

*maszyna synchroniczna, regulator histerezy  
analiza polowa, analiza obwodowa*

Ryszard PAŁKA\*, Piotr PAPLICKI\*,  
Rafał PIOTUCH\*, Marcin WARDACH\*

## **ANALIZA POŁOWA I OBWODOWA SILNIKA SYNCHRONICZNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI STEROWANEGO REGULATOREM HISTEREZOWYM**

W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych pewnej maszyny z magnesami trwałymi umocowanymi na wirniku z zewnętrznym pakietowanym stojanem o konstrukcji konwencjonalnej, sterowanej regulatorem histerezy. Celem przeprowadzonych badań była analiza możliwości wykorzystania modelu polowo-obwodowego maszyny do poprawienia jakości regulacji. Na podstawie badań symulacyjnych wykorzystujących metodę elementów skończonych wyznaczono przebieg prądów, prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego i porównano je z wynikami metody obwodowej. Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano wnioski dotyczące możliwości wykorzystania metody elementów skończonych i metod obwodowych w procesie syntezy regulatorów prądu.

### **1. WSTĘP**

W układach napędowych z silnikami synchronicznymi ze wzbudzeniem od magnesów trwałych PMSM (ang. *Permanent Magnet Synchronous Motor*) przekształtnik pełni rolę wzmacniacza mocy, który zamienia sygnały wygenerowane w układzie sterowania na sygnały o mocy koniecznej do zasilania sterowanego silnika. Wektorowe układy sterowania silników PMSM z orientacją względem wektora pola FOC (ang. *Field Oriented Control*) wypracowują odpowiednie sygnały sterujące, które wymuszają taki prąd w maszynie, aby spełniony był nadrzędny cel regulacji. Wykorzystanie prądów jako wielkości regulowanych oraz transformacji prądów opisanych w układzie trójfazowym do układu dwufazowego wirującego synchronicznie z wektorem pola daje możliwość sterowania silnikiem PMSM w sposób zbliżony do sterowania ob-

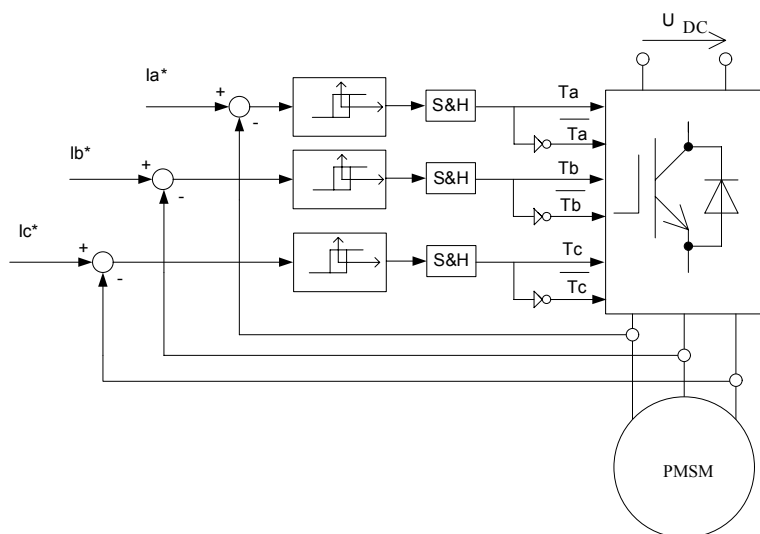
---

\* Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin; rpalka@zut.edu.pl, paplicki@zut.edu.pl, marwar@zut.edu.pl, rpiotuch@zut.edu.pl

cowzbudnym silnikiem prądu stałego, gdzie istnieje możliwość niezależnego kształtowania zarówno strumienia jak i momentu elektromagnetycznego (przy zadanym strumieniu) [6]. W pętli prędkości zazwyczaj wykorzystywane są regulatory PI [4, 9]; w torze prądowym proponowane różne inne regulatory, ale bardzo popularną ze względu na prostotę i pewność działania jest regulator histerezowy. Coraz większe zainteresowanie analizą polową w celu projektowania i optymalizacji maszyn elektrycznych [5] skłoniło autorów do analizy możliwości poprawy jakości regulacji napędu przy wykorzystaniu regulatora histerezowego.

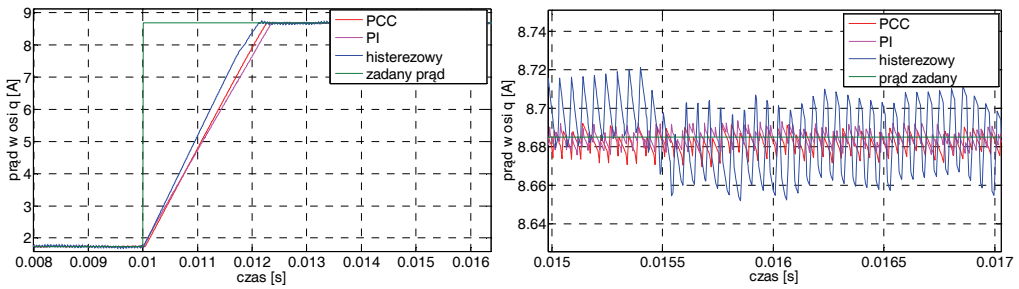
## 2. HISTEREZOWY REGULATOR PRĄDU

Regulator histerezowy należy do grupy regulatorów nieliniowych, które w najprostszej konfiguracji działają na podstawie detekcji znaku uchybu prądu. Zmiana znaku uchybu prądu np. w danej fazie jest wykrywana przez układ sterowania, który wymusza pożądaną zmianę natężenia prądu poprzez odpowiednią zmianę stanu łączników energoelektronicznych. W regulatorze nieliniowym zbudowanym z wykorzystaniem idealnego komparatora warunek odtwarzania prądu zadanego z zerowym lub bliskim zeru uchybem prowadzi do wzrostu częstotliwości modulacji do nieskończoności. W konsekwencji straty w nich wydzielane mogą prowadzić do zniszczenia struktury półprzewodnikowej [6]. W związku z tym proponuje się wprowadzenie pętli histerezy w komparatorze.



Rys. 1. Schemat predykcyjnego regulatora prądu

Fig. 1. Predictive current controller scheme



Rys. 2. Porównanie działania wybranych regulatorów prądu [4]

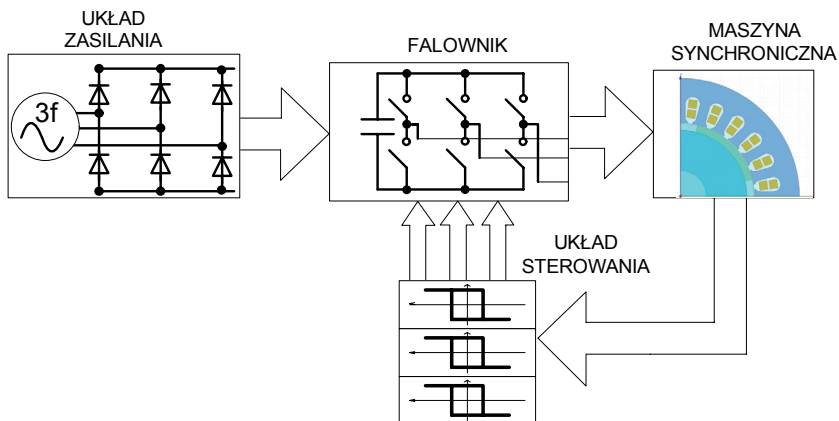
Fig. 2. Comparison between selected current controllers [4]

Znakomite właściwości regulacyjne wraz z prostotą i niezawodnością czynią regulator histerezyowy powszechnie wykorzystywanym regulatorem w przemyśle.

### 3. BADANIA SYMULACYJNE

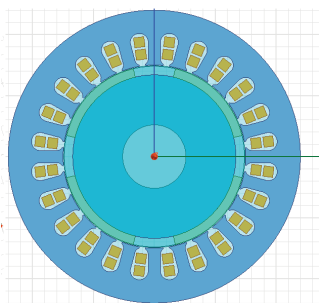
#### 3.1. ŚRODOWISKO PROGRAMISTYCZNE

Badania symulacyjne zostały wykonane w programach Matlab, Simplorer oraz Maxwell. Schemat ideowy badanego układu przedstawia rys. 3. W programie Simplorer oraz Matlab został zamodelowany prezentowany układ. Model silnika został wygenerowany z wykorzystaniem narzędzia RMxprrt, a na jego podstawie stworzono model 2D. Dodatkowo wykorzystano mechanizm połączenia obu pakietów symulacyjnych – Simplorer i Maxwell (rys. 4).

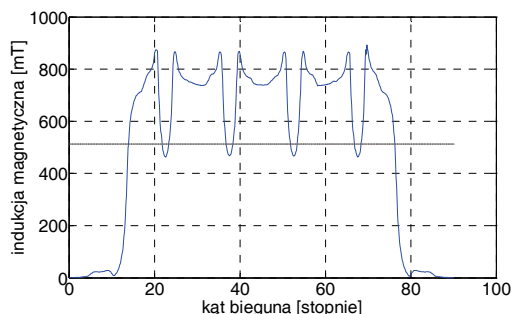


Rys. 3. Schemat ideowy badanego układu

Fig. 3. Idea scheme of the examined circuit



Rys. 4a. Model silnika 2D  
Fig. 4a. 2D motor model

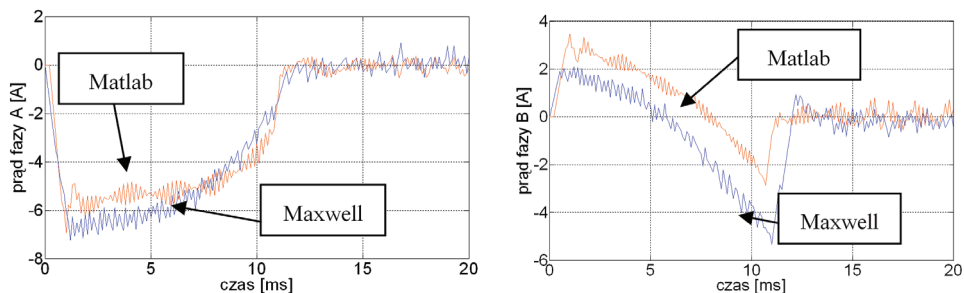


Rys. 4b. Indukcja w szczelinie wyznaczona metodą MES  
Fig. 4b. Flux magnetic density calculated with FEM

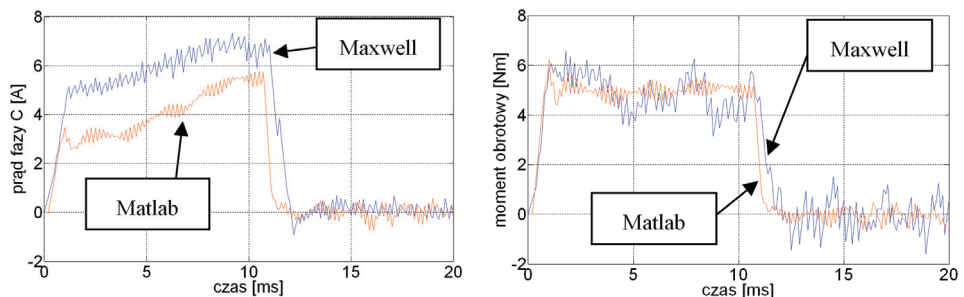
Wybrane parametry maszyny:

$$R_a = 4,7 \text{ Ohm}, L_d = 0,032 \text{ mH}, L_q = 0,032 \text{ mH}, J = 0,0015 \text{ kgm}^2, p = 2$$

niezbędne do przeprowadzenia badań symulacyjnych, zostały wyznaczone na podstawie metody analitycznej w programie Maxwell (RMxprt) oraz symulacji MES. Porównanie wybranych wyników badań symulacyjnych (przebiegi czasowe prądów fazowych oraz momentu obrotowego) przedstawiono na rys. 5 i 6.



Rys. 5. Porównanie wyników dla modelu obwodowego (Matlab i Simplorer) – prądy fazowe  
Fig. 5. Comparison of results (Matlab and Simplorer) – phase currents



Rys. 6. Porównanie wyników dla modelu obwodowego (Matlab, Maxwell) – prąd i moment  
Fig. 6. Comparison of results (Matlab and Maxwell) – current and torque

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Porównanie wyników uzyskanych w różnych pakietach symulacyjnych wykazuje dużą zbieżność. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem analizy polowej dają zdecydowanie szerszy obraz procesów zachodzących w maszynie. Pozwalają poznać rozkład pola w każdej chwili czasu, a także pozwalają uwzględnić zjawisko nasycenia obwodu magnetycznego. Wykorzystanie analizy polowej i analizy obwodowej modelu maszyny oraz obwodów elektrycznych wydaje się stwarzać nowe możliwości w procesie syntezy regulatorów prądu. Wiele nowoczesnych regulatorów prądu bazuje na modelu obwodowym, podczas gdy dzisiejsze techniki symulacji komputerowej pozwalają w sposób bardzo dokładny wyznaczyć parametry maszyny i uwzględnić zachodzące w niej zjawiska w procesie syntezy regulatora już na etapie projektowania maszyny.

*Praca finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki, nr projektu N N510 508040 (2011–2013).*

#### LITERATURA

- [1] GIERAS J., WING M., *Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications*, University of Cape Town Rondebosch, South Africa, 1997.
- [2] KAJSTURA K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Sterowanie ślizgowe silnikiem indukcyjnym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, 2004.
- [3] OHM D.Y., *Dynamic Model of PM Synchronous Motors*, Drivetech, Inc., Blacksburg, Virginia, 2000.
- [4] PIOTUCH R., PAŁKA R., *Porównanie wybranych regulatorów prądu w układzie sterowania silnikiem synchronicznym ze wzbudzeniem od magnesów trwałych*, Maszyny Elektryczne, Zeszyty problemowe Nr 93 (2011), 173–178.
- [5] PUTEK P., PAPLICKI P., SŁODIČKA M., PAŁKA R., *Minimization of cogging torque in permanent magnet machines using the topological gradient and adjoint sensitivity in multi-objective design*, Proc. of ISEM 2011, Napoli, Italy 2011.
- [6] RUSZCZYK A., *Nowe algorytmy predykcyjnych metod regulacji prądów przekształtników AC/DC i DC/AC*, rozprawa doktorska. PB, 2005.
- [7] RUSZCZYK A., SIKORSKI A., *Trójfazowy falownik napięcia do zastosowań napędowych z predykcyjnym regulatorem prądu*, Przegląd Elektrotechniczny, 2008, Vol. 84, No.4.
- [8] SOBCZUK D., *Application of ANN for PMSM of Inverter Fed Induction Motor Drives*, PhD Thesis, Warszawa 1999.
- [9] ŚWIERCZYŃSKI D., *Direct Torque Control with Space Vector Modulation (DTC-SVM) of Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motor Drive*, PhD Thesis, PW, 2005.
- [10] TUNIA H., KAŻMIERKOWSKI M., *Podstawy automatyki napędu elektrycznego*, PWN, Warszawa 1983.
- [11] UTKIN V., GULDNER J., SHI J., *Taylor&Francis Sliding-Mode Control in Electromechanical Systems*, London, 1999.

## FIELD AND CIRCUIT ANALYSIS OF PM SYNCHRONOUS MACHINE WITH HYSTHERESIS CURRENT CONTROLLER

The paper presents results of simulations of a synchronous motor with PM mounted on a rotor controlled with hysteresis current controller. The aim of the research was to show the possibility of using field-circuit analysis for increasing control quality. Based on a 2D simulations using Finite Element Method and control circuit designed in Simplorer, speed, current and torque signals were calculated and the results were compared with circuit analysis carried out in Matlab/Simulink.