

*magnetoelektryczne silniki synchroniczne, optymalizacja,  
algorytmy genetyczne, pole elektromagnetyczne*

Łukasz KNYPÍŃSKI\*, Lech NOWAK\*

## **ALGORYTM OPTYMALIZACJI MAGNETOELEKTRYCZNYCH SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM POLOWEGO MODELU ZJAWISK ELEKTROMAGNETYCZNYCH**

Zaproponowano koncepcję algorytmu do optymalizacji magnetoelektrycznych silników synchronicznych (PMSM) z uwzględnieniem polowego modelu zjawisk elektromagnetycznych. Na podstawie algorytmu opracowano oprogramowanie, które składa się z dwóch modułów: modułu MES do polowej symulacji zjawisk występujących w silnikach PMSM (program ANSYS Maxwell) oraz modułu optymalizacyjnego OPT (Delphi). Optymalizację parametrów strukturalnych silnika przeprowadzono przy użyciu algorytmu genetycznego. Przedstawiono sposoby formułowania funkcji celu. Omówiono wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych i optymalizacyjnych.

### **1. WPROWADZENIE**

W artykule przedstawiono wyniki badań realizowanych w ramach projektu „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa”, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

Głównym celem projektu jest opracowanie serii nowoczesnych, energooszczędnych silników synchronicznych o magnesach trwałych, które w przyszłości zastąpią silniki indukcyjne powszechnie stosowane do napędu pomp i wentylatorów. Zaproponowane będą nowe, hybrydowe struktury silników o obwodach wykonanych z materiałów proszkowych. Obwód elektromagnetyczny, będzie kompozytem wykonanym z materiałów: (a) magnetycznie twardych (magnesy trwałe wzbudzające pole magnetyczne), (b) magnetycznie miękkich, tworzących „magnetowód” oraz (c) przewodzą-

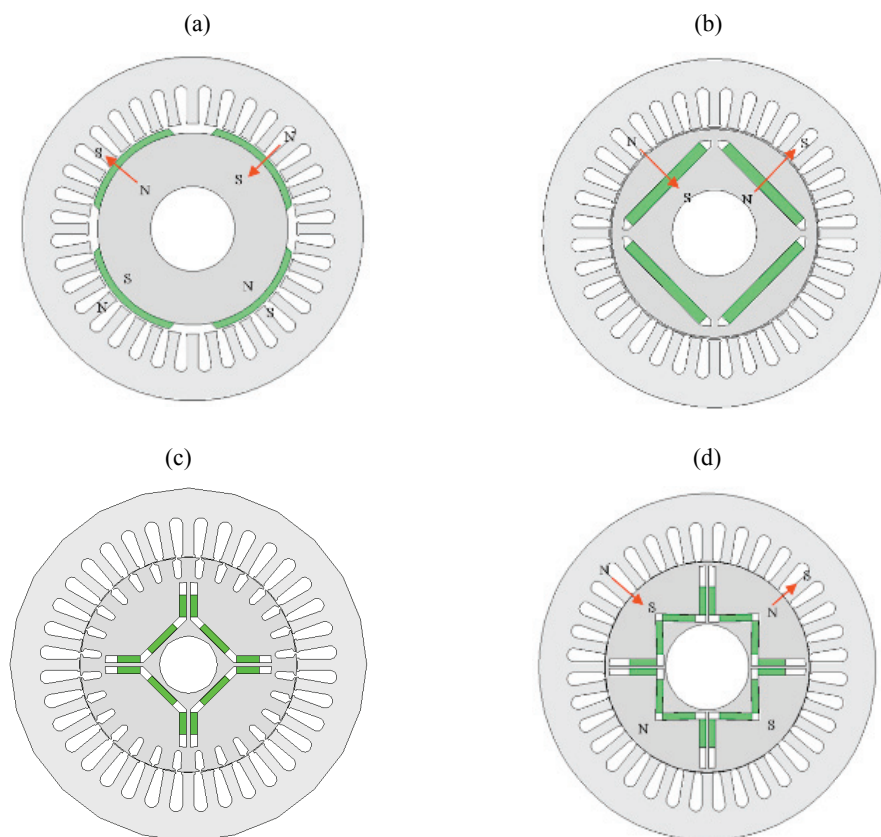
---

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

cych, realizujących funkcję klatki rozruchowej. Przy takiej konstrukcji, magnes może być dowolnie kształtowany. Przewiduje się zaprojektowanie silników przystosowanych do rozruchu częstotliwościowego, jak również silników o rozruchu własnym, zaopatrzonych w klatkę rozruchową.

Realizowane są dwa podstawowe typy zadań, polegające na: (a) zaprojektowaniu wirnika o optymalnej strukturze magnesów, przy zadanym obwodzie magnetycznym (wykroju blach) stojana, np. stojana seryjnego silnika indukcyjnego oraz (b) zaprojektowaniu obwodu magnetycznego i uzwojenia nowego silnika o zadanej mocy.

W literaturze są rozpatrywane liczne struktury wirników silników PMSM [5]. Wybrane 4 struktury przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. (a) Silnik z łukowymi magnesami na powierzchni wirnika (b) silnik z wsuwanymi magnesami prostopadłościennymi, (c) silnik o rozruchu własnym (z klatką rozruchową) i magnesami kształcie litery „U”, (d) silnik z magnesami wsuwanymi w kształcie litery „W”

Fig. 1. (a) Motor with arc magnets situated on the external rotor surface, (b) motor with internal cuboidal magnets, (c) line-start motor with U-shaped magnets, (d) the W-shaped magnets rotor

Nowe struktury silników wymagają opracowania nowych matematycznych modeli zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych, a także opracowania nowych metod optymalnego projektowania. Podjęto próbę opracowania kompleksowego oprogramowania, w którym do optymalizacji wykorzystano algorytm genetyczny „współpracujący” z modułem zawierającym połowy model zjawisk w silniku. Bardzo istotnym zagadnieniem przy formułowaniu zadania optymalizacji jest wybór parametrów stanowiących kryterium optymalności i ograniczenia. W artykule pokazano, że bezkrytyczne konstruowanie funkcji celu może prowadzić do nieracjonalnych wariantów projektowanego obiektu. Wykazano między innymi, że włączenie do kompromisowej funkcji celu jednocześnie momentu użytecznego i momentu zaczepowego prowadzi do nieefektywnego działania algorytmu optymalizacji i często do nieoptymalnego wyniku.

## 2. FORMUŁOWANIE ZADANIA OPTIMALIZACJI OBIEKTU TECHNICZNEGO

Obiekt techniczny jest definiowany za pomocą zbioru  $n$ -parametrów  $s_i$ ;  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ , określających jego strukturę ( $n$ -wymiarowy wektor  $\mathbf{S}$ ). Natomiast stan obiektu jest charakteryzowany przez zbiór parametrów funkcjonalnych  $p_j$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, m$  (wektor  $\mathbf{P}$ ). W przypadku silników elektrycznych parametry definiujące strukturę  $\mathbf{S}$  to zazwyczaj ich podstawowe wymiary. Natomiast do zbioru  $\mathbf{P}$  parametrów funkcjonalnych zalicza się przede wszystkim parametry elektromagnetyczne, ale także parametry termiczne i parametry charakteryzujące obciążenia mechaniczne.

Zadanie syntezy silnika polega na znalezieniu struktury  $\mathbf{S}$ , która przy określonych wymuszeniach zapewnia wymagane wartości parametrów funkcjonalnych  $\mathbf{P}$ , przy czym zwykle wymaga się by poszczególne parametry  $p_j$  spełniały relacje:

$$p_j \leq p_{jz} \quad \text{lub} \quad p_j \geq p_{jz}; \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (1)$$

w których indeksem „z” zaznaczono wartości wymagane lub dopuszczalne.

Tak zdefiniowane zadanie syntezy, czyli zadanie projektowe, może mieć wiele rozwiązań różniących się strukturą  $\mathbf{S}$ . Rozwiązania te można porównywać między sobą; kryterium porównawczym może być jeden spośród parametrów  $p_j$  lub kombinacja kilku parametrów. Proces syntezy nazywany jest wówczas projektowaniem optymalnym lub optymalizacją z ograniczeniami. Zmienne, których wartości są w procesie optymalnego projektowania przedmiotem decyzji projektanta nazywamy zmiennymi projektowymi lub decyzyjnymi, a kryterium optymalności jest nazywane funkcją celu (w algorytmach genetycznych – przystosowaniem).

Najważniejszymi zmiennymi decyzyjnymi w procesie syntezy magnetoelektrycznych silników synchronicznych są:

- wymiary główne: długość  $\delta$  szczeliny, wewnętrzna średnica stojana  $D$ , długość  $L_i$  pakietu stojana, zewnętrzna średnica stojana  $D_z$ ,
- wymiary obwodu magnetycznego wirnika, w szczególności wymiary magnesu; w przypadku magnesów łukowych (rys. 1a) są to rozpiętość  $b_m$  i grubość  $g_m$ ,
- wymiary i parametry klatki rozruchowej,
- parametry stojana: liczba  $q$  żłobków na biegun i fazę, liczba zwojów jednej fazy, wymiary żłobka.

Zmienne decyzyjne i parametry funkcjonalne są zwykle wielkościami fizycznymi wyrażanymi w różnych jednostkach, a ich wartości mogą różnić się nawet o kilka rzędów. W numerycznej implementacji algorytmu, zarówno zmienne, jak i funkcje powinny być unormowane, tzn. powinny być bezwymiarowe i mieć porównywalne wartości. W opracowanym algorytmie zmienne są normowane wg zależności:

$$x_i = \frac{s_i - s_{id}}{s_{ig} - s_{id}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

przy czym:  $s_{id}$ ,  $s_{ig}$  oznaczają dolną i górną granicę przedziałów spodziewanych wartości zmiennych geometrycznych  $s_i$ .

Zbiór unormowanych zmiennych decyzyjnych oznaczany będzie symbolem  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Jeżeli  $s_i \in \langle s_{id}, s_{ig} \rangle$  to  $x_i \in \langle 0, 1 \rangle$ . W procesie optymalizacji moduł optymalizujący „steruje” zmiennymi wykorzystywanymi w module, w którym jest zawarty model matematyczny rozpatrywanego obiektu. Wykorzystywane jest więc przekształcenie odwrotne do (2), tj.  $x_i \Rightarrow s_i$ .

Z kolei ograniczenia (1) unormowano odnosząc parametry  $p_j$  do wartości zadanych  $p_{jz}$  i zapisując je w postaci:

$$g_j(\mathbf{x}) = \xi_j \left( \frac{p_j(\mathbf{x})}{p_{jz}} - 1 \right) \leq 0 \quad (3)$$

przy czym  $\xi_j = \pm 1$ , w zależności od tego czy  $p_j \leq p_{jz}$ , czy też  $p_j \geq p_{jz}$ .

Punkt  $\mathbf{x}$   $n$ -wymiarowej przestrzeni odpowiada jednemu wariantowi urządzenia. Zbiór  $D$  punktów dla których spełnione są wszystkie ograniczenia nazywany jest obszarem dopuszczalnym:

$$D = \{\mathbf{x}: g_j(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, m\} \quad (4)$$

Normalizacja funkcji celu odbywa się według reguły:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{k(\mathbf{x})}{k_0} = \frac{k(\mathbf{x})}{k(\mathbf{x}_0)} \quad (5)$$

przy czym  $k(\mathbf{x})$  oznacza „fizyczne” kryterium optymalizacji, a  $\mathbf{x}_0$  – pierwsze przybliżenie tego procesu, tzn. startowy wariant obiektu. W przypadku algorytmów, w których w poszczególnych iteracjach operuje się na zbiorze punktów, wielkość odniesienia  $k_0$  odpowiada wartości kryterium uśrednionego dla całego zbioru; w algorytmie genetycznym odniesieniem jest średnie przystosowanie pokolenia startowego.

Założmy, że poszukiwane jest minimum funkcji celu. Wówczas zadanie optymalizacji z ograniczeniami polega na zminimalizowaniu funkcji celu  $f(\mathbf{x})$  w obszarze dopuszczalnym  $D$ , tzn. na wyznaczeniu takiego punktu optymalnego  $\hat{\mathbf{x}}$ , że:

$$\bigwedge_{\mathbf{x} \in D} f(\mathbf{x}) \geq f(\hat{\mathbf{x}}) \quad (6)$$

Zadanie poszukiwania minimum można zawsze zastąpić równoważnym zadaniem poszukiwania maksimum. Jeśli pierwotna funkcja celu  $\tilde{f}(x)$  jest minimalizowana, to można wówczas zastosować algorytm maksymalizacji funkcji równoważnej:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{\tilde{f}(\mathbf{x})} \quad \text{lub} \quad f(\mathbf{x}) = \begin{cases} C - \tilde{f}(\mathbf{x}) & \text{gdy } \tilde{f}(\mathbf{x}) < C \\ 0 & \text{gdy } \tilde{f}(\mathbf{x}) > C \end{cases} \quad (7)$$

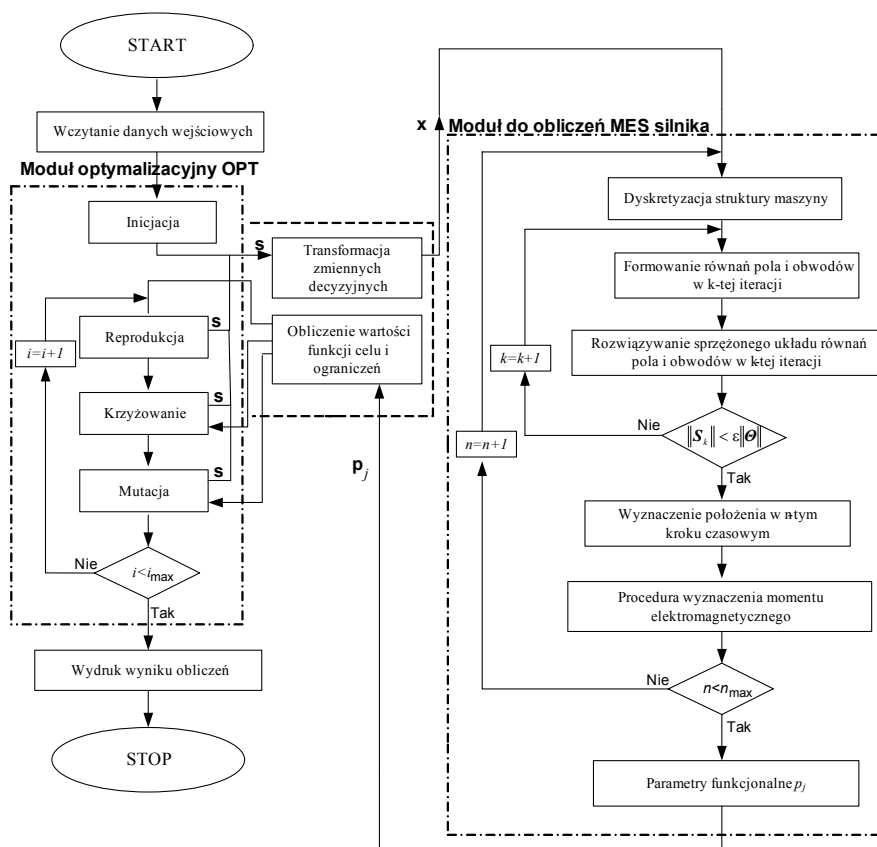
przy czym  $C$  jest odpowiednią dobraną stałą. Stała ta powinna mieć wartość zbliżoną do  $2\tilde{f}(\hat{\mathbf{x}})$ . W takim bowiem przypadku, zachowane są względne różnice pomiędzy wartościami funkcji  $f(\mathbf{x})$  i  $\tilde{f}(\mathbf{x})$  w punktach leżących w otoczeniu optimum  $\hat{\mathbf{x}}$ . W algorytmie genetycznym oznacza to zachowanie jednakowego względnego zróżnicowania w grupie najlepszych osobników pokolenia, co nie zakłóca rozkładu prawdopodobieństwa ich wylosowania. Po losowej inicjacji pokolenia można przyjąć stałą  $C = 2\tilde{f}(\hat{\mathbf{x}}_0)$ , przy czym  $\hat{\mathbf{x}}_0$  oznacza osobnika charakteryzującego się największym przystosowaniem w pokoleniu startowym. W celu zapewnienia odpowiednio dużej puli genów w następnych pokoleniach, osobniki z zerowym przystosowaniem powinny być w procesie inicjacji pominięte. W takim przypadku, liczba losowań w trakcie inicjacji może znacząco przewyższać założoną w algorytmie liczbę osobników w jednym pokoleniu. Jednak ze względu na doskonalenie się kolejnych pokoleń, osobniki z zerowym przystosowaniem będą stopniowo zanikać.

### 3. ALGORYTM OPTYMALIZACJI. STRUKTURA OPROGRAMOWANIA

Opracowane oprogramowanie składa się z dwóch modułów: modułu optymalizacyjnego oraz modułu z matematycznym modelem zjawisk w projektowanym obiekcie. W module optymalizacyjnym zastosowano algorytm genetyczny. Natomiast w programie do wyznaczania parametrów elektromagnetycznych silnika wykorzystano model polowy – bazujący na metodzie elementów skończonych. Oba moduły (moduł

optymalizacji OPT i modułu obliczeń pola MES) zostały połączone poprzez procedury transformacji zmiennych oraz procedury obliczania funkcji celu – rys. 2.

Ograniczenia są uwzględniane bezpośrednio poprzez karę zewnętrzną albo poprzez włączenie (w formie dodatkowego członu) do kompromisowej funkcji celu.



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

Fig. 2. Diagram of two-units software for PMSM optimization

W algorytmie genetycznym populacja  $N$ -osobników jest zbiorem możliwych rozwiązań analizowanego zadania (punktów  $x$ , czyli wariantów urządzenia). W opracowanym programie operacje odbywają się z wykorzystaniem binarnej, 32-bitowej reprezentacji zmiennych decyzyjnych. Generacja populacji początkowej (*inicjacja*) odbywa się drogą losową. Do *Reprodukcji* wykorzystano metodę ruletki, w której losowanie odbywa się z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do przystosowania osobników [1]. Zastosowano metodę *Krzyżowania* jednopunktowego, przy czym zarówno dobór par rodzicielskich jak i punktu podziału łańcuchów genetycznych odby-

wa się losowo. Spośród Grupy  $2N$  osobników rodzicielskich i ich potomków, do dalszych działań przechodzi  $N$  osobników najlepszych. Operacja **mutacji** polega na zamianie losowo wybranego genu na przeciwny. W procedurach krzyżowania i mutacji można stracić osobnika najlepszego. Zastosowano więc strategię elitarną polegającą na wymuszonym przeniesieniu najlepszego osobnika do następnego pokolenia [3].

Komunikacja pomiędzy modułem optymalizacyjnym i modułem obliczeń polowych następuje po wywołaniu specjalnie przygotowanej procedury „PRZYSTOSOWANIE”. Z modułu optymalizacyjnego są „eksportowane” wartości fizycznych zmiennych decyzyjnych – z wykorzystaniem transformacji  $x_i \Rightarrow s_i$ . Natomiast „zwracane” są obliczone wartości parametrów funkcjonalnych. Na tej podstawie konstruowana jest kompromisowa funkcja celu lub funkcja zmodyfikowana, obejmująca karę za przekroczenie ograniczeń, to znaczy konstruowana jest wartość funkcji przystosowania.

W jednym pokoleniu wykonywane są wszystkie trzy operacje: klonowania, krzyżowania i mutacji. O czasie wykonywania programu decyduje czas i częstotliwość obliczania parametrów funkcjonalnych. Dlatego należy zminimalizować liczbę wywołań procedury PRZYSTOSOWANIE. Procedura ta jest wykonywana dla wszystkich osobników w procesie inicjacji, dla grupy „dzieci” w procedurze KRZYŻOWANIE i dla osobników zmutowanych w procedurze MUTACJA.

Dodatkowo, do programu dołączono procedury zapisu cząstkowych wyników optymalizacji. Takie postępowania umożliwiają podziału procesu optymalizacji na etapy co jest niezbędne z uwagi na bardzo długi czas obliczeń z wykorzystaniem modelu polowego. Kryterium zakończenia obliczeń związane z liczbą wygenerowanych pokoleń wymaga obserwacji zachowania się grupy liderów w kolejnych pokoleniach. W celu uniknięcia wykonywania w końcowej fazie obliczeń nie przynoszących poprawy proponuje się kryterium będące koniunkcją dwóch warunków:

1. Przystosowanie  $\hat{f}$  lidera w 3 kolejnych pokoleniach zwiększa się o wartość mniejszą niż zadana dokładność  $\varepsilon_f$  (np.  $\varepsilon_f = 10^{-5}$ ).
2. W  $n$ -wymiarowej ( $n$  – liczba zmiennych decyzyjnych) „hipersferze” o promieniu  $\varepsilon_x$  (np.  $\varepsilon_x = 10^{-3}$ ) i środku w punkcie  $\hat{x}$ , odpowiadającym osobnikowi optymalnemu, zawiera się przynajmniej 40% populacji.

#### 4. OPTIMALIZACJA Z UWZGLĘDNIENIEM MOMENTU ZACZEPOWEGO

Na etapie testowania oprogramowania wybrano prostszy wariant zadania, to znaczy optymalizację wirnika na bazie stojana produkowanego seryjnie silnika indukcyjnego o następujących parametrach: liczba par biegunów  $p = 2$ , średnica wewnętrzna  $D = 94$  mm, średnica zewnętrzna  $D_z = 154$  mm, długość pakietu  $L_i = 154$  mm, liczba

żłobków  $z = 36$ , liczba zwojów w żłobku 45. Rozpatrzono strukturę z zewnętrznymi łukowymi magnesami – rys. 1a. Na podstawie obliczeń polowych wyznaczano: użyteczny moment elektromagnetyczny, moment zaczepowy, współczynnik THD zawartości harmonicznych w przebiegu siły elektromotorycznej. W testach przyjęto trzy zmienne decyzyjne: długość szczeliny powietrznej  $s_1 = \delta$ , grubość magnesu  $s_2 = g_m$ , względną (odniesioną do podziałki biegunowej) rozpiętość magnesu  $s_3 = \alpha = b_m/\tau$ . Jako kryterium optymalności przyjęto wskaźnik energooszczędności, to znaczy iloczyn sprawności i współczynnika mocy:

$$f_1 = \cos\varphi\eta = \frac{P_m}{P_e} \cos\varphi \quad (8)$$

przy czym:  $P_m$  – moc mechaniczna użyteczna,  $P_e$  – moc elektryczna.

Podstawiając:  $P_m = \omega T$  oraz  $P_e = \sqrt{3}UI\cos\varphi$  otrzymuje się:

$$f_1 = \frac{\omega T}{\sqrt{3}UI\cos\varphi} \cos\varphi = \frac{\omega}{\sqrt{3}UI} T = aT \quad (9)$$

Jeżeli zmiennymi w procesie optymalizacji są wyłącznie wymiary wirnika, to maksymalizacja wskaźnika  $\eta \cos\varphi$  jest równoznaczna z maksymalizacją momentu elektromagnetycznego  $T$ . Jeśli bowiem założyć, że w projektowanym magnetoelektrycznym silniku synchronicznym warunki termiczne będą takie same jak w bazowym silniku indukcyjnym, to gęstość prądu i skuteczna wartość prądu w uzwojeniu stojana nie może ulec zmianie. Zatem współczynnik „ $a$ ” we wzorze (9) może być rozpatrywany jako „stała” określająca stopień wyzyskania materiałów czynnych stojana.

Ważnym parametrem przy projektowaniu silnika magnetoelektrycznego jest moment zaczepowy (*cogging torque*  $T_c$ ), który powinien być jak najmniejszy. Wzięto także pod uwagę koszt (objętość) magnesu. Te dwa parametry mogą stanowić ograniczenia w procesie optymalizacji, jednak przy wstępnym projektowaniu ich oczekiwane (zadane) wartości są trudne do jednoznacznego określenia. Dlatego oba te parametry zostały dołączone do kompromisowej funkcji celu – jako dwa dodatkowe składniki funkcji addytywnej. Przyjęto zatem maksymalizowaną funkcję celu w postaci:

$$f = f_1 + \lambda_2 f_2 + \lambda_3 f_3 = t + \lambda_1 t_c^{-1} + \lambda_2 v^{-1} \quad (10)$$

przy czym  $t, t_c, v$  oznaczają względne (unormowane) wartości momentu elektromagnetycznego, momentu zaczepowego i objętości materiału magnetycznie twardego – odniesione do wartości optymalnych w procesie inicjacji:

$$t = T/\hat{T}_0, \quad t_c = T_c/\hat{T}_{c0}, \quad v = V/\hat{V}_0 \quad (11)$$

Ponieważ moment zaczepowy i objętość magnesu powinny być minimalizowane, zatem względne wartości tych parametrów występują w potęgach minus jeden.



Przyjęto współczynniki wagowe:  $\lambda_2 = \lambda_3 = 0,4$ , liczbę osobników  $N = 50$ , współczynnik mutacji  $p_m = 0,005$  oraz liczbę pokoleń równą 20 (czas obliczeń w ramach jednego pokolenia był równy około 4 godzin). W tabeli 1 przedstawiono wyniki – parametry najlepszych osobników w wybranych pięciu generacjach. W ostatnich dwóch kolumnach podano średnią wartość momentu elektromagnetycznego i maksymalną (w obszarze podziałki biegunowej) wartość momentu zaczepowego.

Tabela 1. Wyniki obliczeń optymalizacyjnych dla  $\lambda_2 = \lambda_3 = 0,4$   
Table 1. Optimization results for  $\lambda_2 = \lambda_3 = 0.4$

Pokolenie	$\delta$	$g_m$	$\alpha$	$f$	$T_{av}$	$T_{cmax}$
	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[Nm]	[Nm]
1	0,4712	5,2695	0,5599	1,2341	19,3596	1,5609
5	1,0762	5,2078	0,4685	1,3484	15,9212	0,15520
10	1,0763	4,2029	0,4685	1,5359	15,2412	0,12156
15	1,0763	4,2556	0,46856	1,5459	15,2835	0,12431
20	1,07630	4,2019	0,46856	1,5485	15,2395	0,12085

## 5. PODSUMOWANIE

Z analizy obliczeń wynika, że zadanie optymalizacji zostało sformułowane niewłaściwie. Jeżeli chodzi o wartości zmiennych decyzyjnych, to dodatkowe kryteria  $f_2$  i  $f_3$  dotyczące momentu zaczepowego i objętości magnesu prowadzą do przeciwstawnych tendencji w porównaniu z kryterium dotyczącym momentu użytecznego. W przypadku składnika  $f_1$  (moment użyteczny) optimum występuje dla  $\delta \rightarrow 0$ ,  $\alpha \approx 1$  i dużej wartości  $g_m$ , bliskiej grubości  $h_{jw}$  jarzma wirnika (ograniczonej nasyceniem). Natomiast w przypadku składnika  $f_2$  (moment zaczepowy) optimum występuje dla dużej szczeliny  $\delta$  i bardzo małej grubości magnesu. Moment zaczepowy jest w dodatku multimodalną funkcją rozpiętości magnesu  $\alpha$ , tzn. funkcją posiadającą wiele ekstremów. Przy zmianach  $\alpha$  o około 0,05 moment zaczepowy zmienia się nawet o 400%, podczas gdy moment użyteczny zaledwie o kilka procent. W wyniku optymalizacji otrzymuje się obiekt nieracjonalny, o bardzo małej względnej rozpiętości magnesu. Wynika stąd, że łączenie w jedną kompromisową funkcję celu składnika unimodalnego i multimodalnego jest niewłaściwe. Algorytm jest zbyt „czuły” na zmiany momentu zaczepowego, co wypacza proces optymalizacji. W wyniku optymalizacji wg kryterium (10) otrzymuje się silnik o zbyt dużej szczelinie i zbyt małych wymiarach magnesu. Dlatego w dalszych rozważaniach zadanie optymalizacji zostało rozbite na dwa etapy. W pierwszym etapie, zamiast momentu zaczepowego, w kompromisowej funkcji celu uwzględniono człon związany ze stopniem odkształcenia przebiegu siły elektromotorycznej [4].

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] ENGELBRECHT A.P., *Computational Intelligence*, John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- [2] GLINKA T., *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [3] KNYPIŃSKI Ł., NOWAK L., RADZIUK K., KOWALSKI K., *Application of non-deterministic algorithms in the electromagnetic devices optimal design*, Computer Applications in Electrical Engineering, Electrical Engineering, Published by Institute of Electrical Engineering and Electronics, Poznań University of Technology, Poznań 2009, 216–232.
- [4] KNYPIŃSKI Ł., NOWAK L., *Dwuetapowa optymalizacja magnetoelektrycznych silników synchronicznych z uwzględnieniem współczynnika THD*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały Nr 32, 2012.
- [5] Raport z zadania 8 „Wykonanie obliczeń projektowych i optymalizacyjnych serii prototypów silników”, Etap B, Projekt „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa”, Poznań 01.07.2010–19.03.2011.

#### ALGORITHM FOR THE OPTIMIZATION OF THE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR EMPLOYING THE FINITE ELEMENT METHOD

The paper presents an idea of an algorithm and software for the structure optimization of the permanent magnet synchronous motor. The software consists of two modules: a numerical model of the PMSM motor (ANSYS Maxwell) and an optimization solver OPT (Delphi). Numerical implementation is based on finite element method. For the motor structure optimization the genetic algorithm has been applied. Selected results of the calculation and optimization are presented and discussed.