

*silnik synchroniczny magnetoelektryczny, materiał proszkowy,
symulacje polowe, analiza porównawcza struktur*

Cezary JĘDRYCZKA*, Wiesław ŁYSKAWIŃSKI*,
Jacek MIKOŁAJEWICZ*, Rafał WOJCIECHOWSKI*

ANALIZA STRUKTUR MAGNETOELEKTRYCZNYCH SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH O ROZRUCHU CZĘSTOTLIWOŚCIOWYM. MODELOWANIE

W artykule omówiono struktury silników magnetoelektrycznych z magnesami NdFeB i obwodem magnetycznym wykonanym z materiału proszkowego Somaloy 500. Podano czynniki wpływające na właściwy dobór struktury obwodu magnetycznego. Rozpatrzono dwa typy struktur silników: (a) silniki z magnesami umieszczonymi na obwodzie wirnika i (b) silniki, w których magnesy umieszczono wewnątrz wirnika. Przedstawiono opracowane w programie Maxwell modele symulacyjne rozpatrywanych silników.

1. WPROWADZENIE

Od blisko dwudziestu lat obserwuje się rosnące zainteresowanie silnikami magnetoelektrycznymi. Ich ewolucję zawdzięcza się dynamicznemu rozwojowi układów energoelektronicznych oraz znaczącemu obniżeniu kosztów ich wytwarzania. Istotnym czynnikiem, który przyczynił się do rozwoju tych maszyn jest także opanowanie technologii produkcji materiałów magnetycznie twardych na bazie ziem rzadkich. Materiały tego typu charakteryzują się dużą wartością gęstości energii oraz indukcji remanentu [5]. Dzięki temu istnieje możliwość uzyskiwania większych gęstości mocy i sprawności silników magnetoelektrycznych w porównaniu z silnikami wzbudzonymi klasycznie. Kolejnym czynnikiem, który w znaczący sposób może przyczynić się do dalszego rozwoju silników magnetoelektrycznych jest wprowadzenie nowych typów materiałów magnetycznych wykonanych na bazie proszków. W ostatnim czasie coraz częściej obserwuje się, że elementy konstrukcyjne silników, takie jak wirnik czy stojan, wykonuje się z materiałów proszkowych [3, 7]. Zastosowanie kompozytów

* Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań.

proszkowych lub spieków do wyrobu podzespołów silników umożliwia swobodne kształtowanie geometrii obwodu magnetycznego oraz pozwala w łatwy sposób pozyskiwać pożądane parametry magnetyczne i elektryczne stosowanych kompozytów, co odbywa się przez stosowny dobór domieszek [6, 7]. Dodatkowo w wielu jednostkach naukowych na świecie rozwijana jest technologia produkcji wielowarstwowych elementów hybrydowych stosowanych do budowy silników [8].

Technologia wytwarzania materiałów proszkowych o złożonej strukturze wielowarstwowej w jednym procesie technologicznym, pozwala na znaczną redukcję kosztów i czasu produkcji komponentów do budowy silników elektrycznych. Dotyczy to także budowy nowych energooszczędnych silników magnetoelektrycznych z magnesami trwałymi. W świetle opisanych zmian i trendów rozwojowych w dziedzinie produkcji maszyn magnetoelektrycznych w celu jak największego wyzyskania materiałów oraz minimalizacji kosztów wytwarzania konieczny jest odpowiedni dobór struktury ich obwodu magnetycznego.

Stosując jako kryterium kierunek strumienia głównego maszyny, można wyróżnić konstrukcje o strumieniu radialnym, poprzecznym [2] czy strumieniu mieszanym [1]. W artykule skoncentrowano się na analizie silników o strumieniu radialnym. Rozpatrzono dwa typy struktur: (a) silniki z magnesami umieszczonymi na obwodzie wirnika i (b) silniki, w których magnesy rozmieszczono wewnątrz wirnika. Dużo uwagi poświęcono sposobom kształtowania i rozmieszczenia samych magnesów na obwodzie i wewnątrz wirnika. W artykule ograniczono się do przedstawienia wyników badań ośmiu, najbardziej reprezentatywnych, konstrukcji silników. Podano czynniki wpływające na właściwy dobór struktury obwodu magnetycznego. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń polowych: składowej radialnej wektora indukcji magnetycznej w szczelinie, przebiegów indukowanych sił elektromotorycznych, momentu zaczepowego oraz momentu użytecznego. Modele symulacyjne rozpatrywanych silników opracowano w środowisku Maxwell v. 14.

2. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA DOBÓR STRUKTURY OBWODU MAGNETYCZNEGO

Struktura obwodu magnetycznego maszyny magnetoelektrycznej w znacznym stopniu zależy od właściwości magnetycznych zastosowanego materiału magnetycznie twardego. Podstawowe własności magnesu określa się za pomocą charakterystyk odmagnesowania, gęstości energii magnetycznej właściwej $(BH)_{\max}$, pozostałości magnetycznej B_r , natężenia koercji H_c oraz dopuszczalnej temperatury pracy.

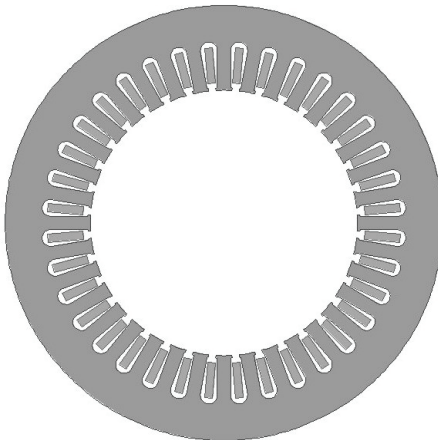
Strumień magnetyczny główny w silniku synchronicznym magnetoelektrycznym powinien być odpowiednio duży, aby zapewnić uzyskanie dużego momentu obrotowego synchronicznego. Jednak podczas pracy synchronicznej z małą prędkością obrotową strumień magnesów trwałych wywołuje okresowo zmienny moment obrotowy. Powstaje

on w wyniku zmiany reluktancji szczeliny powietrznej w funkcji położenia wirnika. W stanie bezprądowym moment ten nazywany jest momentem zaczepowym. Przy pracy z obciążeniami o małym momencie bezwładności pulsacje momentu elektromagnetycznego powodują niepożądane pulsacje prędkości. Z powyższych względów przy doborze struktury obwodu magnetycznego należy uwzględniać także wartość i przebieg momentu zaczepowego. Przy projektowaniu magnetoelektrycznych silników synchronicznych dąży się do uzyskania sinusoidalnych przebiegów indukowanych sił elektromotorycznych (SEM). Mała zawartość wyższych harmonicznych w SEM ogranicza poziom odkształcenia prądów fazowych oraz zmniejsza wartość strat w żelazie. Do poprawy parametrów funkcjonalnych wykorzystywane są także metody bazujące na odpowiednim kształtowaniu rozkładu pola wzbudzanego przez magnesy trwałe. Wykorzystuje się w tym celu wirniki o złożonych układach magnesów lub magnesy o niejednorodnym kierunku magnesowania [1, 2]. W artykule skupiono się na analizie struktur wirników z magnesami o jednorodnym kierunku magnesowania.

W silnikach przeznaczonych do rozruchu częstotliwościowego nie występuje konieczność stosowania klatki rozruchowej. Nie mniej jednak ze względu na stabilność pracy maszyny przy zmiennych obciążeniach celowe jest stosowanie zwartych obwodów tłumiących. Wykonywane są one zazwyczaj w postaci klatki tłumiącej lub przewodzącej tulei (najczęściej aluminiowej), w której umieszczany jest wirnik maszyny [2].

3. WYBRANE STRUKTURY SILNIKÓW

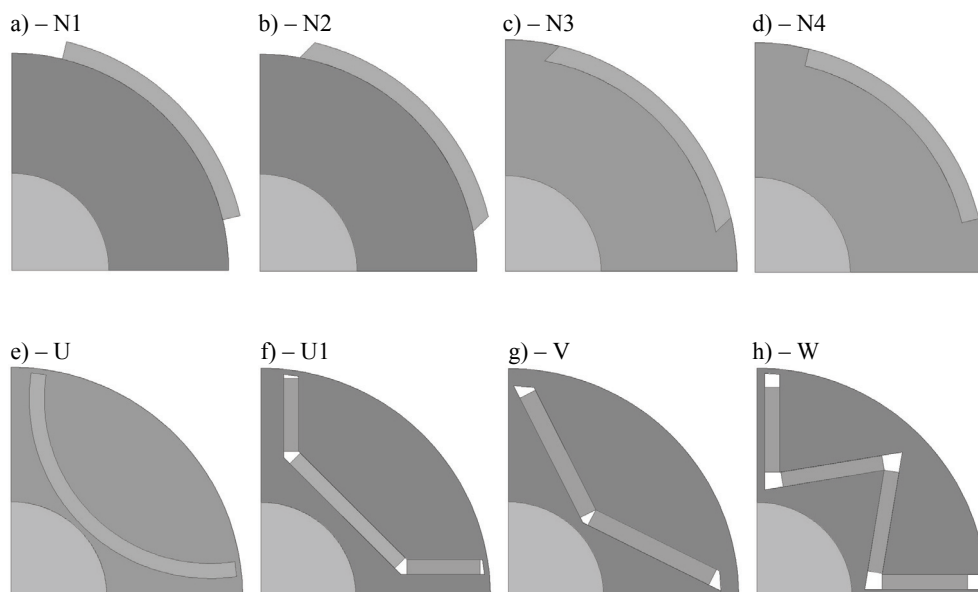
W artykule skoncentrowano się przede wszystkim na modelowaniu struktur magnetoelektrycznych silników synchronicznych o klasycznym obwodzie magnetycznym, tj. maszyn z wirnikiem wewnętrznym. Strukturę uzłobkowanego stojana



Rys. 1. Stojan silnika
Fig. 1. Stator of the motor

Tabela 1. Podstawowe wymiary geometryczne silników oraz parametry magnesów
 Table 1. Major geometrical dimensions of the motors and parameters of magnets

Średnica zewnętrzna stojana D_z	Średnica zewnętrzna wirnika D_w	Liczba żłobków	Indukcja remanentu B_r	Natężenie koercji H_c	Długość pakietu L_i	Szczelina powietrzna δ
[mm]	[mm]	[-]	[T]	[kA/m]	[mm]	[mm]
154	92,5	36	1,04	838	120	1



Rys. 2. Struktury wirników modeli silników: (a–d) z łukowymi magnesami na powierzchni namagnesowanymi promieniowo: a) o prostych krawędziach, b) o ściętych krawędziach, c) o prostych krawędziach wsuwanych w pakiet wirnika, d) o ściętych krawędziach wsuwanych w pakiet wirnika; e) z łukowymi magnesami wsuwanymi, f) z prostopadłościennymi magnesami wsuwanymi – w kształcie litery „U”, g) z prostopadłościennymi magnesami wsuwanymi – w kształcie litery „V”, h) z prostopadłościennymi magnesami wsuwanymi – w kształcie litery „W”
 Fig. 2. Rotors structures of motors models: (a–d) with radial magnetized magnets on the surface of the rotor: a) with straight edges, b) with beveled edges, c) with straight edges retracted in the rotor, d) with beveled edges retracted in the rotor, e) with arched “U” shape magnets retracted in the rotor, f) with retracted block magnets – shaped “U”, g) with retracted block magnets – shaped “V”, h) with retracted block magnets – shaped “W”

pokazano na rys. 1. Podstawowe wymiary charakteryzujące obwód magnetyczny zestawiono w tabeli 1. Rozpatrywane w artykule maszyny różnią się strukturą wirnika. Analizowano struktury z magnesami naklejanymi na zewnętrzną powierzchnię wirnika oraz z magnesami umieszczonymi wewnątrz pakietu wirnika. W szczególności

rozpatrzono silniki z zaprezentowanymi na rys. 2a–2d wirnikami z magnesami naklejanymi. Rysunek 2a przedstawia najprostszą strukturę wirnika z naklejanymi magnesami o prostych krawędziach, natomiast na rysunku 2b pokazano wirnik ze ściętymi krawędziami magnesów. Na rysunkach 2c i 2d zaprezentowano struktury z tzw. magnesami wsuwanymi odpowiednio o prostych i ściętych krawędziach.

Drugą rozpatrywaną podgrupę synchronicznych silników magnetoelektrycznych stanowią silniki o magnesach usytuowanych wewnątrz pakietu wirnika. Na rysunkach 2e do 2h pokazano warianty umiejscowienia magnesów wewnątrz wirnika. Rysunek 2g przedstawia strukturę wirnika z prostopadłościennymi magnesami wsuwanymi – w kształcie litery „V”. Na rysunku 2h pokazano strukturę wirnika z prostopadłościennymi magnesami wsuwanymi – w kształcie litery „W”, a na rys. 2e i rys. 2f – w kształcie litery „U”.

Podstawowe wymiary geometryczne silników oraz parametry materiałowe magnesów przyjęto identyczne dla wszystkich rozważanych wariantów, a ich wartości zestawiono w tabeli 1. Przyjęto, że obwód magnetyczny jest wykonany z materiału typu Somaloy 500 + 0.6 LB1, a umieszczone w wirniku magnesy z materiału NdFeB.

4. MODELE SYMULACYJNE SILNIKÓW

Dla rozpatrywanych w artykule struktur opracowano połowe modele symulacyjne umożliwiające wyznaczenie parametrów funkcjonalnych silników magnetoelektrycznych o rozruchu częstotliwościowym. Modele te zostały utworzone w środowisku Maxwell v.14 firmy Ansys. Ze względu na różny sposób wyznaczania poszczególnych parametrów funkcjonalnych dla danej struktury zostały opracowane cztery modele symulacyjne dedykowane odpowiednio do wyznaczania:

- rozkładu gęstości strumienia magnetycznego oraz rozkładu składowej radialnej wektora indukcji magnetycznej w szczelinie maszyny,
- przebiegów indukowanych sił elektromotorycznych,
- przebiegu momentu zaczepowego,
- przebiegu charakterystyki momentu użytecznego.

Dla każdego z czterech modeli symulacyjnych zastosowano zbiór jednakowych parametrów opisujących wymiary geometryczne wirnika oraz parametrów symulacji określających stan pracy maszyny. Należą do nich: długość szczeliny powietrznej, grubość magnesu, długość magnesu, prędkość obrotowa, liczba zwojów w cewce, skuteczna wartość prądu fazowego.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono i omówiono osiem wybranych, najbardziej reprezentatywnych, struktur silników synchronicznym magnetoelektrycznych o wirniku we-

wnętrznym przeznaczonych do rozruchu częstotliwościowego. Dla rozpatrywanych struktur opracowano cztery modele symulacyjne pozwalające na analizę wybranych parametrów funkcjonalnych silników. Modele opracowano wykorzystując oprogramowanie profesjonalne Maxwell v.14 firmy Ansoft.

Prace badawcze współfinansowane przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w projekcie nr POIG.01.01.02-00-113/09 pt. „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa”.

LITERATURA

- [1] DUDZIKOWSKI I., *Silniki komutatorowe wzbudzone magnesami trwałymi*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 58, Studia i Materiały, Nr 25, 2005, s. 37–59.
- [2] SINGH B., SINGH B.P., DWIVEDI S., *A State of Art on Different Configurations of Permanent Magnet Brushless Machines*, IE(I) Journal-EL, Vol. 87, June 2006, pp. 63–73.
- [3] SKARRIE H., *Design of powder core inductors*, Lund University, Lund 2001.
- [4] STACHOWIAK D., *Edge element analysis of brushless motors with inhomogeneously magnetized permanent magnets*, COMPEL – The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 23, No. 4, 2004, pp. 1119–1128.
- [5] SZELAĞ W., *Analiza stanów pracy i synteza silników synchronicznych magnetoelektrycznych – ujęcie polowe*, Rozprawy nr 331, Politechnika Poznańska, 1998, s. 110.
- [6] WĘGLIŃSKI B., *Rozwój magnetycznych kompozytów proszkowych w Politechnice Wrocławskiej*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 58, Studia i Materiały, Nr 25, 2005, s. 89–98.
- [7] WIŚNIEWSKA-WEINERT H., LESHCHYNSKY V., WENDLAND J., LISOWSKI J., *Rozwój technologii metalurgii proszków*, Stal Metale & Nowe Technologie, Nr 11–12, 2008, s. 52–57.

ANALYSIS OF VARIABLE SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS STRUCTURES. MODELING

In the article the eight different structures of variable speed permanent magnet motors with NdFeB magnets and magnetic circuit made of a powder soft magnetic composite material Somaloy 500 have been presented and discussed. Two types of motor structures were considered: (a) motors with magnets placed on the outer surface of the rotor, and (b) motors with magnets placed inside of the rotor. The criteria influencing the selection of the magnetic circuit structure are proposed and discussed. The field-circuit models of considered permanent magnet motors are briefly described.