

*maszyna elektryczna, magnesy trwałe,
regulacja wzbudzenia, pojazd elektryczny*

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

MASZYNA Z MAGNESAMI O REGULOWANYM WZBUDZENIU – WYBRANE WYNIKI PRAC PROJEKTOWYCH

W artykule przedstawiono wybrane wyniki prac projektowych, konstrukcyjnych i badawczych maszyny wzbudzonej magnesami trwałymi z możliwością regulacji wzbudzenia pola magnetycznego dedykowanej do napędu samochodu elektrycznego. Pokazano modułową budowę wirnika i stojana z dodatkową nieruchomą cewką regulującą pole magnetyczne maszyny, projekt stanowiska doświadczalnego do jej badań oraz wstępne wyniki badań eksperymentalnych. Celem przeprowadzonych badań była weryfikacja możliwości budowy nietypowej maszyny o mocy kilkudziesięciu kilowatów z magnesami trwałymi i regulowanym wzbudzeniem do napędu pojazdu samochodowego.

1. NAPĘD ELEKTRYCZNY POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

Próby zastosowania silnika elektrycznego do napędu pojazdów samochodowych podejmowane są od wielu lat. Do chwili obecnej niemal wszystkie koncerny samochodowe posiadają w swojej ofercie samochody hybrydowe i elektryczne (często wyłącznie w wersji studyjnej), lecz rzeczywista oferta samochodów wyłącznie elektrycznych jest nadal dość uboga. Głównym ograniczeniem jest tu bez wątpienia źródło energii elektrycznej, które nakłada na pozostałe składniki systemu (przede wszystkim na silnik) bardzo trudne do spełnienia wymagania. Jednocześnie z aktualnych tendencji rozwojowych pojazdów elektrycznych wyciągnąć można wnioski, że rozwijana będzie przede wszystkim technologia samochodów elektrycznych napędzanych silnikami o dużej mocy – powyżej 100 kW. Przewidywane są rozwiązania z jednym silnikiem napędzającym

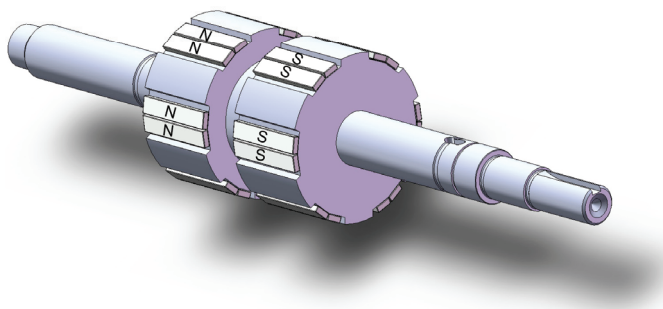
* Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin; rpalka@zut.edu.pl, paplicki@zut.edu.pl, marwar@zut.edu.pl, rpilotuch@zut.edu.pl

główny wał napędowy lub dwoma silnikami o mocy ok. 50 kW każdy, umieszczonymi bezpośrednio przy kołach osi tylnej samochodu.

Obecnie stosowane silniki elektryczne do napędów samochodów hybrydowych i elektrycznych posiadają kilka istotnych wad [4, 5]. W przypadku rozwiązań bezprzekładniowych jednostka napędowa musi być znacznie przewymiarowana, aby zagwarantować istnienie odpowiednio dużego momentu obrotowego przy starcie i dla małych prędkości obrotowych. Stosowanie wielostopniowych skrzyń biegów komplikuje cały system oraz powoduje zwiększenie gabarytów i masy wypadkowej układu. Preferowane obecnie rozwiązania wykorzystujące silniki z magnesami trwałymi mają dodatkowo inną istotną wadę, którą jest ich zachowanie przy dużych prędkościach obrotowych (indukowanie wysokiego napięcia), przy których trudne jest uzyskanie odpowiednio dużego momentu obrotowego. Celem ograniczenia tych efektów stosuje się różne techniki osłabiania strumienia magnetycznego w maszynie. Konwencjonalne rozwiązania tego problemu prowadzą do komplikacji systemu, konieczności kilkukrotnego przewymiarowania falownika i powiększenia gabarytów całego układu. Jako rozwiązanie problemu autorzy proponują unikatową wysokoobrotową maszynę z magnesami trwałymi [1–3], umożliwiającą regulację strumienia magnesów trwałych (*Electric Controlled Permanent Magnet Excited Synchronous Machine – ECPSM*).

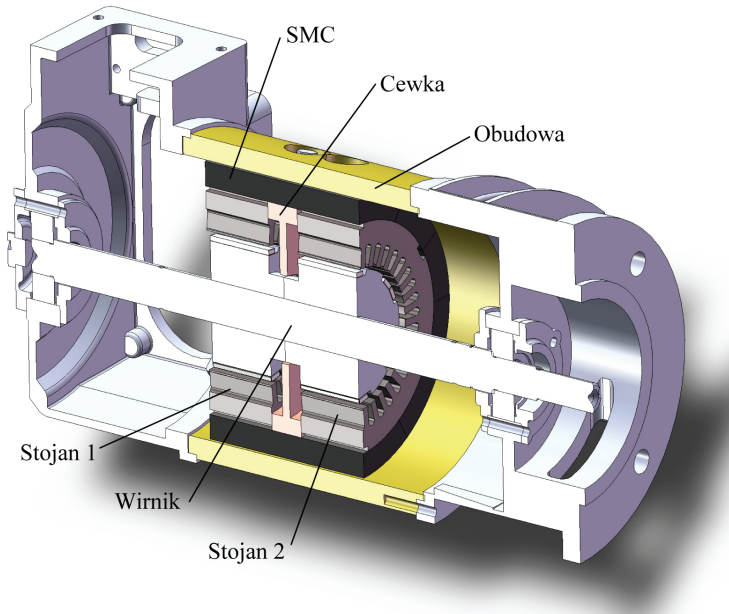
2. KONSTRUKCJA MASZYNY ECPSM

Wirnik proponowanej maszyny ECPSM, zaprezentowanej na rys. 1, składa się z dwóch identycznych części. Jedna z tych części posiada magnesy trwałe spolaryzowane w kierunku zewnętrznym (biegun północny), natomiast druga – spolaryzowana jest w kierunku przeciwnym. Cechą charakterystyczną tego układu jest istnienie pomocniczej cewki przymocowanej do stojana, położonej pomiędzy dwoma częściami wirnika i stojanami. Cewka będzie zasilana z choppera 2Q-DC, co umożliwi regulację



Rys. 1. Wirnik maszyny elektrycznej ECPSM
Fig. 1. Rotor of the ECPS-machine

pola wzbudzenia maszyny. Stożany umieszczone są wewnątrz tulei wykonanej z mieszanki proszku magnetycznego Somaloy 500 oraz żywicy epoksydowej. Przekrój budowy proponowanej maszyny ECPSM, z zaznaczonymi podstawowymi elementami maszyny, przedstawiony został na rys. 2.



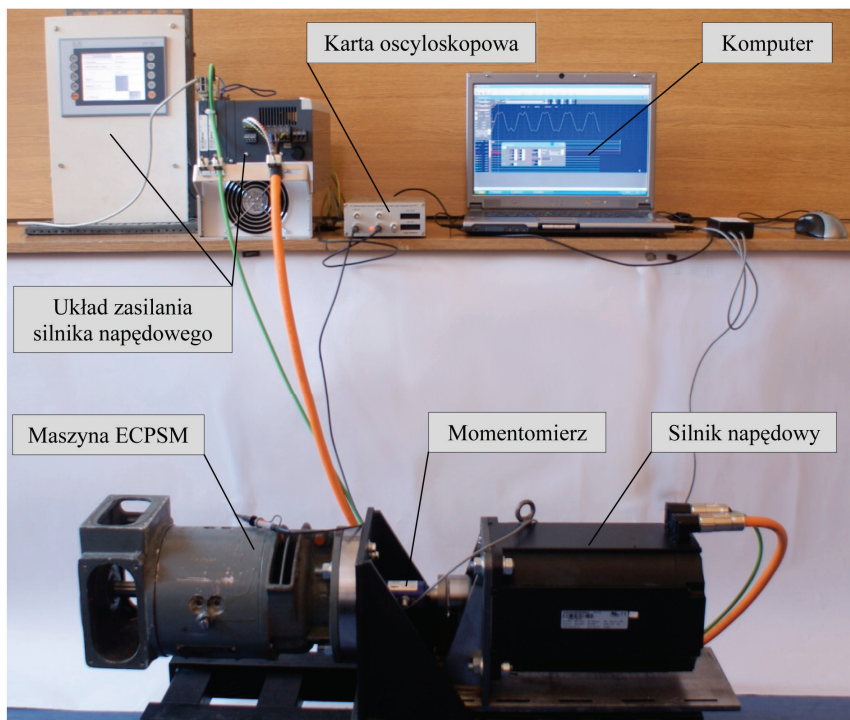
Rys. 2. Przekrój maszyny ECPSM
Fig. 2. Cross-section of the ECPS-machine

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE MASZYNY ECPSM

Zbudowany model eksperymentalny maszyny ECPSM poddano wstępnym badaniom polegającym na wyznaczeniu napięcia indukowanego oraz momentu zaczepowego. Stanowisko badawcze przedstawione zostało na rys. 3.

Napięcie indukowane zmierzono na jednym zezwoju przy prędkościach obrotowych wirnika $n = 5$ obr/s, $n = 10$ obr/s, $n = 15$ obr/s, $n = 20$ obr/s, $n = 25$ obr/s i $n = 30$ obr/s oraz zasilaniu cewki pomocniczej $I_c = -3,6$ A, $I_c = 0$ A i $I_c = 3,6$ A. Wyniki pomiarów wartości skutecznych napięcia indukowanego przedstawiono na rys. 4 oraz w tab. 1. Rysunek 5 prezentuje rozkład jednego okresu napięcia indukowanego dla wybranej prędkości obrotowej $n = 30$ obr/s.

W następnym etapie badań wyznaczono przebieg momentu zaczepowego M_z modelu ECPSM w funkcji kąta położenia wału α . Przebieg ten zaprezentowano na rys. 6.



Rys. 3. Stanowisko badawcze

Fig. 3. Test stand

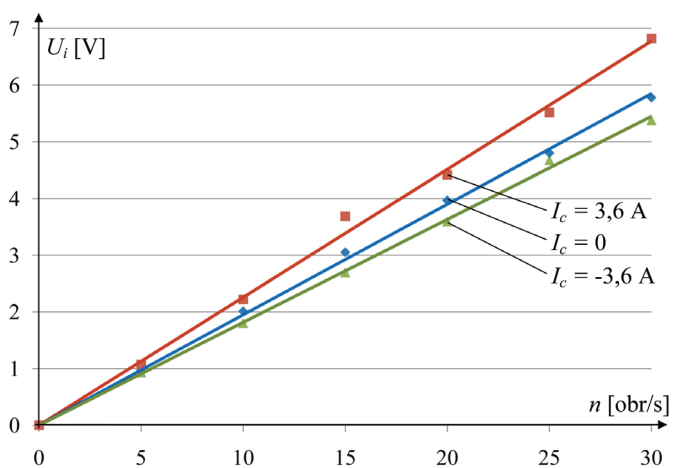
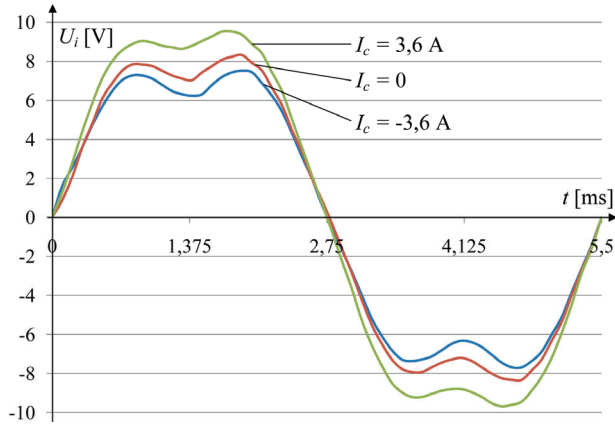
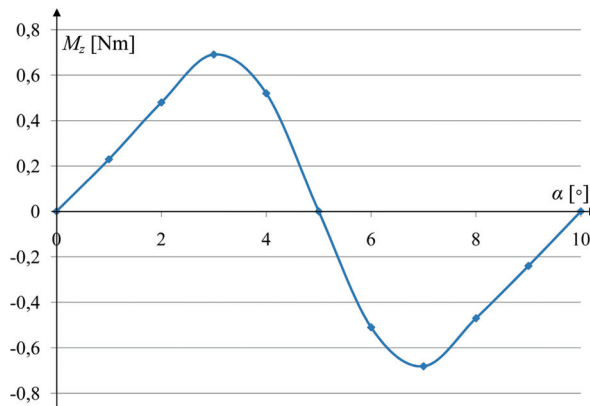
Rys. 4. Charakterystyka zależności wartości skutecznej napięcia indukowanego U_i od prędkości obrotowej n dla trzech wartości prądu zasilania cewki pomocniczej I_c Fig. 4. Induced voltage value U_i vs. rotational speed n for three values of the auxiliary coil current I_c

Tabela 1. Wartość skuteczna napięcia indukowanego U_i
 Table 1. RMS induced voltage value U_i

n [obr/s]	$U_i _{I_c=-3,6A}$ [V]	$U_i _{I_c=0}$ [V]	$U_i _{I_c=3,6A}$ [V]
5	0,93	0,97	1,07
10	1,80	2,01	2,22
15	2,69	3,05	3,69
20	3,59	3,97	4,42
25	4,67	4,80	5,51
30	5,38	5,78	6,82



Rys. 5. Napięcie indukowane $U_i = f(t)$ dla $n = 30$ obr/s
 Fig. 5. Induced voltage $U_i = f(t)$ for $n = 30$ 1/s



Rys. 6. Moment zaczepowy $M_z = f(\alpha)$
 Fig. 6. Cogging torque $M_z = f(\alpha)$

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań eksperymentalnych zaprojektowanego i zbudowanego modelu maszyny z magnesami trwałymi z możliwością regulacji strumienia magnesów trwałych. Wstępne badania doświadczalne pozwalają sformułować wniosek, że możliwa jest realizacja regulacji strumienia wzbudzenia w maszynach z magnesami trwałymi. Dzięki zastosowaniu cewki pomocniczej możliwa była zmiana napięcia indukowanego w uzwojeniu twornika, co może rozwiązać problem zbyt dużego napięcia indukowanego przy wysokich obrotach maszyny z magnesami trwałymi. W dalszym etapie autorzy planują przeprowadzić pełne badania eksperymentalne zarówno w reżimie pracy generatorowej, jak i silnikowej maszyny ECPSM.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki, nr projektu NN510 508040 (2011–2013).

LITERATURA

- [1] 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 on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012, in press.
- [2] MAY H., PALKA R., PAPLICKI P., SZKOLNY S., CANDERS W., *Modified concept of permanent magnet excited synchronous machines with improved high-speed features*, Journal Archives of Electrical Engineering, 4 (2011), 4531–540.
- [3] MAY H., PALKA 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.
- [4] PUTEK P., SŁODIČKA M., PAPLICKI P., PALKA R., *Minimization of the cogging torque in permanent-magnet machines by incorporating the topological gradient and adjoint sensitivity in multi-objective design*, Intern. Journal on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012, in press.
- [5] WARDACH M., PAPLICKI P., PAŁKA R., CIERZNIIEWSKI P., *Wpływ konstrukcji wirnika na parametry maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi*, R. 87, nr 11/2011, s. 131–134, 2011, ISSN 0033-2097.

MACHINE WITH REGULATED MAGNET EXCITATION – SELECTED RESULTS OF DESIGN

The paper presents chosen results of design, construction and testing of the machine with permanent magnet with adjustable magnetic field excitation dedicated to modern drives for electro-mobiles. A modular structure of the rotor and the stator with an additional stationary coil to regulate the magnetic field, the design of experimental research and preliminary results of experimental studies have been shown. The aim of this study was to verify the possibility of building unusual machine with a capacity of several kilowatts with permanent magnets and variable excitation for electrical vehicles.