

Badania eksperymentalne maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi o regulowanym wzbudzeniu

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań modelu prototypowej maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi o regulowanym wzbudzeniu (ECPSM). W przedstawionej konstrukcji dodatkowa cewka umożliwia regulację strumienia magnesów trwałych, dając pewien stopień swobody sterowania maszyną. Dzięki temu osiągnąć można większy moment obrotowy w zakresie niskich prędkości obrotowych oraz zwiększenie prędkości maksymalnej bez użycia tradycyjnych (obniżających sprawność układu napędowego) technik osłabiania pola. W badaniach wykorzystano algorytmy sterowania z wektorową orientacją pola (FOC), które zaimplementowano w autorskim sterowniku mikroprocesorowym. Wykorzystano w tym celu nowoczesny mikrokontroler DSP, będący częścią dedykowanego stanowiska pomiarowego, umożliwiającego kompleksową analizę pracy maszyny.

Abstract. The article presents some results of research on a prototype model of Electric Controlled Permanent Magnet Excited Synchronous Machine (ECPSM). In this construction, the additional coil allows to adjust the flux of permanent magnets, adding a degree of freedom to control the machine. In this way, more torque at low motor speeds and increased max speed can be achieved, without the conventional (lowering the efficiency of the drive system) techniques of weakening the field. Control algorithms of vector field orientation (FOC) were used in the research, which was implemented in a microprocessor controller. Modern DSP microcontroller was used for this purpose, which is a part of a dedicated test bench, allowing a comprehensive analysis of the machine. **(Experimental research of electrical machine with permanent magnets and controlled excitation)**

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, PMSM, regulacja wzbudzenia, ECPSM.

Keywords: electrical machines, PMSM, excitation regulation, ECPSM.

doi:10.12915/pe.2014.10.02

Wstęp

Preferowane obecnie rozwiązania wykorzystujące silniki z magnesami trwałymi charakteryzują się wysoką sprawnością i korzystnymi stosunkami masy i objętości do przetwarzanej mocy. Posiadają jednak istotną wadę, którą jest ich zachowanie przy dużych prędkościach obrotowych (indukowanie wysokiego napięcia), co utrudnia właściwe zasilanie i sterowanie maszyny. Celem ograniczenia tych efektów stosuje się różne techniki osłabiania strumienia magnetycznego w maszynie. Konwencjonalne rozwiązania tego problemu prowadzą do komplikacji systemu i konieczności przewymiarowania falowników oraz skutkują zmniejszeniem sprawności układu. Jako rozwiązanie problemu proponuje się unikatową strukturę wysokoobrotowej maszyny z magnesami trwałymi, która umożliwia dodatkową regulację strumienia magnesów trwałych [2, 3, 6-13].

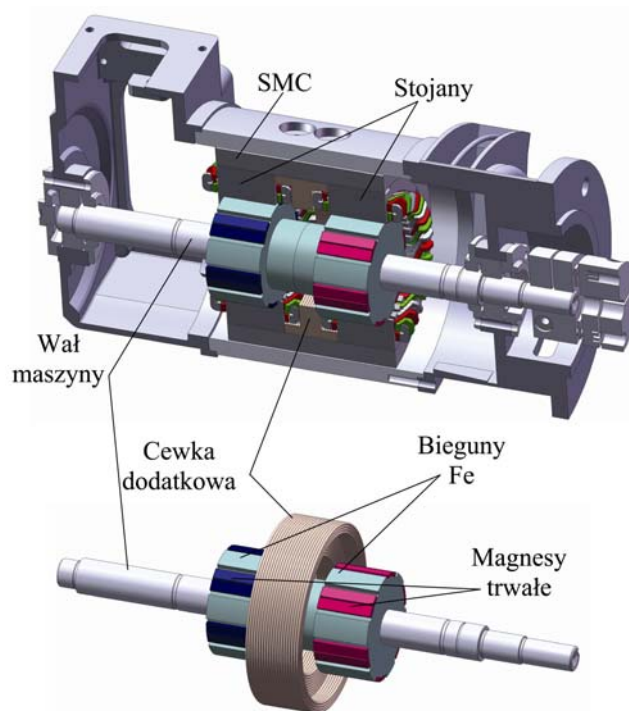
Konstrukcja maszyny ECPSM

Wirnik doświadczalnej maszyny ECPSM składa się z dwóch identycznych części czynnych osadzonych na wspólnym wale. Jedna z nich posiada magnesy trwałe spolaryzowane w kierunku zewnętrznym (biegun północny), druga część spolaryzowana jest w kierunku przeciwnym. Cechą charakterystyczną tego układu jest istnienie pomocniczej cewki znajdującej się pomiędzy dwoma rdzeniami stojana i częściami wirnika (rys. 1).

Tabela 1. Parametry badanej maszyny ECPSM

Parametr	Wartość	Jednostka
R_s	9	Ω
L_d	0,025	H
L_q	0,025	H
p (liczba par biegunów)	6	-
R_{exc}	41	Ω
L_{exc}	0,796	H

Cewka ta jest zasilana z przekształtnika DC-DC w ten sposób, że w zależności od wartości i kierunku prądu pole wzbudzenia maszyny zmienia się w zakresie ograniczonym nasyceniem obwodu magnetycznego.



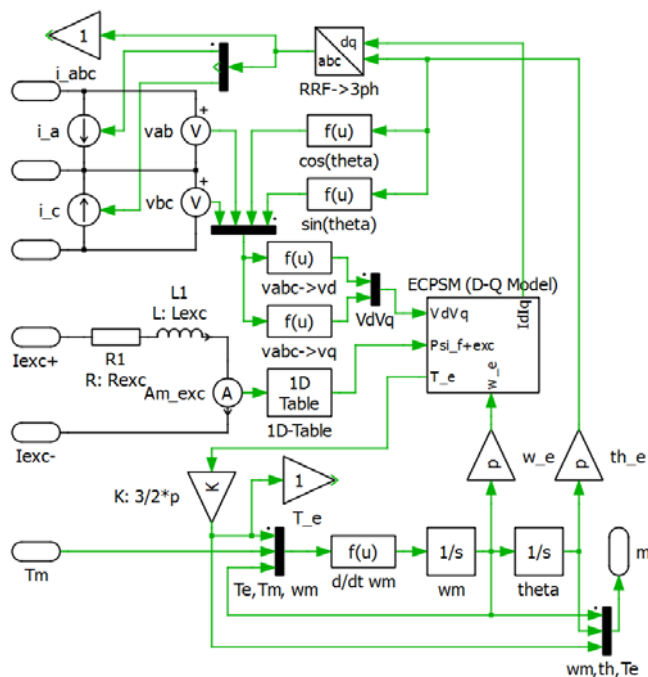
Rys. 1. Konstrukcja badanej maszyny

Model maszyny ECPSM i układu sterowania

W celu przeprowadzenia analizy pracy napędu ECPSM w stanie statycznym i dynamicznym, opracowano jego uproszczony model w środowisku MATLAB/Simulink z dodatkowym, dedykowanym pakietem do modelowania układów energoelektronicznych i maszyn elektrycznych: Plects 3.3 firmy Plexim (założenia upraszczające: symetria uzwojeń trójfazowych, stałość indukcyjności i rezystancji, sinusoidalny rozkład pola w szczelinie powietrznej). Model ten, wynikający z podstawowych równań strumieniowo-prądowych (1-5) i ruchu (6, 7), umożliwia symulację wybranych algorytmów pracy układu, obserwację

podstawowych parametrów, zmianę nastaw i konfiguracji regulatorów oraz weryfikację ich działania (rys. 2 i 3).

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & u_d = R_s i_d + T_N \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \\
 (2) \quad & u_q = R_s i_q + T_N \frac{d\psi_q}{dt} - \omega \psi_d \\
 (3) \quad & \psi_d = L_d i_d + \psi_f + \psi_{exc} \\
 (4) \quad & \psi_q = L_q i_q \\
 (5) \quad & \psi_{exc} = L_{exc} i_{exc} \\
 (6) \quad & \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left[p \frac{3}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) - m_1 \right] \\
 (7) \quad & \frac{d\theta}{dt} = \omega
 \end{aligned}$$



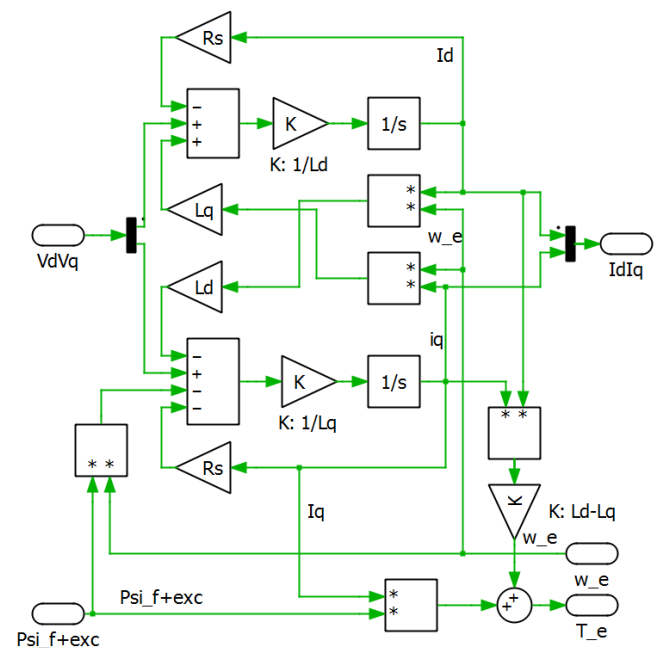
Rys. 2. Model symulacyjny maszyny ECPSM

W omawianej konstrukcji maszyny, istotne jest stosunkowo wierne odtworzenie wartości zadanej momentu rozruchowego w stanach dynamicznych, a także szybka reakcja na stany nietypowe i awaryjne. Obecnie stosowane układy napędowe wykorzystują algorytmy sterowania, oparte m. in. o orientację wektorową pola (FOC – field oriented control) i metody bezpośredniego sterowania momentem (DTC – direct torque control). W zależności od stawianych wymagań są one wykorzystywane w obecnych układach napędowych, wraz z tradycyjnymi silnikami z magnesami trwałymi. W przedstawionej konstrukcji maszyny, istnienie dodatkowej cewki umożliwiającej regulację strumienia dodaje pewien stopień swobody sterowania maszyny [4, 5]. Dzięki temu, osiągnąć można większy moment obrotowy w zakresie niskich prędkości obrotowych oraz zwiększenie prędkości maksymalnej, bez użycia tradycyjnych (obniżających sprawność układu napędowego) technik osłabiania pola.

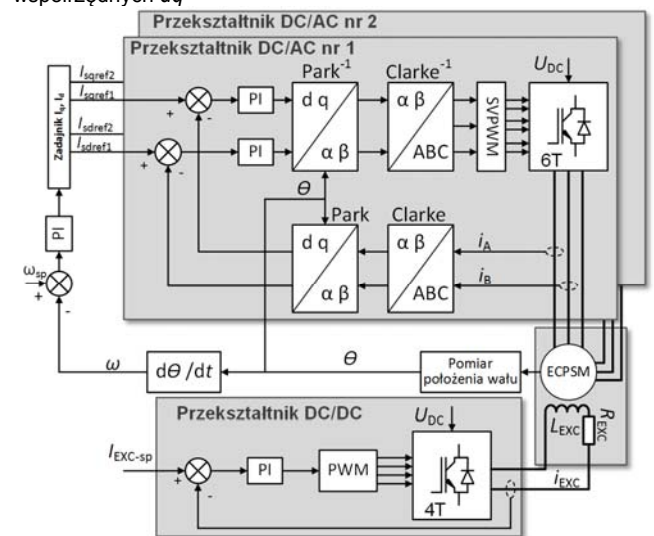
Istotną częścią metody FOC (wykorzystanej w omawianym układzie sterowania) są bloki przekształceń pomiędzy współrzędnymi ABC, ortogonalnymi $\alpha\beta$ oraz wirującymi dq . Za ich pomocą (oraz informacji o aktualnym

położeniu wału maszyny) można transformować składowe prądu i napięcia pomiędzy układami związanymi z nieruchomym stojanem na układ wirujący, związany z wirnikiem. Ostateczna struktura układu występuje w kilku wariantach ze względu na m. in. typ zastosowanych regulatorów prądu, metody pomiaru lub estymacji położenia wału maszyny. W przedstawianej strukturze, zaimplementowano liniowe regulatory PI pracujące niezależnie na składowych prądu d i q . Układ taki odznacza się dobrą dokładnością regulacji prądu. Wyjściowe wartości regulatorów prądu, muszą zostać ponownie przekształcone do współrzędnych skojarzonych ze stojanem ($\alpha\beta$ oraz kolejno ABC), a następnie podane zostają na tzw. modulator wektorowy SVM (Space Vector Modulator), którego zadaniem jest (przy pomocy falownika sześciotranzystorowego) wypracowanie zadanego wektora napięcia. Cewka dodatkowa zasilana jest ze sterowanego przekształtnika DC/DC, kontrolującego wartość prądu I_{exc} .

Strukturę układu sterowania zamodelowanego w środowisku symulacyjnym oraz zaimplementowanego w układzie rzeczywistym przedstawiono na rys. 4.



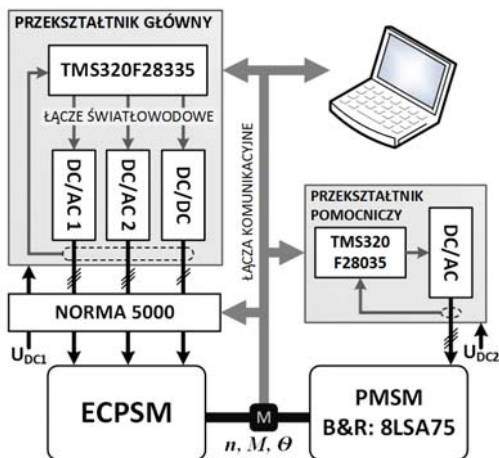
Rys. 3. Model symulacyjny maszyny ECPSM w układzie współrzędnych dq



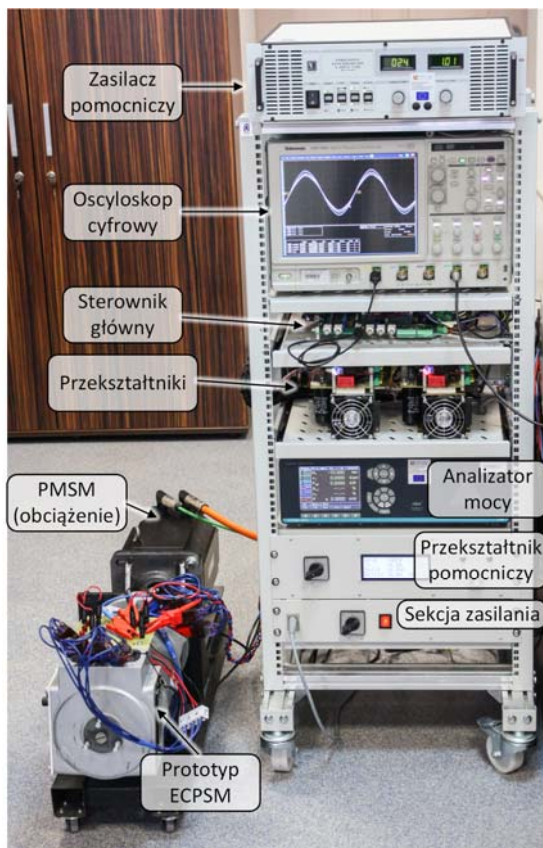
Rys. 4. Schemat blokowy układu sterowania

Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze składa się z dedykowanych przekształtników DC/AC i DC/DC, sterowników mikroprocesorowych i aparatury pomiarowej. Maszyna ECPSM zasilana jest z dwóch dedykowanych, trójfazowych falowników napięcia i przekształtnika DC/DC zasilającego cewkę pomocniczą.



Rys. 5. Schemat blokowy stanowiska badawczego



Rys. 6. Widok stanowiska badawczego

W celu swobodnej integracji w struktury i parametry pętli regulacji, zaprojektowany i wykonany został nadrzędny, cyfrowy układ sterowania z procesorem sygnałowym (DSP) rodziny C2000 firmy Texas Instruments: TMS320F28335. Jego charakterystyczne cechy, szczególnie istotne w aplikacjach sterowania i przetwarzania energii to m.in.: duża ilość elastycznie konfigurowalnych wyjść PWM, prędkość obliczeniowa (taktowanie: 150MHz), jednostka centralna o architekturze zmiennoprzecinkowej i

rozbudowane układy peryferyjne. Umożliwia to m. in. dynamiczne i adaptacyjne przełączanie i modyfikowanie algorytmów sterowania.

Wał maszyny ECPSM sprzęgnięty jest z maszyną PMSM 8LSA75 (B&R), zasilaną dedykowanym, trójfazowym przekształtnikiem pomocniczym, umożliwiającym pracę czterokwadrantową.



Rys. 7. Nadrzędny układ sterowania

W celu wyznaczenia charakterystyk mechanicznych, map sprawności i zjawisk dynamicznych, stanowisko wyposażone jest dodatkowo w analizator mocy Norma 5000 (firmy Fluke), oscyloskop cyfrowy klasy DPO (firmy Tektronix), miernik momentu obrotowego oraz enkoder do wyznaczania pozycji wału. Wszystkie elementy sterujące i pomiarowe połączone są z nadrzędnym komputerem klasy PC z zainstalowanym środowiskiem Matlab, tworząc w ten sposób elastyczną i kompleksową platformę testową.

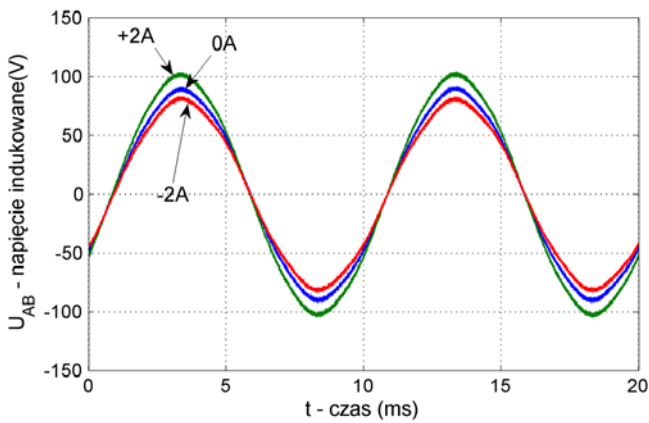


Rys. 8. Przekształtniki DC/AC

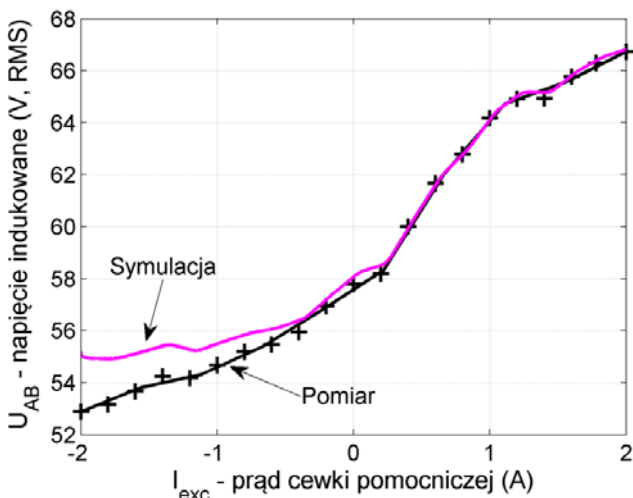
Wybrane wyniki badań

Na oscylogramie z rys. 9. przedstawiono przebieg indukowanego napięcia międzyfazowego przy $n=1000$ obr/min dla różnych wartości prądów cewki pomocniczej (-2A, 0A, 2A). Wartości skuteczne tych napięć wynoszą odpowiednio: 56 V, 62 V, 71 V.

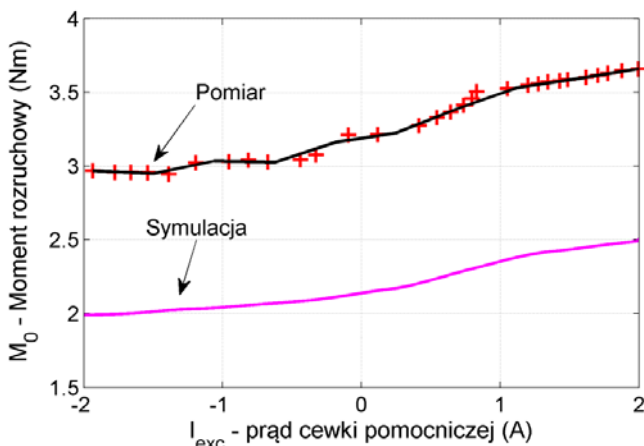
Porównanie wyników symulacji i pomiarów napięcia indukowanego i momentu rozruchowego w funkcji prądu cewki dodatkowej (kolejno: rys. 10 i 11), potwierdzają, że opracowany model matematyczny maszyny ECPSM jest użyteczny podczas analizy jej pracy.



Rys. 9. Oscylogram napięcia indukowanego w zależności od prądu cewki pomocniczej (przy $n=1000$ obr/min)



Rys. 10. Wartość skuteczna napięcia indukowanego w zależności od prądu cewki pomocniczej (przy $n=1000$ obr/min)

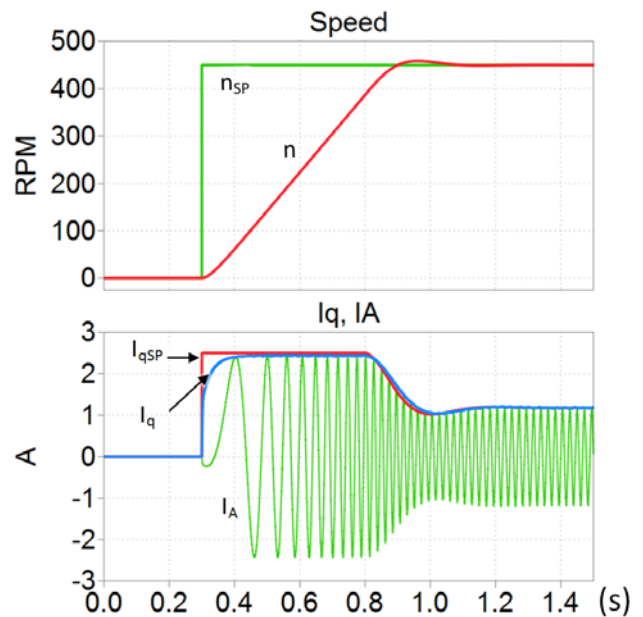


Rys. 11. Moment rozruchowy w funkcji prądu cewki pomocniczej (przy $I_q = 1,67$ A)

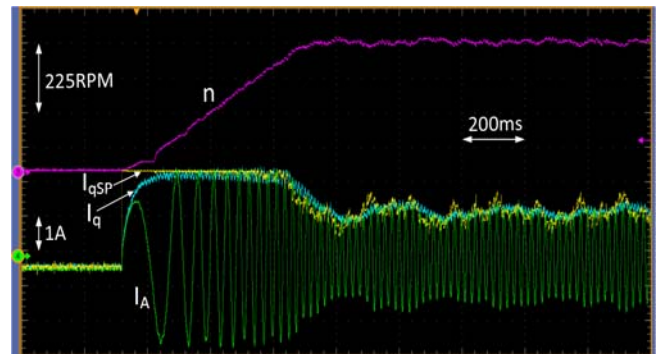
Ocenia się, że różnice w uzyskanych wynikach (szczególnie rys. 11) mogą wynikać z niedokładnego odwzorowania parametrów napędu rzeczywistego w modelu symulacyjnym oraz ograniczoną dokładnością pomiaru momentu obrotowego.

Dalszą weryfikację modelu i prototypu maszyny ECPSM, dodatkowo z układem zasilania i sterowania algorytmem zorientowanym polowo (FOC), przeprowadzono w oparciu o wyniki symulacji (rys. 12) i pomiarów na stanowisku testowym (rys. 13). Zmierzono

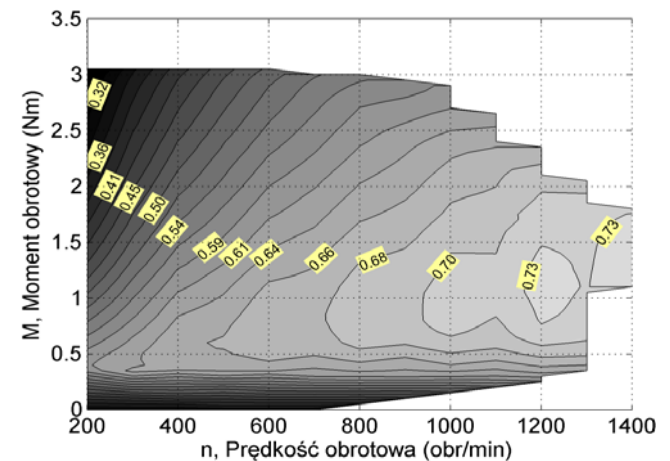
także wpływ wartości prądu cewki pomocniczej (wzbudzenia) na sprawność prototypu ECPSM w szerokim zakresie prędkości obrotowej i momentu obciążenia [1] (rys. 14). Zauważyć można zwiększenie sprawności przy dowzbudzeniu w zakresie niskich prędkości obrotowych, natomiast przy wyższych prędkościach, celowe jest odwzbudzenie.



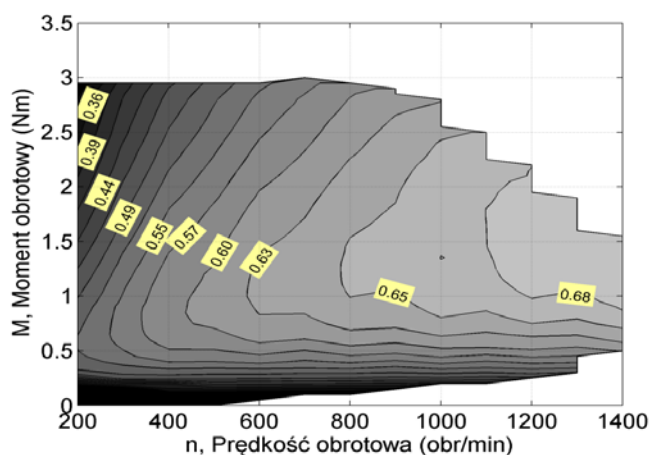
Rys. 12. Przykładowy wynik symulacji modelu ECPSM sterowanej algorytmem FOC



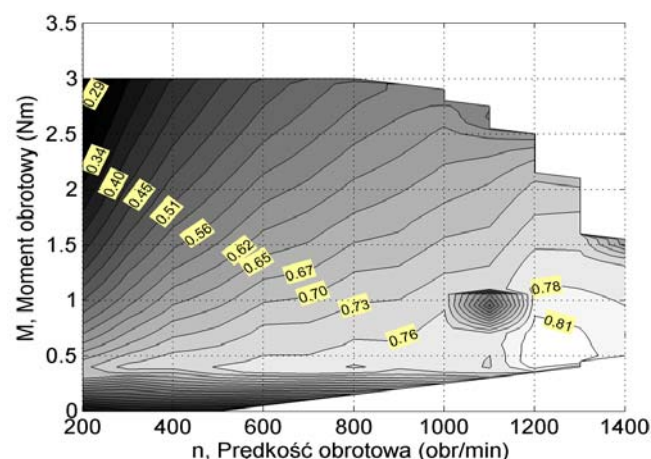
Rys. 13. Praca prototypu ECPSM sterowanej algorytmem FOC na stanowisku testowym



(a)



(b)



(c)

Rys. 14. Mapa sprawności badanej maszyny przy prądzie cewki pomocniczej $I_{exc} = 0A$ (a); $I_{exc} = 1,5A$ (b); $I_{exc} = -1,5A$ (c).

Widoczna na rys. 14c anomalia, występująca przy prędkości 1100 obr/min, jest wynikiem powstania drgań mechanicznych w konstrukcji maszyny. Ponadto należy zaznaczyć, że nadrzędnym celem badań była weryfikacja metody regulacji wzbudzenia silnika ECPSM, stąd przy wyznaczaniu sprawności maszyny nie uwzględniono względnie dużego poboru mocy cewki dodatkowej, która na podstawie zdobytych doświadczeń, przy badaniu prototypu, wymaga dalszych optymalizacji.

Wnioski

Celem przeprowadzonych badań była wstępna weryfikacja pracy prototypowej maszyny ECPSM, jej modelu matematycznego, a także układu zasilania i sterowania. Opracowany model w środowisku Matlab/Simulink+Plecs ułatwia analizę zjawisk zachodzących w maszynie ECPSM, a także stanowi punkt wyjściowy dla modeli uwzględniających więcej parametrów.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych potwierdzony został wpływ dodatkowej cewki na stan wzbudzenia maszyny. Przez zmianę wartości i kierunku prądu cewki dodatkowej, możliwa jest regulacja momentu rozruchowego i napięć fazowych w zakresie ok. 15% oraz widoczna poprawa sprawności maszyny.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki, nr projektu N N510 508040 (2011-2013).

LITERATURA

- [1] Amara Y., Vido L., Gabsi M., Hoang E., Hamid Ben Ahmed A., Lecrivain M.: Hybrid Excitation Synchronous Machines: Energy-Efficient Solution for Vehicles Propulsion, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58 (2009), Nr. 5, pp.2137-2149
- [2] Candere W., May H., Pałka R., Paplicki P., Szkolny S.: Model obwodowy maszyny elektrycznej z regulacją strumienia magnesów trwałych do napędu samochodów. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*. T. 1 nr 32 (2012), s. 140-145
- [3] Di Barba P., Mognaschi M. E., Pałka R., Paplicki P., Szkolny S.: Design optimization of a permanent-magnet excited synchronous machine for electrical automobiles. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, IOS Press, vol. 39, Number 1-4/2012, pp.889-895
- [4] Fodorean, D.; Djerdir, A.; Miraoui, A., Viorel, I. A.: FOC and DTC Techniques for Controlling a Double Excited Synchronous Machine, *Electric Machines Drives Conference, 2007, IEMDC '07, IEEE International*, pp.1258-1263
- [5] Hoang, E.; Lecrivain, M.; Hlioui, S., Gabsi, M.: Hybrid excitation synchronous permanent magnets synchronous machines optimally designed for hybrid and full electrical vehicle, *IEEE: 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia*, May 30-June 3, 2011, The Shilla Jeju, Korea, 2011
- [6] Ki-Chan K.: Novel Magnetic Flux Weakening Method of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no.11/2012, pp.4042-4045
- [7] May H., Pałka R., Paplicki P., Szkolny S., Candere W.-R.: Modified concept of permanent magnet excited synchronous machines with improved high-speed features, *Archives of Electrical Engineering*, 4/2011, pp.531-540
- [8] May H., Pałka R., Paplicki P., Szkolny S., Wardach M.: Comparative research of different structures of a permanent-magnet excited synchronous machine for electric vehicles. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88 NR 12a/2012, pp.53-55
- [9] May H., Pałka R., Paplicki P., Szkolny S.: Comparison of different structures of a permanent-magnet excited synchronous machine for electric vehicle drives, *Proc. of ISEM 2011, Napoli, Italy*
- [10] Kosaka T., Sridharbabu M., Yamamoto M., Matsui N.: Design studies on hybrid excitation motor for main spindle drive in machine tools. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 11/2010, pp. 3807-3813
- [11] Pałka R., Paplicki P., Piotuch R., Wardach M.: Maszyna z magnesami o regulowanym wzbudzeniu - wybrane wyniki prac projektowych. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*. 32/2012, s.128-133
- [12] Putek P., Paplicki P., Słodička M., Pałka R., Van Keer R.: Application of topological gradient and continuum sensitivity analysis to the multi-objective design optimization of a permanent-magnet excited synchronous machine. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88, nr 7a (2012), s. 256-260
- [13] Putek P., Słodička M., Paplicki P., Pałka R.: Minimization of cogging torque in permanent magnet machines using the topological gradient and adjoint sensitivity in multi-objective design. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* Vol. 39, nr 1-4 (2012), s. 933-940

Autorzy:

mgr inż. Michał Bonisławski, e-mail: michal.bonislawski@zut.edu.pl,
 prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka, e-mail: rpalka@zut.edu.pl; dr inż.
 Piotr Paplicki, e-mail: paplicki@zut.edu.pl; dr inż. Marcin Wardach,
 e-mail: marwar@zut.edu.pl; Zachodniopomorski Uniwersytet
 Technologiczny w Szczecinie, Katedra Elektroenergetyki
 i Napędów Elektrycznych, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin