

**Marcin Kowol, Piotr Mynarek, Dariusz Mroczeń**  
**Politechnika Opolska**

## **MODEL MATEMATYCZNY PRZEŁĄCZALNEGO SILNIKA RELUKTANCYJNEGO DO ANALIZY STANÓW DYNAMICZNYCH**

### **SRM MATHEMATICAL MODEL FOR ANALYSIS OF DYNAMIC PERFORMANCE**

**Abstract:** The article presents the analysis of dynamic states of switched reluctance motors. The analysis was performed for two phase SRM. The Matlab/Simulink environment with PLECS toolbox was used for the calculations. Simulated transient results of switched reluctance motor were presented in the article. The FLUX 3D software was used for the integral parameters calculations.

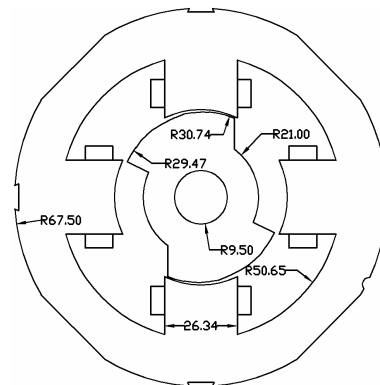
#### **1. Wstęp**

Biorąc pod uwagę własności przełączalnych silników reluktancyjnych (SRM) można zauważyć, że w coraz większej ilości dziedzin życia będą one zastępowały inne rodzaje silników [1, 2]. Następuje to w wyniku gwałtownego rozwoju elementów energoelektronicznych oraz spadków kosztów podzespołów mocy. Mając na uwadze to, że silniki reluktancyjne są mniej zawodne, rozwijają się badania nad ich stosowaniem w wielu dziedzinach gospodarki. Niezawodność są silniki SRM zawdzięczają temu, że pozbawione są elektromechanicznego komutatora oraz prostej budowie. Poza tym, ich dużym atutem jest fakt, że ze względu na sposób zasilania straty w uzwojeniach wydzielają się jedynie w stojanie.

W poprzednich publikacjach [3, 8] autorzy analizowali właściwości statyczne silników reluktancyjnych. W niniejszej pracy podjęto próbę konstrukcji modelu matematycznego silnika SRM do analizy stanów dynamicznych.

#### **2. Model fizyczny**

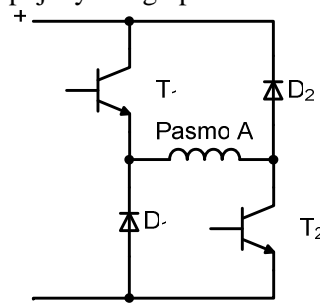
Analizie poddano dwupasmowy silnik SRM z optymalizowanym kształtem wirnika, ograniczającym duże pulsacje momentu [8]. Obwód magnetyczny silnika został wykonany w postaci pakietu z blachy elektrotechnicznej M250 o grubości 0,5 mm. Silnik ten został przystosowany do montażu w standardowym korpusie silnika indukcyjnego SEhR 90-2 produkowanego przez fabrykę BESEL w Brzegu, co wprowadziło określone wymogi co do średnicy zewnętrznej i kształtu stojana [8]. Geometrię silnika wraz z wymiarami przedstawiono na rysunku 1.



*Rys.1. Przekrój poprzeczny analizowanego silnika z wymiarami*

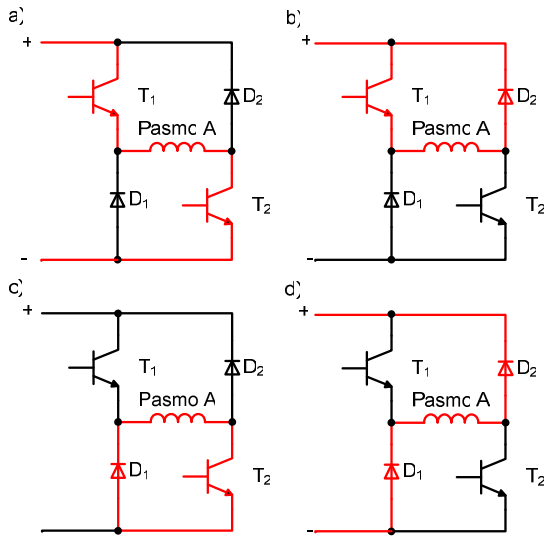
#### **3. Układ sterowania**

Przełączalne silniki reluktancyjne należą do grupy maszyn bezszczotkowych, których integralną częścią jest elektroniczny układ komutacyjny. Najczęściej stosowanym układem sterowania tego typu silnika jest półmostek typu H [4, 6]. Na rysunku 2 przedstawiono schemat zasilania pojedynczego pasma silnika SRM.



*Rys.2. Schemat zasilania pojedynczego pasma silnika SRM*

Wybrany przez autorów układ zasilania charakteryzuje się trzema stanami pracy (rys.3).

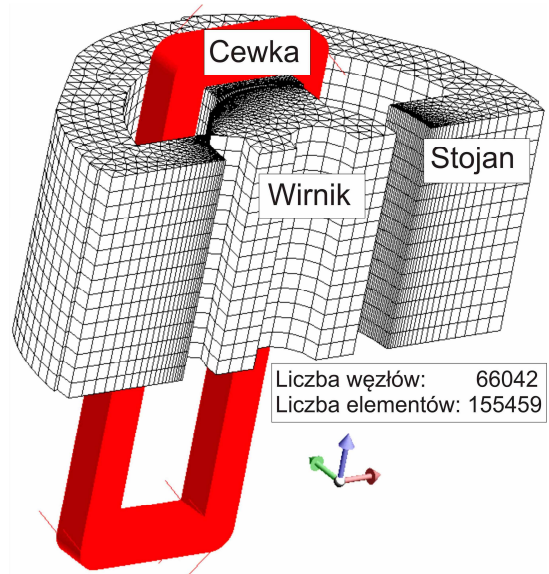


Rys.3. Stany pracy półmostka typu H

Pierwszy stan przedstawiony został na rys. 3a. Przy załączonych tranzystorach T1 i T2 następuje zasilanie pasma stojana. W tym czasie wirnik ma się obrócić w taki sposób, aby stworzyć jak najmniejszą reluktancję na drodze stojan – wirnik. Drugi ze stanów przedstawiony na rysunkach 3b i 3c umożliwia rozładowanie energii zgromadzonej w paśmie, w wyżej zaznaczonym obwodzie (energia tracona jest w postaci ciepła). Trzeci stan (rys.3d) daje możliwość zwrotu części energii pobranej z powrotem do źródła zasilania. Jest to również najkorzystniejszy sposób na zatrzymanie pracującego silnika (hamowanie). Sterowanie silnikiem przedstawionym w pracy polega na załączaniu pasm w sekwencji A B A. Zmiana zasilanego pasma następuje na skutek sygnału sterującego pochodzącego z transoptora odbiciowego, przyporządkowanego do każdego z pasm silnika.

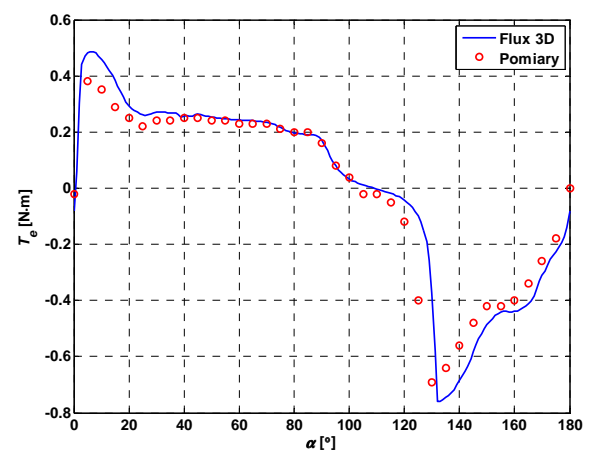
#### 4. Model połowy

Do zbudowania modelu dynamicznego w oparciu o równania różniczkowe silnika, niezbędna jest znajomość jego parametrów całkowych. W tym celu zastosowano program FLUX 3D, bazujący na trójwymiarowej metodzie elementów skończonych. Oprogramowanie to umożliwia dokładne odwzorowywanie zjawisk fizycznych występujących w maszynie. Model numeryczny wraz z siatką dyskretyzacyjną zilustrowano na rysunku 4.

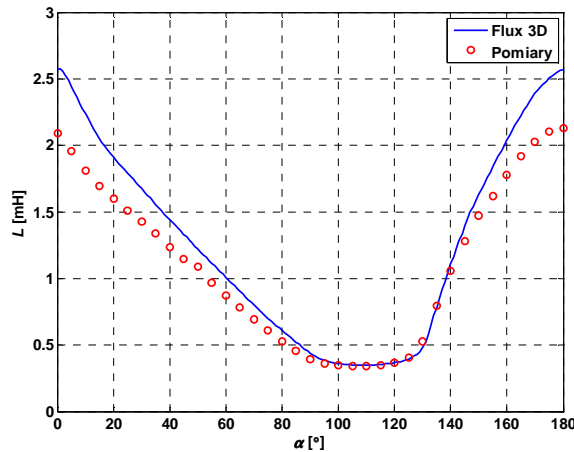


Rys.4. Model numeryczny w FLUX 3D

W obliczeniach numerycznych przyjęto następujące uproszczenia: pominięto histerezę magnetyczną, zjawisko prądów wirowych oraz przyjęto stałą gęstość prądu w całym przekroju cewek. Dla zbudowanego modelu numerycznego przeprowadzono szereg obliczeń parametrów całkowych. Na rysunku 5 i 6 przedstawiono zmienność momentu elektromagnetycznego oraz indukcyjności własnej pasma w funkcji kąta obrotu wirnika względem stojana, przy zasilaniu pasma prądem  $I = 20$  A.



Rys.5. Zależność momentu elektromagnetycznego od kąta obrotu wirnika



Rys.6. Zależność indukcyjności własnej pasma od kąta obrotu wirnika

### 5. Model matematyczny

W modelowaniu przebiegów dynamicznych silnika SRM skorzystano z koncepcji budowy modelu matematycznego silnika opartego o równanie napięciowe (1) oraz mechaniczne (2) [3, 7]. W analizie przyjęto następujące założenia upraszczające: maszyna jest symetryczna, uzwojenie stojana zastąpiono uzwojeniem skupionym oraz przyjęto stałą rezystancję uzwojeń:

$$\begin{cases} u_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\ u_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

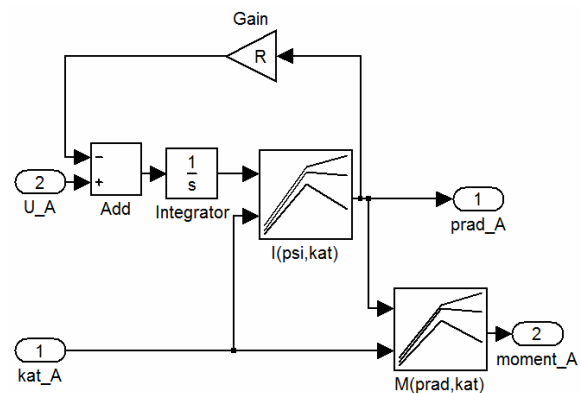
gdzie:  $u_A, u_B$  – wartości chwilowe napięcia zasilania pasm,  $R_A, R_B$  – rezystancje pasm,  $\psi_A, \psi_B$  – strumienie skojarzone pasm,  $i_A, i_B$  – prądy w pasmach

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_l - D \omega \cdot \omega \\ T_e = \sum_{n=1}^2 T_{e_n}(i_n, \alpha) \\ \omega = \frac{d\alpha}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:  $J$  – moment bezwładności wirnika,  $\omega$  – prędkość obrotowa silnika,  $\alpha$  – kąt położenia wirnika,  $T_e$  – wartość chwilowa momentu elektromagnetycznego rozwijanego

przez silnik,  $T_l$  – wartość chwilowa momentu obciążenia,  $D$  – współczynnik tarcia

W analizie uwzględniono nieliniowość zarówno strumienia magnetycznego jak i momentu elektromagnetycznego. Dzięki takiemu rozwiązaniu wyeliminowano błędy spowodowane linearyzacją modelu. Poniżej na rysunku 7 przedstawiono subsystem zbudowany w SIMULINKU dla pasma A. W układzie zbudowanym na podstawie równania napięciowego silnika (1), wykorzystano wyniki jakie otrzymano z analizy polowej przeprowadzonej w środowisku FLUX 3D [5].

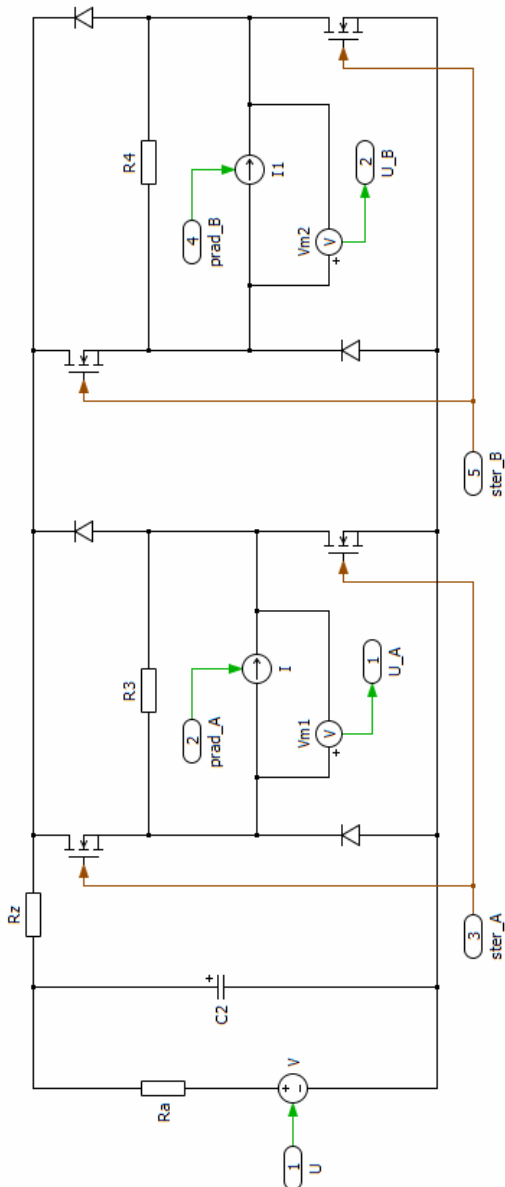


Rys.7. Subsystem pasma A

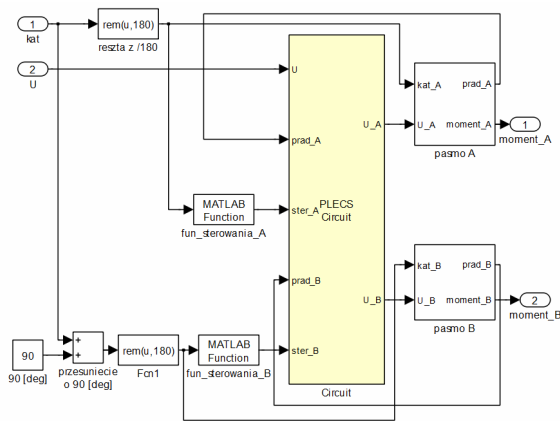
Do zasilania silnika wykorzystano układ zbudowany na podstawie półmostka typu H. Na rysunku 8 przedstawiono schemat układu zasilania zamodelowany za pomocą programu PLECS.

Cechą charakterystyczną zastosowanego układu jest brak możliwości zmiany kierunku przepływu prądu, a więc nawrotu silnika. Silnik jest zasilany z akumulatorów, a pojemność  $C_F$  włączona równolegle do akumulatorów ma na celu ograniczenie przepięć powstających podczas przełączania zasilania pomiędzy jednym pasmem, a drugim.

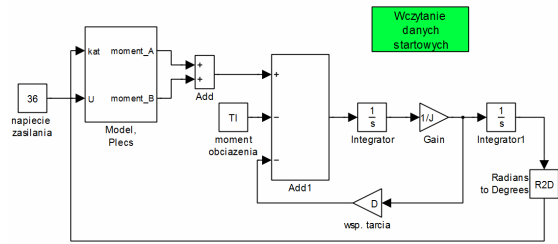
Na rysunku 10 zamieszczono końcowy model silnika SRM. Układ ten odpowiada równaniom mechanicznym silnika (2) i pozwala uwzględnić parametry mechaniczne badanego silnika takie jak: moment obciążenia, moment bezwładności wirnika oraz współczynnik tarcia.



Rys.8. Układ zasilania silnika w programie PLECS

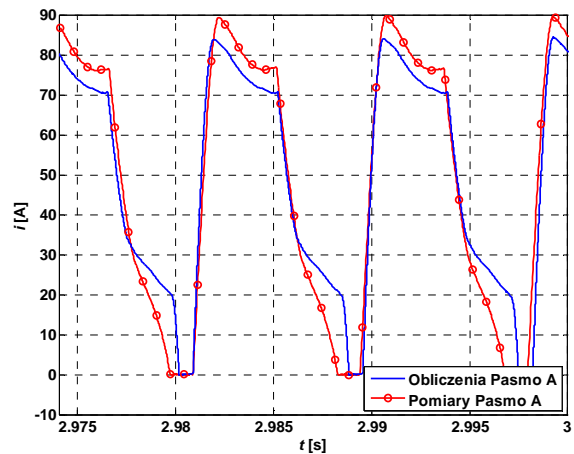


Rys.9. Subsystem – sterowanie pasmami

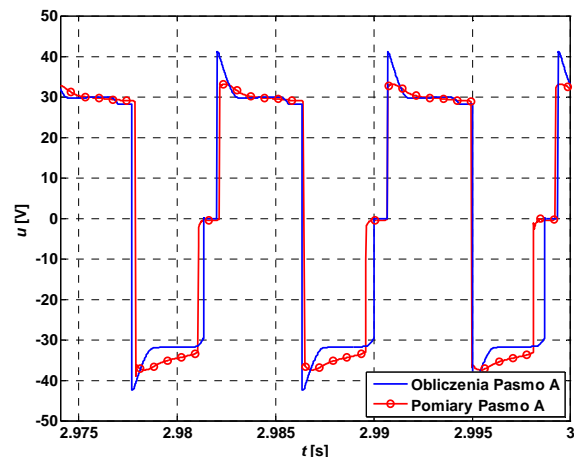


Rys.10. Końcowy model matematyczny silnika SRM

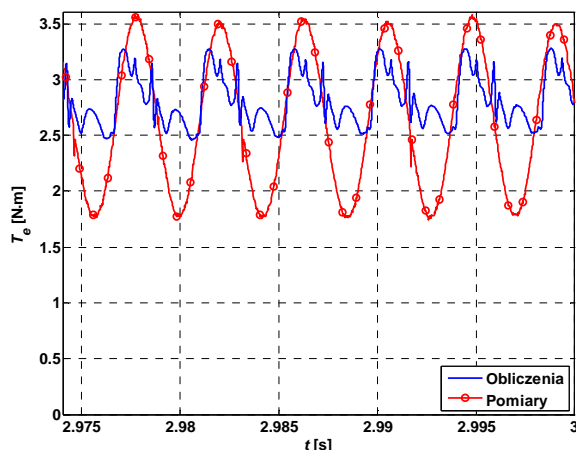
W oparciu o zbudowany model matematyczny przeprowadzono szereg symulacji komputerowych. Na rysunku 11 przedstawiono przykładowy przebieg prądu w paśmie A przy zasilaniu silnika napięciem 36 V oraz obciążeniu momentem 2,9 N·m. Natomiast na rysunkach 12 i 13 zilustrowano przebiegi napięcia i momentu elektromagnetycznego dla podanych powyżej warunków pracy.



Rys.11. Przebieg prądu pasma A w stanie ustalonym



Rys.12. Przebieg napięcia pasma A w stanie ustalonym



Rys.13. Przebieg momentu w stanie ustalonym

## 6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono model do analizy stanów dynamicznych dwupasmowego silnika reluktancyjnego, zbudowanego za pomocą programu MATLAB/SIMULINK oraz PLECS. Do wyznaczenia momentu elektromagnetycznego oraz indukcyjności zastosowano program FLUX 3D. Otrzymane wyniki wykazują dużą zbieżność z pomiarami, co świadczy o poprawnie zbudowanym modelu matematycznym. Różnice widoczne na przedstawionych przebiegach wynikają m.in. z trudności wyznaczenia współczynnika tarcia oraz zależności napięcia akumulatorów od prądu zasilania.

W dalszych badaniach autorzy przeprowadzą symulację stanów przejściowych za pomocą trójwymiarowej metody elementów skończonych.

## Literatura

- [1] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Silniki reluktancyjne przelączalne przeznaczone do zastosowania w sprzęcie gospodarstwa domowego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, No. 72, 2005, pp. 59-64.
- [2] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Stany awaryjne maszyny reluktancyjnej przelączalnej w zakresie pracy generatorowej*, Zeszyty

Problemowe – Maszyny Elektryczne, No. 80, 2008, pp. 51-56.

[3] Kowol M., Kołodziej J.: *Mathematical model of a transverse flux motor for dynamic states simulation*. International Conference Low Voltage Electrical Machines, Brno, 3-4 November 2008.

[4] 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, Issue 55, Poznań 2007, pp. 158-165.

[5] Sorandaru C., Musuroi S., Argeseanu A., Svoboda M.: *Matlab Simulation of a Switched Reluctance Motor Drive in steady state and dynamic regimes*. The Conference for the contribution of Information Technology to Science, Economy, Society and Education, Aegina, 19-21 September 2008.

[6] Stecz P.: *Badanie układu sterowania silnikiem reluktancyjnym przelączalnym* [online], Gdańsk: Politechnika Gdańska [dostęp: 10 lutego 2010]. Dostępny w Internecie: <<http://www.ely.pg.gda.pl/kane/Dydaktyka/SRM%20instrukcja%20v2.pdf>>

[7] Tang Gh Z., Pillay P., Chen Y., Omekanda A.M.: *Prediction of Electromagnetic Forces and Vibrations in SRMs Operating at Steady State and Transient Speeds*. IEEE, vol. 41, Issue 4, 2005, pp. 927 – 934.

[8] Tomczewski K., Łukaniszyn M., Wróbel K., Kowol M., Kołodziej J.: *Badania eksperymentalne silnika reluktancyjnego po optymalizacji*. XIV Konferencja Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice, ZkwE'2009, Poznań 20-22 kwietnia 2009, s. 249-250.

## Autorzy

dr inż. Marcin Kowol, e-mail: m.kowol@po.opole.pl  
 Piotr Mynarek (*student*), e-mail: piotr\_mynarek@o2.pl  
 Dariusz Mrocheń (*student*), e-mail: darek1221@o2.pl  
 Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

*Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego*

## Recenzent

*Prof. dr hab. inż. Lech Nowak*