

Krzysztof Szewczyk¹, Adam Kościelniak², Ryszard Kot³, Elżbieta Moryń-Kucharczyk¹
 Politechnika Częstochowska (1), Student P. Cz. (2), Częstochowa
 Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (3), Kraków

HYBRYDOWY SILNIK KROKOWY Z MAGNESAMI STAŁYMI JAKO ELEMENT HAMUJĄCY

HYBRID STEP MOTOR WITH CONSTANT MAGNETS SUCH AS THE BRAKE SYSTEM

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę pracy hybrydowego silnika krokowego pracującego jako hamulec. Silnik samohamowny pełni istotną rolę we wszystkich układach elektromechanicznych gdzie występuje czynny moment obciążenia lub duży moment bezwładności. Wytracanie energii kinetycznej wiąże się z koniecznością wzbudzenia pola magnetycznego. W przypadku konstrukcji elektromechanicznej zawierającej magnesy stałe w związku ze wzbudzaniem momentu zaczepowego można częściowo zaoszczędzić energię elektryczną wykorzystując strumień generowany przez magnesy stałe.

Abstract: In the paper the results of analysis concerning hybrid step motor that works as a braking system has been presented. In the research FEM Method has been applied. All simulations for computing flux density, forces, and torques have been performed by the program ANSYS MAXWELL. It is possible to save a part of energy using a flux from constant magnets. Especially when there is an active torque in the system, cogging torque can be useful during the process of break.

Słowa kluczowe: obwód magnetyczny, silnik z magnesami stałymi, metoda elementów skończonych, obwód magnetyczny

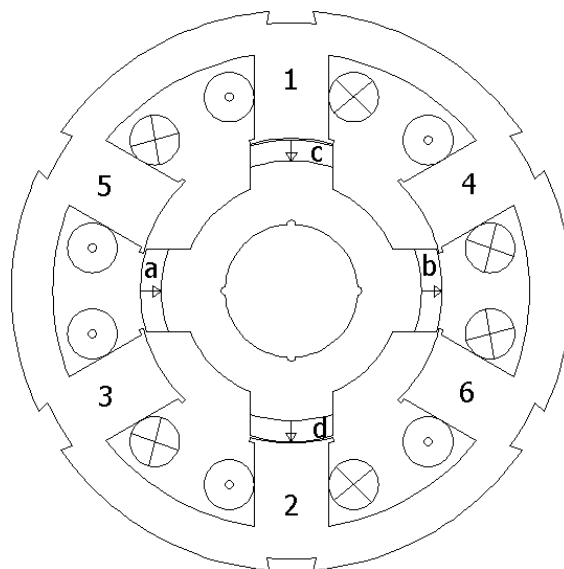
Keywords: magnetic circuit, permanent magnet, finite elements method, magnetic circuit

Wstęp

Magnesy stałe w konstrukcjach silników elektrycznych stanowią istotne źródło inspiracji dla konstruktorów[3]. Energia kinetyczna zgromadzona w układzie napędowym może być odzyskiwana w konstrukcjach nowych silników elektrycznych gdzie do wzbudzenia stałego pola magnetycznego użyto magnesów stałych. Oszczędności na energii niezbędnej do wzbudzenia silnika zwiększają jego sprawność a tym samym atrakcyjność dla użytkowników [1].

Hybrydowy silnik krokowy, którego przekrój poprzeczny przedstawiono na rys. 1, w którego konstrukcji użyto magnesów stałych jest jednym z tego rodzaju silników[2].

Wzbudzenie magnetyczne nabiegunków wirnika uzyskuje się poprzez umieszczenie na nich magnesów stałych. Uzyskiwane pole ma dwie zalety : uzyskuje się je bez użycia dodatkowej energii elektrycznej oraz nie wymaga doprowadzenia tej energii do kręcącego się wirnika silnika.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny hybrydowego silnika krokowego wraz z kierunkiem polaryzacji magnesów stałych

Metoda obliczeń

Symulacji dokonano w środowisku programu ANSYS MAXWELL 2D w oparciu o kształt silnika którego przekrój przedstawiono na rys. 1.

Sposób wyliczeń oparto o metodę elementów skończonych (Finite Elements Method) z użyciem Tensorów Naprężeń Makswella (Maxwell Stres Tensor) z zerowymi warunkami początkowymi wokół silnika. Przestrzeń wokół silnika podzielono na ponad 200 tys. elementów trójkątnych i czworokątnych. Ze względu na prędkość obliczeń elementy zostały zróżnicowane pod względem wielkości. Mniejsze elementy umieszczono w obszarach wrażliwych ze szczególnym uwzględnieniem szczeliny powietrznej silnika oraz wszędzie tam, gdzie kształt obliczanych elementów był najbardziej zróżnicowany. Dokonano rozróżnienia elementów silnika jako ruchomych (wirnik) z osią prostopadłą do płaszczyzny obliczeń oraz związanych z podłożem (stojan), przy założeniu właściwości materiałów magnetycznych przeprowadzono symulację działania silnika. Wokół nabiegowników stojana (na rys. 1 elementy 1 do 6) umieszczono cewki sterujące z przyporządkowanym kierunkiem prądów sterujących. Na nabiegownikach umieszczono magnesy stałe z zaznaczonym kierunkiem ich polaryzacji. Przy takiej konstrukcji silnika siły oraz momenty w silniku wyliczono w oparciu o Metodę Tensorów Siły dla równania Maxwella. Składowa normalna siły wynika z całki (1) po obszarze zamkniętym obwodu wirnika C. Siła F działając prostopadle do promienia wirnika wytwarza moment elektromagnetyczny T.

$$F = \int_C \left[\frac{1}{\mu_0} B(B \cdot n) - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \cdot n \right] dC \quad (1)$$

$$T = r * F \quad (2)$$

Wielkości i wartości występujące we wzorach (1) i (2) oznaczają :

B - chwilowe wartości obwodowego rozkładu indukcji w szczelinie B [T],

n - jednostkowy wektor składowej normalnej prostopadłej do powierzchni wirnika, który normalizuje składową chwilową wektora B ,

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m],

F- siła [N],

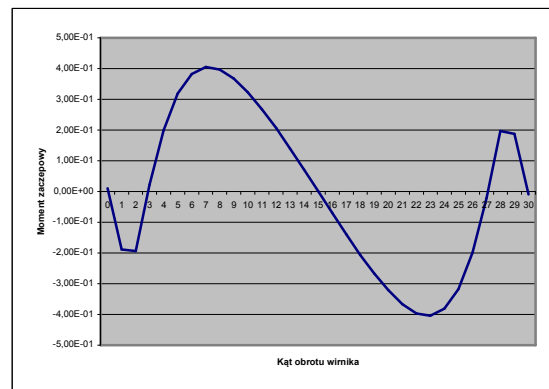
T- moment obrotowy [Nm],

r - promień wirnika [m].

Wielkość momentu wyliczana jest ze wzoru (2) przy uwzględnieniu promienia badanego wirnika oraz składowej siły F działającej na powierzchnię wirnika, prostopadłej do jego promienia. W metodzie obliczeń bardzo ważną jest duża dysproporcja pomiędzy przenikalnością magnetyczną na granicy rozpatrywanych obszarów. Szczelina powietrzna w silniku oraz obwód magnetyczny wirnika i stojana spełniają to założenie. W obliczeniach przyjęto dużą dysproporcję ($<1/1000$) pomiędzy przenikalnością magnetyczną obwodów magnetycznych oraz otoczenia (powietrza w szczelinie oraz na zewnątrz silnika).

Rezultaty obliczeń

Przy założeniach jak powyżej dokonano symulacji przebiegu momentu obrotowego w zależności od kąta obrotu. Wykonano obliczenia dla kolejnych położenia wirnika przy zmieniającym się co 1° kącie obrotu. Główny nacisk położony został na wartość momentu zaczepowego pochodzącego od magnesów stałych rozmieszczonych na nabiegownikach wirnika. Na rys. 2 przedstawiono przebieg tego momentu w zależności od kąta obrotu wirnika, gdzie odpowiednio maksimum oraz minimum przebiega przy kącie obrotu odpowiednio 7° oraz 23° .



Rys. 2. Zależność momentu zaczepowego od kąta obrotu wirnika

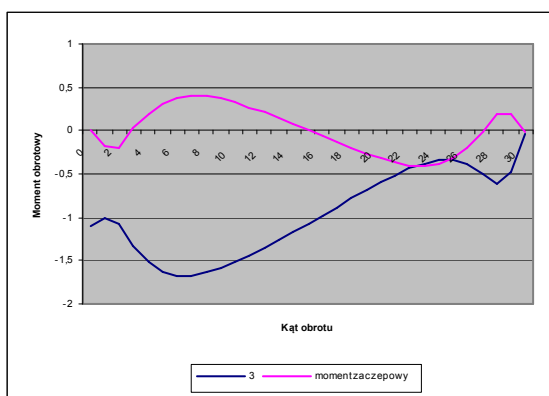
Analizując przebieg momentu zaczepowego można zauważyć, że zgodnie ze wzorem (3):

$$C = \int_0^{30^\circ} T d \text{deg} = 0 \quad (3)$$

Obliczenia w sposób oczywisty potwierdzają tą uwagę [8]. Oznacza to, że nie możemy hamować wirnika wykorzystując naturalne działanie momentu zaczepowego, gdyż całka (3) równa jest 0. Oznacza to, że chcąc hamować tego ro-

dzaju silnik należy podjąć działania związane z jego sterowaniem. Można tego dokonać poprzez takie sterowanie silnika, które pozwoliłoby na przesunięcie charakterystyki w ten sposób, aby generowany moment przeciwdziałał ruchowi obrotowemu wirnika [9].

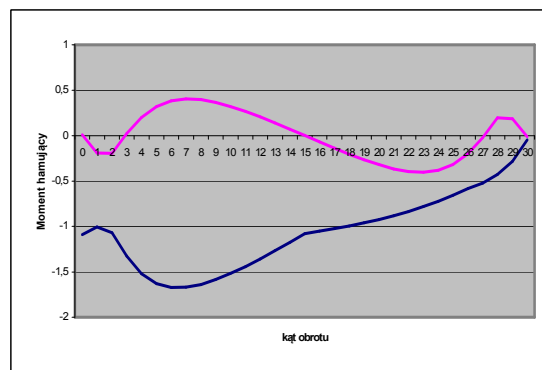
Na rys. 1 przyjęto pewien określony kierunek prądów w cewkach sterujących. Przy założeniu, że wirnik wiruje w prawo (zgodnie z kierunkiem obrotu wskazówek zegara) należy sterować w ten sposób, aby nabiegający magnes był odpychany, a magnes zbiegający przyciągany. Sterowanie tego rodzaju spowoduje powstanie momentu obrotowego wspomaganego momentem zaczepowym, po dokonaniu symulacji tego rodzaju sterowania otrzymano przebieg momentu hamującego jak na rys. 3.



Rys. 3. Zależność momentu hamującego silnika w korelacji z momentem zaczepowym przy podstawowym sterowaniu

Działanie momentu obrotowego razem z momentem zaczepowym również nie daje zadowalającego wyniku ze względu na to, że w zakresie 0° do 15° moment zaczepowy wzmacnia moment hamujący silnika, jednakże w dalszej części przebiegu odejmuje się od momentu hamującego silnika, a całość zgodnie ze wzorem (3) nie wykazuje żadnego zysku momentu hamującego wynikającego z oddziaływania momentu zaczepowego. Modyfikacja sterowania polegająca na zmianie polaryzacji nabiegowników w zakresie obrotu od 15° do 30° w ten sposób, aby nabiegownicy z magnesami stałymi dalej przeciwdziałały ruchowi wirnika daje rezultaty jak na rys. 4.

Przy tego rodzaju postępowaniu widać różnicę w kształcie momentu hamującego. Podsumowując, wpływ zmiany sterowania na wielkości momentu hamującego przy różnych sterowaniach przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 4. Zależność momentu hamującego silnika w korelacji z momentem zaczepowym przy dodatkowym sterowaniu

Tab. 1. Wpływ sterowania na wielkości momentu hamującego w hybrydowym silniku krokowym

Moment	Sterowanie podst.	Sterowanie dod.
Mom. zaczepowy [Nm] max	(dla -7°) 4,05	(dla -23°) 4,04
Mom. hamujący [Nm] max	(dla -7°) 1,67	(dla -23°) 0,78
Całka (3) C [Nm*deg]	27,03	29,74

Dane w tabeli 1 wskazują, że moment hamujący jest nieco większy przy zmianie sterowania silnika.

Wnioski

Symulacja hamowania hybrydowego silnika krokowego pozwala stwierdzić, że istnieje możliwość wykorzystania momentu zaczepowego do zwiększenia intensywności hamowania silnika z dodatkowym sterowaniem. Ze względu na to, że całość momentu zaczepowego po kącie obrotu wirnika jest równa 0 należy je zmodyfikować. Zysk dodatkowego momentu hamującego na poziomie 3,3% nie powoduje entuzjazmu, jednakże jeżeli uwzględnimy, że można to uzyskać poprzez zmianę sterowania pozwala stwierdzić, że tego rodzaju postępowanie może być interesujące dla konstruktorów sterowania tego rodzaju silników.

Literatura

- [1]. Aziza M. Zaki, Amal Z. Mohamed, Microstepping Control of Hybrid Stepper Motor Using Fuzzy Logic for Robotics Applications, Electronic Reserch Institute. Dokki, Cairo, Egypt.
- [2]. Kazuaki Nakata, Kenji Hiramoto, Masuayuki Sanada, Sigeo Morimoto, Yoji Ta-

ked a Noise reduction for switched reluctance motor with a hole. PCC – Osaka 2002.

[3]. Texas Instruments, Microstepping Bipolar Drive of Two-Phase Hybrid Stepping Motor on TSM320F2808 DSC

[4]. Information – VACuumshmelze, Rare-Earth Permanent Magnet Materials, VACODYM®, VACOMAX®

[5]. Meeker D., Finite Element Method Magnetic. V3.1 User Manual. 2001

[6]. Tokuz Dulger L.C., Serdan Uyan, Modeling, simulation and control for a four-bar mechanism with a brushless servo-motor, Mechatronics Vol.7 No.4©1997

[7]. Wolf J., Spath H., Switched Reluctance Motor With 16 Stator Poles and 12 Rotor Teeth. Elektrotechnisches Institut, Universitat Karlsruhe

[8]. Lis M., An Algorithm for Calculation of Chosen Differential Parameters for a Brushless Motor with Permanent Magnet

Excitation with Sine Control (PMSM), Przegląd Elektrotechniczny R.88 nr 6, s.128-130, 2012.

[9]. Lis M., A Comparison of Magneto-Mechanical Time Dependencies of a Brushless Motor with Permanent Magnet Excitation in BLDC and PMSM Modes, Prz.Elektrot. R.87 nr 12b, s.118-120, 2011.

Autorzy

dr inż. Krzysztof Szewczyk
Politechnika Częstochowska
al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa
E-mail: szewczyk500@gmail.com

mgr inż. Adam Kościelniak
absolwent Politechniki Częstochowskiej
ul. Kosmiczna 1, 42-274 Konopiska
E-mail: megamanb@poczta.fm

mgr inż. Ryszard Kot
Instytut Zaawansowanych Technologii
Wytwarzania, Zakład Niekonwencjonalnych
Technologii Produkcyjnych
30-011 Kraków, ul. Wrocławska 37A
ryszard.kot@ios.krakow.pl

dr inż. Elżbieta Moryń-Kucharczyk
Politechnika Częstochowska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa
E-mail: moryn@imc.pcz.czyst.pl