

**Cezary JĘDRYCZKA, Marcin NOWAK, Kazimierz RADZIUK
i Dorota STACHOWIAK**

Politechnika Poznańska, Poznań

HYBRYD MAGNETS IN LINE START SYNCHRONOUS MOTORS MAGNESY HYBRYDOWE W SILNIKACH SYNCHRONICZNYCH O ROZRUCHU WŁASNYM

Wstęp

W ostatnich latach można zaobserwować rosnące zainteresowanie silnikami magnetoelektrycznymi. Silniki te charakteryzują się większym współczynnikiem mocy i sprawnością w porównaniu z klasycznymi silnikami indukcyjnymi klatkowymi. Z tego względu są one szczególnie pożądane w układach napędowych przeznaczonych do pracy ciągłej, stosowanych m.in. w napędach pomp i wentylatorów w górnictwie [1]. Poszukiwane są coraz doskonalsze, a zarazem tańsze eksploatacyjnie rozwiązania tych silników. W niniejszym artykule omówione zostaną wybrane konstrukcje silników przystosowanych do rozruchu bezpośredniego. W literaturze silniki te określane są skrótem LSPMSM (*ang. Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*) [2, 3].

Rozwój maszyn elektrycznych jest uzależniony od wielu czynników. Zależy on zarówno od postępu w dziedzinie materiałów magnetycznych i elektrycznie czynnych, materiałów izolacyjnych, jak i od doskonalenia metod analizy, projektowania i optymalizacji tych maszyn. W ostatnich latach dzięki osiągnięciom metalurgii proszkowej możliwe jest wykonanie elementów konstrukcyjnych silników, takich jak wirnik czy stojan, z materiałów proszkowych [4,6]. Zastosowanie kompozytów 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 odpowiedni dobór domieszek [5,6].

Do jednych z nowszych rozwiązań technologii proszkowej zaliczają się magnetyczne elementy hybrydowe. Elementy te składają się z przynajmniej dwóch materiałów o różnych właściwościach magnetycznych, wykonanych w jednym procesie technologicznym. W przypadku magnesów hybrydowych mogą to być magnesy wytwarzane z mieszanek różnych materiałów lub magnesy o strukturze warstwowej. Właściwości takich hybrydowych magnesów można kształtować w taki sposób, by dostosować je do konstrukcji i wymagań projektowanej maszyny elektrycznej [7].

W artykule przedstawiono wybrane struktury silników z magnesami hybrydowymi złożonymi z magnesów wytwarzanych metodą spiekania i dielektromagnesów wytwarzanych w Instytucie Tele- i Radiotechnicznym w Warszawie.

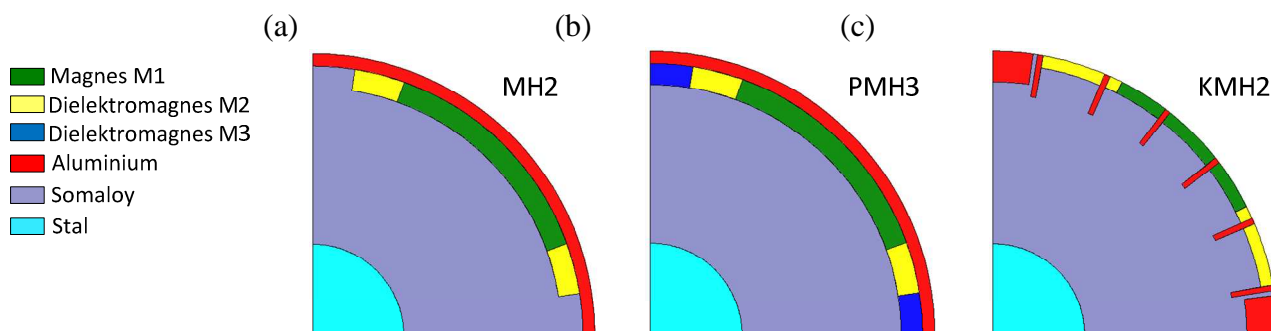
W celu oceny wpływu hybrydyzacji magnesów na parametry funkcjonalne wybranych struktur silników LSPMSM opracowano ich modele polowo-obwodowe oraz przeprowadzono szereg symulacji, wyznaczono między innymi rozkłady składowej radialnej wektora indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej, przebiegi sił elektromotorycznych indukowanych na biegu jałowym oraz dokonano symulacji procesu rozruchu maszyn. Przeprowadzono analizę otrzymanych wyników oraz przedstawiono wynikające z niej wnioski.

Wybrane struktury silników

W ramach prowadzonych badań nad poszukiwaniem optymalnych konstrukcji silników synchronicznych o rozruchu własnym z hybrydowymi magnesami trwałymi analizowano następujące wybrane konstrukcje:

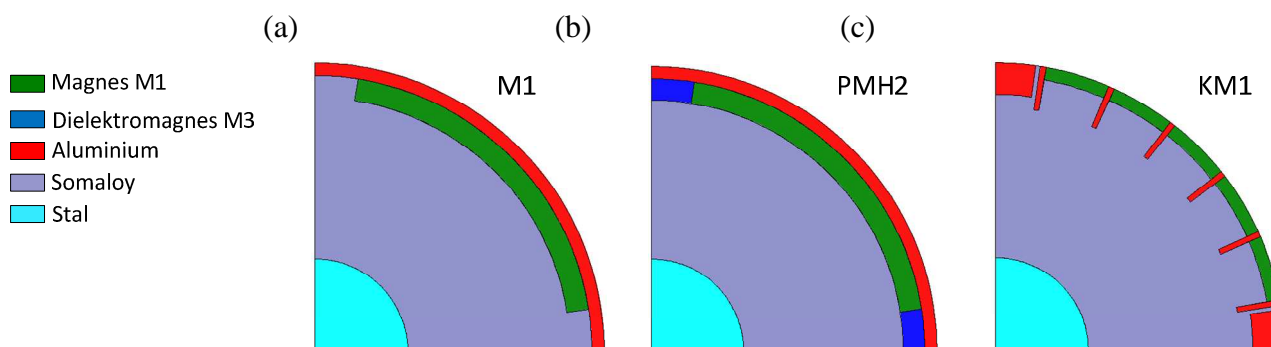
- MH2 - silnik z zewnętrzną warstwą wirnika wykonaną z materiału przewodzącego (aluminium) i umieszczonymi pod nią dwoma magnesami hybrydowymi (rys. 1a);
- PMH3 - silnik z zewnętrzną warstwą wirnika wykonaną z materiału przewodzącego (aluminium) i umieszczonymi pod nią na całym obwodzie wirnika trzema magnesami hybrydowymi (rys. 1b.);
- KMH2 - dwukłatkowy silnik z magnesami umieszczonymi między prętami jednej z kłatek (rys. 1c.).

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej przyjęto identyczne podstawowe wymiary geometryczne silników oraz parametry materiałowe obwodu magnetycznego dla wszystkich rozważanych wariantów. Wirnik we wszystkich modelach wykonany jest z dielektromagnetyka miękkiego typu Somaloy 500+0.6 LB1. Umieszczone w wirniku magnesy hybrydowe złożone są z silniejszego magnesu wytwarzanego metodą spiekania (magnes neodymowy M1 o parametrach $H_c=890000\text{A/m}$, $B_r=1,23\text{T}$) i dielektromagnesów (dielektromagnes M2 o parametrach $H_{c2}=404970\text{A/m}$, $B_{r2}=0,646\text{T}$ oraz dielektromagnes M3 o parametrach $H_{c3}=379600\text{A/m}$, $B_{r3}=0,6\text{T}$).



Rys. 1. Struktury wirników modeli silników o magnesach hybrydowych: (a) MH2, (b) PMH3, (c) KMH2

W celu sprawdzenia celowości stosowania magnesów hybrydowych w silnikach LSPMSM wykonano analizę struktur silników, w których dielektromagnes M2 został zastąpiony magnesem neodymowym M1 - rys 2.

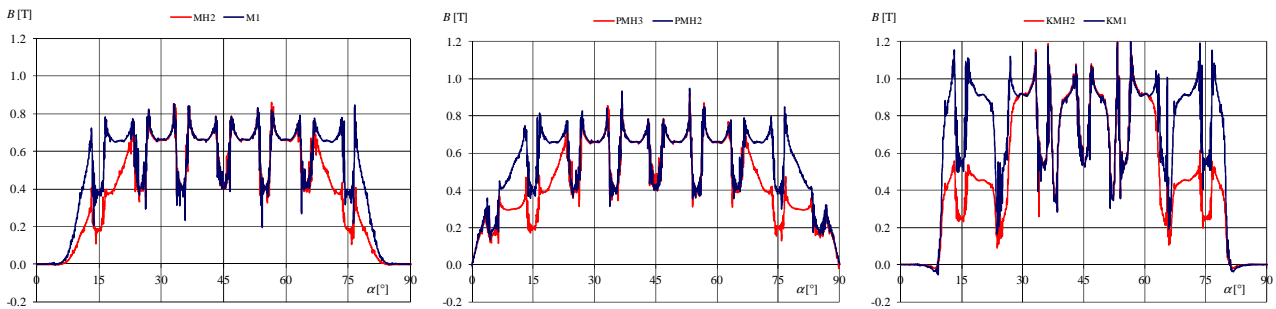


Rys. 2. Struktury wirników modeli silników: (a) M1, (b) PMH2, (c) KM1

Wyniki obliczeń symulacyjnych

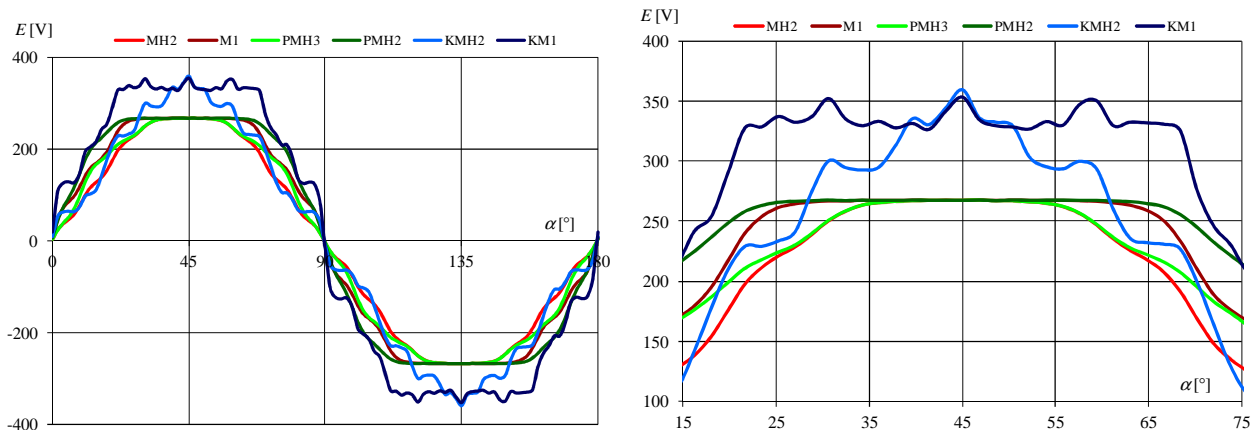
Połowe modele symulacyjne rozpatrywanych struktur silnika opracowano w środowisku Maxwell v.14 firmy Ansys. Przy tworzeniu modelu symulacyjnego silnika przyjęto, że stojan jest taki sam jak w czterobiegowym silniku indukcyjnym typu Sg100L-4, a zmianie ulegała jedynie struktura wirnika.

Porównanie otrzymanych rozkładów składowej radialnej wektora indukcji magnetycznej pokazano na rys. 3. Zastosowanie magnesów hybrydowych pozwala na swobodne kształtowanie rozkładu indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej. Największą wartość indukcji w szczeliny powietrznej otrzymano w silniku dwukłatkowym.



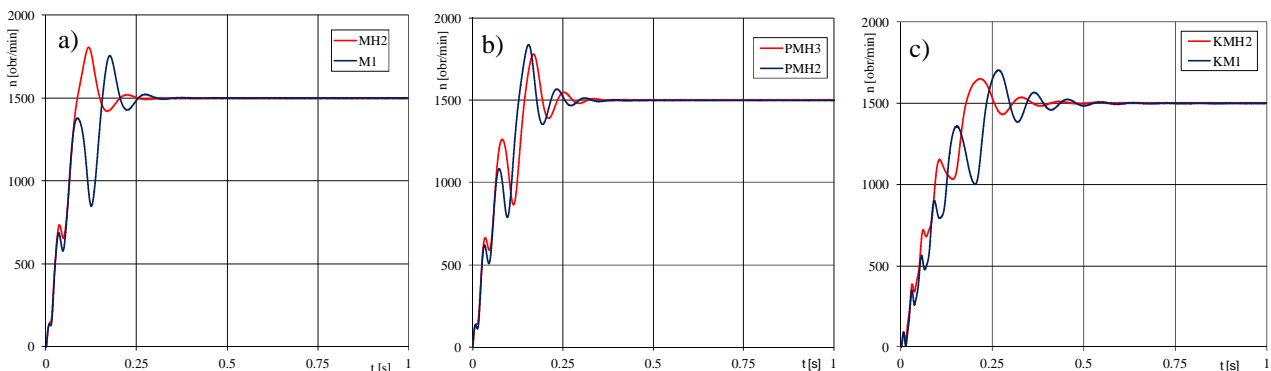
Rys. 3. Rozkład składowej promieniowej wektora indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej

Na rys. 4 porównano przebiegi indukowanych fazowych sił elektromotorycznych (SEM) dla rozpatrywanych struktur silników. Indukowaną w uzwojeniach siłę elektromotoryczną wyznaczono przy założeniu zerowych wartości prądów fazowych oraz przy pracy z wymuszoną prędkością obrotową 1500 obr/min.



Rys. 4. Przebiegi sił elektromotorycznych indukowanych w wybranej fazie uzwojenia stojana

Przebiegi prędkości obrotowej podczas rozruchu rozpatrywanych silników przedstawiono na rys. 5. Obliczenia wykonano przy momencie bezwładności obciążenia 3-krotnie większym od wartości momentu bezwładności wirnika i wentylatorowej charakterystyce obciążenia.



Rys. 5. Przebiegi prędkości obrotowej podczas rozruchu silników: (a) MH2 i M1, (b) PMH3 i PMH2, (c) KMH2 i KM1

Po zastosowaniu magnesów hybrydowych zmniejszają się oscylacje w pobliżu prędkości synchronicznej i jednocześnie nieznacznie skraca się czas rozruchu. W przypadku konstrukcji PMH3 i PMH2 przebiegi prędkości obrotowej podczas rozruchu są zbliżone.

Wnioski

Na podstawie analizy wyników otrzymanych podczas symulacji ustalonego stanu pracy oraz stanu zwarcia wyznaczono parametry funkcjonalne dla rozpatrywanych struktur silników takie jak: sprawność (η), współczynnik mocy ($\cos\phi$), pulsacje momentu oraz prąd (I_{rmax}) i moment rozruchowy (T_r). W tabeli 1 zestawiono wartości tych parametrów funkcjonalnych oraz dokonano analizy porównawczej silników o magnesach hybrydowych z silnikami o magnesach neodymowych wytwarzanych metodą spiekania.

Tabela. 1. Zestawienie wartości współczynnika mocy, sprawności, pulsacji momentu, prądu i momentu rozruchowego analizowanych silników

Struktura		MH2	M1	PMH3	PMH2	KMH2	KM1
$\cos\phi$	-	0.565	0.636	0.575	0.666	0.808	0.974
η	-	0.793	0.827	0.804	0.841	0.903	0.928
Pulsacje momentu	[%]	15.63	23.81	13.04	12.14	38.10	42.36
I_{rmax}	[A]	40.20	41.15	38.77	40.65	32.21	34.15
T_r	[Nm]	102.24	101.98	96.35	96.07	52.75	51.82

Analizując otrzymane wyniki (Tabela 1) można stwierdzić, że po zastosowaniu magnesów hybrydowych rośnie moment rozruchowy, maleją pulsacje momentu ale sprawność i współczynnik mocy także maleje.

Przeprowadzone badania symulacyjne pokazują, że zastosowanie magnesów hybrydowych ma istotny wpływ na parametry funkcjonalne silnika. Magnesy hybrydowe proponuje się stosować wszędzie tam gdzie ważne jest ograniczenie pulsacji momentu nawet kosztem pogorszenia sprawności i współczynnika mocy, a także w celu poprawienia parametrów rozruchowych silnika.

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. Barański M., Szelaż W., Jędrzycka C., Mikołajewicz J.: *Analiza silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim i magnesach w wirniku rozłożonych w kształcie litery U*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 66, Studia i Materiały Nr 32, Wrocław 2012, ss.78-85.
2. Popescu M., Miller T.: *Line start PM motor: single phase starting performance analysis*. IEEE Trans., IA-39, No.4, 2003, pp.1021-1030.
3. Jian L., Song J.; Cho Y.: *High performance Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor for pumping system*, International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 4-7 July 2010, 1308 – 1313.
4. Skarrie H.: *Design of powder core inductors*, Lund University, Lund 2001.
5. 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.
6. Wiśniewska-Weinert H., Leshchynsky V., Wendland J., Lisowski J.: *Rozwój technologii metalurgii proszków*, Stal Metale & Nowe Technologie, Nr 11-12 2008.
7. Kapelski D., Jankowski B., Karbowski M., Przybylski M., Ślusarek B.: *Research of magnetic properties of hybrid composite elements*. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 5a/2012, pp. 26-27.

dr inż. C. Jędrzycka, mgr inż. M. Nowak, dr inż. K. Radziuk i dr inż. D. Stachowiak
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3A 60-965 Poznań
tel.: +48 61 6652396
E-mail: dorota.stachowiak@put.poznan.pl