

# Optymalizacja obwodu magnetycznego dwumodułowego silnika reluktancyjnego ze strumieniem poprzecznym

Marian Łukaniszyn, Marcin Kowol, Janusz Kołodziej

Zasadniczym celem projektowania jest dopasowanie zestawu specyficznych cech przedmiotu badań do założeń projektowych. W przypadku maszyn elektrycznych istotnymi parametrami mogą być np.: sprawność silnika, wartość średnia momentu elektromagnetycznego, moment rozruchowy, współczynnik pulsacji itd. W tym celu stosuje się różne metody optymalizacji powiązane z odpowiednimi kryteriami oceny funkcji celu [1, 2]. Przedmiotem badań w niniejszej pracy jest nowa konstrukcja silnika reluktancyjnego dwumodułowego powstałego na bazie prototypu trójmodułowej maszyny ze strumieniem poprzecznym (rys. 1).

Analizowany silnik składa się z dwóch jednakowych modułów, w których zęby wirnika są przesunięte względem siebie o 15 stopni mechanicznych. Każdy moduł posiada dwanaście zębów wirnika i stojana oraz jedno pasmo uzwojenia w postaci cewki toroidalnej. Moduły oddzielone są od siebie przekładką z materiału paramagnetycznego, aby zminimalizować sprzężenia pomiędzy sąsiadującymi ze sobą modułami. Kierując się tymi samymi względami, wał maszyny wykonano ze stali kwasoodpornej charakteryzującej się bardzo niską przenikalnością magnetyczną. Kadłub wirnika oraz pokrywy zewnętrzne wykonano z aluminium. Najważniejsze parametry techniczne oraz konstrukcyjne zebrano w tabeli 1.

Nieodzownym elementem rozpatrywanej maszyny jest energoelektroniczny układ zasilania w postaci półmostka typu „H”. Najprostsze sterowanie polega na sekwencyjnym załączaniu pasm A i B w zależności od położenia wirnika względem stojana.

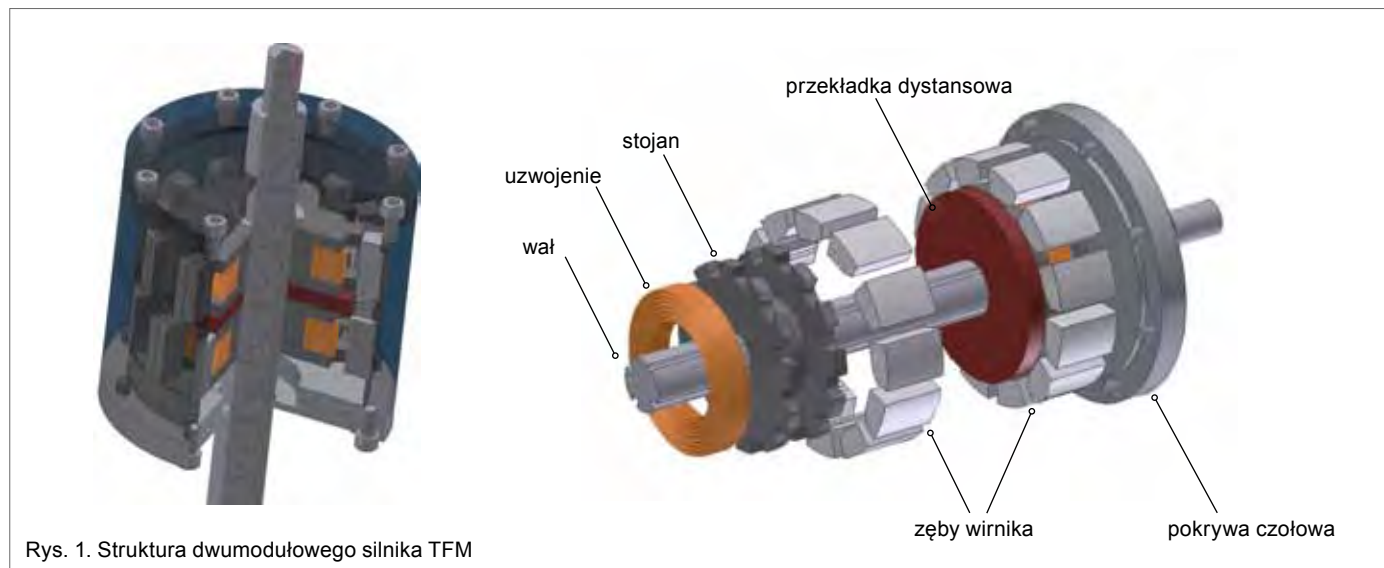
Zasadniczą wadą wyżej wymienionej konstrukcji silnika reluktancyjnego ze strumieniem poprzecznym jest zero wartość momentu rozruchowego dla pewnych położen

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki optymalizacji magnetowodu dwumodułowego silnika reluktancyjnego (TFM) z wirnikiem zewnętrznym. Istotną wadą omawianej podstawowej konstrukcji maszyny jest zerowy moment rozruchowy dla dwóch położen wirnika względem stojana. W celu wyeliminowania powyższej niedogodności autorzy przeprowadzili optymalizację z wykorzystaniem dwóch postaci funkcji celu. W procesie optymalizacji zastosowano algorytmy ewolucyjne w sprzężeniu z bazą danych umożliwiającą znaczne zmniejszenie kosztów obliczeniowych.

## MAGNETIC CIRCUIT OPTIMIZATION OF A TWO-MODULE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR WITH AN AXIAL FLUX

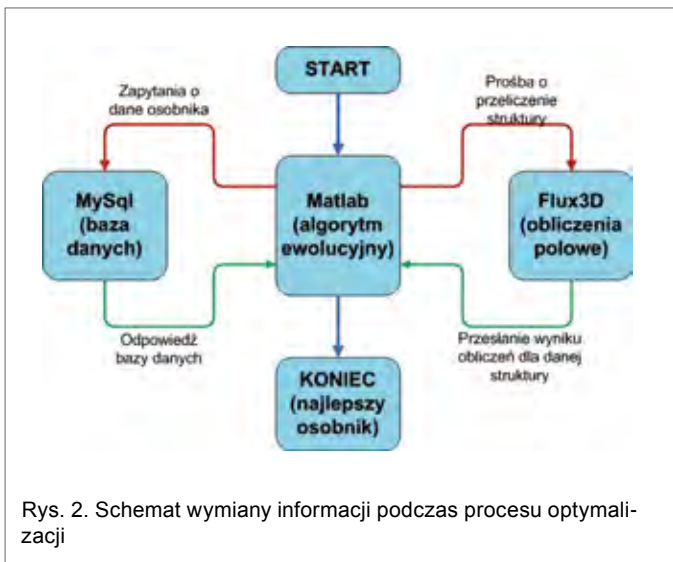
**Abstract:** The paper presents optimization results for a two-module reluctance motor (Transverse Flux Motor) with an outer rotor. The main disadvantage of the considered motor structure is a zero starting torque in some rotor positions. The main optimization instrument is Matlab and its evolutionary algorithm connected with field computations software and a database to limit the computation costs. Two objective functions are taken into account for the motor integral parameter improvement.

wirnika (rys. 5a). Głównym celem niniejszej pracy jest zatem taki dobór kształtu obwodu magnetycznego wirnika, aby zapewnić możliwie duży moment rozruchowy w każdym położeniu wirnika względem stojana [5].



Rys. 1. Struktura dwumodułowego silnika TFM

Tabela 1. Podstawowe parametry silnika TFM	
Napięcie zasilania	$U_n = 24 \text{ V}$
Prąd znamionowy	$I_n = 12 \text{ A}$
Prędkość obrotowa	0–300 obr./min
Średnica zewnętrzna wirnika	158 mm
Średnica zewnętrzna stojana	103,5 mm
Szerokość szczeliny powietrznej	$\delta = 0,5 \text{ mm}$



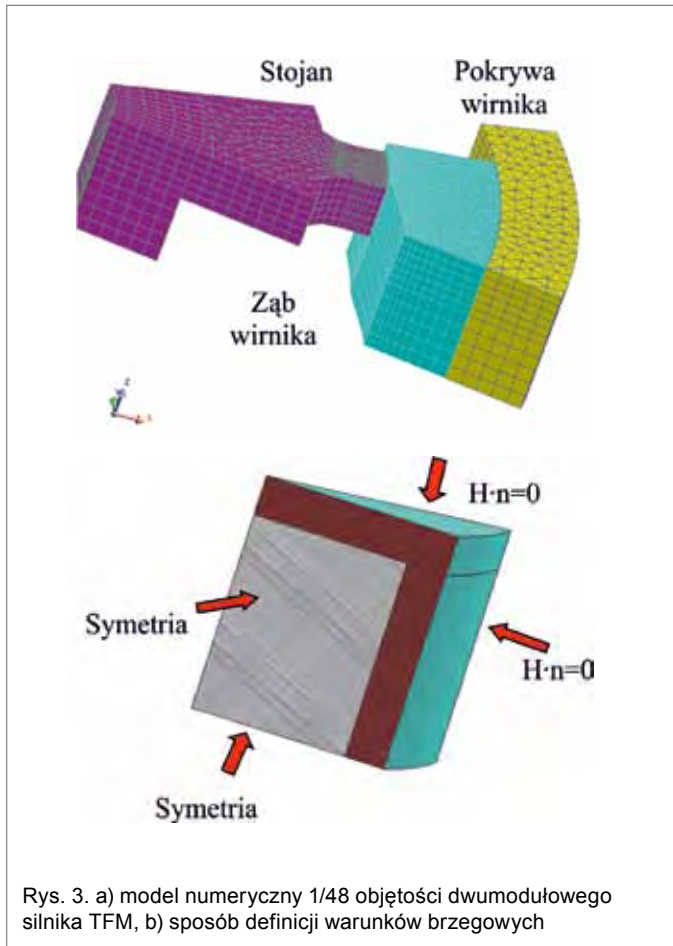
### Implementacja modelu polowego w obliczeniach optymalizacyjnych

Spośród wielu metod używanych obecnie do rozwiązania zagadnień optymalizacji na szczególną uwagę zasługuje grupa algorytmów genetycznych usytuowanych w nurcie obliczeń ewolucyjnych. Powstały one w drodze obserwacji prowadzonych w środowisku naturalnym, gdzie zauważono, iż lepsze przystosowanie osobników danego gatunku do życia w określonym ekosystemie daje dużo wyższe szanse przetrwania niż u osobników innych – słabiej przystosowanych [3]. Działanie algorytmu ewolucyjnego oparte jest na kilku podstawowych operacjach. Wszystkie osobniki danej populacji podlegają procesowi krzyżowania i mutacji – samoistnych zmian w swojej strukturze, co pozwala na osiągnięcie nowej populacji. Na podstawie selekcji w końcowym rozrachunku otrzymuje się najlepiej przystosowanego osobnika.

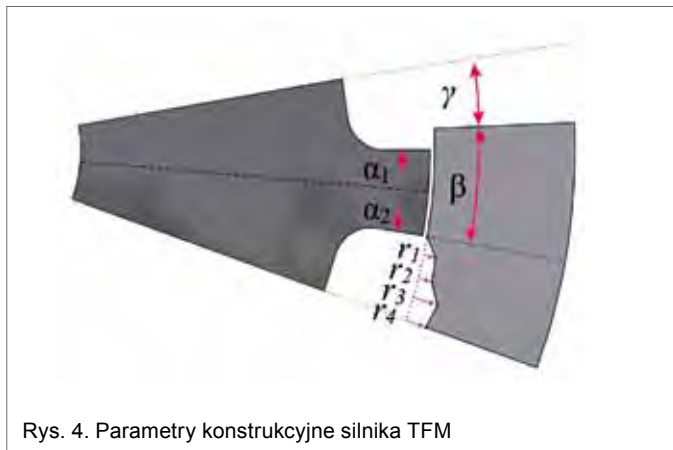
Proces optymalizacji przeprowadzono w oparciu o trzy podstawowe narzędzia:

- do obliczeń pola magnetycznego (Flux3D);
- nadzorujące proces optymalizacji – Matlab (*Genetic algorithms toolbox*);
- służące do gromadzenia danych – baza danych (MySQL).

Znaczne nakłady czasowe związane z procesem optymalizacji modeli polowych wymuszają stosowanie wszelkich zabiegów mających na celu ograniczenie obszaru obliczeniowego. Algorytm optymalizacyjny został rozbudowany o bazę danych, w której zapisywano dane osobników oraz obliczony dla nich moment elektromagnetyczny. Zastosowanie bazy danych ma na celu pominięcie obliczeń polowych w przypadku wygenerowania osobnika, dla którego już wcześniej został wyznaczony moment elektromagnetyczny (rys. 2). Dodatkowym elementem pozwalającym na redukcję czasów obliczeń jest odpowied-



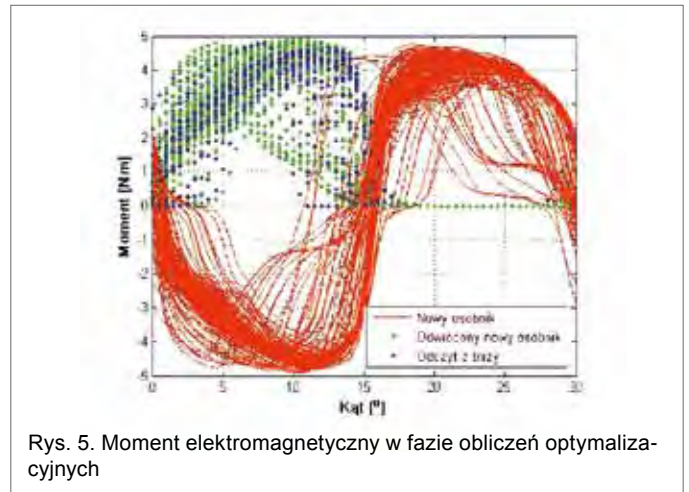
Rys. 3. a) model numeryczny 1/48 objętości dwumodułowego silnika TFM, b) sposób definicji warunków brzegowych



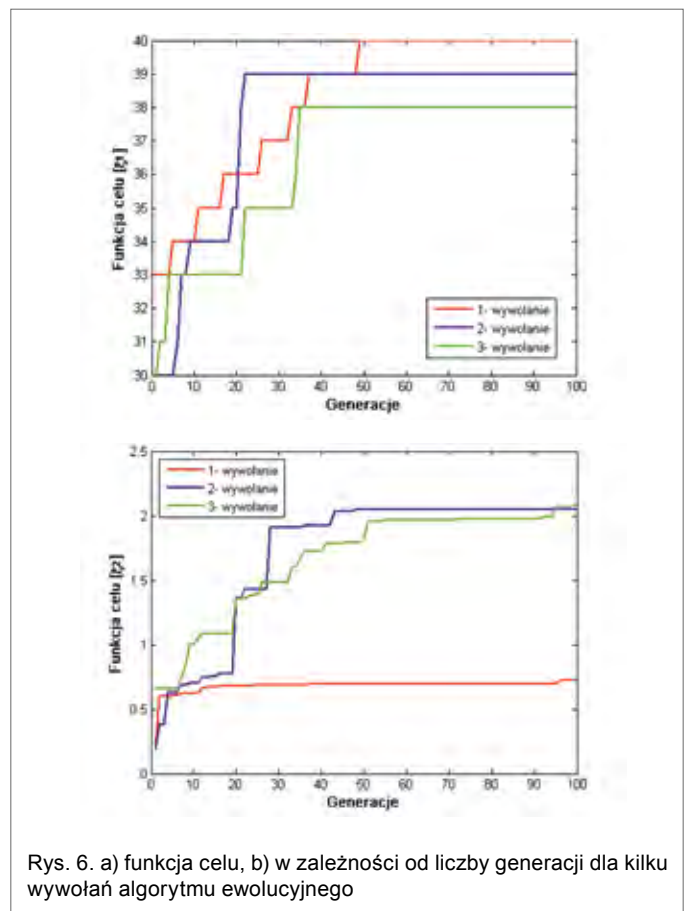
Rys. 4. Parametry konstrukcyjne silnika TFM

ni dobór siatki obliczeniowej. W procesie jej tworzenia należy jednak mieć na uwadze jakość otrzymywanych wyników oraz stopień odzwierciedlenia rzeczywistych zjawisk zachodzących w badanej maszynie.

Na podstawie obliczeń wstępnych podczas konstrukcji modelu poleowego założono, iż nie występują sprzężenia magnetyczne pomiędzy sąsiadującymi modułami. Uproszczenie to wraz z przyjęciem warunków symetrii obrotowej (warunki periodyczne) pozwoliło na redukcję obszaru obliczeniowego do jednego modułu – jednej dwudziestej czwartej objętości całej maszyny. Dodatkowo przyjęto warunek symetrii w płaszczyźnie XY przechodzącej przez środek wysokości modułu. Pozwoliło to na dalsze ograniczenie obszaru obliczeniowego o połowę. W obliczeniach optymalizacyjnych rozpatrywano więc obszar



Rys. 5. Moment elektromagnetyczny w fazie obliczeń optymalizacyjnych



Rys. 6. a) funkcja celu, b) w zależności od liczby generacji dla kilku wywołań algorytmu ewolucyjnego

równy jednej czterdziestej ósmej całego silnika TFM (rys. 3). Moment elektromagnetyczny rozwijany przez silnik jest obliczany za pomocą metody pracy wirtualnej, natomiast ruch wirnika względem stojana odwzorowano metodą powierzchni ślizgowej [5, 6].

Przystępując do parametryzacji modelu numerycznego, jako zmienne decyzyjne przyjęto następujące parametry geometryczne silnika TFM:  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $r_4$  (rys. 4). Parametry te w głównej mierze związane są z doбором rozpiętości zęba stojana oraz kształtem zęba wirnika. Ze względu na stopień złożoności obliczeń autorzy nie uwzględnili w procesie optymalizacji pozostałych parametrów konstrukcyjnych. Dyskusję wpływu tych parametrów na właściwości ruchowe silnika TFM omówiono w pracach [4, 6].

Tabela 2. Parametry całkowite silnika TFM

	Przed optymalizacją	Po optymalizacji		Zmiana [%]	
		$\xi_1$	$\xi_2$		
$T_{max}$ [N·m]	6,22	4,45	4,29	-28	-31
$T_{min}$ [N·m]	0	0,63	2,05	-	-
$T_{av}$ [N·m]	4,66	2,42	2,98	-48	-36
$\varepsilon$ [%]	66,73	78,75	37,71	18	-44
$l_u$ [°]	15	19,5	17,5	30	17

rekłama

Podstawowym celem optymalizacji jest rozszerzenie przedziału występowania dodatniego momentu użytecznego (w stanie pracy silnikowej) oraz możliwie dużej wartości momentu rozruchowego i średniego.

### Wyniki badań

Ze względu na bardzo duże koszty obliczeniowe autorzy zrezygnowali z analizy efektywności algorytmu ewolucyjnego. Wszelkie parametry algorytmu ewolucyjnego dobrano, sugerując się przykładami zawartymi w literaturze [6]. Za warunek zakończenia działania algorytmu przyjęto osiągnięcie zadanej liczby generacji równej 100.

Pierwszym podstawowym celem optymalizacji było uzyskanie jak najszerszego przedziału występowania dodatniego momentu przy pracy silnikowej oraz maksymalizację momentu rozruchowego. Mając na uwadze tę cechę, zaproponowano dwie funkcje celu w postaci:

$$\max_{x \in X} \{ \xi_1(x) = l_u \} \quad (1)$$

oraz

$$\max_{x \in X} \{ \xi_2(x) = T_{min} \} \quad (2)$$

$$X \subset R^7$$

gdzie:  $l_u$  – szerokość przedziału występowania dodatniego momentu użytecznego,  $T_{min}$  – wartość minimalna momentu.

Do opisu pulsacji momentu elektromagnetycznego zdefiniowano dodatkowy parametr wg zależności [4]:

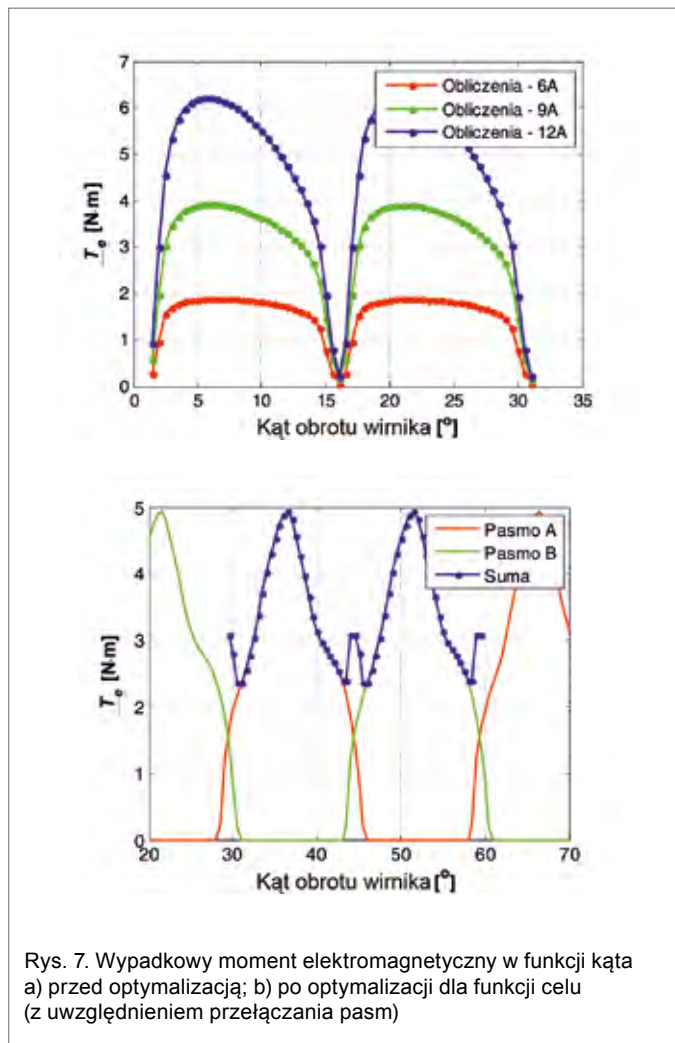
$$\varepsilon = \frac{T_{max} - T_{min}}{2T_{av}} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $T_{av}$  – oznaczają odpowiednio wartości: maksymalną, minimalną i średnią momentu elektromagnetycznego.

Wykresy momentu elektromagnetycznego generowane podczas trwania procesu optymalizacji przedstawiono na rysunku 5. Obrazują one sposób działania (błądzenie) algorytmu ewolucyjnego, który w kolejnych krokach przeszukiwał przestrzeń obliczeniową, dążąc do maksymalizacji narzuconej mu funkcji celu.

Stosując przedstawiony wyżej model numeryczny silnika dwumodułowego, przeprowadzono szereg obliczeń przy użyciu algorytmu ewolucyjnego. Wyniki badań w postaci wykresów zmienności funkcji celu w zależności od liczby generacji przedstawiono na rys. 6.

Podczas wywołania pierwszej funkcji celu osiągnięto istotne poszerzenie przedziału występowania dodatniego momentu



użytecznego aż o 5°. Niestety znacznemu pogorszeniu uległy pozostałe parametry całkowite maszyny. Znacznie lepsze rezultaty otrzymano przy zastosowaniu drugiej funkcji celu. Wraz z rozszerzeniem przedziału występowania dodatniego momentu znacznie podniesiono wartość momentu rozruchowego. Zasadniczemu zmniejszeniu uległ również współczynnik tętnień momentu. W tabeli 2 zebrano istotne parametry całkowite silnika TFM przed optymalizacją i po niej.

Na rys. 7 przedstawiono zależność momentu elektromagnetycznego rozpatrywanej maszyny przed optymalizacją i po niej z zastosowaniem drugiej funkcji celu (zależność (2)).

## Podsumowanie

W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań optymalizacyjnych kształtu magnetowodu silnika reluktancyjnego ze strumieniem poprzecznym. Otrzymana w wyniku optymalizacji struktura zęba wirnika znacznie poprawiła właściwości elektromechaniczne silnika TFM. Otrzymana wartość minimalnego momentu na poziomie 2 N·m zapewnia start maszyny w każdym położeniu wirnika. W wyniku optymalizacji zredukowano również znacznie (o 44%) współczynnik tętnień momentu. Zastosowanie w obliczeniach bazy danych pozwoliło na znaczącą redukcję nakładów obliczeniowych. W dalszych badaniach autorzy zamierzają zastosować bardziej złożoną postać funkcji celu, aby dodatkowo maksymalizować wartość średnią momentu elektromagnetycznego.

## Literatura

- [1] BIENKOWSKI K., SZCZYPIOR J., ROGALSKI A., BUCKI B., BIERNAT A.: *Influence of Geometrical Parameters of Switched Reluctance Motor on Electromagnetic Torque*. ICEM, 5–8 September, Cracow, 2004, Vol. 2, pp. 519–520.
- [2] BOGUSZ P., KORKOSZ M., PROKOP J.: *Analiza wpływu szerokości biegunów stojana i zębów wirnika na parametry eksploatacyjne silników reluktancyjnych przełączalnych na bazie obliczeń polowych*. Zeszyty Problemowe BOBRME-KOMEL – Maszyny Elektryczne, nr 75/2006, s. 201–206.
- [3] SOCAŁA J., KOŚCIŃSKI W.: *Zastosowanie metody funkcji dolnej do badania zbieżności algorytmów genetycznych*. Matematyka stosowana 8, 2007.
- [4] ŁUKANISZYN M., KOWOL M.: *Wpływ zmian konstrukcyjnych na parametry elektromechaniczne silnika reluktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 11’2006, s. 43–45.
- [5] KOŁODZIEJ J.: *Analiza dynamicznych i ustalonych stanów pracy silnika reluktancyjnego ze strumieniem poprzecznym*. Rozprawa doktorska, Opole 2010.
- [6] KOWOL M.: *Analiza pracy przełączalnego silnika reluktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym do napędu lekkich pojazdów*. Rozprawa doktorska, Opole 2007.

Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. Praca zrealizowana w ramach grantu MNiSzW nr N N510 332637.



prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn – ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Opolskiej w 1977 r. Stopień doktora i doktora habilitowanego uzyskał na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej kolejno w 1985 r. i 1991 r. W 2003 r. uzyskał tytuł profesora. W latach 1993–1999 był stypendystą Fundacji Alexandra von Humboldta w Uniwersytecie Erlangen-Nürnberg. Jest autorem ok. 200 publikacji, 3 monografii oraz kilku podręczników i skryptów. Specjalizuje się w modelowaniu i optymalizacji konstrukcji maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i maszyn reluktancyjnych;  
e-mail: m.lukaniszyn@po.opole.pl



dr inż. Marcin Kowol – ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej w 2003 r. Stopień doktora uzyskał na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej w 2008 r. Jest autorem ponad 40 publikacji. Specjalizuje się w modelowaniu i optymalizacji konstrukcji silników reluktancyjnych ze strumieniem poprzecznym oraz maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi;  
e-mail: m.kowol@po.opole.pl



dr inż. Janusz Kołodziej – ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej w 2004 r. Jest autorem ok. 20 publikacji. Specjalizuje się w modelowaniu i optymalizacji konstrukcji maszyn elektrycznych ze strumieniem poprzecznym oraz z magnesami trwałymi; e-mail: jan.kolodziej@po.opole.pl