

Marcin Kowol, Janusz Kołodziej, Marian Łukaniszyn
Politechnika Opolska, Opole

ANALIZA WPLYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW NA DYNAMIKĘ SILNIKA RELUKTANCYJNEGO

ANALYSIS OF THE SELECTED PARAMETERS INFLUENCE ON RELUCTANCE MOTOR DYNAMICS

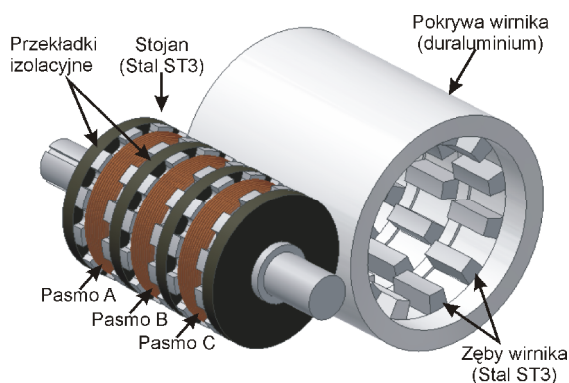
Abstract: The paper presents the simulation results of the modular reluctance motor (Transverse Flux Motor) with an outer rotor in different transient states. The analysis of the switch-on and switch-off angles influence on the average electromagnetic torque and torque ripple were made. The mathematical model was implemented in Matlab/Simulink environment using nonlinear torque and flux characteristics obtain from magnetostatic calculations. Several computer simulations were carried out for different TFM control procedure.

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój metod i narzędzi do obliczeń zagadnień z zakresu pól elektromagnetycznych umożliwił znaczny postęp w dziedzinie projektowania i konstrukcji współczesnych maszyn elektrycznych. Analiza polowa i polowo-obwodowa na etapie projektowania stała się bardzo ważnym narzędziem ułatwiającym wdrażanie także silników reluktancyjnych do specyficznych zastosowań w przemyśle. Silniki reluktancyjne posiadają szereg zalet, do których należy zaliczyć przede wszystkim prostą budowę, a co za tym idzie, wysoką niezawodność. Charakteryzują się również prostym sposobem regulacji prędkości obrotowej i wykazują dużą odporność na uszkodzenia – szczególnie w przypadku maszyn o większej liczbie pasm. Największą wadą tych maszyn są duże pulsacje momentu elektromagnetycznego powodujące wibracje oraz hałas.

Jedną z odmian tych maszyn jest silnik reluktancyjny ze strumieniem poprzecznym (TFM). Rozpatrywana maszyna [1, 5] składa się z trzech modułów oddzielonych od siebie przekładkami dystansowymi w celu zminimalizowania sprzężeń pomiędzy sąsiednimi modułami. Wał maszyny wykonano z materiału o bardzo małej przenikalności magnetycznej (stal kwasoodporna). Każdy moduł zawiera 12 zębów oraz jedno uzwojenie w postaci cewki solenoidalnej. Poszczególne moduły wirnika są przesunięte względem siebie o dziesięć stopni mechanicznych, natomiast moduły stojana są ułożone symetrycznie względem siebie. Pokrywy zewnętrzne oraz pokrywę wirnika wykonano z materiału niemagnetycznego (aluminium)

[1, 5, 6, 7]. Przedmiot badań przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Struktura silnika TFM

Zasadniczym problemem, nad którego rozwiązaniem pracuje obecnie wiele zespołów badawczych na świecie, jest minimalizacja pulsacji momentu elektromagnetycznego. Zniwelowanie, bądź ograniczenie pulsacji na etapie projektowania obwodu magnetycznego oraz w sposobie sterowania, pozwoli na znaczne rozszerzenie zakresu zastosowań tych napędów. Wysokie wymagania stawiane obecnie silnikom elektrycznym od strony eksploatacyjnej wymuszają badania nad pozyskiwaniem nowych konstrukcji tych silników, charakteryzujących się większą sprawnością oraz niskim poziomem pulsacji momentu elektromagnetycznego. Analiza polowa mająca na celu maksymalizację wartości średniej momentu elektromagnetycznego przy jednoczesnym ograniczeniu pulsacji staje się niewystarczająca. Synteza metod optymalizacji magnetowodu oraz dobór optymalnych w danym punkcie pracy maszyny algorytmów sterowania, pozwala na kompleksową poprawę

istotnych parametrów silnika TFM. Innym rozwiązaniem jest zaproponowana w [8] jednoczesna analiza w tych dwóch kierunkach.

2. Model matematyczny

Znaczna nieliniowość charakteryzująca silniki reluktancyjne determinuje sposób podejścia do budowy modeli matematycznych. Jako bazowe równania w modelowaniu dynamiki tych maszyn przyjęto przedstawione poniżej równania (1) i (2) [2, 3]:

$$u = Ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

gdzie: u – napięcie zasilania, R – rezystancja uzwojenia pasma, i – prąd pasma, ψ – strumień skojarzony z pojedynczym pasmem,

$$T = T_l + k_\omega \omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

gdzie: T – moment elektromagnetyczny, T_l – moment obciążenia, k_ω – współczynnik tarcia, J – moment bezwładności, ω – prędkość obrotowa wirnika.

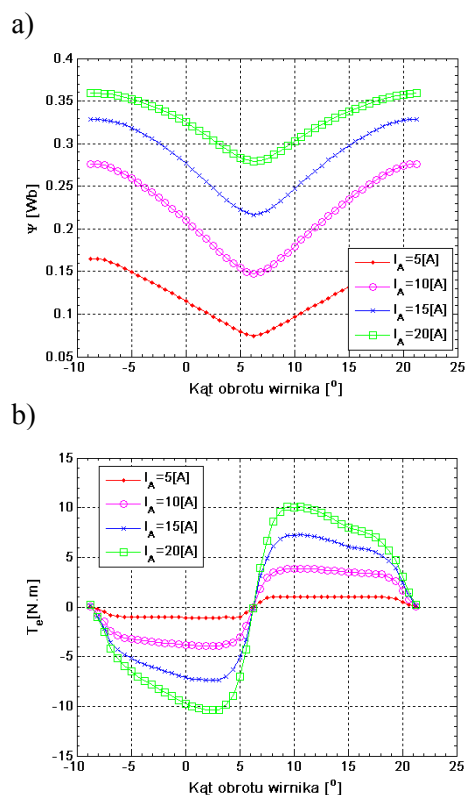
Pierwsze z równań opisuje silnik od strony elektromagnetycznej, drugie natomiast od strony mechanicznej.

Jednym ze sposobów uwzględnienia nieliniowości strumienia i momentu elektromagnetycznego w zależności od kąta położenia wirnika względem stojana oraz prądu jest dołączenie do modelu matematycznego funkcji $\psi = f(i, \Theta)$ oraz $T = f(i, \Theta)$ (rys. 2). Funkcje te wyznaczono na drodze obliczeń polowych i zweryfikowano pomiarowo.

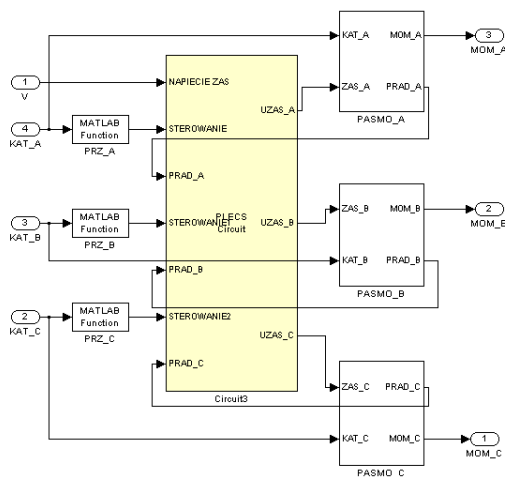
Podstawowym elementem składowym modelu symulacyjnego jest podsystem pojedynczego pasma. Zawiera on funkcje strumienia oraz momentu w postaci dwóch „lock-up table”. Podczas symulacji dane te są na bieżąco interpolowane, aby uchwycić nieliniowe zachowanie się silnika TFM dla zmiennego charakteru przebiegu prądu. Na rysunku 3 przedstawiono układ zasilania oraz bloki poszczególnych pasm silnika TFM wraz z funkcjami sterującymi.

Kolejne bloki układu symulacyjnego pozwalają na wprowadzenie do modelu istotnych parametrów elektrycznych oraz mechanicznych. Układ zasilania zbudowano na bazie biblioteki PLECS, z wykorzystaniem zawartych w niej komponentów energoelektrycznych. Pozwala on na badanie rozpyłów prądu oraz wykreśle-

nie spadków napięć na poszczególnych elementach. Sterowanie zostało zrealizowane na bazie bloków funkcji dostępnych w środowisku Matlab.



Rys. 2. a) Strumień, b) moment elektromagnetyczny w funkcji kąta obrotu wirnika dla różnych prądów pasma A

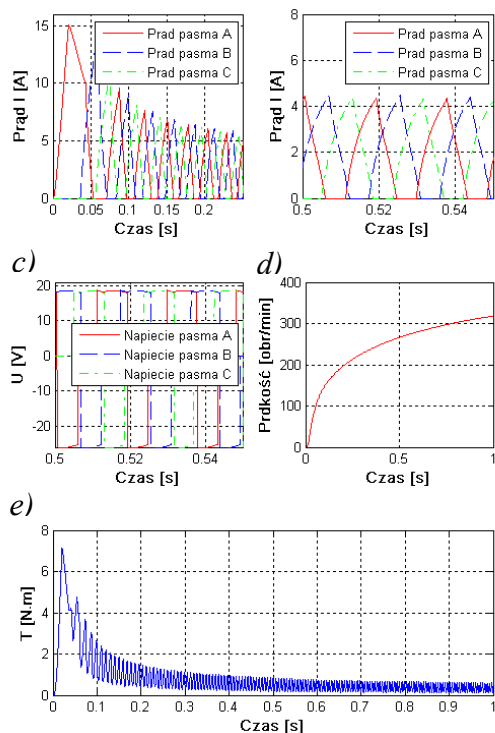


Rys. 3. Podsystem sterowania pasmami silnika TFM

3. Symulacje stanów przejściowych

Badania symulacyjne obejmowały kilka aspektów. Pierwszym najważniejszym aspektem było uzyskanie odpowiedzi układu symulacyjnego

(zachowanie się silnika TFM) dla zadanych parametrów wejściowych w stanie przejściowym. Rysunek 4 przedstawia prądy, napięcia, prędkość oraz moment elektromagnetyczny podczas rozruchu silnika przy znamionowym napięciu zasilania $U_z = 24$ V bez dodatkowego momentu obciążenia silnika.



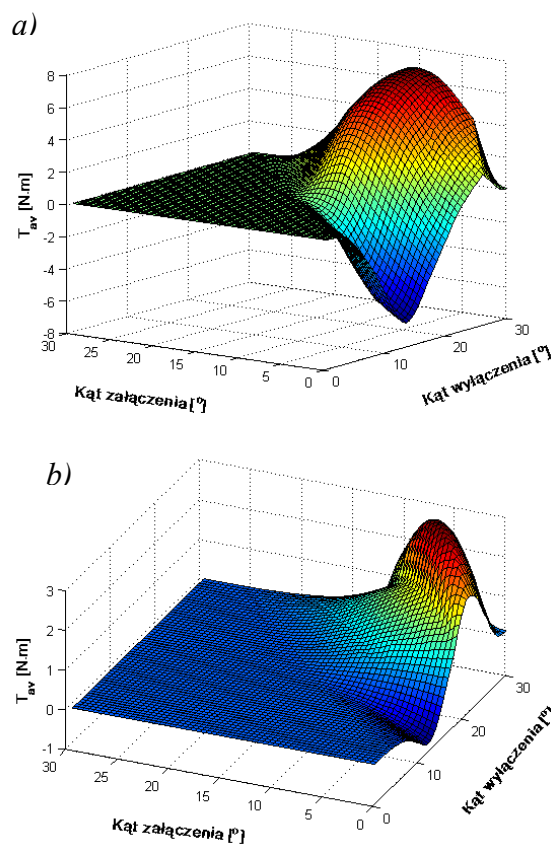
Rys. 4. a, b) Prądy pasm, c) napięcie, d) prędkość, e) moment elektromagnetyczny

Otrzymane przebiegi porównano z wynikami obliczeń polowo-obwodowych (FLUX3D). Obecnie autorzy budują stanowisko pomiarowe z silnikiem TFM, celem pomiarowego zweryfikowania otrzymanych wyników badań.

4. Wpływ sterowania na moment elektromagnetyczny

Charakterystyczną cechą każdego silnika reluktancyjnego jest średni moment elektromagnetyczny. Decydujący wpływ na ten parametr ma sposób sterowania. Dobór odpowiednich kątów sterowania w danym punkcie powinien zapewnić uzyskanie maksymalnej wartości średniej momentu przy możliwie niskim poziomie pulsacji. Badania prowadzono za pomocą przedstawionego wyżej modelu matematycznego dla całej przestrzeni kątów załączenia i wyłączenia poszczególnych pasm. Wykresy przedstawione na rysunku 5 obrazują zależność średniej wartości momentu elektromagnetycznego przy

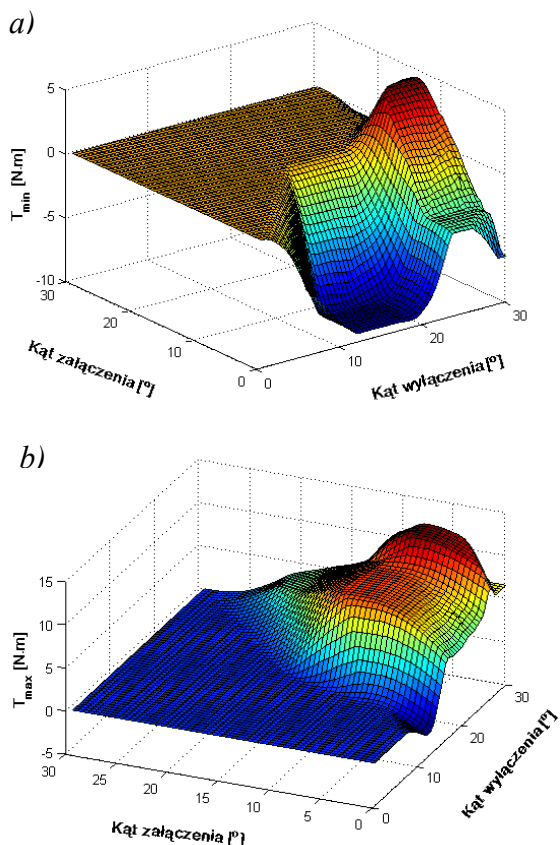
znamionowym napięciu zasilania $U_z = 24$ V dla prędkości obrotowych $n = 60$ obr/min oraz $n = 300$ obr/min.



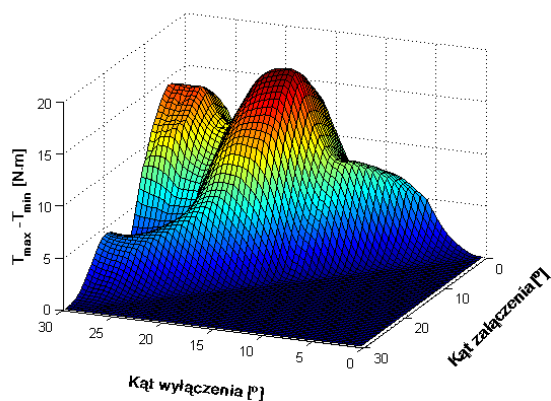
Rys. 5. Średni moment elektromagnetyczny silnika TFM a) dla $n = 60$ obr/min, b) $n = 300$ obr/min

Powyższe wykresy zawierają w sobie wiele informacji, jednak nie mówią nic na temat pulsacji momentu elektromagnetycznego. Odczyt kątów załączenia i wyłączenia odpowiadających najwyższej wartości średniej momentu elektromagnetycznego (T_{av}) nie gwarantuje optymalnych warunków pracy silnika ze względu na pulsacje momentu. Kolejne charakterystyki (rys. 6) pozwalają ocenić jak duże są wahania momentu dla przestrzeni kątów załączenia i wyłączenia pasm. Badania wykonano dla prędkości obrotowej $n = 60$ obr/min oraz napięcia zasilania $U_z = 24$ V.

Miarą bezwzględną poziomu pulsacji dla zadanego sterowania jest różnica wartości maksymalnej oraz minimalnej momentu. Wykres przedstawiony na rysunku 7 pozwala na odnalezienie bezwzględnego minimum pulsacji momentu elektromagnetycznego.



Rys. 6. a) Minimalna, b) maksymalna wartość momentu elektromagnetycznego silnika TFM dla prędkości obrotowej $n = 60$ obr/min



Rys. 7. Różnica wartości maksymalnej i minimalnej momentu elektromagnetycznego silnika TFM dla $n = 60$ obr/min

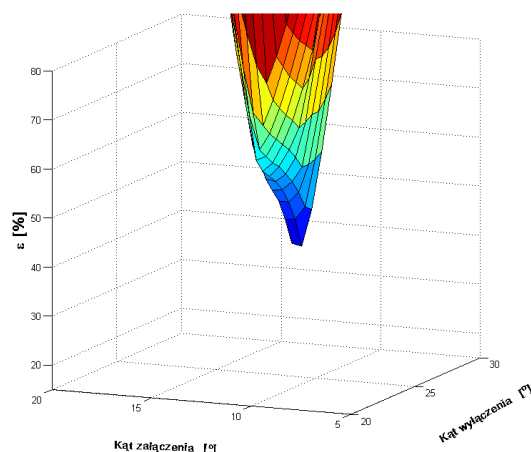
Najczęściej spotykaną w literaturze miarą pulsacji momentu jest wyrażenie (3):

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

gdzie: ε – współczynnika pulsacji, T_{\max} – maksymalna wartość momentu elektromagnetycznego, T_{\min} – minimalna wartość momentu elek-

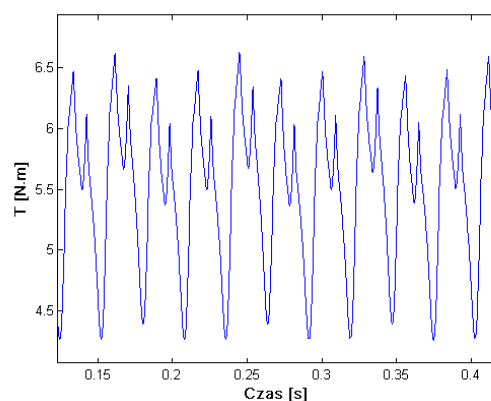
tromagnetycznego, T_{av} – średnia wartość momentu elektromagnetycznego [6, 7].

Analiza otrzymanych wyników symulacyjnych pozwala na wyznaczenie minimalnego współczynnika pulsacji momentu ε . Rysunek 8 przedstawia w powiększeniu fragment wykresu zależności współczynnika pulsacji momentu w zależności od kątów załączenia i wyłączenia pasm silnika TFM. Minimalna wartość współczynnika pulsacji momentu – $\varepsilon = 35\%$ przypada dla kąta załączenia $k_z = 13,5^\circ$ oraz kąta wyłączenia $k_w = 30^\circ$.



Rys. 8. Zależność współczynnika pulsacji momentu od kątów załączenia i wyłączenia pasm silnika

Dla tak dobranych parametrów sterowania wykreślono przebieg całkowitego momentu elektromagnetycznego silnika TFM.



Rys. 9. Moment elektromagnetyczny silnika TFM dla $k_z = 13,5^\circ$ i $k_w = 30^\circ$

5. Podsumowanie

Praca zawiera wyniki badań symulacyjnych modelu silnika reluktancyjnego ze strumieniem poprzecznym o zewnętrznym wirniku. W modelu matematycznym wykorzystano wyniki ob-

liczeń polowych pozwalających na uwzględnienie nieliniowego charakteru przebiegu strumienia oraz momentu. Głównym celem pracy było przedstawienie wpływu sterowania na moment elektromagnetyczny. Zbadano wpływ wyboru kątów załączenia i wyłączenia pasm silnika na wartość średnią momentu dla różnych prędkości obrotowych.

W kolejnym etapie badań przeprowadzono analizę wpływu sterowania na charakterystyczne dla silników reluktancyjnych pulsacje momentu. Wyznaczano również wartości współczynnika pulsacji momentu w całym przedziale możliwych sterowań. Weryfikacja pomiarowa otrzymanych rezultatów pozwoli na sprecyzowanie zagadnienia optymalizacyjnego w dalszych pracach.

6. Literatura

- [1] Kowol M.: *Optymalizacja obwodu magnetycznego silnika TFM za pomocą algorytmu ewolucyjnego*, IX Międzynarodowe Warsztaty Doktoranckie, OWD 2007, vol. 2, pp. 233-238
- [2] Tang Z., Pillay P., Chen Y., Omekanda A. M.: *Prediction of Electromagnetic Forces and Vibrations in SRMs Operating at Steady State and Transient Speeds*, 0-7803-8487-3/04 (C) 2004, IEEE
- [3] Mana M., Honzak A.: *Optimization of switched reluctance motor control*, EEICT 2004
- [4] Vasquez H., Parker J. K., *A new simplified mathematical model for a switched reluctance motor in a variable speed pumping application*, Mechatronics 14 (2004), pp. 1055–1068
- [5] Kowol M.: *Obliczanie momentu elektromagnetycznego modułowego silnika reluktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym*, VII Międzynarodowe Warsztaty Doktoranckie, OWD'2005, Wisła, vol. 2, pp. 291-296
- [6] Łukaniszyn M., Kowol M.: *Analiza pracy modułowego silnika reluktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym*, Śląskie Wiadomości Elektryczne, 4'2005, pp. 4-7
- [7] Łukaniszyn M., Kowol M.: *Wpływ zmian konstrukcyjnych na parametry elektromechaniczne silnika reluktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym*, Przegląd Elektrotechniczny, 11'2006, pp. 43-45
- [8] Tomczewski K., Wróbel K.: *Jednoczesna optymalizacja kształtu obwodu magnetycznego i parametrów zasilania przelączalnego silnika reluktancyjnego*, Przegląd Elektrotechniczny, 3'2009, pp. 107-110
- [9] Łukaniszyn M., Kowol M.: *Optimization of magnetic circuit of a modular reluctance motor with an outer rotor*, Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering

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: jankolodziej@po.opole.pl

Politechnika Opolska,

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki,

ul. Luboszycka 7, 45-036, Opole