

*aktywne łożysko magnetyczne, metoda elementów skończonych,
parametry siłownika łożyska magnetycznego*

Bronisław TOMCZUK*, Dawid WAJNERT*

WPLYW KSZTAŁTU ZĘBÓW STOJANA SIŁOWNIKA ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO NA JEGO PARAMETRY ELEKTROMAGNETYCZNE

W pracy przedstawiono analizę wpływu rozpiętości kątowej zębów stojana na parametry elektromagnetyczne promieniowego 8-biegunowego siłownika łożyska magnetycznego. W pracy analizowano parametry takie jak sztywność prądowa oraz sztywność przemieszczeniowa. Dodatkowo, zaproponowano kryteria oceny charakterystyk sztywności prądowej oraz przemieszczeniowej, które pozwalają określić optymalne parametry konstrukcyjne. Badania symulacyjne wykonano w oparciu model połowy siłownika dla którego rozwiązywano zagadnienie brzegowe metodą elementów skończonych. Na podstawie uzyskanego rozkładu pola magnetycznego wyznaczono siłę magnetyczną działającą na wał siłownika. Zastosowano metodę całkowania wektora naprężeń Maxwella.

1. WSTĘP

Łożysko magnetyczne jest specyficznym aktuatorem, czyli siłownikiem elektrycznym który umożliwia podtrzymanie wirującego wału bez mechanicznego kontaktu z częścią ruchomą czyli stojanem. Przenoszenie obciążeń pomiędzy stojanem a wirnikiem następuje poprzez pole magnetyczne wzbudzone prądami wymuszonymi w uzwojeniach siłownika. Łożysko magnetyczne, poza siłownikiem, składa się również z układu automatycznej regulacji położenia części ruchomej lewitującej w obrębie stojana siłownika.

Koncepcja łożyska magnetycznego była znana już dawno. Jednakże dopiero rozwój elementów energoelektronicznych oraz mikroprocesorowych metod sterowania pozwolił wykorzystać zalety tej koncepcji oraz właściwości tego typu łożyska. Łożyska te posiadają wiele zalet, do których zalicza się przede wszystkim: możliwość pracy przy bardzo wysokich prędkościach obrotowych, brak jakichkolwiek środków sma-

* Politechnika Opolska, Katedra Elektrotechniki Przemysłowej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, b.tomczuk@po.opole.pl, dawid.wajnert@op.pl

rujących. Nie generują one zanieczyszczeń w postaci zużytych środków smarujących, zapewniają długi czas bezawaryjnego użytkowania oraz co najważniejsze nie przenoszą drgań wirnika silnika napędowego na korpus maszyny napędzającej lub napędzanej. Ponadto, elektroniczny układ regulacji pozwala na precyzyjne sterowanie położeniem oraz drganiami wirnika, a także zapewnia stosunkowo prosty proces ich diagnostyki, nawet w czasie pracy. Z uwagi na przytoczone zalety, łożyska magnetyczne znajdują z powodzeniem zastosowanie w urządzeniach, które muszą charakteryzować się stosunkowo dużą niezawodnością, wśród nich można wyróżnić wysokoobrotowe magazyny energii, pompy krwi, elektrowrzeciona, turbokompresory.

2. MODEL POŁOWY SIŁOWNIKA ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO ORAZ JEGO PARAMETRY

Siłownik aktywnego łożyska magnetycznego należy do grupy przetworników elektromechanicznych w których najważniejsza jest siła lewitacji magnetycznej. Jej wartość zależy od prądu wzbudzającego pole magnetyczne oraz od odległości stojan wirnik, czyli od przemieszczenia p wirnika. Dlatego też mamy do czynienia ze specyficznymi parametrami do których należą m.in. sztywność prądowa k_i i przemieszczeniowa k_s .

Sztywność prądowa łożyska magnetycznego określa zmianę siły magnetycznej F pod wpływem zmiany prądu sterującego i_c

$$k_i = \frac{\partial F}{\partial i_c}. \quad (1)$$

Natomiast sztywność przemieszczeniowa odnosi się do zmiany siły magnetycznej F w wyniku zmiany położenia p wirnika

$$k_s = \frac{\partial F}{\partial p}. \quad (2)$$

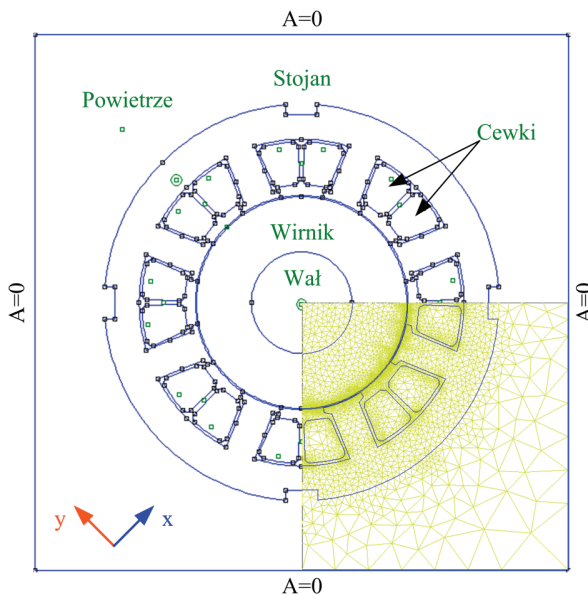
Charakterystyki powyższych sztywności powinny cechować się jak najmniejszą zmiennością w zakresie pracy siłownika. Dlatego też, do oceny zmienności charakterystyk sztywności wprowadzono współczynniki określone jako:

$$\Delta k_i = \frac{|k_i - k_i|_{p=0, i_c=0}}{k_i|_{p=0, i_c=0}} \cdot 100\% \quad (3)$$

$$\Delta k_s = \frac{|k_s - k_s|_{p=0, i_c=0}}{k_s|_{p=0, i_c=0}} \cdot 100\% \quad (4)$$

W powyższych wyrażeniach $k_i|_{p=0, i_c=0}$ oraz $k_s|_{p=0, i_c=0}$ oznacza odpowiednio sztywność prądową oraz przemieszczeniową łożyska dla wału położonego w punkcie centralnym przy zerowej wartości prądu sterowania. Wartości ww. parametrów można wyznaczyć analitycznie [2]. Jednakże, wykonane w ten sposób obliczenia obarczone są znacznym błędem. Spowodowane to jest pominięciem nieliniowej charakterystyki magnesowania materiału magnetycznego oraz niedokładnością odwzorowania kształtu obwodu magnetycznego. Dokładniejsze wyniki uzyskuje się stosując metodę elementów skończonych (MES) do wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego w obrębie siłownika [3].

Model połowy analizowanego promieniowego siłownika łożyska magnetycznego utworzono w programie FEMM 4.2 [1]. Rysunek 1 przedstawia najważniejsze elementy siłownika w przekroju poprzecznym. Dodatkowo zaznaczono warunki brzegowe. Do analizy przyjęto charakterystykę magnesowania stali M270-50A dla stojana oraz wirnika.



Rys. 1. Model połowy 8-biegunowego siłownika łożyska magnetycznego
Fig. 1. Field model of the 8-pole active magnetic bearing

O poprawności otrzymanych wyników rozkładu pola magnetycznego uzyskanych na podstawie MES decyduje oprócz prawidłowo postawionego zagadnienia dla równań różniczkową cząstkowych, dobór siatki dyskretyzacyjnej modelu [4, 5]. Dlatego też przeprowadzono szereg eksperymentów numerycznych celem dobrania siatki o odpowiedniej gęstości. Szczególną uwagę zwrócono na dyskretyzację szczeliny

powietrznej, ponieważ siłę magnetyczną wyznaczono stosując metodę całkowania tensora \vec{T} naprężeń Maxwella, zgodnie ze wzorem:

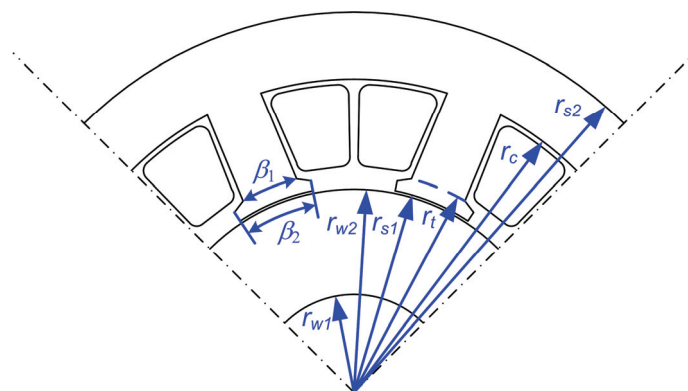
$$\vec{F} = \oint_{\Gamma} \vec{T} \cdot d\vec{\Gamma} \quad (5)$$

gdzie $\vec{\Gamma}$ jest konturem przechodzącym przez szczelinę i obejmującym element na który działa siła magnetyczna.

Tabela 1 wraz z rysunkiem 2 określają parametry geometryczne siłownika. Obliczenia wielowariantowe wykonane w ramach niniejszej pracy obejmowały zmianę szerokości bieguna poprzez zmianę kąta β_2 w zakresie 16–42°.

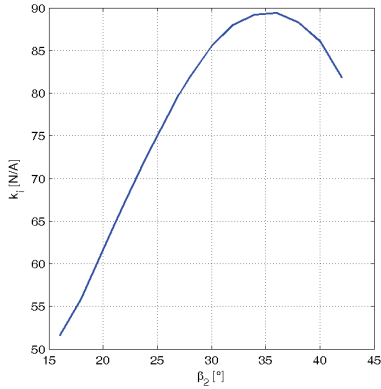
Tabela 1. Parametry 8-biegunowego siłownika łożyska magnetycznego
Table 1. Parameters of the 8-pole magnetic bearing actuator

Parametr	r_{w1} [mm]	r_{w2} [mm]	r_{s1} [mm]	r_{s2} [mm]	r_t [mm]	r_c [mm]	β_1 [°]
Wartość	9,50	19,75	20,00	37,00	22,00	30,50	15

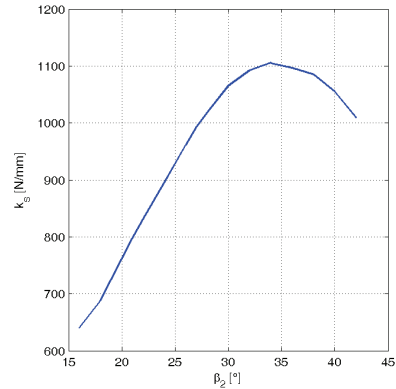


Rys. 2. Parametry kształtów zębów stojana
Fig. 2. Dimensions of the stator teeth

Na rysunkach 3 oraz 4 przedstawiono odpowiednio sztywność prądową oraz przemieszczeniową siłownika w funkcji kątowej rozpiętości zęba stojana β_2 . Z wykresów tych wynika, iż szerokość zęba w znacznym stopniu wpływa na omawiane parametry. Najważniejszym jednakże wnioskiem z symulacji obliczeniowych jest fakt, że sztywność prądowa i przemieszczeniowa posiadają maksima, które są widoczne na rysunkach 3 i 4. Największą wartość sztywności prądowej siłownik osiąga dla kątowej rozpiętości zęba stojana równej $\beta_2 = 36^\circ$, natomiast największą wartość sztywności przemieszczeniowej dla $\beta_2 = 34^\circ$.

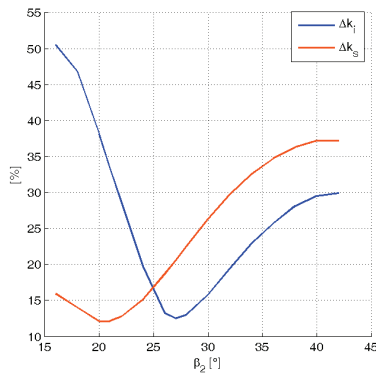


Rys. 3. Zależność sztywności prądowej od kąta β_2
Fig. 3. Dependence of current stiffness from angle β_2



Rys. 4. Zależność sztywności przemieszczeniowej od kąta β_2
Fig. 4. Dependence of position stiffness from angle β_2

Ze względu na to, iż siłownik łożyska magnetycznego jest elementem wykonawczym automatyki powinien cechować się jak najmniejszą zmiennością sztywności prądowej oraz przemieszczeniowej. Z przedstawionych wykresów na rysunku 5 wynika, iż najmniejszą zmienność sztywności prądowej osiąga siłownik dla $\beta_2 = 20^\circ$, natomiast najmniejszą zmienność sztywności przemieszczeniowej osiąga siłownik dla $\beta_2 = 27^\circ$. Jako optymalny kształt zębów stojana można przyjąć zęby o rozpiętości kątowej równej $\beta_2 = 25^\circ$. Wymieniona wartość kąta β_2 wynika z przecięcia charakterystyki zmienności sztywności prądowej oraz przemieszczeniowej (rys. 5). Dla takiego kształtu zęba siłownik osiąga sztywność prądową $k_i = 75,0$ N/A i przemieszczeniową $k_s = 926,9$ N/mm.



Rys. 5. Zmienność sztywności prądowej i przemieszczeniowej w funkcji kąta β_2
Fig. 5. The current stiffness and position stiffness variability from angle β_2

3. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono model połowy 8-biegunowego siłownika łożyska magnetycznego. Umożliwia on wyznaczenie pola magnetycznego oraz jego parametrów całkowych. Modelowanie rozkładu pola magnetycznego oparto na metodzie elementów skończonych, zaimplementowanej w środowisku FEMM.

Praca rozwiązuje problem techniczny, który polega na określeniu optymalnej rozpiętości kątowej zębów nabiegownika w siłowniku łożyska. Na podstawie obliczeń wielowariantowych dla konstrukcji siłownika łożyska, wyznaczono taką wartość rozpiętości kątowej zęba dla której zmienność sztywności prądowej jest równa zmienności sztywności przemieszczeniowej. Wartość tej rozpiętości wynosi $\beta_2 = 25^\circ$. Sformułowany model matematyczny pozwala również na inne wielowariantowe obliczenia, w celu optymalizacji nie tylko rozpiętości zębów, lecz także innych wymiarów geometrycznych siłownika.

LITERATURA

- [1] MEEKER D., *Finite Element Method Magnetics Version 4.2, User's Manual*, University of Virginia, USA, 2009.
- [2] SCHWEITZER G., MASLEN E., *Magnetic bearings, Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*, Springer, Berlin 2009.
- [3] TOMCZUK B., *Metody numeryczne w analizie pola układów transformatorowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2007.
- [4] TOMCZUK B., WAJNERT D., *Porównanie analizy pola w przestrzeni 2D i 3D w aktywnym łożysku magnetycznym*, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 248, 2010, s. 61–73.
- [5] WAJNERT D., *Charakterystyki pracy łożyska magnetycznego z uwzględnieniem jego układu regulacji*, praca doktorska, Opole 2012.

THE INFLUENCE OF THE TEETH GEOMETRY IN THE STATOR ON THE MAGNETIC BEARING PARAMETERS

The paper presents the analysis of the stator teeth geometry impact on the parameters of the 8-pole radial magnetic bearing. In this work, such parameters as current and position stiffnesses, have been analyzed. Additionally, we propose criteria for the evaluating the characteristics of the stiffnesses, which allow to determine the optimum of the designing parameters. The research have been performed with modelling the magnetic bearing actuator boundary problem using the finite element method. Magnetic force acting on the actuator shaft has been calculated using the magnetic field distribution knowledge using Maxwell stress tensor method.