

*magnetoelektryczne silniki synchroniczne, optymalizacja,
algorytm genetyczny, pole elektromagnetyczne*

Łukasz KNYPÍŃSKI*
Lech NOWAK*

DWUETAPOWA OPTYMALIZACJA MAGNETOELEKTRYCZNYCH SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM WSPÓŁCZYNNIKA THD

Przedstawiono algorytm optymalizacji magnetoelektrycznych silników synchronicznych (PMSM) z uwzględnieniem polowego modelu zjawisk elektromagnetycznych. Opracowano oprogramowanie, które składa się z dwóch modułów: modułu MES do polowej symulacji zjawisk występujących w silnikach PMSM oraz modułu optymalizacyjnego OPT. Optymalizację parametrów strukturalnych silnika przeprowadzono przy użyciu algorytmu genetycznego. Przedstawiono rozwiązania dotyczące poprawności formułowania funkcji celu, w szczególności wyboru kryteriów cząstkowych w funkcji kompromisowej. Zaproponowano dekompozycję zadania optymalizacji – poprzez jego podział na dwa etapy. Przedstawiono wybrane wyniki testowych obliczeń symulacyjnych i optymalizacyjnych.

1. WPROWADZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących opracowania serii energooszczędnych silników synchronicznych o magnesach trwałych, które w przyszłości zastąpią silniki indukcyjne stosowane powszechnie do napędu pomp i wentylatorów. Badania są realizowane w ramach projektu „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Zaproponowano nowe, hybrydowe struktury silników o dowolnie kształtowanych obwodach magnetycznych, wykonanych z materiałów proszkowych.

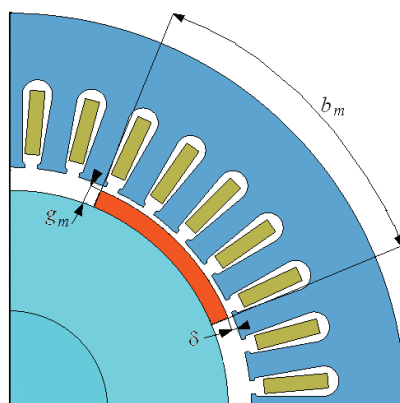
* Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań.

Realizowane są dwa rodzaje zadań polegające na: (a) zaprojektowaniu wirnika o optymalnej strukturze magnesów przy zadanym obwodzie magnetycznym stojana oraz (b) zaprojektowaniu obwodu magnetycznego i uzwojenia nowego silnika.

Nowe struktury silników wymagają opracowania nowych metod optymalnego projektowania. Podjęto próbę opracowania kompleksowego oprogramowania, w którym do optymalizacji wykorzystano algorytm genetyczny „współpracujący” z modułem zawierającym połowy model silnika. Istotnym zagadnieniem przy formułowaniu zadania optymalizacji jest wybór parametrów stanowiących kryterium optymalności i ograniczenia funkcjonalne. W artykule [3] wykazano, że włączenie do kompromisowej funkcji celu jednocześnie funkcji unimodalnej względem wybranej zmiennej (momentu użytecznego) i funkcji multimodalnej względem tej samej zmiennej (momentu zaczepowego) prowadzi do nieefektywnego działania algorytmu optymalizacji. Zaproponowano dekompozycję zadania. W etapie pierwszym, w kryterium optymalności, obok momentu użytecznego i stopnia wykorzystania materiału magnetycznie twardego uwzględniono współczynnik THD przebiegu indukowanej siły elektromotorycznej. Moment zaczepowy został włączony do funkcji celu – po zawężeniu obszaru przeszukiwań zmiennych decyzyjnych – w etapie drugim.

2. OPTIMALIZACJA Z UWZGLĘDNIENIEM WSPÓŁCZYNNIKA THD

Na etapie testowania oprogramowania do optymalizacji (z uwzględnieniem poleowego modelu zjawisk elektromagnetycznych) wybrano prostszy wariant zadania, to znaczy optymalizację wirnika na bazie stojana produkowanego seryjnie silnika indukcyjnego. Przyjęto strukturę z zewnętrznymi łukowymi magnesami – rys. 1.



Rys. 1. Przekrój maszyny z zaznaczonymi zmiennymi decyzyjnymi
Fig. 1. The cross-section of the machine with design variables

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych i optymalizacyjnych stwierdzono, że włączenie do kompromisowej funkcję celu składnika unimodalnego i multimodalnego [3] jest niewłaściwe. Bardzo silnie i niemonotonicznie zależne od zmiennych decyzyjnych dodatkowe kryterium opisujące moment zaczepowy wypacza proces optymalizacji. Algorytm jest zbyt „czuły” na zmiany tego momentu. Dlatego w dalszych rozważaniach zadanie optymalizacji zostało rozbite na dwa etapy. W pierwszym etapie nie uwzględniono momentu zaczepowego. W takim przypadku długość δ szczeliny będzie dążyła do zera. Jej wielkość jest ograniczona od dołu względami technologicznymi i zawiera się w przedziale od 0,8 do 1,0 mm [1]. Przyjęto $\delta = 0,9$ mm.

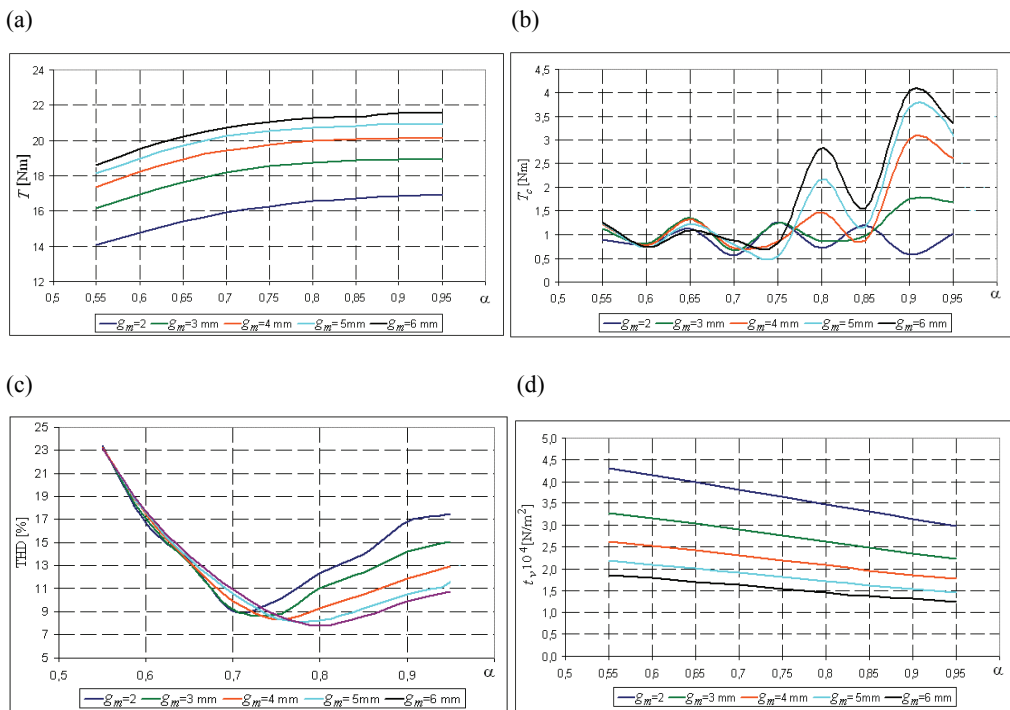
W celu rozpoznania zależności pomiędzy zmiennymi decyzyjnymi b_m i g_m wykonano szereg wstępnych obliczeń. Zmieniano grubość magnesu g_m oraz jego względną rozpiętość $\alpha = b_m/\tau$ – w przedziale 0,55–0,95. Obliczano między innymi:

- użyteczny moment elektromagnetyczny T ,
- maksymalny moment zaczepowy T_c w obszarze podziałki biegunowej,
- współczynnik THD przebiegu siły elektromotorycznej,
- moment t_v uzyskiwany z jednostki objętości magnesu (przy stałej długości maszyny jest to wartość uzyskiwana z jednostki pola powierzchni przekroju magnesu).

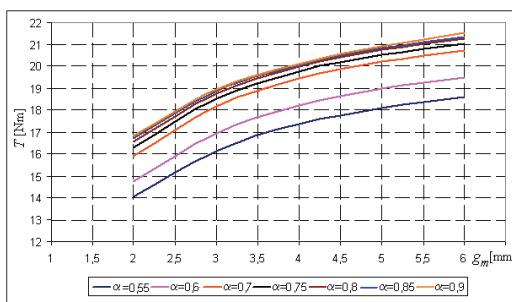
Wyniki ilustrujące zależność parametrów: T , T_c , THD, oraz t_v od zmiennych g_m i α przedstawiono na rys. 2. Moment jest monotonicznie rosnącą funkcją obu zmiennych, zaś stopień wykorzystania magnesu – funkcją malejącą. Są to więc kryteria przeciwstawne, jednak w funkcji celu muszą być uwzględnione oba parametry.

Istotna jest zależność współczynnika THD od zmiennych b_m i g_m . Istnieje optymalna wartość $\alpha \cong 0,7\text{--}0,8$, przy której współczynnik THD jest najmniejszy. Jest to ważne spostrzeżenie. Z uwagi na prawidłową pracę silnika synchronicznego [2], przebieg siły elektromotorycznej powinien być możliwie sinusoidalny. Przy zbyt małej i zbyt dużej rozpiętości magnesu przebieg jest silnie odkształcony. To powoduje zniekształcenie przebiegów prądu i dodatkowe pulsacje momentu.

Rysunek 3 ilustruje wpływ grubości magnesów na efektywność ich wykorzystania. Ze względu na maksimum momentu magnes powinien mieć możliwie dużą grubość g_m . Jednak przyrosty momentu przy wzroście g_m powyżej około 5 mm są coraz mniejsze. Nie można więc, kierując się kryterium maksimum momentu elektromagnetycznego, abstrahować od aspektów ekonomicznych. Powyżej $g_m \approx 5$ mm koszt uzyskania zwiększonego momentu poprzez powiększanie grubości magnesu jest zbyt duży; takie działanie jest nieekonomiczne. W kompromisowej funkcji celu, musi być uwzględnione (oprócz momentu T i współczynnika THD), trzecie kryterium dotyczące czynnika ekonomicznego, np. objętości V_m magnesu.



Rys. 2. Wpływ zmiennych g_m i α na parametry T , T_c , THD oraz t_v
 Fig. 2. The influence of g_m and α on parameters T , T_c , THD and t_v



Rys. 3. Zależność momentu od grubości magnesu
 Fig. 3. The relation between electromagnetic torque and magnet thickness

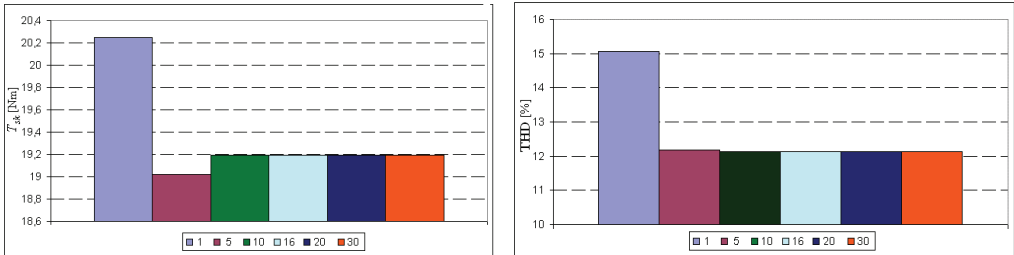
Na podstawie wykonanych przeglądowych obliczeń testowych sformułowano kompromisową addytywną funkcję celu w postaci:

$$f = \lambda_1 \left(\frac{T}{T_{av}} \right) + \lambda_2 \left(2 - \frac{THD}{THD_{av}} \right) + \lambda_3 \left(2 - \frac{V_m}{V_{mav}} \right) \quad (1)$$

Indeksem „ av ” oznaczono przyjęte jako odniesienie wartości średnie uzyskane w procesie inicjacji. Transformację funkcji minimalizowanych w funkcje maksymalizowane przeprowadzono zasady przedstawionej w [3], przyjmując stałą $C = 2$. Przyjęto: $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0,75$, $\lambda_3 = 0,25$. Przebieg procesu optymalizacji dla wybranych pokoleń ilustruje tabela 1 i rysunek 4.

Tabela 1. Przebieg procesu optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu genetycznego
Table 1. Course of optimization process using the genetic algorithm

Np.	g_m	α	f	T_{sk}	THD	V_m	T_c	f_{av}
	[mm]	[-]	[-]	[Nm]	[%]	[dm ³]	[Nm]	[-]
1	5,5896	0,67113	1,9182	20,2497	15,0630	1,1348	0,7487	1,8545
2	6,4321	0,7398	2,1100	21,1309	12,6083	1,4459	0,7584	2,0755
3	5,9935	0,76845	2,11568	21,0999	11,9567	13,9626	1,6202	2,1075
5	3,47401	0,72410	2,116379	19,01752	12,1849	0,75264	1,0303	2,1144
10	3,5651	0,73555	2,116395	19,1968	12,1467	0,78496	1,1805	2,1123
20	3,56508	0,73555	2,116396	19,19680	12,1467	0,78496	1,1804	2,1161
30	3,56500	0,73548	2,116397	19,1958	12,1467	0,78486	1,17936	2,1162



Rys. 4. Porównanie wartości momentu, współczynnika THD oraz objętości magnesów w 30 pokoleniach
Fig. 4. Comparison of torque, THD factor and magnet volume during optimization process

Podane wartości parametrów oraz wartości przystosowania dotyczą najlepszego osobnika w każdym pokoleniu. W ostatniej kolumnie tabeli 1 podano średnią wartość przystosowania w każdym pokoleniu.

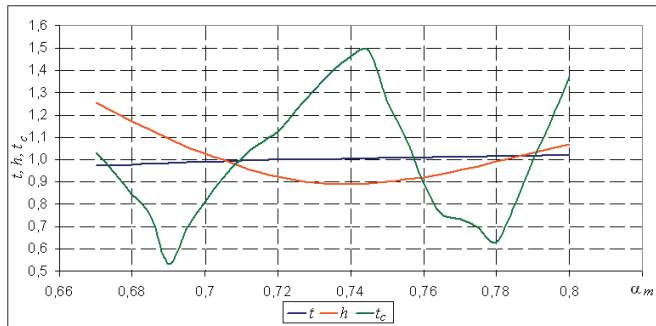
Z tabeli wynika, że algorytm działa efektywnie. Rozwiązanie zostało znalezione już po około 10 pokoleniach. Czas obliczeń może być znacząco skrócony – po zastosowaniu kryterium zakończenia podanego w [3]. Zwiększenie liczby osobników nie wpływa w istotny sposób na wzrost czasu obliczeń; zmniejsza się bowiem liczba pokoleń ewolucyjnych potrzebnych do uzyskania optimum. Zwiększona liczba osobników zwiększa jednak znacząco prawdopodobieństwo znalezienia **minimum globalnego**.

3. OPTIMALIZACJA Z UWZGLĘDNIENIEM MOMENTU ZACZEPOWEGO

Drugi etap syntezy struktury wirnika polegał na włączeniu do procesu optymalizacji momentu zaczepowego. Moment ten, jako funkcja rozpiętości magnesu, ma w rozpatrywanym przedziale kilka ekstremów – rys. 2b. Okres zmienności jest związany z podziałką żłobkową stojana τ_{z1} . Rozpatrzono przedział:

$$\left\langle \hat{\alpha} - \frac{1,1}{2} \frac{\tau_{z1}}{\tau}, \hat{\alpha} + \frac{1,1}{2} \frac{\tau_{z1}}{\tau} \right\rangle \quad (2)$$

przy czym $\hat{\alpha} = 0,735$ – optymalna wartość zmiennej α wyznaczona w pierwszym etapie (tabela 1), τ – podziałka biegunowa. Przyjęto $\delta = 0,9$ mm oraz optymalną z pierwszego etapu optymalizacji grubość magnesu $g_m = \hat{g}_m = 3,565$ mm. Wyniki przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wpływ rozpiętości α na względne wartości parametrów t , h oraz t_c
 Fig. 5. The influence of α on relative parameters t , h and t_c

Najmniejszy współczynnik THD, równy 8,314%, występuje dla $\alpha = 0,742$. Wiadocznym są natomiast dwa wyraźne minima momentu zaczepowego – dla $\alpha = 0,69$ oraz $\alpha = 0,78$, równe 0,499 oraz 0,618 Nm. Stanowi to około 2,55% i 3,1% wartości momentu użytecznego, co przy konstrukcji wirnika z magnesami naklejanymi na jego powierzchni jest wynikiem bardzo dobrym.

W punkcie $\alpha = 0,69$, w którym występuje pierwsze minimum momentu zaczepowego, współczynnik THD jest równy 10,22%, natomiast w punkcie drugiego minimum ($\alpha = 0,78$) współczynnik ten jest wyraźnie mniejszy, równy 8,89%. W punkcie drugim moment użyteczny jest większy – o około 0,6 Nm. Kompromisowe optimum powinno być wybrane zatem w pobliżu drugiego minimum.

Przeprowadzono optymalizację dla multiplikatywnej kompromisowej funkcji celu:

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

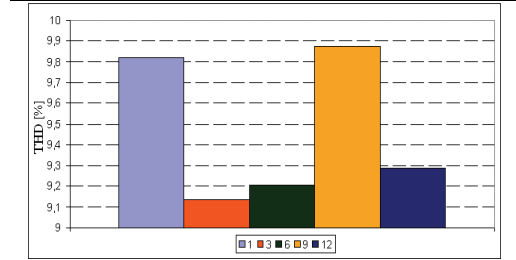
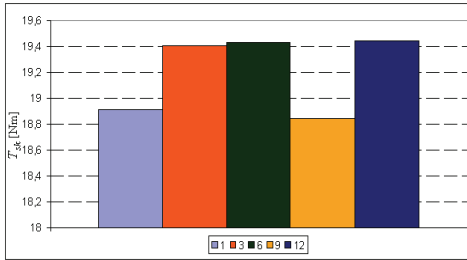
Jako odniesienie przyjęto wartości średnie z inicjacji.

$$t = \frac{T}{T_{0av}}, \quad h = \frac{THD}{(THD)_{0av}}, \quad t_c = \frac{T_c}{T_{c0av}} \quad (4)$$

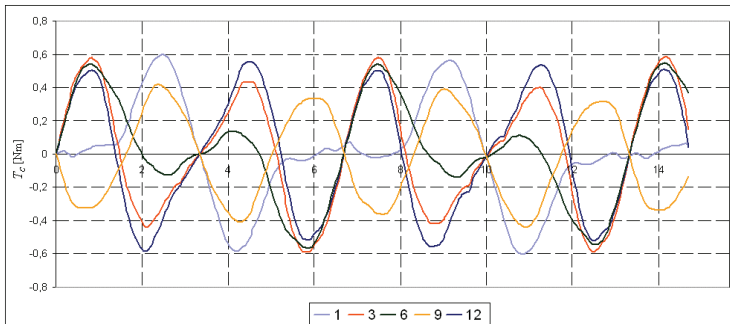
Przyjęto współczynniki wagowe: $q_1 = 2$, $q_2 = -1/2$, $q_3 = -1/2$. Obliczenia wykonano na populacji o liczebności 60. Wyniki obliczeń optymalizacyjnych dla wybranych pokoleń zestawiono w tabeli 2 oraz przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Tabela 2. Przebieg procesu optymalizacji dla funkcji multiplikatywnej
Table 2. Course of optimization process for multiplicative function

Pokolenie	α	T	THD	T_c	f_{max}	f_{av}
	[-]	[Nm]	[%]	[Nm]	[-]	[-]
1	0,69582	18,90983	9,81973	0,59683	1,11600	1,0044
2	0,76290	19,38953	8,99094	0,59833	1,27989	1,1902
3	0,77743	19,40369	9,13747	0,5728	1,28901	1,2296
4	0,77797	19,41926	8,99590	0,57849	1,30464	1,2456
6	0,76881	19,42805	9,20478	0,54254	1,30611	1,2838
9	0,68851	18,84406	9,87267	0,42088	1,31265	1,2913
12	0,78176	19,43987	9,28515	0,53827	1,31345	1,3105



Rys. 6. Porównanie wartości parametrów: T , THD oraz T_c w wybranych pokoleniach
Fig. 6. Comparison of T , THD and T_c in selected populations



Rys. 7. Porównanie przebiegów momentu zaczepowego w wybranych pokoleniach
Fig. 7. Comparison of cogging torque waveforms in selected populations

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń optymalizacyjnych magnetoelektrycznego silnika synchronicznego z łukowymi magnesami naklejanymi. Ze względu na specyfikę rozwiązywanego zadania oraz charakter optymalizowanych parametrów zaproponowano dekompozycję zadania optymalizacji na dwa etapy. W pierwszym etapie zastosowano addytywną funkcję celu, w której uwzględniono parametry: moment zaczepowy, współczynnik THD w sile elektromotorycznej oraz objętość magnesów. W drugim etapie zastosowano funkcję multiplikatywną i poszukiwano rozpiętości magnesu, która zapewni minimalizację momentu zaczepowego.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa”, realizowanego w ramach badań naukowych dla budowy gospodarki opartej na wiedzy, Podzadanie P.O.I 1.1.2. Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej, 2010–2013.

LITERATURA

- [1] GLINKA T., *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [2] HAFNER M., SCHONING M., HAMAYER K., *Automated sizing of permanent magnet synchronous machines with respect to electromagnetic and thermal aspects*, COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 2010, Vol. 29, No 5.
- [3] NOWAK L., KNYPPIŃSKI Ł., *Algorytm optymalizacji magnetoelektrycznych silników synchronicznych z uwzględnieniem polowego modelu zjawisk elektromagnetycznych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały, Nr 32, 2012.

TWO-STAGE OPTIMIZATION OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR TAKING INTO ACCOUNT THE THD FACTOR

In the paper an algorithm and software for the structure optimization of the permanent magnet synchronous motor is presented. The software consists of two modules: a numerical model of the PMSM motor and an optimization solver OPT. Numerical implementation is based on finite element method. For the motor structure optimization the genetic algorithm has been applied. Decomposition of optimization task has been proposed. The two-stage optimization has been executed. Selected results of the calculation and optimization are presented and discussed.