

Marian ŁUKANISZYN

POLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI,
INSTYTUT UKŁADÓW ELEKTROMECHANICZNYCH I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ,
ZAKŁAD MASZYN ELEKTRYCZNYCH

Optymalizacja kształtu magnesów trwałych w bezszczotkowym silniku prądu stałego

Prof. dr hab. inż. Marian ŁUKANISZYN

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Opolskiej, dawniej WSI w Opolu, w 1977 r. Stopień doktora i doktora habilitowanego uzyskał na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej kolejno w 1985 r. i 1991 r. W 2003 r. uzyskał tytuł profesora. W latach 1993-1999 był stypendystą Fundacji Alexandra von Humboldta w Uniwersytecie Erlangen-Nürnberg. Specjalizuje się w modelowaniu i optymalizacji konstrukcji maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi.

e-mail: luk@po.opole.pl



Streszczenie

W pracy przedstawiono metodę minimalizacji pulsacji momentu elektromagnetycznego przy użyciu magnesów ze skosem zmieniającym się skokowo w kierunku osi maszyny. Omówiono algorytm obliczeń, wyniki optymalizacji kształtu magnesów trwałych oraz wpływ modyfikacji na moment elektromagnetyczny na przykładzie silnika bezszczotkowego małej mocy do napędu wentylatora. Wyniki obliczeń, częściowo zweryfikowane doświadczalnie, potwierdzają skuteczność proponowanej metody.

Słowa kluczowe: magnesy trwałe, maszyny wirujące, moment zaczepowy, ukosowanie, optymalizacja.

Optimization of the permanent magnets shape in a brushless DC motor

Abstract

The paper presents the method for reducing torque pulsation using skewed magnets with discrete skew angle. An elaborated algorithm, the results of optimization of permanent magnet shape as well as the impact of magnetic circuit modification on the electromagnetic torque on a basis of low-power fan motor are presented. The calculation results, partially backed by the measurements prove the efficiency of proposed method.

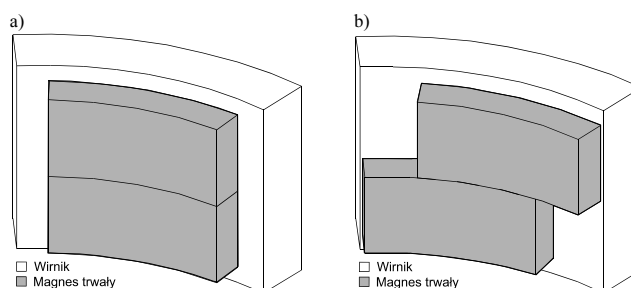
Keywords: permanent magnets, rotating machines, cogging torque, skew, optimization.

1. Wstęp

Nowe generacje wysokoenergetycznych magnesów trwałych zapewniają wartość indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej silnika elektrycznego rzędu 1.0-1.2 T. To z kolei pozwala uzyskać większe wartości momentu elektromagnetycznego, jednak również przyczynia się do znacznego wzrostu momentu od zębów w silnikach z ułożkowym stojanem. Redukcja momentu zaczepowego w silnikach z magnesami trwałymi jest jednym z obecnych trendów badawczych [1-2]. Istnieje szereg metod umożliwiających minimalizację momentu zaczepowego. Są to dość skomplikowane modyfikacje obwodu magnetycznego maszyny, z których najpopularniejszą jest ukosowanie pakietu stojana. Znane są również rozwiązania alternatywne, w których w miejsce skośnego stojana stosuje się ukosowanie magnesów trwałych [2].

W konwencjonalnych maszynach elektrycznych, bieguny wzbudzenia (magnesy trwałe) mogą być złożone z dwóch lub większej ilości segmentów w kierunku osi wirnika (rys. 1a). Taka konstrukcja umożliwi uzyskanie efektu ukosowania magnetowodu poprzez odpowiednie przemieszczanie poszczególnych segmentów względem siebie (rys. 1b). Sposób ułożenia segmentów w celu

uzyskania minimalizacji pulsacji momentu wymaga jednak wielowariantowych obliczeń optymalizacyjnych.



Rys. 1. Podziałka biegunowa wirnika silnika: a) magnes dwusegmentowy; b) magnes dwusegmentowy – ukosowanie

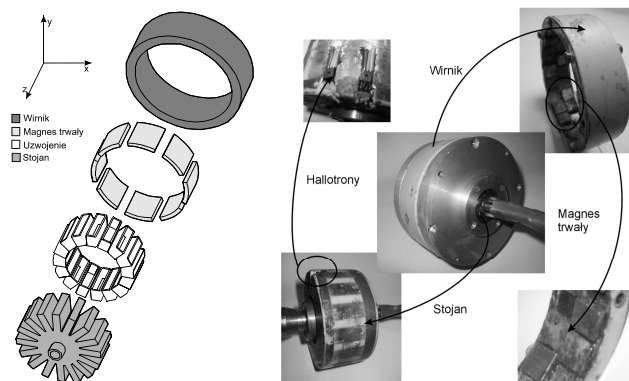
Fig. 1. Outline of the single pole-pitch of the motor: a) two-slice PM without dislocation, b) two-slice PM with dislocation

Duże koszty obliczeniowe związane z analizą połową przy użyciu trójwymiarowej (3D) metody elementów skończonych (MES), wymusiły zastosowanie uproszczonego podejścia.

W niniejszej pracy przedstawiono optymalizację kształtu magnesów trwałych o skosie zmiennym skokowo. Opracowany model został zweryfikowany obliczeniami w przestrzeni trójwymiarowej oraz badaniami doświadczalnymi. Jest to jeden z kierunków badań prowadzonych w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Politechniki Opolskiej.

2. Model fizyczny silnika

Na rysunku 2 przedstawiono strukturę oraz model fizyczny badanego silnika elektrycznego. Jest to dwupasmowy silnik bezszczotkowy prądu stałego nowej konstrukcji z zewnętrznym wirnikiem. Wirnik silnika stanowi pakietowane jarzmo z magnesami trwałymi. Jako wzbudzenie silnika zastosowano wysokoenergetyczne magnesy trwałe segmentowe ($B_r=1\text{T}$, $H_c=-700\text{kA/m}$). Silnik został zaprojektowany do napędu wentylatora.



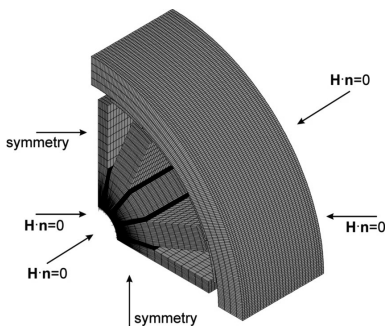
Rys. 2. Struktura badanego silnika

Fig. 2. View of the motor prototype

Podstawowe parametry elektryczne badanego prototypu silnika elektrycznego są następujące: moc silnika – 150W, napięcie zasilania – 6V, prąd – 30A, prędkość – 1500 obr/min. Średnica zewnętrzna wynosiła 112mm, a całkowita długość – 30mm.

3. Model matematyczny

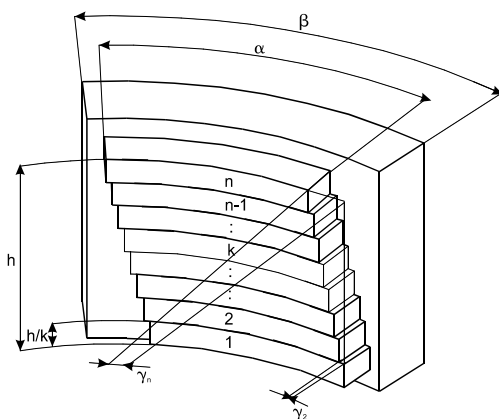
Do obliczeń badanego silnika elektrycznego zastosowano trójwymiarową metodę elementów skończonych (MES) [6]. Analizowano pole magnetostatyczne pomijając zjawisko histerezy oraz prądów wirowych. Model numeryczny zachowuje symetrię obrotową względem dwóch podziałek biegunowych. Modelowanie ruchu wirnika przeprowadzono przy użyciu metody ruchomej warstwy, zakładając stałą prędkość obrotową. Na rys. 3 przedstawiono model matematyczny badanego silnika wraz z siatką dyskretyzacyjną. Po dyskretyzacji siatka modelu silnika składała się z 135000 elementów ośmiowęzłowych (145886 węzłów). Moment elektromagnetyczny rozwijany przez badany silnik wyznaczono na podstawie tensora naprężeń Maxwella.



Rys. 3. Model matematyczny silnika wraz z siatką dyskretyzacyjną oraz warunkami brzegowymi

Fig. 3. Numerical model of the motor with calculation mesh and boundary conditions

Koszty obliczeniowe związane z obliczeniami połowymi w przestrzeni 3D są na tyle wysokie, że optymalizacja kształtu magnesów trwałych z wykorzystaniem przedstawionego modelu nie jest opłacalna. Dlatego zastosowano model uproszczony bazujący na cząstkowych wynikach z modelu 3D. Model ten wchodzi w skład opracowanej procedury optymalizacji. Na rysunku 4 pokazano szkic podziałki biegunowej wirnika wraz z przyjętymi oznaczeniami. Opis procedury przedstawiono poniżej.



Rys. 4. Szkic podziałki biegunowej wirnika wraz z oznaczeniami

Fig. 4. Outline of the single pole-pitch of the motor

Niech n oznacza liczbę segmentów na które podzielono magnes trwały, a k numer segmentu gdzie ($k=1, 2, \dots, n$). Następnie niech α będzie rozpiętością kątową k -tego segmentu magnesu trwałego a β - rozpiętością kątową podziałki biegunowej wirnika. Następnie niech γ_k będzie przesunięciem kątowym k -tego segmentu magnesu trwałego (rys. 4), natomiast h długością bieguna wzbudzenia. Zatem h/n będzie oznaczać wysokość pojedynczego segmentu magnesu trwałego.

Dalej, wprowadzono następujące ograniczenia:

- szerokość wszystkich segmentów magnesu trwałego jest taka sama równa α ;
- maksymalny kąt przesunięcia k -tego segmentu magnesu trwałego jest ograniczony $\gamma_k \leq \beta - \alpha$;
- minimalny krok przesunięcia to 1 stopień;
- dla segmentu o numerze $k=1$ $\gamma_1 = 0$.

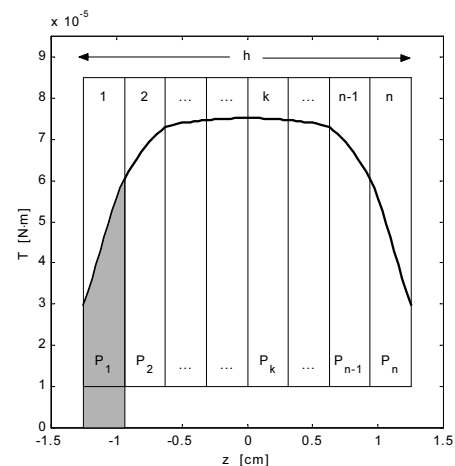
Z pojedynczym n -tym segmentem magnesu trwałego jest związana kątowa zmienność momentu zaczepowego określona zależnością:

$$T_k(\theta) = a_k T(\theta), \quad (1)$$

gdzie: $T(\theta)$ jest kątową zmiennością momentu zaczepowego wytwarzanego przez badany silnik (dla magnesów bez podziałki na segmenty), wyznaczoną na podstawie obliczeń 3D, natomiast a_k jest współczynnikiem wagowym określonym następującym wyrażeniem:

$$a_k = \frac{P_k}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (2)$$

gdzie: P_i jest polem powierzchni pod krzywą (rys. 5).



Rys. 5. Zmienność momentu zaczepowego w funkcji długości magnesu trwałego
Fig. 5. Variation of the cogging torque vs. PM length

Moment rozwijany przez silnik nie jest stały na całej długości czynnej maszyny elektrycznej (rys. 5). Przedstawiona zmienność momentu zaczepowego $T(z)$ w funkcji długości czynnej silnika została wyznaczona dla magnesu jednosegmentowego na podstawie trójwymiarowych obliczeń połowych. Moment rozwijany przez pojedynczy k -ty segment magnesu trwałego zależy od jego położenia na długości silnika i jest proporcjonalny do pola pod krzywą (rys. 5). Dla dowolnego położenia wirnika względem stojana ($\theta = \theta_0$) jest prawdziwe równanie:

$$T(\theta) \Big|_{\theta=\theta_0} = \sum_{j=1}^s T_j(z), \quad (3)$$

gdzie: s jest liczbą punktów na osi z , dla których wyznaczono $T(z)$.

Wypadkowy moment zaczepowy wytwarzany przez badany silnik można zatem zapisać za pomocą następującego równania:

$$T(\theta) = \sum_{k=1}^n T_k(\theta), \quad (4)$$

dla przypadku, gdy $\gamma_k=0$, ($k=1, 2, \dots, n$), $T_r(\theta)=T(\theta)$, ($T_r=T$).

Optymalny kształt magnesu będzie odpowiadał minimum funkcji celu σ określonej następującą zależnością:

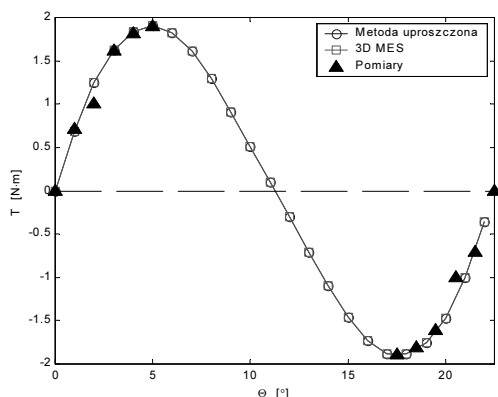
$$\sigma = \min \left\{ \left(\frac{1}{m-1} \sum_i^m ((T_r)_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (5)$$

gdzie: m jest liczbą punktów w których wyznaczono okres zmienności momentu zaczepowego w funkcji obrotu wirnika. Powyższa funkcja jest odchyleniem standardowym od wartości zerowej. Zatem przypadek $\sigma=0$ odpowiada silnikowi, w którym moment zaczepowy jest równy zero. Aby uzyskać jednoznaczne rozwiązanie postawionego zadania optymalizacyjnego, należy jeszcze określić w jaki sposób należy układać magnesy trwałe na jarzmie wirnika. W literaturze proponuje się kilka możliwych rozwiązań magnesów trwałych o ciągłym skosie [2]. W niniejszej pracy rozważania ograniczono do magnesów o skosie jednostronnym (równoległym).

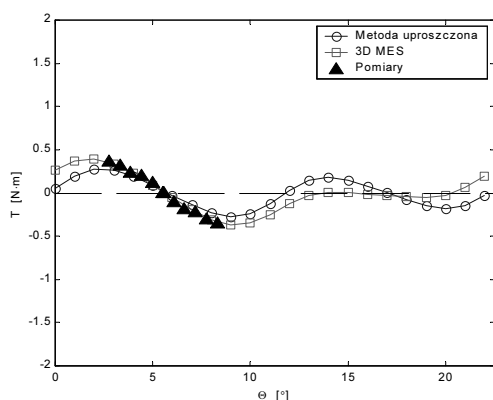
4. Zadania testowe

Obliczenia przeprowadzono dla $\alpha/\beta=33/45$, przyjmując biegun wzbudzenia składający się z dwóch segmentów ($k=2$). Największą redukcję momentu od zębów uzyskuje się dla $\xi=0,5$ oraz $\gamma_2=11$.

Na rysunkach 6 i 7 pokazano kątową zmienność momentu zaczepowego dla przypadku $\xi=0,5$ przy różnych kątach przesunięcia segmentów magnesu trwałego. Porównano wyniki obliczeń wykonanych metodą uproszczoną oraz metodą elementów skończonych z pomiarami na modelu fizycznym. Uzyskano dobrą zgodność wyników.



Rys. 6. Kątowa zmienność momentu zaczepowego ($\xi=0,5$; $\gamma_2=0$ – prototyp)
Fig. 6. Angular variation of the cogging torque ($\xi=0,5$, $\gamma_2=0$ – prototyp)

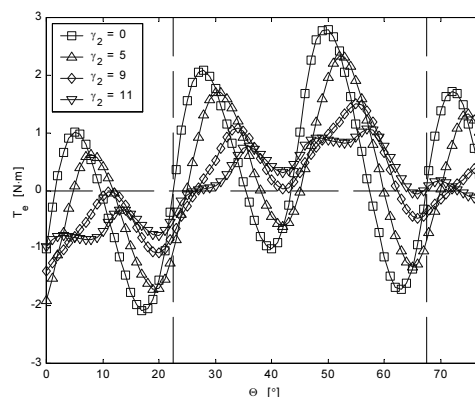


Rys. 7. Kątowa zmienność momentu zaczepowego ($\xi=0,5$; $\gamma_2=11$)
Fig. 7. Angular variation of the cogging torque ($\xi=0,5$, $\gamma_2=11$)

Równie istotne jest określenie wpływu skosu magnesów na wartość momentu elektromagnetycznego rozwijanego przez silnik. Przy zmniejszeniu momentu elektromagnetycznego o 8% uzyskano ponad 2-krotne zmniejszenie jego pulsacji.

Rysunek 8 ilustruje kątową zmienność momentu elektromagnetycznego rozpatrywanych modyfikacji konstrukcyjnych silnika.

Szersze omówienie problemów optymalizacji kształtu magnesów trwałych zawierają prace autora [3, 4, 5].



Rys. 8. Kątowa zmienność momentu elektromagnetycznego (przy zasilaniu jednego pasma silnika bez przełączeń, $I=20A$)

Fig. 8. Angular variation of the torque developed by the motor for one-phase supply without switch-overs ($I = 20A$)

5. Wnioski

Uzyskane wyniki obliczeń potwierdzają poprawność zastosowanej metody minimalizacji momentu zaczepowego w silnikach z magnesami trwałymi. Pełne obliczenia optymalizacyjne wymagają przeprowadzenia analizy dla kilku szerokości magnesu trwałego.

Prezentowana metoda optymalizacji kształtu magnesów trwałych może być skutecznym narzędziem do projektowania przetworników elektromechanicznych z magnesami trwałymi.

6. Literatura

- [1] Jahns T.M., Soong W.L.: Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives - a review, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.43, No.2, 1996, pp. 321-330.
- [2] Jang G.H., Yoon J.W., Ro K.C., Park N.Y., Jang S.M.: Performance of a brushless DC motor due to the axial geometry of the permanent magnet, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.33, No.5, 1997, pp. 4101-4103.
- [3] Łukaniszyn M., Wróbel R., Jagiela M., Latawiec K.: A new approach to reduction of the cogging torque in brushless motors by skewing optimization of permanent magnets, Electrical Engineering (Archiv für Elektrotechnik), Springer Verlag, Vol. 85, No. 2, Berlin, 2003, pp.59-69.
- [4] Łukaniszyn M., Jagiela M., Wróbel R.: Optimization of the Permanent Magnet Shape for Minimum Cogging Torque Using a Genetic Algorithm, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 40, No.2, March 2004, pp. 1228-1231.
- [5] Łukaniszyn M., Jagiela M., Wróbel R.: Method for reduction of cogging torque in PM machines using stepped magnets, in book: Computer Engineering in applied Electromagnetism, Springer, 2005, pp. 149-154.
- [6] OPERA User Guide, Vector Fields Limited. Oxford, United Kingdom 2000