

**Michał Bonisławski, Ryszard Palka**  
**Piotr Paplicki, Marcin Wardach**  
 Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie  
 Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych

## ANALIZA PRACY MASZYNY ELEKTRYCZNEJ Z MAGNESAMI TRWAŁYMIO REGULOWANYM WZBUDZENIEM

### ANALYSIS OF THE ELECTRICAL MACHINE WITH PERMANENT MAGNETS AND REGULATED EXCITATION

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań nad modelem prototypowym maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi o regulowanym wzbudzeniu (ECPSM). W przedstawionej konstrukcji, dodatkowa cewka umożliwia regulację strumienia magnesów trwałych, dodając pewien stopień swobody sterowania maszyny. 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 - Field Oriented Control), które zaimplementowano w autorskim sterowniku mikroprocesorowym. Wykorzystano w tym celu nowoczesny mikrokontroler DSP, będący częścią dedykowanego stanowiska pomiarowego, umożliwiającego kompleksową analizę pracy maszyny.

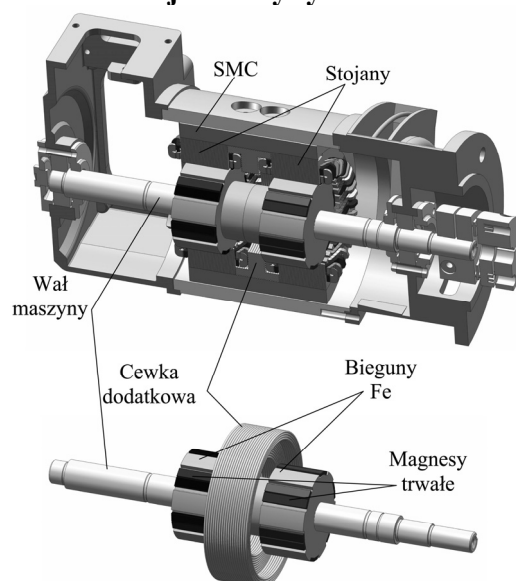
**Abstract:** The article presents some results of research on a prototype model of Electric Controlled Permanent Magnet Excited Synchronous Machine (ECPSM). In this construction, the additional coil allows to adjust the flux of permanent magnets, adding a degree of freedom to control the machine. In 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.

**Słowa kluczowe:** maszyny elektryczne, PMSM, regulacja wzbudzenia, ECPSM,  
**Keywords:** electrical machines, PMSM, excitation regulation, ECPSM

## 1. 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 (Electric Controlled Permanent Magnet Excited Synchronous Machine).

## 2. Konstrukcja maszyny ECPSM



Rys. 1. Konstrukcja badanej maszyny

Wirnik doświadczalnej maszyny ECPSM składa się z dwóch identycznych części czynnych osa-

dzonych 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 stojanu i częściami wirnika (Rys. 1). 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.

Tabela 1. Parametry badanej maszyny ECPSM

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

### 3. 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: Plecs 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).

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \quad (2)$$

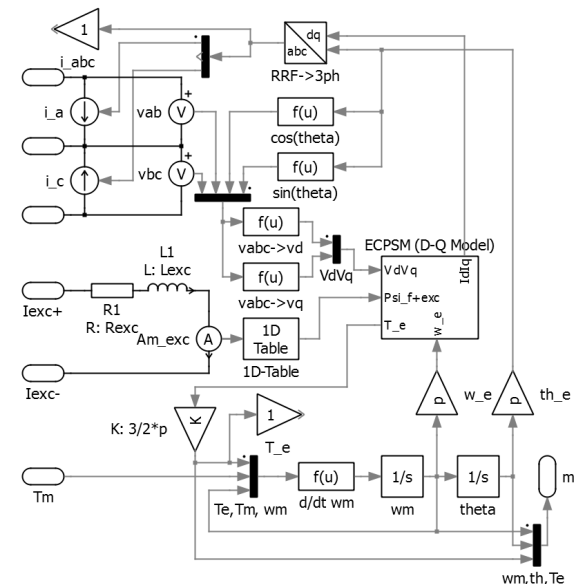
$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f + \psi_{exc} \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

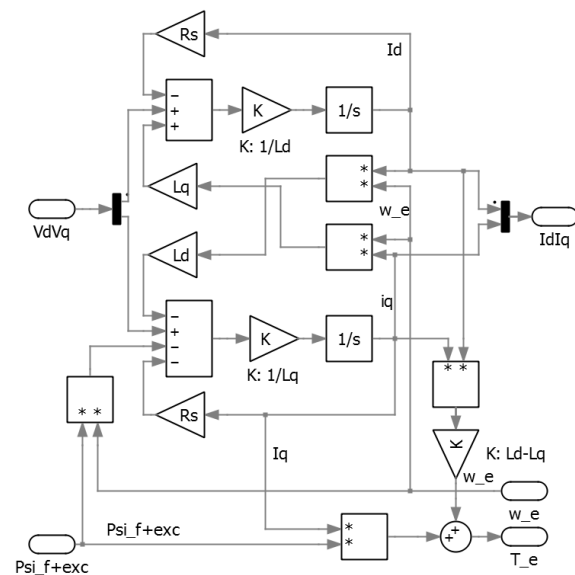
$$\psi_{exc} = L_{exc} i_{exc} \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left[ p \frac{3}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) - m_l \right] \quad (6)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (7)$$



Rys. 2. Model symulacyjny maszyny ECPSM



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

W omawianej konstrukcji maszyny, istotne jest stosunkowo wierne odtworzenie wartości zadanej momentu rozwijanego 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 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.

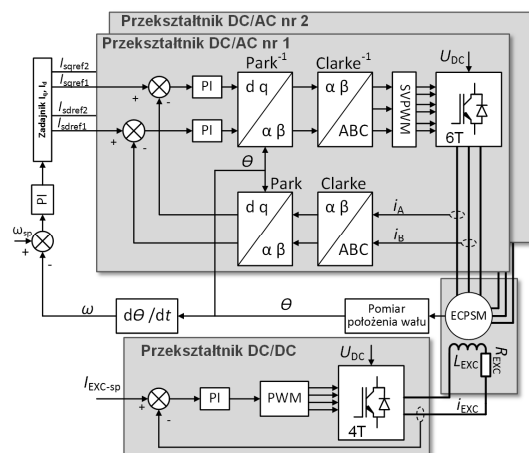
Istotną częścią metody FOC (wykorzystanej w omawianym układzie sterowania) są bloki przekształceń pomiędzy współrzędnymi  $ABC$ , ortogonalnymi  $\alpha\beta$  oraz wirującymi  $dq$ . Za ich pomocą (oraz informacji o aktualnym położeniu wału maszyny) można transformować składowe prądu i napięcia pomiędzy 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.

#### 4. Stanowisko badawcze

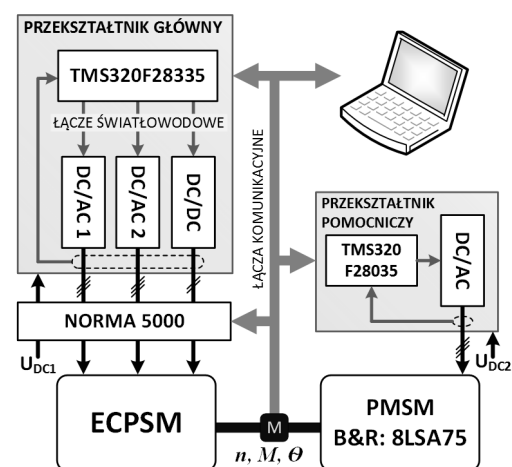
Stanowisko badawcze składa się z dedykowanych przekształtników DC/AC i DC/DC, sterowników mikroprocesorowych i aparatury pomiarowej. Maszyna ECPSM zasilana jest z dwóch dedykowanych, trójfazowych falowników napięcia i przekształtnika DC/DC zasilającego cewkę pomocniczą. W celu swobodnej in-

tegracji 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.

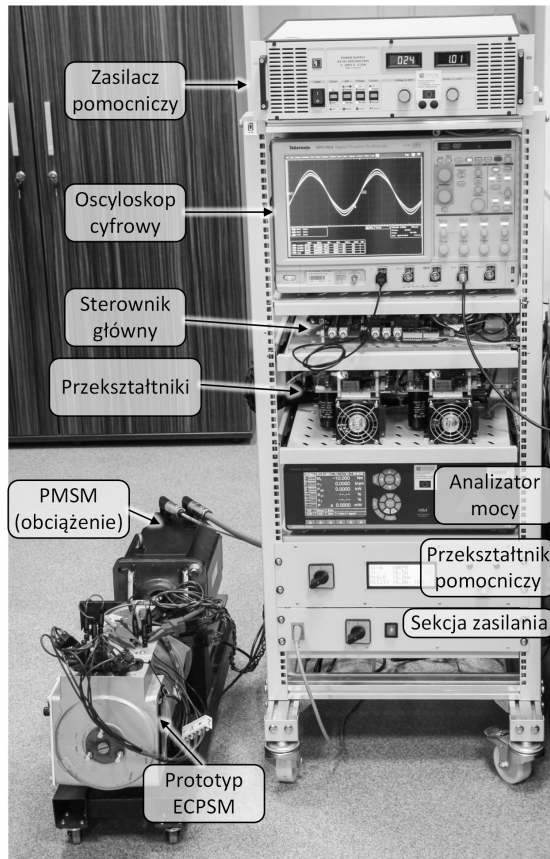


Rys. 4. Schemat blokowy układu sterowania

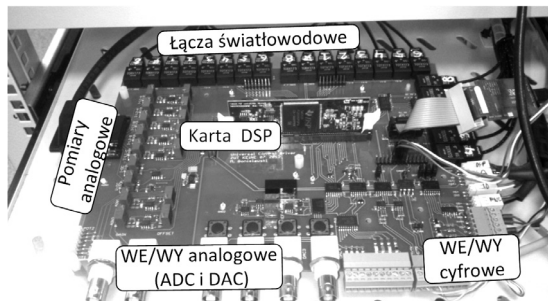
Wął maszyny ECPSM sprzęgnięty jest z maszyną PMSM 8LSA75 (B&R), zasilaną dedykowanym, trójfazowym przekształtnikiem pomocniczym, umożliwiającym pracę czterokwadrantową.



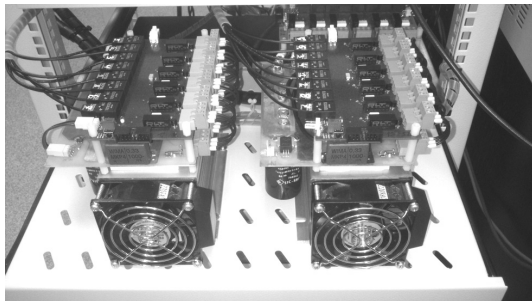
Rys. 5. Schemat blokowy stanowiska badawczego



Rys. 6. Widok stanowiska badawczego



Rys. 7. Nadrzędny układ sterowania



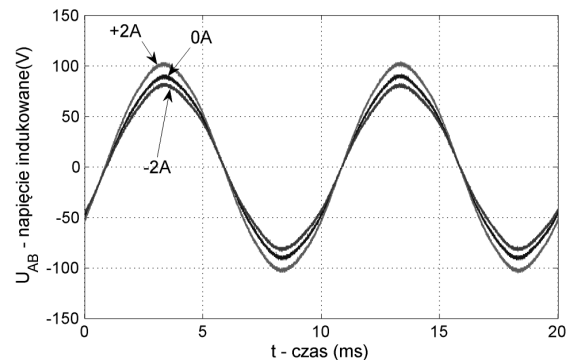
Rys. 8. Przetworniki DC/AC

W celu wyznaczenia charakterystyk mechanicznych, map sprawności i zjawisk dynamicznych, stanowisko wyposażone jest dodatkowo w analizator mocy Norma 5000 (firmy Fluke), oscylo-

skop 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.

### 5. 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 kolejno: 56V, 62V, 71V.

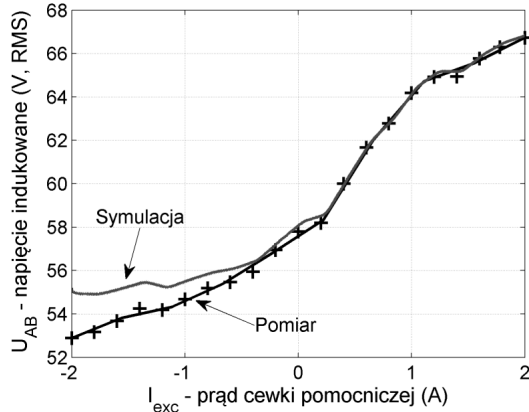
Rys. 9. Oscylogram napięcia indukowanego w zależności od prądu cewki pomocniczej (przy  $n=1000$  obr/min)

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

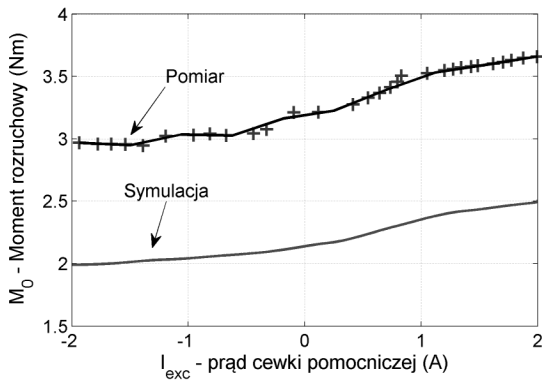
Dalszą weryfikację modelu i prototypu maszyny ECPSM, dodatkowo z układem zasilania i sterowania algorytmem zorientowanym polewo (FOC) przeprowadzono w oparciu o wyniki symulacji (Rys. 12) i pomiarów na stanowisku testowym (Rys. 13).

Zmierzono także wpływ wartości prądu cewki pomocniczej (wzbudzenia) na sprawność prototypu ECPSM w szerokim zakresie prędkości obrotowej i momentu obciążenia (Rys. 14). Za-

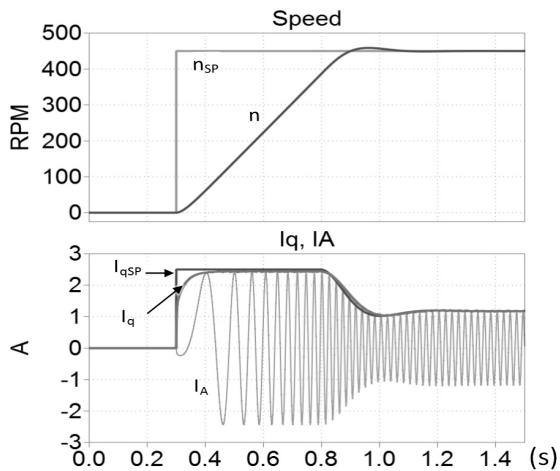
uważyć można zwiększenie sprawności przy dowzbudzeniu w zakresie niskich prędkości obrotowych, natomiast przy wyższych prędkościach, celowe jest odwzbudzenie.



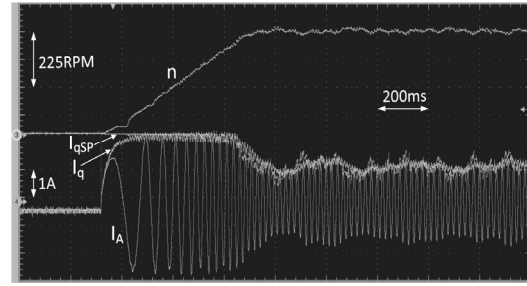
Rys. 10. Wartość skuteczna napięcia indukowanego w zależności od prądu cewki pomocniczej (przy  $n=1000$  obr/min)



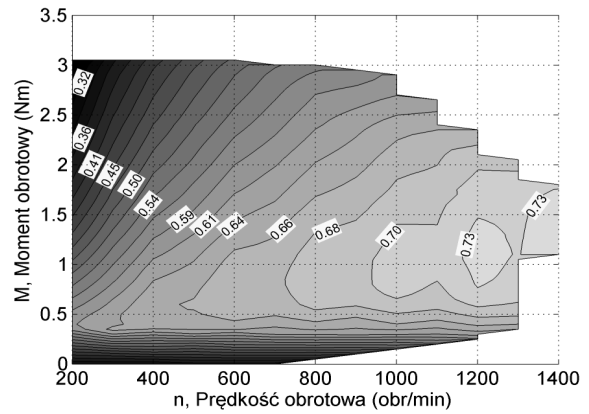
Rys. 11. Moment rozruchowy w funkcji prądu cewki pomocniczej (przy  $I_q = 1,67A$ )



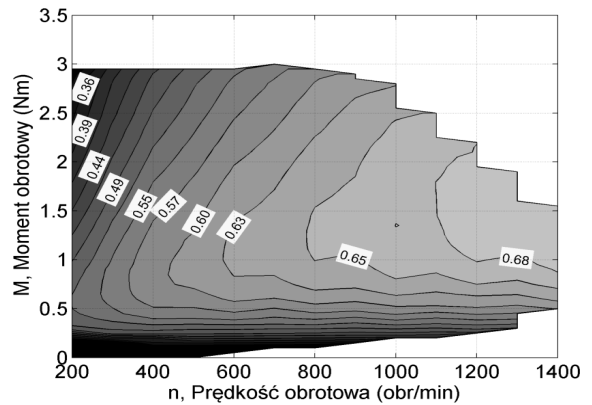
Rys. 12. Przykładowy wynik symulacji modelu ECPSM sterowanej algorytmem FOC



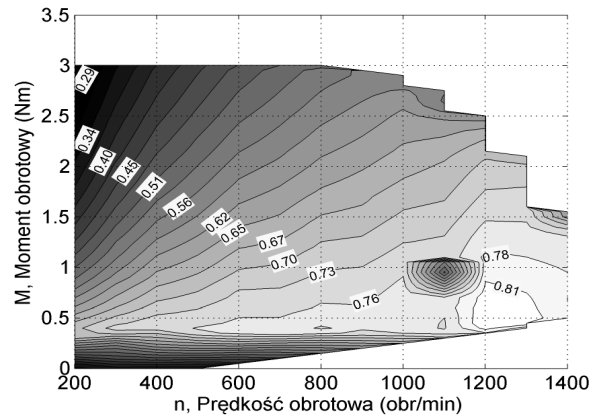
Rys. 13. Praca prototypu ECPSM sterowanej algorytmem FOC na stanowisku testowym



(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.

## 6. 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.

## 7. Literatura

- [1] Ki-Chan K.; A.: *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
- [2] May H., Palka R., Paplicki P., Szkolny S., Canders W.-R.: *Modified concept of permanent magnet excited synchronous machines with improved high-speed features*, Archives of Electrical Engineering, 4/2011, pp.531-540
- [3] 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
- [5] Amara, Y. and Vido, L. and Gabsi, M. and Hoang, E. and Hamid Ben Ahmed, A. and Lecrivain, M.: *Hybrid Excitation Synchronous Machines: Energy-Efficient Solution for Vehicles Propulsion*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, 2009 pp.2137-2149.
- [6] Nedjar, B.; Hlioui, S.; Amara, Y.; Vido, L.; Gabsi, M.; Lecrivain, M., *A New Parallel Double Excitation Synchronous Machine*, Magnetics, IEEE Transactions on , vol.47, no.9, pp.2252,2260, Sept. 2011
- [7] R.L. Owen, Z.Q. Zhu, J.B. Wang, D. A. Stone, I. Urquhart: *Review of Variable-flux Permanent Magnet Machines*, Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, Vol.1, No.1, pp.23~31, 2012 23
- [8] May H., Palka 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] Di Barba P., Mognaschi M. E., Palka 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
- [10] Canders W., May H., Palka 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
- [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

## Autorzy

prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka, [rpaka@zut.edu.pl](mailto:rpaka@zut.edu.pl);  
 dr inż. Piotr Paplicki, [piotr.paplicki@zut.edu.pl](mailto:piotr.paplicki@zut.edu.pl);  
 dr inż. Marcin Wardach, [marcin.wardach@zut.edu.pl](mailto:marcin.wardach@zut.edu.pl);  
 mgr inż. Michał Bonisławski,  
[michal.bonislawski@zut.edu.pl](mailto:michal.bonislawski@zut.edu.pl).  
 Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel.: +48 91 449 48 05

## Informacje dodatkowe

Badania finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR), projekt nr N510 508040 (2011-2013).

## Recenzent

prof. dr hab. inż. Włodzimierz Przyborowski