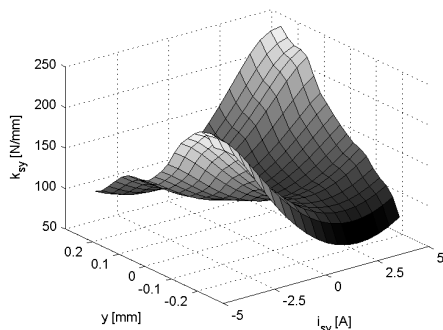
Rys. 7 Sztywność prądowa: a) w osi „a” dla wariantu 1, b) w osi „y” dla wariantu 2

Jak należało przypuszczać, w odróżnieniu od wariantu 1, w przypadku wariantu 2 uzwojeń otrzymano wykresy symetryczne zarówno dla sztywności prądowej i przemieszczeniowej. Należy podkreślić, że dla łożyska 3-biegunowego otrzymuje się większą zmienność wartości sztywności niż w łożysku 4-biegunowym.

a)



b)



Rys. 8. Sztywność przemieszczeniowa: a) w osi „a” dla wariantu 1, b) w osi „y” dla wariantu 2

Jednakże, w tym przypadku otrzymuje się lepszą liniowość zmian wartości przemieszczeń, co jest zjawiskiem korzystnym w przypadku implementacji układów sterowania.

6. Uwagi i wnioski

Budowa analizowanego łożyska magnetycznego pozwala na zrealizowanie kilku wariantów jego wzbudzenia. Porównano konfiguracje 3 i 4 biegunowego sterowania łożyskiem. Z punktu widzenia kosztów aplikacji, konfiguracja 3-biegunowa wydaje się być atrakcyjniejszą, ze względu na mniejszą liczbę układów zasilania łożyskiem. Jednakże, wadą tego rozwiązania jest to, że istnieją silne sprzężenia pomiędzy osiami sterowania, co utrudnia regulację położenia wału.

W przypadku konfiguracji 4 biegunowej możliwe jest zaimplementowanie układu różnicowego zasilania łożyska. Zjawiskiem niekorzystnym takiej konfiguracji jest silna nieliniowość współczynników sztywności prądowej

i przemieszczeniowej łożyska. Ma to znaczący wpływ, na jakość sterowania układu zawieszenia magnetycznego.

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, pp.12-16



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



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

Autorzy

prof. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk
dr inż. Jan Zimon
mgr inż. Dawid Wajnert

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Katedra Elektrotechniki Przemysłowej, ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole, tel. (77) 4538448 w. 148, b.tomczuk@po.opole.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Ignacy Dudzikowski