

Wyznaczanie parametrów elektromagnetycznych silnika PMDC z wykorzystaniem metody elementów skończonych

Streszczenie. W pracy przedstawiono obliczenia parametrów elektromagnetycznych maszyny komutatorowej prądu stałego wzbudzonej magnesami neodymowymi prostokątnymi. Analizę przeprowadzono w oprogramowaniu ANSYS Maxwell. W oparciu o otrzymane wyniki wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej w przekroju poprzecznym maszyny oraz w szczelinie. Ponadto wyznaczono moment zaczepowy i elektromagnetyczny w funkcji kąta obrotu. Wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów na modelu fizycznym.

Abstract. The paper presents calculations of the electromagnetic parameters of a DC commutator machine excited by rectangular neodymium magnets. The analysis was conducted using ANSYS Maxwell software. Based on the obtained results, the distribution of magnetic induction in the cross-section of the machine and in the air gap was determined. Additionally, the cogging torque and electromagnetic torque as functions of the rotation angle were determined. The calculation results were compared with the measurement results from the physical model. (**Determining the electromagnetic parameters of a PMDC motor using the finite element method.**)

Słowa kluczowe: silnik komutatorowy, magnesy trwałe, metoda elementów skończonych.

Keywords: comutator motor, permanent magnets, finite element method.

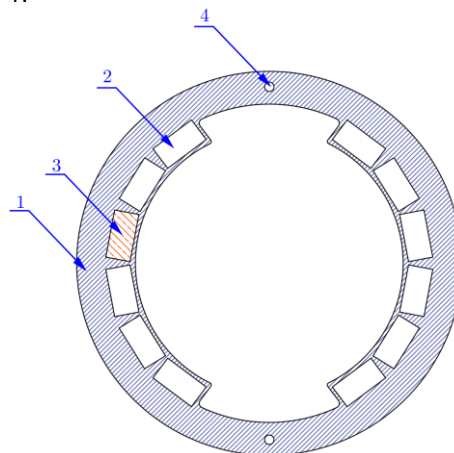
Wstęp

Pierwsze znane maszyny elektryczne były maszynami o wzbudzeniu magnetoelektrycznym i powstały w XIX wieku. Ówczesnie stosowane magnesy miały niewielką gęstość energii – nieprzekraczającą 10 kJ/m³. W związku z tym dalszy rozwój maszyn elektrycznych dokonał się za sprawą maszyny o wzbudzeniu elektromagnetycznym. Mimo to maszyny wzbudzone magnesami dalej koncentrowały uwagę badaczy. Masowa produkcja tanich magnesów ferrytowych przyczyniła się do powszechnego stosowania magnesów w maszynach małej mocy (≤1000 W). Maszyny takie miały mniejsze gabaryty i masę od odpowiadających im maszyn o wzbudzeniu elektromagnetycznym. Prawdziwy przełom w konstruowaniu maszyn wzbudzonych magnesami trwałymi miał miejsce pod koniec wieku XX. Wtedy to powszechnie zaczęto wytwarzać magnesy ze spieków ziem rzadkich – głównie stosując smar i neodym [1]. Obecnie maszyny o wzbudzeniu magnetoelektrycznym są grupą maszyn najchętniej stosowanych. Do ich stosowania zachęca wysoka sprawność, duża gęstość mocy oraz dobre właściwości dynamiczne. Konstruktorzy tego typu maszyn muszą mierzyć się jednak z ich słabymi stronami takimi jak występowanie momentu zaczepowego, pogarszające się ze wzrostem temperatury i upływem czasu parametry magnesów, ryzykiem ich odklejania czy wysoką ceną. Ze względu na budowę oraz sposób sterowania wyróżnić można maszyny bezszczotkowe prądu stałego (BLDC), bezszczotkowe maszyny synchroniczne (BLSM i PMSM) oraz silniki komutatorowe z magnesami PMDC. Te ostatnie pomimo bardzo prostej budowy, łatwego układu zasilania oraz niskiej ceny wykorzystywane są powszechnie w maszynach o niewielkiej mocy ze względu na stosowane powszechnie magnesy ferrytowe.

Silnik PMDC o wzbudzeniu od magnesów NdFe prostokątnych

Zastępowanie tanich magnesów ferrytowych magnesami o większej gęstości energii nie jest powszechnie stosowane. Przyczyną tego stanu rzeczy jest wysoka cena magnesów spiekanych w kształcie wycinka pierścienia – takiego kształtu magnesy stosuje się w maszynach komutatorowych. Magnesy ferrytowe w procesie produkcji formowane są w dowolne kształty.

W przypadku magnesów z domieszką ziem rzadkich magnesy o takich kształtach uzyskuje się poprzez wycięcie z większego prostokątnego bloku. Powoduje to znaczny wzrost kosztów. W pracy przedstawiono obliczenia MES dla modelu silnika o zmodernizowanej konstrukcji stojana. W analizowanej maszynie magnesy o skomplikowanym kształcie zastąpiono pakietem magnesów prostokątnych – jak przedstawiono na rysunku 1.



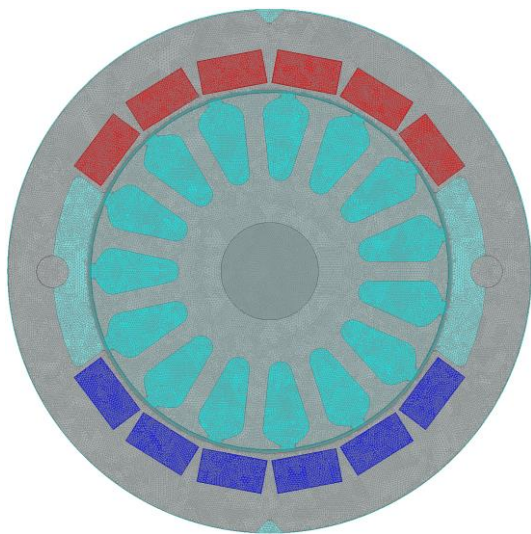
Rys.1. Przekrój poprzeczny analizowanej maszyny o zmodernizowanej konstrukcji stojana: 1. Pakiet blach, 2. Prostokątne otwory na magnesy, 3. Magnes neodymowy, 4. Otwory montażowe [2]

Zaletą tego rozwiązania jest brak ryzyka odklejania, znacznie niższa cena ze względu na zastosowanie magnesów prostokątnych oraz łatwy montaż [2, 3]. Potencjalny problem stanowić może zamykanie się części strumienia poprzez ścianki pomiędzy magnesami. Należy zatem zadbać aby odległości były jak najmniejsze związane z możliwościami produkcyjnymi – poniżej 1mm.

Model połowy silnika w oprogramowaniu ANSYS Maxwell

Rozwój techniki w zakresie numerycznych metod obliczeniowych, a także wzrost wydajności komputerów spowodowały że analiza połowa jest obecnie jednym z podstawowych narzędzi analizy parametrów maszyn

elektrycznych [4,5]. W oparciu o koncepcje przedstawioną powyżej opracowano model połowy silnika. Obliczenia przeprowadzono w oprogramowaniu ANSYS Maxwell wykorzystując pakiet Maxwell 2D i solver Transient [6]. Pierwotnie przygotowany został model silnika bez uzwojeń – rysunek 2. Model ten posłużył do wyznaczenia rozkładu indukcji magnetycznej oraz momentu zaczepowego.

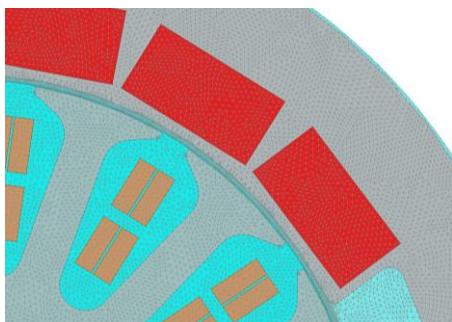


Rys.2. Model połowy badanego silnika

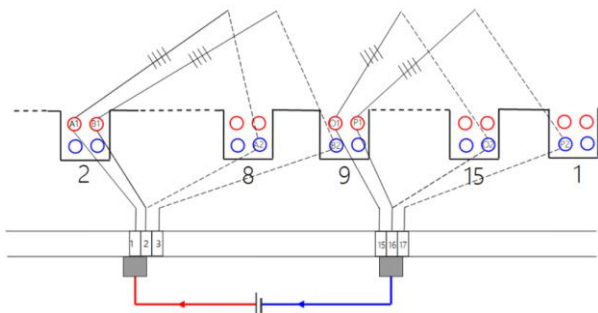
W tabeli 1. przedstawiono przyjęte parametry symulacji.

Tabela 1. Parametry symulacji

Parametry siatki	
Maksymalny rozmiar elementu	0,5 mm
Maksymalny rozmiar elementu w szczelinie	0,1 mm
Liczba elementów siatki	111726
Parametry materiałowe	
Magnesy	NdFe35
Stal wirnik i stojan	Steel 1008
Pozostałe parametry modelu	
Długość modelu	60 mm
Skos	0° (brak)



Rys.3. Fragment modelu uzwojonej maszyny



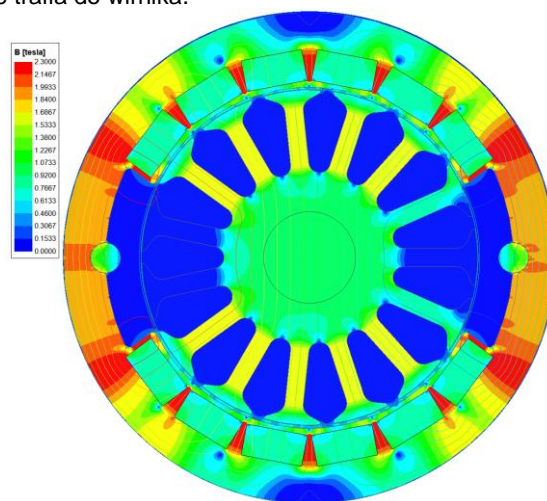
Rys.4. Schemat uzwojenia silnika

Przyjęto maksymalny rozmiar elementu nie większy niż 0,5mm dla całego modelu z wyłączeniem szczeliny gdzie siatkę zagęszczono. Maksymalny rozmiar elementu w szczelinie zdefiniowano na 0,1 mm.

Następnie do modelu połowego dodano uzwojenia rozłożone w 15 żłobkach wirnika maszyny. Korzystając z narzędzia *Maxwell Circuit* zasymulowano pracę komutatora. Zdefiniowano uzwojenie pętlicowe, dwuwarstwowe o zmiennym poskoku: 8 zwojów w cewce, drut 0,95 mm. Uzwojenie takie poprawia komutację w maszynie która nie ma biegunów komutacyjnych [7,8]. Przyjęto przepływ prądu poziomie prądu znamionowego 12,5 A. Prąd rozplywa się na dwie gałęzie uzwojenia – szczotka stale styka się z 2 wycinkami komutatora.

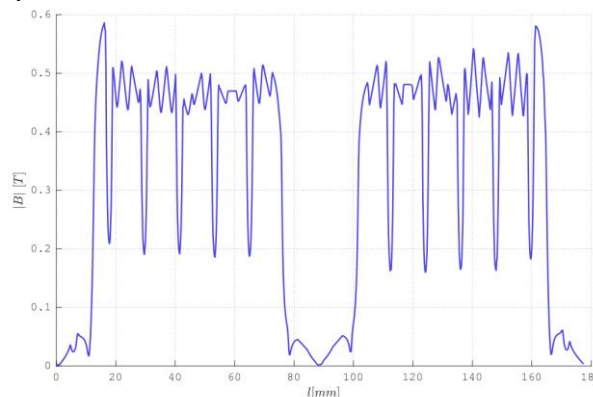
Wyniki obliczeń MES

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń połowych wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej oraz przebieg drogi strumienia magnetycznego w przekroju poprzecznym maszyny. Zgodnie z przypuszczeniami niewielka część strumienia zamyka się w ściankach między magnesami i nie trafia do wirnika.



Rys.5. Model połowy badanego silnika

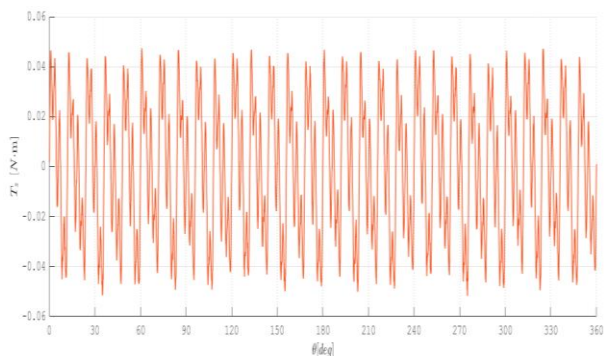
Wartość indukcji magnetycznej w ściankach między magnesami wynosi ponad 2,2 T. Zdecydowana większość strumienia pochodzącego od magnesów trafia do wirnika tworząc zamknięte pętle magnetowodu przez jarzmo stojana.



Rys.6. Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej

Indukcja magnetyczna osiąga największe wartości przy krawcach nabiegunków – około 0,58 T. W okolicach magnesów wartość waha się w zakresie 0,44-0,52 T. W okolicach ścianek między magnesami można dostrzec spore wahania wartości indukcji. Najniższa wartość indukcji

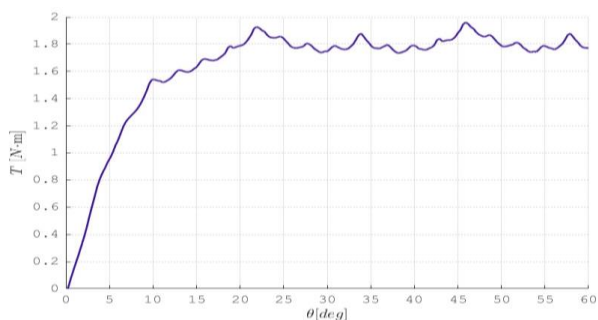
występuje w odcinku szczeliny znajdującym się między biegunami silnika.



Rys.6. Moment zaczepowy w funkcji kąta obrotu wirnika

Na rysunku 6 przedstawiono wartość momentu zaczepowego maszyny w funkcji kąta obrotu. W symulacji dla nieuzwojonej maszyny wymuszono obrót wirnika z prędkością 1 0/s. Przyjęto czas symulacji 360 s, z krokiem 0,1 s, tak aby zarejestrować pełny obrót wirnika ze skokiem 0,1°. Obliczona amplituda momentu zaczepowego wynosi około 0,0518 N·m. Okres zmienności momentu zaczepowego wynosi około 12°.

Dla uzwojonej maszyny w symulacji wyznaczono wartość momentu elektromagnetycznego. Wymuszono ruch wirnika o prędkości 1000 obr./min. Wynik symulacji przedstawiono poniżej.



Rys.7. Moment elektromagnetyczny w funkcji kąta obrotu



Rys.8. Prototyp badanego silnika

Badania laboratoryjne i porównanie wyników pomiarów i obliczeń

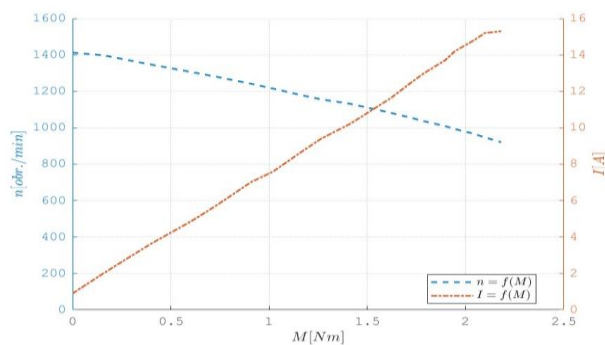
Po przeprowadzeniu obliczeń dla modelu polowego maszyny przeprowadzono badania dla prototypowego silnika – rysunek 8.

Budowę stojana silnika przedstawiono na rysunku poniżej. Stojan składa się z pakietu blach EP530 50A-130

połączonych śrubami. Na końcach pakietu umieszczono niemagnetyczne blachy zapobiegające wysuwaniu się magnesów.



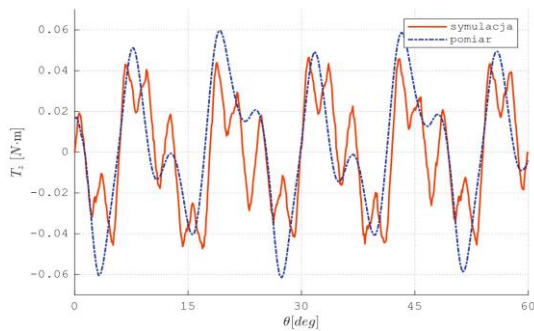
Rys.9. Stojan silnika komutatorowego wzbudzanego magnesami neodymowymi prostopadłościennymi



Rys.10. Charakterystyka prądu i prędkości obrotowej w funkcji momentu obciążenia silnika.

Na rysunku 10 przedstawiono charakterystykę mechaniczną oraz zależność prądu przepływającego przez uzwojenie twornika od momentu obciążenia maszyny. Badany silnik napędzał generator który stopniowo obciążano 12 stopniowym układem obciążającym zbudowanym z żarówek. Zamocowany w łożyskowanych uchwytach silnik poprzez zrównoważoną dźwignię naciskał na wagę za pomocą której zmierzono moment obciążenia. Przy prędkości obrotowej (1000 obr./min.) silnik generuje moment 1,9 N·m. Wynik ten jest mocno zbliżony z wynikiem uzyskanym w symulacji – ok 1,75-1,9 N·m. Na rysunku 10 przedstawiono porównanie momentu zaczepowego zmierzonego z wyznaczonym w wyniku obliczeń MES. Również w tym przypadku do pomiaru momentu wykorzystano wagę laboratoryjną i przymocowaną do wału maszyny dźwignię. Maksymalna wartość zmierzonego momentu zaczepowego wynosi 0,0585 N·m (około 13% więcej niż w symulacji). Pomiar momentu zaczepowego dokonano ze stojanem oraz bez stojana – aby wyznaczyć i odjąć udział tarcia łożysk w mierzonym momencie. [8]

Różnice w wartościach zmierzonego momentu wynikają z dokładności wykonania prototypowej maszyny. Ponadto na wynik pomiaru wpływ może mieć błąd związany z zastosowaną metodą pomiaru oraz dokładność i przybliżenia przyjęte w modelu obliczeniowym [9-10]. Obliczenia polowe pozwalają jednak w stopniu akceptowalnym wyznaczyć przebieg momentu zaczepowego oraz rząd jego wartości.



Rys.11. Porównanie momentu zaczepowego zmierzonego i obliczonego.

Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono wyniki analizy MES silnika prądu stałego o wzbudzeniu od prostopadłościennych magnesów neodymowych opracowanego według pomysłu przedstawionego w [2]. Uzyskane wyniki zweryfikowano na zbudowanym prototypie. Satysfakcjonująca zbieżność wyników obliczeń i pomiarów wskazuje na zasadność prowadzenia obliczeń dla modeli polowych. Przeprowadzenie symulacji okazuje się szczególnie przydatne w przypadku analizy wielokryterialnej, gdzie mnoga liczba modeli obliczeniowych zastępuje kosztowne i pracochłonne prototypowanie projektowanych maszyn. Należy zauważyć że w opracowanym modelu przyjęto szereg założeń upraszczających m.in. w obliczeniach momentu przyjęto przepływ prądu znamionowego przez uzwojenie silnika, pominięto zjawisko prądów wirowych.

Autorzy: mgr inż. Paweł Strączyński, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, al. Tysiąclecia PP 7 25-314 Kielce, E-mail: pstraczyński@tu.kielce.pl; dr hab. inż. Sebastian Różowicz, prof. PŚk, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Automatyki, al. Tysiąclecia PP 7 25-314 Kielce, E-mail: srozowicz@tu.kielce.pl; dr hab. inż. Zbigniew Goryca, Politechnika Świętokrzyska, al. Tysiąclecia PP 7 25-314 Kielce, E-mail: zgoryca@tu.kielce.pl; dr inż. Krzysztof

Baran, Politechnika Rzeszowska, Katedra Ergoelektroniki i Elektroenergetyki, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, E-mail: kbaran@prz.edu.pl;

LITERATURA

- [1]. Bernatt J., Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi. Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych „Komel”, 2010
- [2]. Goryca Z., Różowicz S., Goryca M., Stojan silnika komutatorowego, Wzór użytkowy PL72924Y1
- [3]. Strączyński P., Goryca Z., i Różowicz S., Analysis of the Impact of Selected Design Changes on the Cogging Torque of a Commutator Motor with Permanent Magnets, *Automatyka, Elektryka, Zakłócenia*, t. 14, nr 52, s. 96–109.
- [4]. Mynarek P., Kowol M., Łukaniszyn M., Zastosowanie metody elementów skończonych do wyznaczania parametrów elektromagnetycznych silnika PMSM, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, nr 75, s. 57–62, 2013.
- [5]. Różowicz S., Zawadzki A., Włodarczyk M., Wachta H. and Baran K.: Properties of fractional-order magnetic coupling Energies MDPI; *Energies* 2020, 13, 1539; ISSN 1996-1073; doi:10.3390/en13071539.
- [6]. Hallman D., Jankowski P., Przykłady obliczeń wolnozmiennych pól magnetycznych w środowisku Ansys-Maxwell, Akademia Morska w Gdyni, 2016
- [7]. Różowicz, S. Voltage modelling in ignition coil using magnetic coupling of fractional order. *Archives of Electrical Engineering* 2019, 68, 227–235. doi 10.24425/aee.2019.128264.
- [8]. Glinka T., Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi, Wydawnictwo WNT, 2018
- [9]. Mazur D., Gołębiowski M., Rudy M., Modelowanie i analiza układów elektromechanicznych metodą elementów skończonych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2016.
- [10]. Różowicz S., Tofil Sz.: The influence of impurities on the operation of selected fuel ignition systems in combustion engines, *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 65(2), pp.349-360, doi:10.1515/aee-2016-0026.