

Łukasz KNYPIŃSKI*
Lech NOWAK*

OPTIMALIZACJA MAGNETOELEKTRYCZNEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO O MAGNESACH ZŁOŻONYCH Z MATERIAŁÓW O RÓŻNYCH WŁAŚCIWOŚCIACH MAGNETYCZNYCH

W artykule przedstawiono wyniki optymalizacji struktury wirnika magnetoelektrycznego silnika synchronicznego wzbudzanego układem magnesów wykonanych z dwóch materiałów o różnych właściwościach magnetycznych. Obliczenia symulacyjne przeprowadzono w opracowanym oprogramowaniu z uwzględnieniem polowego modelu zjawisk elektromagnetycznych. Oprogramowanie składa się z dwóch modułów: modułu MES do polowej symulacji zjawisk występujących w silnikach PMSM oraz modułu optymalizacyjnego. Optymalizację parametrów silnika przeprowadzono przy użyciu algorytmu genetycznego. Przedstawiono i omówiono wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych i optymalizacyjnych.

1. WPROWADZENIE

W wyniku ciągłego rozwoju inżynierii materiałowej powstają magnesy trwałe o dużych gęstościach energii, lepszych parametrach magnetycznych, mechanicznych i termicznych. Współcześnie producenci i użytkownicy maszyn elektrycznych coraz częściej zwracają uwagę na energooszczędność urządzeń. Z powyższych powodów obserwowany jest wzrost zainteresowania oraz rozwój konstrukcji silników magnetoelektrycznych, to jest silników wzbudzanych magnesami trwałymi. Silniki te posiadają wiele zalet: wysoki stosunek momentu do masy, wyższą sprawność, niższe koszty eksploatacji, większą dynamikę działania oraz niską awaryjność [1, 6, 8]. Możemy wyodrębnić dwa zasadnicze rodzaje silników magnetoelektrycznych. Tak więc w zależności od kształtu przebiegu siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach stojana: silniki z sinusoidalnym przebiegiem siły elektromotorycznej rotacji (silniki synchroniczne – PMSM) oraz silniki z trapezoidalnym przebiegiem siły elektromotorycznej rotacji (silniki bezszczotkowe prądu stałego – BLDC). Różnorodność parametrów magnesów trwałych oraz szerokie spektrum zastosowań praktycznych tego typu maszyn, wpływa na zróżnicowanie konstrukcji maszyn synchronicznych

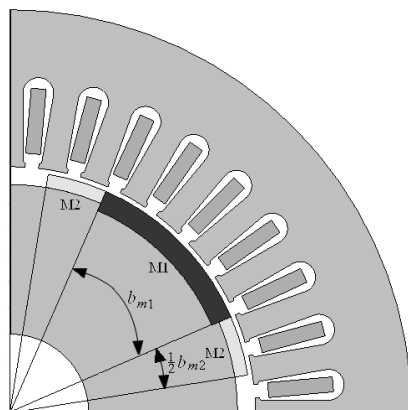
* Politechnika Poznańska.

wzbudzanych magnesami trwałymi [2]. W strukturach tych magnesy najczęściej są naklejane na zewnętrzną powierzchnię wirnika lub umieszczone wewnątrz pakietu wirnika (wsuwane). Wymiary, kształt oraz rozmieszczenie magnesów trwałych pozwala na osiągnięcie pożądanego przez konstruktora rozkładu pola w szczeliny powietrznej.

Rozwój technologii proszkowej umożliwia: swobodne kształtowanie geometrii elementów oraz zmiany właściwości magnetycznych w zależności od zastosowanych domieszek. W artykule przedstawione zostaną wyniki obliczeń optymalizacyjnych magnetoelektrycznego silnika synchronicznego, posiadającego magnesy złożone z materiałów o różnych właściwościach magnetycznych: a) spiekane materiały NeFeB, b) proszkowego diaelektromagnesu opracowanego przez Instytut Tele- i Radiotechniczny [11]. Pełne wykorzystanie zalet i właściwości takich silników wymaga poznania zjawisk, opracowania nowych, dokładnych modeli matematycznych oraz algorytmów ich projektowania i optymalizacji [7, 10].

2. STRUKTURA SILNIKA

Strukturę silnika przedstawiono na rys. 1. Podstawowe parametry charakteryzujące obwód magnetyczny stojana zestawiono w tabeli 1.



Rys. 1. Struktura silnika synchronicznego wzbudzanego układem magnesów

Tabela 1. Podstawowe wymiary i parametry silnika

Liczba par biegunów	Zewnętrzna średnica stojana	Wewnętrzna średnica stojana	Długość pakietu stojana	Długość szczeliny powietrznej	Liczba żłobków	Liczba zwojów w żłobku
[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
2	154	94	125	0,9	36	39

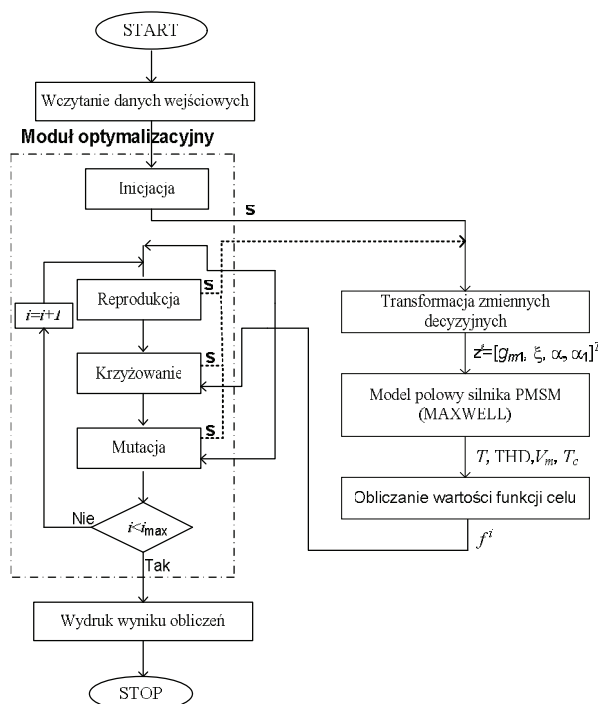
Rdzeń wirnika wykonano z magnetycznie miękkiego materiału proszkowego Somaloy 500 [9], na powierzchni którego naklejono magnes trwały, składający się z dwóch materiałów o różnych właściwościach magnetycznych ($M1$, $M2$). Obszar $M1$ magnesu jest wykonany z materiału NdFeB o właściwościach: $H_C = 890$ kA/m oraz $B_r = 1,23$ T, natomiast obszar $M2$ – z diaelektromagnesu proszkowego o właściwościach: $H_C = 404,97$ kA/m oraz $B_r = 0,646$ T.

Przeprowadzono optymalizację parametrów struktury wirnika z uwzględnieniem polowego modelu zjawisk elektromagnetycznych przy użyciu algorytmu genetycznego. Obiekt opisano za pomocą czterech zmiennych decyzyjnych: $z_1 = g_{m1}$ – grubość obszaru magnesu neodymowego, $z_2 = \xi$ – parametr określający względną grubość obszaru magnesu proszkowego $g_{m2} = \xi \cdot g_{m1}$, $z_3 = \alpha = (b_{m1} + b_{m2})/\tau$ – współczynnik wypełnienia podziałki biegunowej materiałem magnetycznym, $z_4 = \alpha_1 = b_{m1}/(b_{m1} + b_{m2})$ – względna rozpiętość kątowa obszaru $M1$, przy czym b_{m1} – rozpiętość kątowa magnesu neodymowego, b_{m2} – rozpiętość kątowa magnesu proszkowego, τ – podziałka biegunowa.

3. STRUKTURA OPROGRAMOWANIA

Oprogramowanie do optymalizacji struktury magnetoelektrycznego silnika o magnesach złożonych z materiałów o różnych właściwościach magnetycznych składa się z dwóch modułów: programu optymalizacyjnego oraz modułu do polowej symulacji stanów pracy silnika. Schemat blokowy programu przedstawiono na rys. 2.

Oba moduły tworzące program zostały połączone przez procedury: transformacji zmiennych decyzyjnych oraz obliczania funkcji celu. W module optymalizacyjnym do obliczeń wykorzystany jest wektor unormowany s [5], natomiast model polowy silnika opracowany w programie Maxwell wykorzystuje wektor zmiennych rzeczywistych z . Do optymalizacji wykorzystano algorytm genetyczny. W pojedynczym pokoleniu wykonywane są wszystkie operacje algorytmu genetycznego: reprodukcja (selekcja), krzyżowanie oraz mutacja. W modelu do symulacji stanów pracy silnika PMSM z uwzględnieniem polowego modelu zjawisk elektromagnetycznych wyznaczone są: średnia wartość momentu elektromagnetycznego T , zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu stojana THD, objętość materiałów magnetycznych V_m oraz maksymalną wartość momentu zaczepowego T_c .



Rys. 2. Schemat blokowy dwumodulowego oprogramowania do optymalizacji silników PMSM

4. WYNIKI OPTYMALIZACJI

Bardzo ważnym zagadnieniem podczas formułowania zadania optymalizacji jest właściwy dobór parametrów stanowiących kryterium optymalności oraz ograniczenia. W artykule [3] wykazano, że włączenie do kompromisowej funkcji celu jednocześnie składnika unimodalnego (użyteczny moment elektromagnetyczny) oraz składnika multimodalnego (moment zaczepowy) prowadzi do nieefektywnego działania algorytmu. Na podstawie zdobytych doświadczeń dotyczących zagadnienia optymalizacji maszyn magnetoelektrycznych przystosowanych do rozruchu częstotliwościowego wykorzystano koncepcję dwuetapowej optymalizacji [4].

Etap I. Optymalizacja z uwzględnieniem współczynnika THD zawartości harmonicznycch w przebiegu siły elektromotorycznej

W etapie pierwszym, w kryterium optymalności, obok momentu użytecznego i stopnia wykorzystania materiału magnetycznie twardego, uwzględniono współczynnik THD przebiegu indukowanej siły elektromotorycznej. Po wielu

obliczeniach testowych zaproponowano kompromisową addytywną funkcję celu dla i -tego osobnika w postaci:

$$f_i = \lambda_1 \left(\frac{T_i}{T_{av}} \right) + \lambda_2 \left(2 - \frac{THD_i}{THD_{av}} \right) + \lambda_3 \left(2 - \frac{V_{mi}}{V_{av}} \right) \quad (1)$$

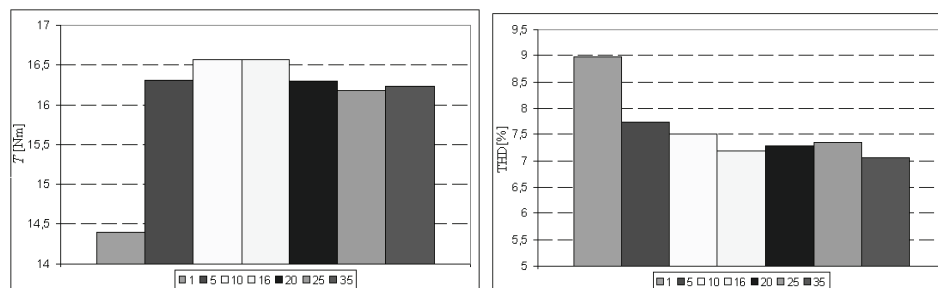
przy czym: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – współczynniki wagowe, T_{av}, THD_{av}, V_{av} – średnie wartości parametrów T, THD oraz V_m uzyskanych w procesie inicjacji algorytmu genetycznego.

Przyjęto następujące parametry algorytmu genetycznego: liczba osobników w populacji $L = 60$, wartość współczynnika mutacji $p_m = 0,005$, maksymalna liczba generacji równą $(N_p)_{max} = 35$. Założono wartości współczynników wagowych: $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0,75, \lambda_3 = 0,25$. Przebieg procesu optymalizacji zaprezentowano w tabeli 2. Dla wybranych pokoleń przedstawiono wartości: zmiennych decyzyjnych, parametrów silnika oraz wartość funkcji celu dla najlepszego osobnika w pokoleniu.

Tabela 2. Przebieg pierwszego etapu procesu optymalizacji

N_p	g_{m1}	ξ	α	α_1	T	THD	V_m	T_c	f
	[mm]	[-]	[-]	[-]	[Nm]	[%]	[cm ³]	[Nm]	[-]
1	4,022	1,019	0,799	0,545	14,400	8,982	24,066	0,583	1,246841
3	3,197	1,195	0,809	0,629	16,190	6,825	23,903	1,039	1,425541
5	3,144	1,072	0,782	0,704	16,308	7,736	21,701	0,655	1,470121
10	3,144	0,900	0,791	0,704	16,296	7,499	20,908	0,247	1,473461
16	3,144	0,824	0,821	0,704	16,561	7,189	21,206	0,925	1,474563
20	3,019	0,881	0,813	0,704	16,298	7,279	20,540	0,692	1,490000
25	3,019	0,806	0,812	0,704	16,172	7,356	19,605	0,571	1,495876
30	3,019	0,749	0,817	0,704	16,236	7,064	19,838	0,751	1,496811
35	3,019	0,749	0,817	0,704	16,236	7,064	19,838	0,751	1,496812

Na rysunku 3 przedstawiono zmiany wartości składników kompromisowej funkcji celu w wybranych pokoleniach procesu optymalizacji.



Rys. 3. Porównanie wartości T oraz THD w wybranych pokoleniach

Etap II. Optymalizacja z uwzględnieniem momentu zaczepowego

Drugi etap syntezy struktury wirnika polegał na włączeniu do procesu optymalizacji momentu zaczepowego. Moment zaczepowy silnie zależy od rozpiętości α obszaru magnetycznego. W obszarze jednej podziałki biegunowej stojana posiada kilka maksimów i minimów [6], okres zmienności związany jest z podziałką zębówką τ_{z1} . Dlatego w drugim etapie zawężono przedział zmienności parametru α :

$$\left\langle \hat{\alpha} - 0,52 \frac{\tau_{z1}}{\tau}, \hat{\alpha} + 0,52 \frac{\tau_{z1}}{\tau} \right\rangle \quad (2)$$

przy czym: $\hat{\alpha} = 0,817$ – optymalna wartości zmiennej α wyznaczona w pierwszym etapie optymalizacji.

Optymalizację przeprowadzono dla multiplikatywnej funkcji celu:

$$f_i = t^{q_1} h^{q_2} t_c^{q_3} \quad (3)$$

Jako odniesienie przyjęto średnie wartości z inicjacji:

$$t = \frac{T}{T_{av}}, h = \frac{THD}{THD_{av}}, t_c = \frac{T_c}{T_{cav}}. \quad (4)$$

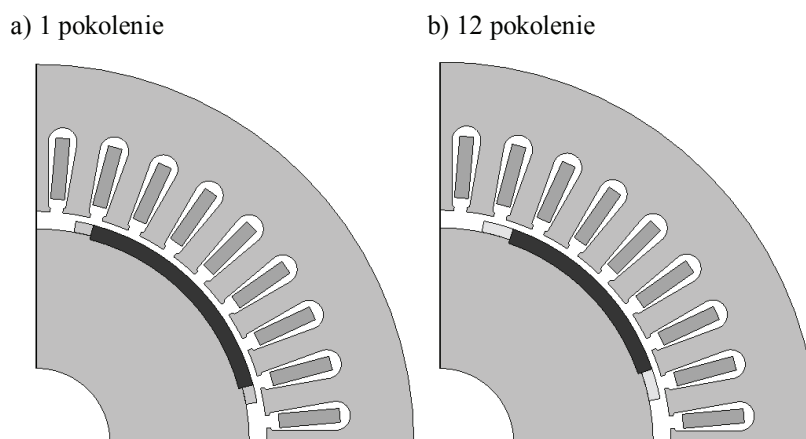
Przyjęto wartości optymalne z pierwszego etapu optymalizacji: grubość magnesu $g_{m1} = \hat{g}_{m1} = 3,019$ mm oraz wartość parametru $\xi = \hat{\xi} = 0,749$.

Na podstawie obliczeń testowych przyjęto współczynniki $q_1 = 2$, $q_2 = -1/2$, $q_3 = -1/2$. Porównanie wyników obliczeń dla kolejnych pokoleń przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Przebieg drugiego etapu procesu optymalizacji dla funkcji multiplikatywnej

N_p	α	α_1	T	THD	V_m	T_c	f_c
	[-]	[-]	[Nm]	[%]	[cm ³]	[Nm]	[-]
1	0,7741	0,8683	16,875	8,575	19,590	0,1850	2,63135471
2	0,8876	0,7697	17,323	12,01	21,899	0,1005	2,70846627
5	0,7750	0,8683	16,884	8,615	19,611	0,1827	2,71009390
7	0,7498	0,8683	16,643	7,689	18,976	0,3015	2,71009390
10	0,7499	0,7695	15,963	7,964	18,500	0,1648	2,71059382
12	0,7499	0,7695	15,963	7,964	18,500	0,1648	2,71059382

Rys. 4 ilustruje przekroje poprzeczne najlepszej maszyny w wybranych pokoleniach procesu optymalizacji.



Rys. 4. Porównanie przekroi poprzecznych maszyny w wybranych pokoleniach

W wyniku II etapu optymalizacji uzyskano ponad czterokrotne zmniejszenie wartości maksymalnego momentu zaczepowego przy nieznacznym zmniejszeniu, zaledwie o 1,5% momentu użytecznego. Uzyskano efekt ekonomiczny w postaci zmniejszenia objętości materiału magnetycznego o 10%. Ze względu na mniejszą wagę w kompromisowej funkcji celu współczynnik THD uległ pogorszeniu.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń optymalizacyjnych magnetoelektrycznego silnika synchronicznego wzbudzanego układem magnesów o różnych właściwościach magnetycznych. Zastosowanie magnesów trwałych złożonych z dwóch różnych materiałów umożliwia większy wpływ na rozkład pola w szczelinie niż w przypadku zastosowania magnesów jednorodnych. Zastosowanie wzbudzenia tak ukształtowanym układem magnesów zmniejsza wartość momentu zaczepowego oraz współczynnika THD.

LITERATURA

- [1] Dudzikowski I., Ciurys M., Komutatorowe i bezszczotkowe maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
- [2] Jędrzycka C., Łyakawiński W., Mikołajewicz J., Wojciechowski R., Analiza struktur magnetoelektrycznych silników synchronicznych o rozruchu częstotliwościowym. Modelowanie, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 66, Studia i Materiały Nr 32, Tom 1, Wrocław 2012, s.86-91.

- [3] Knypiński Ł., Nowak L., Algorytm optymalizacji magnetoelektrycznych silników synchronicznych z uwzględnieniem polowego modelu zjawisk elektromagnetycznych, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej* Nr 66, *Studia i Materiały* Nr 32, Wrocław 2012, s. 60 – 69.
- [4] Knypiński Ł., Nowak L., Dwuetapowa optymalizacja magnetoelektrycznych silników synchronicznych z uwzględnieniem współczynnika THD, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej* Nr 66, *Studia i Materiały* Nr 32, Wrocław 2012, s. 70 – 77.
- [5] Knypiński Ł., Nowak L., Sujka P., Radziuk K., Application of a PSO algorithm for identification of the parameters of Jiles-Atherton hysteresis model, *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 30, No. 2, June 2012, pp. 139 – 148.
- [6] Lindth P. M., Jussila H. K., Niemelä M., Parviainen A., Pyrhönen J., Comparison of concentrated windings permanent magnet motors with embedded and surface mounted rotor magnets, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, No. 5, pp. 2085 – 2089, 2009.
- [7] Łukaniszyn M., Kowol M., Kołodziej J., Modelowanie i optymalizacja silnika reluktancyjnego dwumodułowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 11, s. 100 – 106, 2011
- [8] Salminen P., Fractional slot permanent magnet synchronous motors for low speed applications, PhD thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta 2004.
- [9] Ślusarek B., Jankowski B., Kapelski D., Karbowiak M., Przybylski M., Łukaszewicz P., Wpływ zastosowania proszkowego obwodu magnetycznego na parametry eksploatacyjne silnika elektrycznego małej mocy, *Materiały konferencji Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Elektromechaniki i Mechatroniki PPEEm* 2012, Gliwice, 11 – 13 grudzień, s. 198 – 192.
- [10] Yamazaki K., Kanou Y., Shape optimization of rotating machines using time-stepping adaptive finite element method, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, No. 8, pp. 3113 – 3116, 2010.
- [11] Projekt POIG.01.01.02-00-113/09 pt. Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa, raport z prac zrealizowanych w ramach zadania 8E. Prace zrealizowane pod kierownictwem prof. W. Szeląga. <http://www.ngn.put.poznan.pl/BazaWiedzy/> (dostęp z dnia 24.01.2013).

OPTIMIZATION OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH SYSTEM MAGNETS ABOUT DIFFERENT MAGNETIC PROPERTIES

The paper presents the results of the optimization of the rotor permanent magnet synchronous motor with magnet composed of two materials about different magnetic properties. The software consists of two modules: a module to the field FEM simulation of phenomena PMSM motors and optimization module. The optimization module has been elaborated employing the Delphi environment. The genetic algorithm has been applied for the optimization. Selected results of the calculation and optimization are presented and discussed.