

Marian Łukaniszyn, Marcin Kowol, Janusz Kołodziej
Politechnika Opolska

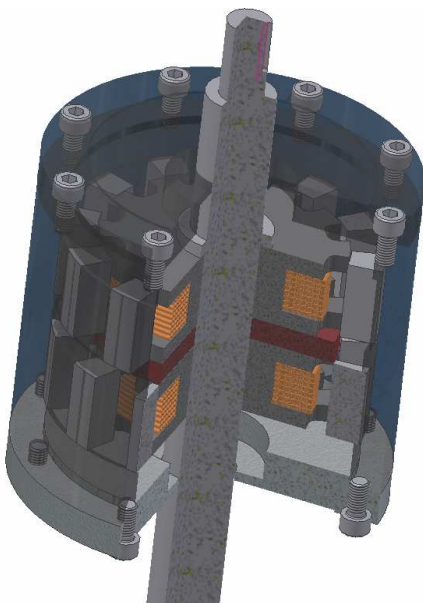
OPTYMALIZACJA OBWODU MAGNETYCZNEGO DWUMODUŁOWEGO SILNIKA RELUKTANCYJNEGO ZE STRUMIENIEM POPRZECZNYM

MAGNETIC CIRCUIT OPTIMIZATION OF A 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.

1. Wstęp

Zasadniczym celem projektowania jest dopasowanie zestawu specyficznych cech przedmiotu badań do założeń projektowych. W przypadku maszyn elektrycznych istotnymi parametrami mogą być np.: sprawność przetwornika, 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 trój-modułowej maszyny ze strumieniem poprzecznym (rys.1).



Rys.1. Prototyp dwumodułowego silnika TFM.

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.

Tabela 1. Podstawowe parametry silnika TFM

Napięcie zasilania	$U_n=24$ V
Prąd znamionowy	$I_n=12$ A
Prędkość obrotowa	0 ÷ 300 obr/min
Średnica zewnętrzna wirnika	158 mm
Średnica zewnętrzna stojana	103,5 mm
Szerokość szczeliny powietrznej	$\delta = 0,5$ mm

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.

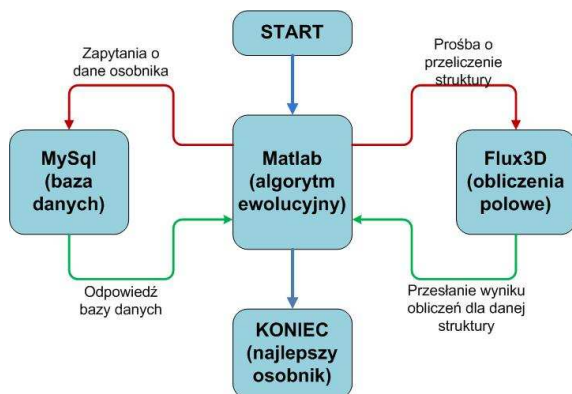
Zasadniczą wadą wyżej wymienionej konstrukcji silnika reluktancyjnego ze strumieniem poprzecznym jest zerowa wartość momentu rozruchowego dla pewnych położeń wirnika. Głównym celem niniejszej pracy jest zatem taki dobór kształtu obwodu magnetycznego wirnika, aby zapewnić możliwie duży moment rozruchowy w każdym położeniu wirnika względem stojana.

2. 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:

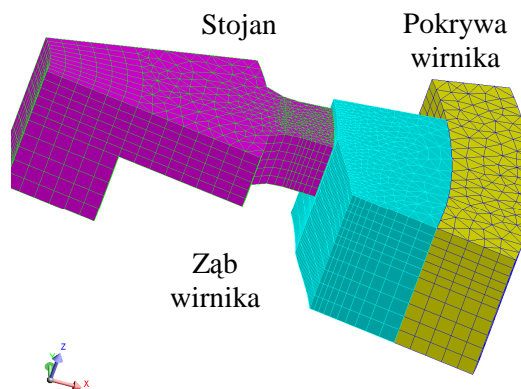
- ✓ narzędzie do obliczeń pola magnetycznego (Flux3D);
- ✓ narzędzie nadzorujące proces optymalizacji – Matlab (Genetic algorithms toolbox);
- ✓ narzędzie służące do gromadzenia danych – baza danych (MySQL).



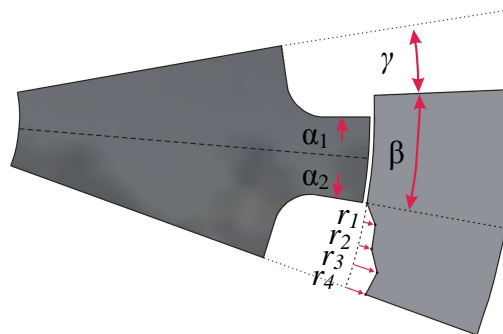
Rys.2. Schemat wymiany informacji podczas procesu optymalizacji

Znaczne nakłady czasowe związane z procesem optymalizacji modeli polowych wymuszają stosowanie wszelkich zabiegów mających na celu ograniczenie obszaru obliczeniowego. Dodatkowym elementem pozwalającym na redukcję czasów obliczeń jest odpowiedni dobór siatki obliczeniowej. Podczas jej minimalizacji należy jednak mieć na uwadze jakość otrzymywanych wyników oraz stopień odzwierciedlenia rzeczywistych zjawisk zachodzących w badanej maszynie.

Na podstawie obliczeń wstępnych podczas konstrukcji modelu polowego założono, iż nie występują sprzężenia magnetyczne pomiędzy sąsiadującymi modułami. Uproszczenie to wraz z przyjęciem warunków symetrii obrotowej 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 równy jednej czterdziestej ósmej całego silnika TFM (rysunek 3).



Rys.3. Model numeryczny 1/48 objętości dwumodułowego silnika TFM



Rys.4. Parametry konstrukcyjne silnika TFM

Przystępując do parametryzacji modelu numerycznego, jako zmienne decyzyjne przyjęto następujące parametry geometryczne silnika TFM: $\alpha_1, \alpha_2, \beta, r_1, r_2, r_3, r_4$ (rysunek 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, 5].

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

3. Wyniki badań

Za względu na bardzo duże koszty obliczeniowe autorzy zrezygnowali z analizy efektywności algorytmu ewolucyjnego. Wszelkie parametry algorytmu ewolucyjnego dobrano sugerując się przykładami zawartymi w literaturze [5]. 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

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

$$X \subset R^7$$

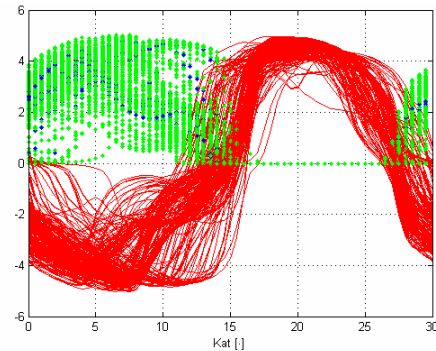
gdzie: l_u – szerokość przedziału występowania dodatniego momentu użytecznego, T_{min} – wartość minimalna momentu.

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

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

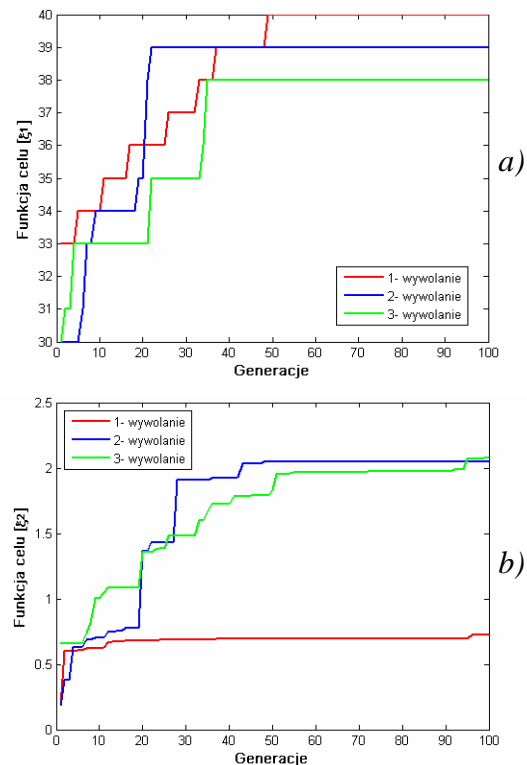
gdzie: T_{max} , T_{min} , T_{av} – oznaczają odpowiednio wartość maksymalną, minimalną i średnią momentu elektromagnetycznego.

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



Rys.5. Moment elektromagnetyczny w fazie obliczeń optymalizacyjnych

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 rysunku 6.



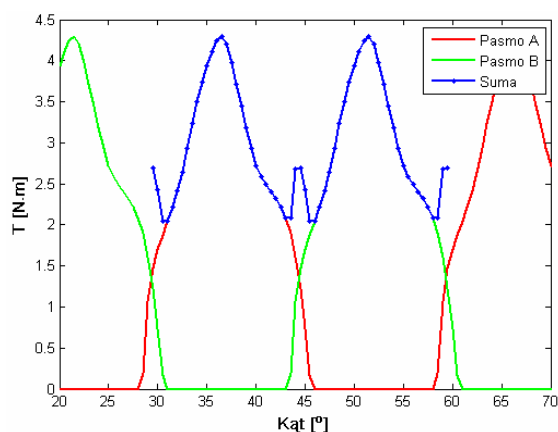
Rys.6. a) Funkcja celu ξ_1 , b) ξ_2 w zależności od liczby generacji dla kilku wywołań algorytmu ewolucyjnego.

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 i po optymalizacji.

Tabela 2. Parametry całkowite silnika TFM

	Przed optymalizacją	Po optymalizacji		Zmiana [%]	
		ξ_1	ξ_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
ε [%]	133,47	157,51	75,42	18	-44
l_u [°]	15	19,5	17,5	30	17

Na rysunku 7 przedstawiono zależność momentu elektromagnetycznego rozpatrywanej maszyny po optymalizacji z zastosowaniem drugiej funkcji celu (zależność (2)).



Rys.7. Wypadkowy moment elektromagnetyczny w funkcji kąta z uwzględnieniem przełączania pasm dla funkcji celu ξ_2 .

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono 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.

7. Literatura

- [1] Bieńkowski 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] Socąła J., Kosiński 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] Kowol M.: *Analiza pracy przełączalnego silnika reluktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym do napędu lekkich pojazdów*, Rozprawa doktorska, Opole, 2007.

Autorzy

Prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn,
e-mail: m.lukaniszyn@po.opole.pl;
Dr inż. Marcin Kowol,
e-mail: m.kowol@po.opole.pl;
Mgr inż. Janusz Kołodziej,
e-mail: ja.kolodziej@po.opole.pl;

Politechnika Opolska, Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej, Katedra Maszyn Elektrycznych, ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole.

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

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Lech Nowak