

Marian Łukaniszyn, Marcin Kowol, Janusz Kołodziej  
Politechnika Opolska

## WERYFIKACJA POMIAROWA DWUMODUŁOWEGO SILNIKA RELUKTANCYJNEGO ZE STRUMIENIEM POPRZECZNYM

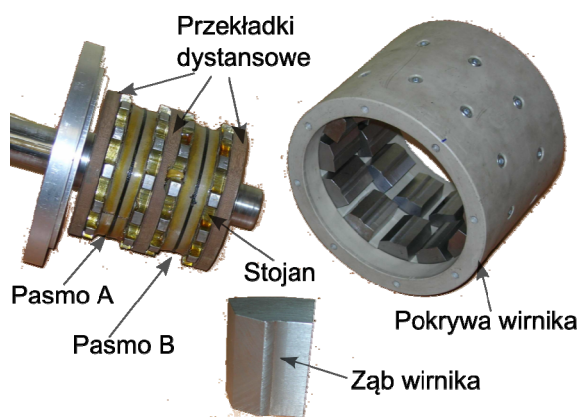
### EXPERIMENTAL VALIDATION OF TWO-MODULE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR WITH AXIAL FLUX

**Abstract:** The paper presents the experimental validation of the two-modular reluctance motor (Transverse Flux Motor) with an outer rotor. The new prototype motor structure was prepared on the basis of the performed optimization. The main optimization instrument was Matlab and its evolutionary algorithm connected with a three-dimensional field computations software and MySQL data base. The results of selected simulation runs, clearly show the effectiveness of the approach presented. The experimental validation of a electromagnetic torque was performed for two prototypes of TFM's. The simulation results are in very good agreement with the experimental data obtained from prototype motors.

#### 1. Wstęp

Szybki rozwój technologii komputerowej w zasadniczy sposób wpłynął również na zmianę podejścia do projektowania przetworników elektromechanicznych. Dostępne liczne, bardzo zaawansowane środowiska obliczeniowe umożliwiają przeprowadzenie analizy jak również optymalizacji, konstrukcji bez konieczności budowy wielu, kosztownych prototypów [1, 2, 3, 5]. Jednak bardzo istotnym elementem całego procesu projektowania jest również weryfikacja pomiarowa, pozwalająca na dokonanie oceny poprawności i przydatności modeli numerycznych [6, 7].

Przedmiotem badań zawartych w niniejszej pracy jest dwumodułowy silnik reluktancyjny ze strumieniem poprzecznym (TFM) oraz wirnikiem zewnętrznym (rys. 1.) [3]. Maszyna ta posiada dwa moduły stojana umieszczone symetrycznie na wale ze stali kwasoodpornej i oddzielone od siebie przekładką z materiału paramagnetycznego, celem minimalizacji sprzężeń magnetycznych. Każde z pasm posiada jedno uzwojenie w postaci cewki toroidalnej wyprowadzone poprzez wycięcia w wale. Charakterystyczną cechą maszyn ze strumieniem poprzecznym jest jednakowa liczba zębów stojana oraz wirnika. W omawianej konstrukcji zastosowano 12 zębów. Moduły wirnika, składające się z przytwierdzonych do pokrywy zewnętrznych profilowanych zębów, są przesunięte względem siebie o 15 stopni mechanicznych. Wszystkie elementy magnetowodu wykonano z litej stali w związku z koniecznością zapewnienia wytrzymałości strukturalnej maszyny.



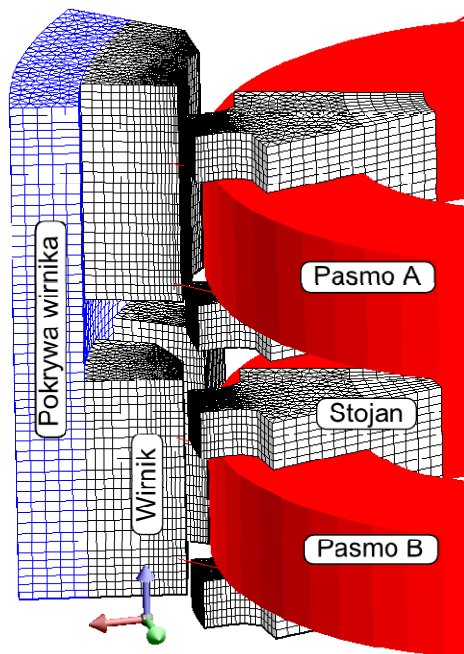
Rys. 1. Prototyp dwumodułowego silnika TF

Omawianą konstrukcję maszyny poddano intensywnym badaniom, których głównym celem była poprawa własności elektromechanicznych. Przeprowadzono optymalizację konstrukcji magnetowodu a w szczególności kształtu zębów wirnika, celem rozszerzenia przedziału występowania dodatniego momentu użytecznego oraz maksymalizacji momentu rozruchowego [3, 4]. W dalszej części pracy zawarto, analizę porównawczą parametrów całkowitych (moment elektromagnetyczny) dla prototypów o różnych kształtach zębów wirnika.

#### 2. Model numeryczny

Naturalnym podejściem w modelowaniu przetworników elektromechanicznych jest stosowanie warunków brzegowych umożliwiających redukcję obszaru obliczeniowego. Szczególne znaczenie konieczności stosowania warunków symetrii pola elektromagnetycznego jest podyk-

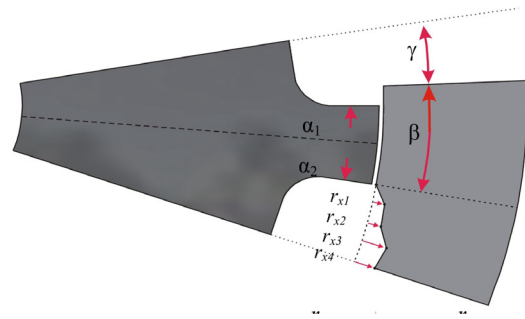
towane ograniczaniem nakładów czasowych związanych z obliczeniami polowymi. Jednak warunkiem ich stosowania jest znajomość zjawisk zachodzących w modelowanym przetworniku. Podczas budowy modelu polowego rozpatrywanej maszyny zastosowano warunki periodyczne ograniczające obszar obliczeniowy do 1/12 objętości całej maszyny – jednej podziałki biegunowej (rys. 2.) [3]. W mniejszej pracy autorzy, przystępując do implementacji numerycznej silnika TF, zastosowali szereg uproszczeń. W modelu rozpatrywano pole magnetyczne ustalone, uzwojenia zastąpiono przez szyny z prądem o równomiernej gęstości w całym przekroju cewek. Model ten pozwala również na uwzględnienie sprzężeń magnetycznych.



Rys. 2. Model numeryczny wraz z siatką dyskretyzacyjną i uzwojeniami maszyny TF

W swoich rozważaniach autorzy skupili się na trzech rozwiązaniach konstrukcyjnych zębów wirnika (rys. 4.). Pierwsze z nich (prototyp A) jest wynikiem obliczeń optymalizacyjnych. Drugi prototyp (prototyp B) powstał w wyniku niedotrzymania tolerancji przez zewnętrznego wykonawcę zębów wyznaczonych w drodze optymalizacji. Identyfikację geometrii tych zębów wykonano w oparciu o zastosowaną do optymalizacji autorską bazę danych, w połączeniu z dokładnymi pomiarami kształtu omawianych elementów [3]. Dodać należy, iż maszyny reaktancyjne są bardzo czułe na modyfikacje magnetowodu. Już bardzo niewielka różnica (rzędu 0,1 mm) w geometrii, w znaczący spo-

sób wpływa na parametry całkowite tych przetworników. Ostatni z omawianych prototypów (C), to konstrukcja o uproszczonej geometrii zębów wirnika.

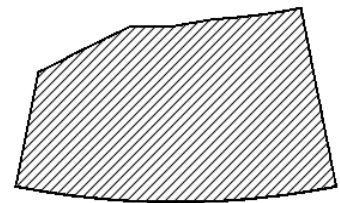


Rys. 3. Parametry geometryczne zębów wirnika oraz stojana silnika TF

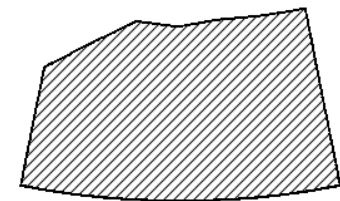
Tabela 1. Parametry geometryczne zębów wirnika dwumodułowej maszyny TF

Parametry geom. zębów wirnika	$\beta$ [°]	$r_{x1}$ [mm]	$r_{x2}$ [mm]	$r_{x3}$ [mm]	$r_{x4}$ [mm]
Prototyp A	8	0,5	0,6	2,7	5,6
Prototyp B	8	0,6	0	2,5	5,6
Prototyp C	10	0,6	1,5	2,5	3,5

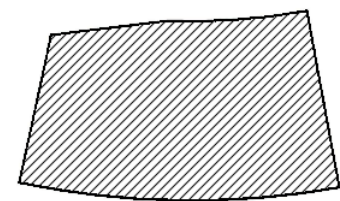
Prototyp A



Prototyp B



Prototyp C



Rys. 4. Kształty zębów wirnika dla prototypów A, B, C

Najistotniejsze parametry geometryczne zębów wirnika dwumodułowego silnika TF zobrazowano rysunku 3 oraz zebrano w tabeli 1.

### 3. Wyniki obliczeń i pomiarów

Dla opracowanego modelu polowego przeprowadzono szereg symulacji komputerowych. Moment elektromagnetyczny ( $T_e$ ) rozwijany przez silnik jest obliczany za pomocą metody pracy wirtualnej, jako pochodna koenergii magnetycznej względem kąta obrotu wirnika do stojana, według następującej zależności:

$$T_e = \frac{\partial W_s}{\partial \alpha_m} \quad (1)$$

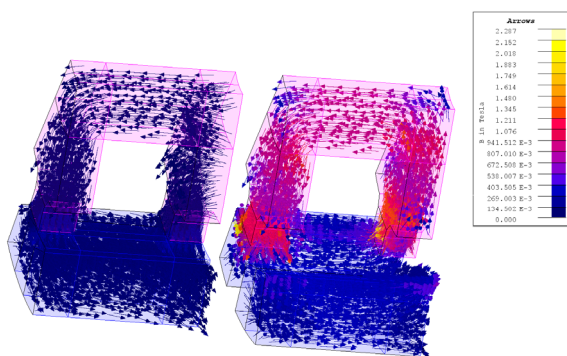
gdzie:  $W_s$  – koenergia pola magnetycznego,  $\alpha_m$  – współrzędna mechaniczna (kąt obrotu).

Dodatkowo w obliczeniach wprowadzono parametr opisujący tętnienia momentu elektromagnetycznego ( $\varepsilon$ ) opisany zależnością przedstawioną poniżej [4]:

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

gdzie:  $T_{\max}$  – wartość maksymalna momentu elektromagnetycznego,  $T_{\min}$  – wartość minimalna momentu elektromagnetycznego,  $T_{av}$  – wartość średnia momentu elektromagnetycznego.

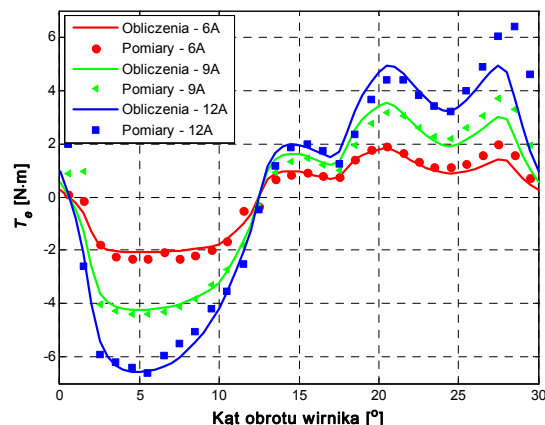
Wstępną analizę oceny przydatności i poprawności modeli numerycznych można przeprowadzić na podstawie rozkładów indukcji magnetycznej.



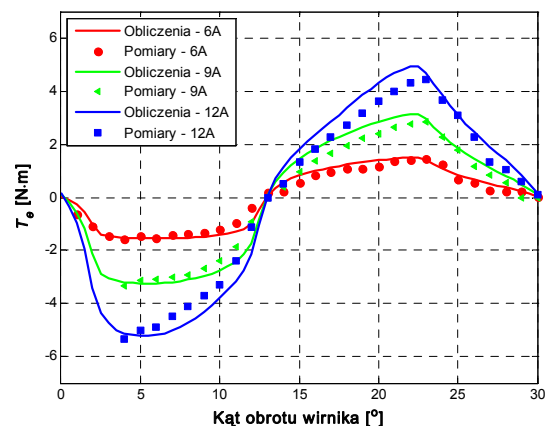
Rys. 5. Przykładowy rozkład wartości bezwzględnej indukcji magnetycznej w prototypie C, przy zasilaniu pasma A

Wektorowy wykres modułu indukcji magnetycznej dla prototypu C podczas zasilania jednego pasma (pasma A), zaprezentowano na rysunku 5. Na rysunkach 6 i 7 zilustrowano zmienność momentu elektromagnetycznego dla różnych wartości prądu zasilania pasma silnika.

Na wykresy naniesiono również wyniki pomiarów.



Rys. 6. Moment elektromagnetyczny w funkcji kąta obrotu wirnika dla prototypu B silnika TF modul A,



Rys. 7. Moment elektromagnetyczny w funkcji kąta obrotu wirnika dla prototypu C silnika TF modul A

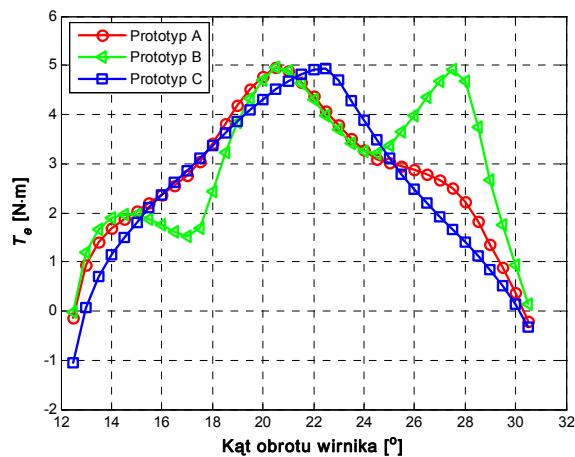
Przeprowadzona weryfikacja pomiarowa wykazała dobrą zgodność pomiędzy wartościami zmierzonymi a wyznaczonymi w drodze obliczeń polowych. Powstałe rozbieżności wynikają w głównej mierze z przyjętych w modelu numerycznym uproszczeń. Bardzo istotne znaczenie szczególnie w przypadku maszyn reluktancyjnych ma również dokładność wykonania czynnych elementów silnika. Nietrzymanie tolerancji wykonania skutkuje natychmiastowymi zmianami parametrów całkowitych silnika TF. Mniejsza wartość momentu elektromagnetycznego otrzymana z pomiarów dla prototypu C wynika szczególnie z niedotrzymania wymiaru szczeliny powietrznej w obiekcie rzeczywistym w porównaniu z modelem numerycznym. W tabeli 2 zamieszczono dodatkowo porównanie najistotniejszych parametrów dla wszystkich trzech prototypów. Na rysunku 8 wykre-

ślono charakterystyki zmienności momentu elektromagnetycznego dla poszczególnych prototypów.

Tabela 2. Zestawienie parametrów całkowych dla prototypów A, B, C, z uwzględnieniem przełączy pasm

Parametry całkowite maszyn TF	$T_{max}$ [N·m]	$T_{min}$ [N·m]	$T_{av}$ [N·m]	$\varepsilon$ [%]	$l_u$ [°]
Przed optymalizacją	6,22	0	4,66	66,73	15,00
Prototyp A	4,96	2,19	3,38	40,86	17,50
Prototyp B	5,85	1,51	3,69	58,75	18,00
Prototyp C	4,95	1,47	3,19	54,05	17,50

gdzie:  $l_u$  – szerokość przedziału występowania dodatniego momentu użytecznego.



Rys. 8. Moment elektromagnetyczny w funkcji kąta obrotu wirnika dla prototypów A, B, C, bez uwzględnienia przełączy pasm

#### 4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono porównanie momentu elektromagnetycznego dla trzech wariantów budowy zębów wirnika dwumodułowej maszyny TF. Zdecydowanie najlepszymi właściwościami charakteryzuje się prototyp A, otrzymany w drodze optymalizacji. Uzyskano znaczną redukcję współczynnika pulsacji przy jednoczesnym rozszerzeniu przedziału występowania dodatniego momentu użytecznego oraz wzroście wartości minimalnej momentu. Dwa pozostałe prototypy cechuje już znacznie większa wartość współczynnika pulsacji oraz niższa

wartość momentu minimalnego. Przeprowadzona weryfikacja pomiarowa pokazała dobrą zbieżność wyników obliczeń z badaniami eksperymentalnymi.

#### 5. Literatura

- [1] Białoszewski T.: *Wielokryterialna optymalizacja parametrów układów z zastosowaniem algorytmów ewolucyjnych*. Rozprawy Naukowe (Problemy nauk technicznych) No. 1, dział Automatyka i Informatyka, PWNT, 2007.
- [2] Demenko A.: *Obwodowe modele układów z polem elektromagnetycznym*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2004.
- [3] Kołodziej J.: *Analiza dynamicznych i ustalonych stanów pracy silnika reluktancyjnego ze strumieniem poprzecznym*, Praca Doktorska, Opole 2011;
- [4] Kowol M., Łukaniszyn M., Latawiec K.: *Modeling and construction of a modular TFM with an outer rotor*. Electrical Engg., Vol. 92, No 3, September 2010, pp.111-118.
- [5] Mendrela E., Łukaniszyn M., Macek-Kamińska K.: *Tarczowe silniki prądu stałego z komutacją elektroniczną*. Wydawnictwo Gnome, PAN, Katowice, 2002.
- [6] Tomczewski K., Łukaniszyn M., Wróbel K., Kowol M, Kołodziej J.: *Badania eksperymentalne silnika reluktancyjnego po optymalizacji*. Napędy i sterowanie, Nr 10 (138), Października 2010, s. 56-58
- [7] Tomczewski K., Wróbel K.: *Jednoczesna optymalizacja kształtu obwodu magnetycznego i parametrów zasilania przełączalnego silnika reluktancyjnego*. Przegląd Elektrotechniczny, 03/2009, s. 107-110.

#### 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  
dr inż. Janusz Kołodziej, e-mail: ja.kolodziej@po.opole.pl

Politechnika Opolska  
Wydział Elektrotechniki,  
Automatyki i Informatyki,  
ul. Mikołajczyka 5, 45 - 271 Opole

#### Recenzent

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski