

Mirosław Dąbrowski, Andrzej Rudeński  
Instytut Elektrotechniki, Warszawa

## INTERAKTYWNE OPROGRAMOWANIE DO PROJEKTOWANIA SILNIKÓW MAGNETOELEKTRYCZNYCH O KOMUTACJI ELEKTRONICZNEJ

### INTERACTIVE SOFTWARE FOR DESIGN OF THE PERMANENT MAGNET BRUSHLESS DC MOTORS

**Abstract:** The paper presents the algorithm and software for design of the optimal permanent magnet brushless d.c. motors. This motors are powered from d.c. voltage source through semiconductor switches of the motor phase belts. Design software allows to apply the shell-shaped NdFeB magnets with high energy density. In algorithm only analytical formulas have been applied without introducing of numerical field analysis methods. The software based on this algorithm is the fast and effective tool for design of permanent magnet d.c. motors. By its elaboration authors have take attention to ensure user convenience. The software interface allows to introduce changes of magnetic circuit dimensions and winding structure and parameters and simultaneously to check influence of these changes on the calculation results. The software operates on the standard and inverted motors structures, i.e. with outer rotor. As optimization procedure the non-deterministic method i.e. evolution strategy  $(\mu+\lambda)$ -ES have been applied. To the software have been included the basis of materials data, which consists data of several grades of sintered and bonded NdFeB magnets, data of several grades of electrotechnical steels and construction steels for the rotor yokes. The special service software allows to change of existing material data and to introduce data of new materials grades.

#### 1. Wstęp

Silniki magnetoelektryczne bezkomutatorowe, nazywane w literaturze anglosaskiej *permanent magnet d.c. brushless motors*, należą do grupy silników o regulowanej prędkości obrotowej uzyskiwanej za pomocą zmiany częstości przełączania pasm uzwojeń twornika. Silniki te są zasilane ze źródła napięcia stałego za pośrednictwem półprzewodnikowych układów przełączalnych. Trudność w ich projektowaniu wynika głównie z braku pełnej teorii występujących w nich zjawisk. Szybki rozwój silników magnetoelektrycznych o komutacji elektronicznej nastąpił po wynalezieniu w latach 70-tych ubiegłego wieku magnesów samarowo-kobaltowych oraz w połowie lat 80-tych po opanowaniu produkcji magnesów NdFeB o dużej gęstości energii magnetycznej. W pracy przedstawiono specyficzne dla tych silników zagadnienia doboru magnesów trwałych oraz obwodu magnetycznego i pasm uzwojeń twornika. Szczególną uwagę zwrócono na zwiększenie dokładności identyfikacji punktu pracy magnesu oraz na wizualizację procesu wyboru pasm uzwojenia i doboru wymiarów obwodu magnetycznego. Opracowany program może być użyty do projektowania silników o strukturze klasycznej, jak i o strukturze odwróconej, tj.

z wewnętrznym nieruchomym twornikiem i zewnętrznym wirnikiem z magnesami naklejonymi na jego wewnętrznej powierzchni. Zastosowano także niedeterministyczną procedurę optymalizacyjną przy syntezy silników.

#### 2. Algorytm obliczeń projektowych

Znacznym utrudnieniem w opracowaniu algorytmu obliczeń projektowych silników magnetoelektrycznych o komutacji elektronicznej jest brak poprawnej teorii występujących w nich zjawisk. W silnikach tych występują bowiem m.in. złożone przebiegi prądu, siły elektromotorycznej i momentu obrotowego. Złożone jest również zagadnienie obliczania strat mocy w uzwojeniach, rdzeniu magnetycznym i magnesach trwałych. Tworząc algorytm autorzy posłużyli się uproszczonymi ujęciami inżynierskimi, starając się jednak wprowadzić udokładnienia do zależności podawanych w literaturze [1÷3; 5÷7]. W algorytmie wykorzystano jedynie zbiór zależności analitycznych, bez wprowadzania numerycznych metod analizy pola magnetycznego. Opracowany na bazie algorytmu program służy do szybkiego i efektywnego projektowania rozpatrywanych silników. Algorytm składa się z kilku powiąza-

nych ze sobą bloków. Są to:

- obliczenia wstępne (moment obrotowy, prąd przy zasilaniu falą prostokątną);
  - obliczenia głównych wymiarów obwodu magnetycznego silnika;
  - obliczenia iteracyjne obwodu magnetycznego z uwzględnieniem jego nieliniowości oraz punktu pracy magnesu przy biegu jałowym;
  - obliczenia liczby zwojów uzwojenia twornika oraz dobór drutu nawojowego;
  - obliczenia iteracyjne obwodu magnetycznego oraz punktu pracy magnesu przy obciążeniu znamionowym;
  - obliczenia rezystancji uzwojeń, poszczególnych składowych strat oraz sprawności;
  - obliczenia współczynnika przeciążalności prądowej, tj. dopuszczalnej krotności prądu znamionowego ze względu na zapobieganie trwałemu rozmagnesowaniu magnesów.
- W obliczeniach obwodu magnetycznego oraz punktów pracy magnesu uwzględniono dwa składniki przewodności rozproszenia magnesu: pomiędzy powierzchniami bocznymi oraz czołowymi.

### 3. Wyznaczanie punktu pracy magnesu

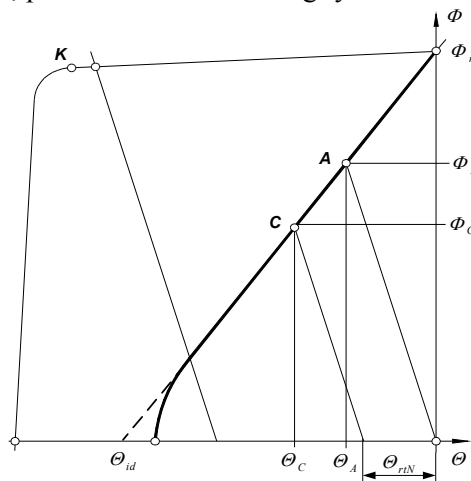
Wyznaczanie punktu pracy magnesu jest w silnikach bezkomutatorowych bardziej złożone niż w silnikach magnetoelektrycznych prądu stałego lub synchronicznych. Punkt ten należy bowiem wyznaczyć nie tylko dla pracy znamionowej, ale także dla stanu jałowego oraz stanu znacznego przeciążenia. W algorytmie uwzględniono analityczne wyznaczanie tego punktu z uwzględnieniem kształtu charakterystyki odmagnesowania, strumienia rozproszenia magnesu oraz oddziaływania twornika w wybranych stanach pracy – zwłaszcza przy przetężeniach występujących podczas rozruchu, które mogą spowodować rozmagnesowanie magnesu. Na rys. 1 przedstawiono charakterystyczne punkty pracy magnesu dla biegu jałowego oraz obciążenia znamionowego. Przy biegu jałowym silnika, a ściślej w stanie bezprądowym współrzędne punktu pracy magnesu oblicza się z zależności:

$$\theta_A = \theta_{id} \left( 1 - \frac{1}{1 - A \frac{\Phi_r}{\theta_{id}}} \right) \quad (1)$$

$$\Phi_A = \Phi_r \frac{\theta_{id}}{\theta_{id} - A \Phi_r} \quad (2)$$

$$A = 2 k_c \delta \frac{k_{ns}}{\mu_0 \alpha_i \tau L} \quad (3)$$

przy czym:  $k_{ns}$  – współczynnik nasycenia obwodu magnetycznego;  $k_c$  – współczynnik Cartera;  $\delta$  – grubość szczeliny powietrznej;  $\tau$  – podziałka biegunowa;  $\alpha_i$  – współczynnik wypełnienia podziałki biegunowej strumieniem;  $L$  – długość rdzenia;  $A$  – współczynnik nachylenia charakterystyki obwodu magnetycznego silnika; pozostałe oznaczenia wg rys. 1.



Rys. 1. Punkty pracy magnesu. A – przy biegu jałowym; C – przy obciążeniu znamionowym

Przy znamionowym obciążeniu współrzędne punktu pracy magnesu oblicza się z zależności:

$$\Phi_C = \Phi_r \left( \frac{1 - \frac{\theta_{rN}}{\theta_{id}}}{1 - A \frac{\Phi_r}{\theta_{id}}} \right) \quad (4)$$

$$\theta_C = -A \Phi_C - \theta_{rN} \quad (5)$$

przy czym:  $\theta_{rN}$  – przepływ reakcji twornika.

Na rys. 1 literą K oznaczono punkt zakrzywienia charakterystyki magnetyzacji. Współrzędne tego punktu są wprowadzone do bazy danych materiałowych i służą do obliczenia przepływu reakcji twornika dopuszczalnego ze względu na trwałe rozmagnesowanie magnesu oraz związanego z nim współczynnika przeciążalności prądowej silnika.

Podstawowym gatunkiem magnesów przewidzianych do zastosowania, są magnesy spiekane NdFeB. Odznaczają się one dużą gęstością energii. Ich wadą jest silna zależność remanencji i koercji od temperatury. Wartości te są pod-

czas obliczeń korygowane zgodnie z zależnościami:

$$B_r^t = B_r^{20} \left[ 1 + k_{TBr} \left( \frac{t - 20}{100} \right) \right] \quad (6)$$

$$H_{id}^t = H_{id}^{20} \left[ 1 + k_{THci} \left( \frac{t - 20}{100} \right) \right] \quad (7)$$

przy czym:  $B_r^{20}$ ,  $H_{id}^{20}$  – odpowiednio remanencja i koercja w temp. 20 °C (wartości katalogowe);  $k_{TBr}$ ,  $k_{THci}$  – współczynniki temperaturowe remanencji i koercji wyrażone w [%/°C];  $t$  – temperatura pracy magnesu.

We wzorach (1) ÷ (5) występują skorygowane wartości remanencji, a przepływy w tych wzorach oblicza się na podstawie skorygowanych wartości koercji.

#### 4. Interaktywny dobór wymiarów obwodu magnetycznego oraz struktury i parametrów uzwojeń

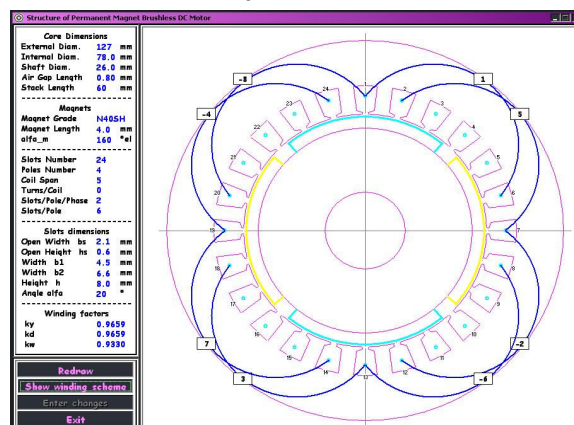
Przy opracowaniu programu obliczeń położono szczególny nacisk na ułatwienie użytkownikowi wprowadzania zmian wymiarów obwodu magnetycznego oraz struktury i danych nawojowych uzwojeń podczas projektowania. Interfejs programu umożliwia interaktywne wprowadzanie zmian tych wielkości oraz śledzenie ich wpływu na parametry projektowanego silnika.

Możliwe jest wprowadzanie zmian wszystkich wymiarów poprzecznych rdzenia wirnika i stojana, włącznie z liczbą żłobków i ich wymiarami, szczyrbiny żłobkowej, a także liczby żłobków na biegun i pasmo oraz poskoku uzwojenia, kąta magnesu i jego grubości.

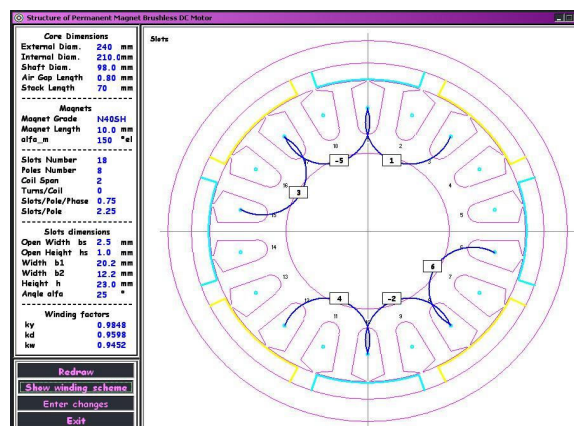
Program umożliwia zastosowanie dowolnych uzwojeń, również o ułamkowej liczbie żłobków na biegun i pasmo. Należy podkreślić, że takie uzwojenia są często stosowane, zwłaszcza w silnikach o odwróconej strukturze, tj. z wewnętrznym nieruchomym twornikiem i zewnętrznym wirnikiem w postaci stalowego pierścienia z magnesami naklejonymi na jego wewnętrznej powierzchni. Ponadto, uzwojenia ułamkowe są korzystne ze względu na zmniejszenie pulsacji momentu.

Po wprowadzeniu zmian wymiarów projektowanego silnika, na ekranie monitora jest rysowany obraz przekroju silnika z zachowaniem proporcji oraz schemat zastosowanego uzwojenia. Wygląd formularza programu do interaktywnego projektowania obwodu magnetycznego oraz uzwojeń przedstawiono na rys. 2 oraz

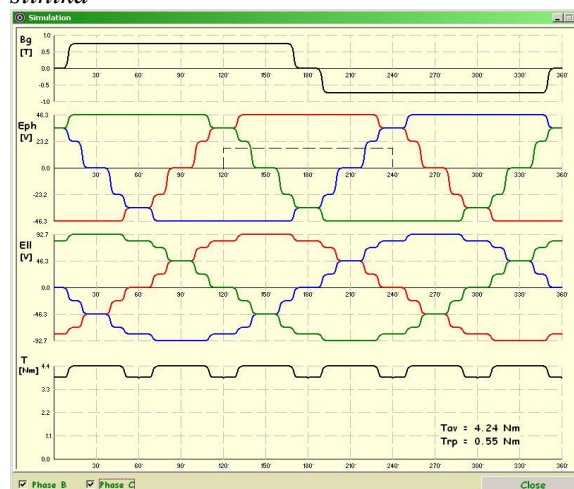
3, przy czym rys. 3 przedstawia formularz dla silnika o odwróconej strukturze.



Rys. 2. Wygląd formularza programu do interaktywnego projektowania obwodu magnetycznego oraz uzwojeń przy klasycznej strukturze silnika



Rys. 3. Wygląd formularza programu do interaktywnego projektowania obwodu magnetycznego oraz uzwojeń przy odwróconej strukturze silnika



Rys. 4. Wygląd formularza z przedstawionymi wynikami symulacji przebiegów sił elektromotorycznych oraz momentu

Ponadto, program umożliwia wizualne przedstawienie przebiegów sił elektromotorycznych fazowych, przewodowych oraz momentu na wale silnika w funkcji kąta położenia wirnika. Wizualizacja tych przebiegów jest pomocna przy ocenie prawidłowości doboru kąta magnesu  $\alpha_m$  oraz struktury i parametrów uzwojenia, tj.: liczby żłobków na biegun i pasmo oraz poskoku. Parametry te mają bowiem istotny wpływ na pulsacje momentu. Na rys. 4 przedstawiono formularz programu z przykładowymi wynikami wizualizacji przebiegów sił elektromotorycznych oraz momentu. Wyświetlane przy wykresach przybliżone wartości napięć i momentu są obliczane tzw. metodą „BLV” przedstawioną m.in. w pracy [7] i mają charakter orientacyjny.

## 5. Procedura optymalizacyjna

Do optymalizacji zastosowano niedeterministyczną procedurę strategii ewolucyjnej ( $\mu+\lambda$ )-ES. Jako kryterium optymalizacji przyjęto minimalizację kosztu materiałów czynnych użytych podczas wytworzenia silnika. Przy wyborze kryterium wzięto pod uwagę następujące okoliczności:

- duże koszty wytworzenia silników magneto-elektrycznych wynikające z ceny jednostkowej magnesów trwałych o dużej gęstości energii oraz dużej ceny blachy elektrotechnicznej o małej stratności przy dużych częstotliwościach przemagnesowywania, koniecznej do zastosowania w silnikach o dużej znamionowej prędkości obrotowej;

- drugorzędne znaczenie kosztów energii traconej podczas eksploatacji. Silniki magneto-elektryczne o komutacji elektronicznej odznaczają się stosunkowo dużą sprawnością i przeważnie nie są stosowane w napędach przewidzianych do pracy ciągłej.

Algorytm obliczeń funkcji celu obejmuje 7 zmiennych niezależnych. Są to: średnica wewnętrzna rdzenia twornika  $D$ ; długość rdzenia twornika  $L$ ; średnica zewnętrzna rdzenia twornika  $D_e$ ; szerokość żłobka twornika  $b_0$ ; wysokość zęba twornika  $h_i$ ; kąt magnesu  $\beta$ ; grubość magnesu  $b_m$ . Przy odwróconej strukturze silnika, tj. przy nieruchomym wewnętrznym tworniku oraz zewnętrznym wirniku, występuje zewnętrzna średnica twornika oraz zewnętrzna średnica jarzma wirnika.

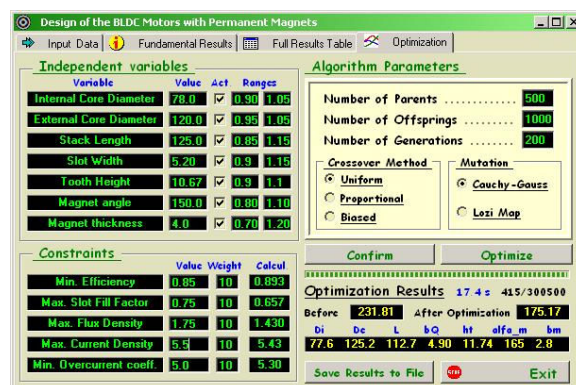
Ograniczenia nakłada się na następujące parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne silnika:

minimalną sprawność  $\eta_{\min}$ ; maksymalną gęstość prądu w uzwojeniu twornika  $j_{\max}$ ; maksymalny współczynnik wypełnienia żłobka twornika  $k_{z\max}$ ; maksymalną wartość indukcji w zębach i jarzmach  $B_{\max}$ ; minimalny współczynnik przeciążalności prądowej  $k_{\min}$ .

W programie jako funkcję ograniczeń zastosowano funkcję logarytmiczną [4]. Jednocześnie w procedurze optymalizacyjnej zastosowano korekcję kar wg metody Powella-Skolnicka [8]. Interfejs programu umożliwia wybór parametrów procedury optymalizacyjnej, tj.: liczby rodziców  $\mu$ ; liczby potomków  $\lambda$ ; liczby pokoleń  $g$ ; a także wartości parametrów podlegających ograniczeniom oraz współczynników wagowych ograniczeń. Ponadto, jest możliwy wybór operatora krzyżowania (równomierne, proporcjonalne, stronicze) oraz operatora mutacji (z wykorzystaniem zmiennej losowej o rozkładach Cauchy’ego i Gaussa przy odpowiednio dobranym schemacie wyboru tych rozkładów [4] oraz rozkładzie chaotycznym – wg odwzorowania Lozi).

Na rys. 5 przedstawiono widok formularza programu do wprowadzania parametrów procedury optymalizacyjnej, zakresów zmienności zmiennych niezależnych, wartości parametrów podlegających ograniczeniom oraz wyboru operatorów krzyżowania i mutacji.

W wyniku działania procedury optymalizacyjnej otrzymuje się wektor rozwiązania optymalnego oraz pełny zbiór wyników obliczeń silnika optymalnego. Zbiór ten może być wydrukowany, albo zapisany na dysku w formie pliku tekstowego.



Rys. 5. Wygląd formularza programu do wprowadzania parametrów procedury optymalizacyjnej oraz obliczeń optymalizacyjnych

## 6. Baza danych materiałowych

W bazie danych materiałowych wykorzysty-

wanej w programie obliczeń umieszczono zbioru parametrów pięciu typów magnesów spiekanych NdFeB oraz dodatkowo trzech typów magnesów NdFeB wiązanych. Poza wartościami remanencji i koercji dla każdego gatunku magnesu podano wartości współczynników temperaturowych remanencji i koercji, gęstość energii, przenikalność względną, dopuszczalną temperaturę pracy, gęstość masy, cenę jednostkową oraz współrzędne punktu  $K$  (rys.1) do obliczania dopuszczalnej przeciążalności prądowej ze względu na rozmagnesowanie magnesu.

Magnet Grade	Property	Value
N40SH	Remanence Br [T]	1.25
	Coercivity Hcb [kA/m]	965
	Intrinsic Coercivity Hci [kA/m]	1592
	Y-coordinate of K-point [T]	1.18
	X-coordinate of K-point [kA/m]	1450
	Max. Energy Product (BH) <sub>max</sub> [kJ/m <sup>3</sup> ]	315
	Relative Recoil Permeability [-]	1.05
	Temperature Coefficient of Br [%/°C]	0.11
	Temperature Coefficient of Hci [%/°C]	0.60
	Maximum Operating Temperature [°C]	150
	Mass Density [g/cm <sup>3</sup> ]	7.20
	Price per kg [zł/kg]	230.0

Rys. 5. Wygląd formularza programu obsługi bazy danych materiałowych z parametrami magnesów trwałych

Na rys. 5 przedstawiono formularz programu obsługi bazy danych z parametrami wybranego gatunku magnesu.

Baza danych materiałowych zawiera również dane katalogowe kilku gatunków blach elektrotechnicznych oraz stali konstrukcyjnych, z których wykonuje się jarzma wirników. Są to: charakterystyki magnesowania (w postaci tabelarycznej), stratności przy indukcjach 1T oraz 1,5T, a także gęstości masy i ceny jednostkowe.

## Literatura

- [1]. Dąbrowski M.: *Analityczne modele magnesu trwałego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Elektryka, Nr 43, 1994, s. 5 – 23.
- [2]. Dąbrowski M.: *Analityczna metoda obliczania obwodów magnetycznych o magnesach trwałych*. III Sympozjum „Zjawiska elektromagnetyczne w obwodach nieliniowych”, Poznań 1975, s. 58 – 67.
- [3]. Dąbrowski M.: *Współdziałanie magnesów trwałych w maszynach elektrycznych*. Międzynarodowa Konferencja „Maszyny elektryczne o magnesach trwałych”. Tom 2, Katowice 1979. s. 5 – 22..
- [4]. Dąbrowski M., Rudeński A.: *Application of the evolutionary algorithms for optimization of electrical machines*. Monografia ZkwE'2005, s. 106-113.
- [5]. Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone ma-*

*gniesami trwałymi*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice2002.

[6]. Hanselman D.: *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. Second Edition. The Writers' Collective, Cranston 2003.

[7]. Hendershot J. R., Miller T. J. E.: *Design of Brushless Permanent Magnet Motors*. Clarendon Press, Oxford 1994.

[8]. Rudeński A.: *Zagadnienia kary za przekroczenie ograniczeń w projektowaniu optymalnych maszyn elektrycznych za pomocą metod ewolucyjnych*. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 12/2007, s. 73-78.

## Autorzy

Prof. dr hab. inż. Mirosław Dąbrowski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3A.  
e-mail: miroslaw.dabrowski@put.poznan.pl

Dr inż. Andrzej Rudeński, Instytut Elektrotechniki, Zakład Maszyn Elektrycznych, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa,  
e-mail: a.rudenski@iel.waw.pl