

Marcin WARDACH¹, Darian GORZYŃSKI¹

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny,
Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych (1)

Koncepcja maszyny elektrycznej z wirnikiem kłowym wzbudzanej hybrydowo

Streszczenie. Praca przedstawia koncepcję oraz wstępne wyniki badań eksperymentalnych generatora energii elektrycznej z wirnikiem o konstrukcji kłowej, w którym zastosowano hybrydowe wzbudzenie, tj.: za pomocą klasycznej cewki umieszczonej między dwoma częściami wirnika oraz dodatkowych magnesów trwałych umieszczonych na biegunach kłowych wirnika. Dla potrzeb badań przebudowano seryjnie produkowany alternator samochodowy umieszczając na jego wirniku magnesy trwałe. Badania eksperymentalne wykazały, że – przy odpowiedniej prędkości obrotowej – możliwe jest samoczynne wzbudzenie generatora bez dodatkowego źródła energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: generator kłowy, wzbudzenie hybrydowe, magnesy trwałe, cewka wzbudzająca.

Wstęp

Przedmiotem badań jest generator z wirnikiem kłowym, który może znaleźć zastosowanie w małych elektrowniach wiatrowych, a także w pojazdach mechanicznych. Znane są konstrukcje wirników generatorów, które posiadają bieguny kłowe – np. alternatory samochodowe. W celu wytworzenia pola magnetycznego stosowana jest tam cewka wzbudzająca, znajdująca się pomiędzy dwoma częściami wirnika kłowego. W badanym modelu zamontowano dodatkowo magnesy trwałe na biegunach kłowych. Do budowy generatora wykorzystano seryjnie produkowany alternator firmy Denso.

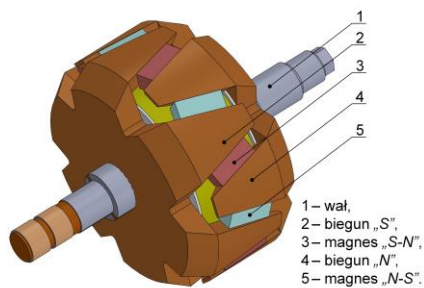
Konstrukcje maszyn kłowych o wzbudzeniu hybrydowym

W literaturze znane są różne rozwiązania techniczne maszyn wzbudzanych hybrydowo [1-5] oraz kłowych z magnesami trwałymi. Rozwiązania maszyn z wirnikiem kłowym [6-8] posiadają jednak pewne ograniczenia – brak możliwości regulacji strumienia wzbudzenia lub wymagają wprowadzenia specjalnych obszarów ograniczających strumień rozproszenia.

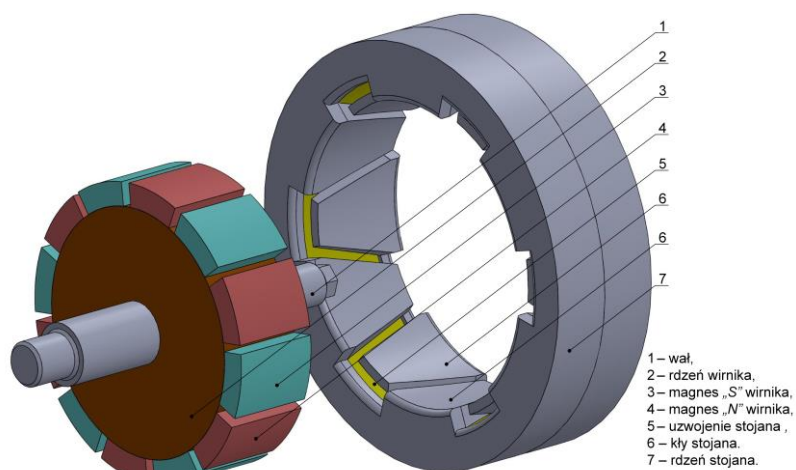
W konstrukcji maszyny wg [9] magnesy trwałe zamocowane są pomiędzy biegunami kłowymi wirnika. Takie rozwiązanie wymusza konieczność zastosowania dodatkowych rozwiązań – barier magnetycznych w obszarze wirnika, które spowodują zmniejszenie rozproszenia strumienia od magnesów trwałych, ponieważ część strumienia magnetycznego w tej strukturze mogłaby zamknąć się wewnątrz samego wirnika, nie przechodząc do szczeliny powietrznej. Strukturę wirnika przedstawia rysunek 1.

Maszyny kłowe z magnesami trwałymi proponowane są również w innych – zupełnie odmiennych – konstrukcjach. Artykuł [10] przedstawia rozwiązanie maszyny kłowej z magnesami trwałymi, w której bieguny kłowe znajdują się na zewnętrznym stojanie, natomiast wirnik posiada powierzchniowo montowane magnesy trwałe (rys. 2.). W konstrukcji tej nie ma regulacji strumienia wzbudzenia, ponadto – jak sami autorzy wspominają – taka konstrukcja wymusza konieczność zastosowania technologii spiekania proszków magnetycznie miękkich SMC (z ang. *Soft Magnetic Composites*). Podobna struktura omawiana jest w artykule [7]. Natomiast odwróconą konstrukcję wirnika względem stojana – magnesy na wirniku zewnętrznym i bieguny kłowe na

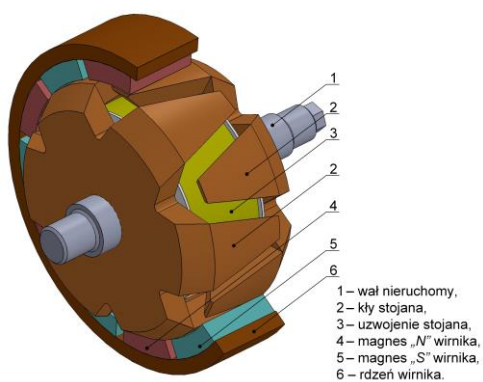
stojanie wewnętrznym – przedstawia artykuł [8] (rys. 3.). W przypadku obu tych koncepcji nie ma możliwości regulowania napięcia indukowanego maszyny.



Rys. 1. Wirnik maszyny o konstrukcji wg [9].



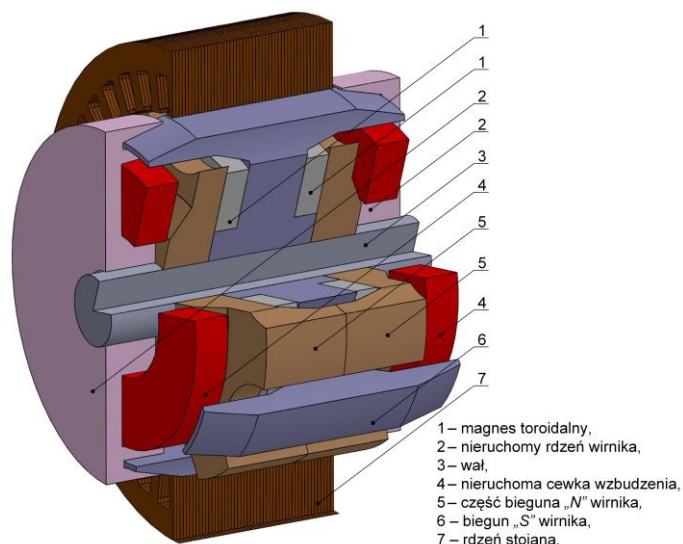
Rys. 2. Główne elementy aktywne maszyny z zewnętrznym stojanem kłowym [7, 10].



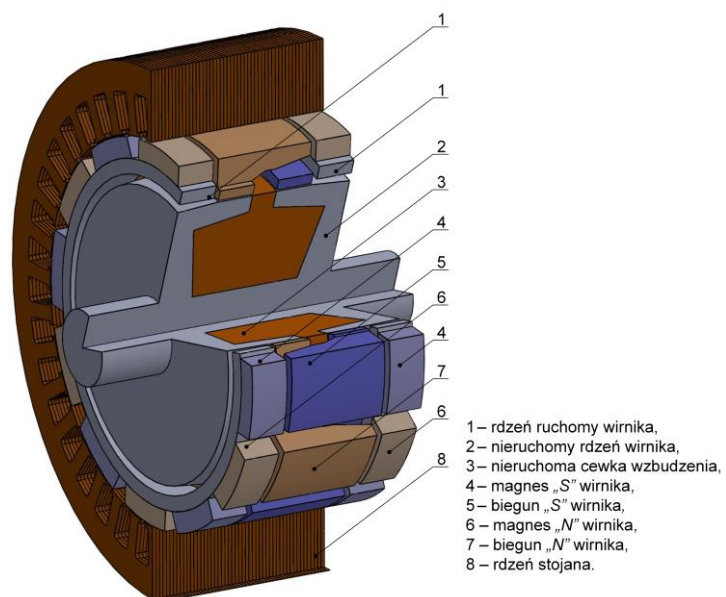
Rys. 3. Główne elementy aktywne maszyny z wewnętrznym stojanem kłowym [8].

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

W artykule [6] przedstawiono rozwiązanie maszyny kłowej z magnesami trwałymi o kształcie toroidów montowanych pomiędzy trzema częściami biegunów kłowych (rys. 4.).



Rys. 4. Struktura maszyny kłowej o wzbudzeniu hybrydowym z nieruchomymi cewkami wzbudzenia.



Rys. 5. Struktura maszyny kłowej o wzbudzeniu hybrydowym z nieruchomą cewką wzbudzenia i magnesami umieszczonymi na oddzielnych rdzeniach toroidalnych.

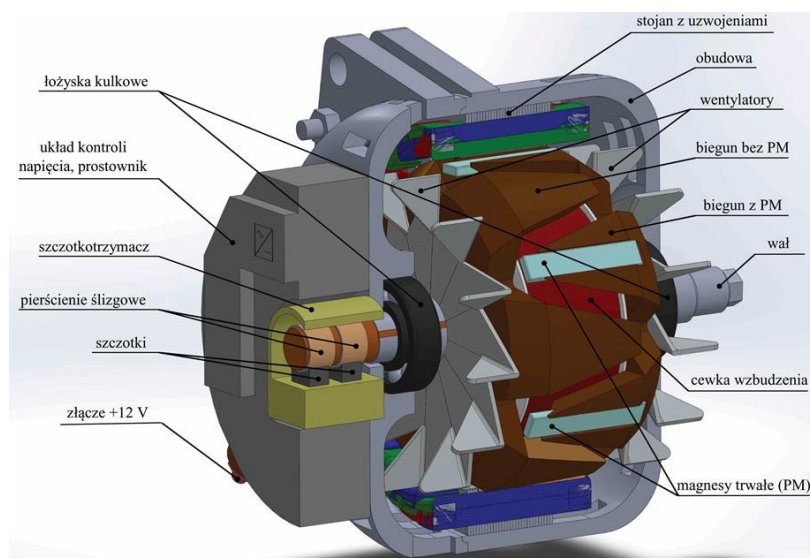
Zaletą tej konstrukcji jest brak pierścieni ślizgowych i szczotek, ponieważ cewki wzbudzające są nieruchome, jednak takie rozwiązanie wymusza przejście strumienia wzbudzenia od cewek przez dwie szczeliny powietrzne, co ogranicza możliwości regulacyjne. Istotną wadą tego rozwiązania jest bardzo skomplikowana struktura, która utrudni wykonanie maszyny.

Artykuł [11], przedstawia koncepcję maszyny kłowej ze stojanem zewnętrznym, nieruchomym układem regulacji wzbudzenia, natomiast wirnik stanowią bieguny kłowe oraz umocowane w ich sąsiedztwie magnesy trwałe. Korzystny jest w tym przypadku brak szczotek i pierścieni, natomiast jest to rozwiązanie bardzo skomplikowane konstrukcyjnie, ponadto strumień magnetyczny z układu regulacji wzbudzenia musi pokonać dwie szczeliny powietrzne, co musi spowodować zwiększenie strumienia rozproszenia od nieruchomej cewki wzbudzenia. Strukturę tą przedstawia rysunek 5.

Badania maszyny kłowej o wzbudzeniu hybrydowym

Generator z wirnikiem kłowym, który był przedmiotem badań (rys. 6.), zawiera m.in.: regulator napięcia, prostownik, szczotkotrzymacz, pierścienie ślizgowe, szczotki węglowe, rdzeń stojana, wirnik zawierający cewkę wzbudzającą oraz bieguny kłowe, na których na jednej części zamontowano magnesy trwałe. Istotnym jest dla tego rozwiązania, aby polaryzacja magnesów trwałych była zgodna z polaryzacją biegunów kłowych, na której są umieszczone.

Dzięki zastosowanym magnesom trwałym generator jest w stanie sam się wzbudzić bez konieczności stosowania zewnętrznego źródła energii elektrycznej. Należy wówczas złącze dodatnie generatora podłączyć szeregowo z diodą prostowniczą zorientowaną przewodzeniem w kierunku do złącza dodatniego akumulatora, natomiast biegun ujemny należy podłączyć bezpośrednio. Do ładowania akumulatorów nie jest potrzebny wówczas dodatkowy układ kontroli, którego zadaniem byłoby zabezpieczenie przed rozładowywaniem akumulatora w przypadku zatrzymania wirnika, ponieważ funkcję takiego zabezpieczenia pełni dioda prostownicza. Przy nieruchomym wirniku nie jest tracona energia elektryczna z akumulatora, co jest bardzo istotne przy zastosowaniu go do siłowni wiatrowej.



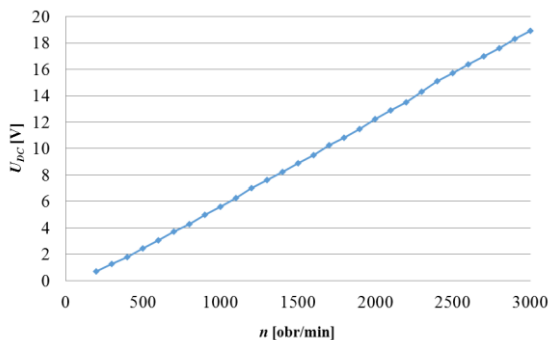
Rys. 6. Proponowana konstrukcja generatora kłowego o wzbudzeniu hybrydowym.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

W tabeli 1 i na rysunku 7 przedstawiono wyniki pomiarów napięcia na zaciskach badanej maszyny przy wyłączonym regulatorze napięcia.

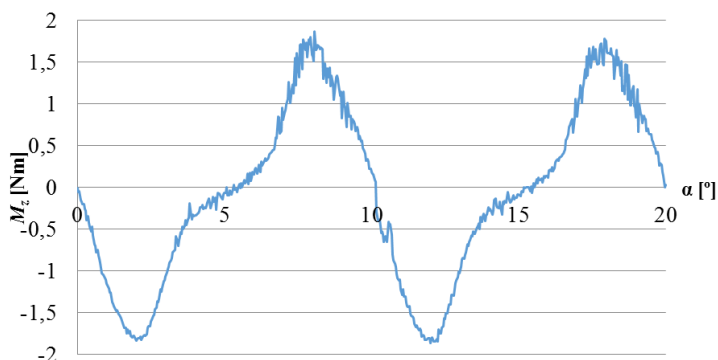
Tabela 1. Pomiar napięcia za prostownikiem, bez wzbudzenia oraz bez obciążenia.

n [obr/min]	U_{DC} [V]
200	0,7
400	1,8
600	3,1
800	4,3
1000	5,6
1200	7,0
1400	8,3
1600	9,5
1800	10,8
2000	12,3
2200	13,5
2400	15,1
2600	16,4
2800	17,6
3000	18,9



Rys. 7. Zależność $U_{DC} = f(n)$.

Następnie wyznaczony został przebieg momentu zaczepowego, którego kształt zaprezentowano na rysunku 8. Wyznaczono wartość średnią jednego półokresu momentu zaczepowego, która wyniosła $M_{z,av} = 0,81$ Nm oraz wartość maksymalną wynoszącą $M_{z,max} = 1,87$ Nm. Otrzymane wartości momentu zaczepowego są stosunkowo wysokie. Znane są różne techniki jego zmniejszania [12-18]. W dalszych pracach planowane jest wybranie i opracowanie optymalnej konstrukcji maszyny kłowej z magnesami trwałymi, w której moment zaczepowy zostanie zminimalizowany.



Rys. 8. Przebieg momentu zaczepowego w funkcji kąta położenia wału $M_z = f(\alpha)$.

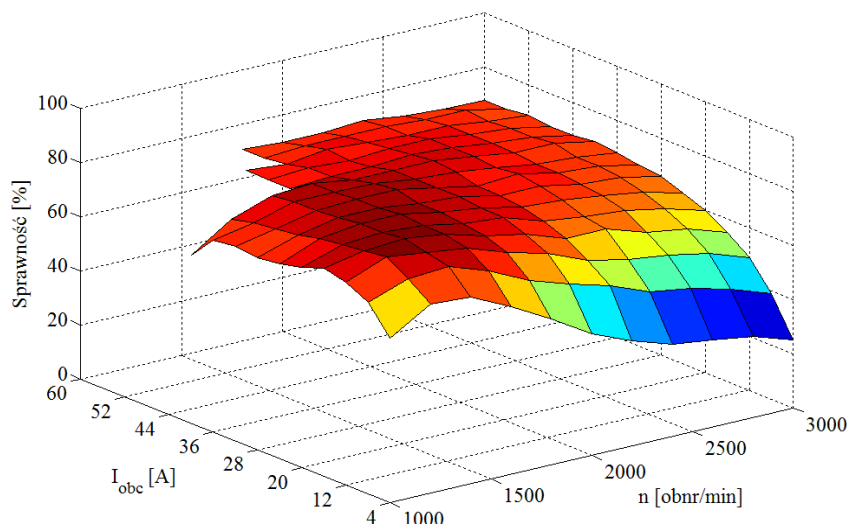
W dalszych badaniach stwierdzono, że po załączeniu regulatora napięcia, generator sam się wzbudził przy prędkości obrotowej 1300 obr/min bez udziału zewnętrznego

źródła zasilania, a po wzbudzeniu mógł generować napięcie ok. 14 V (niezbędne do ładowania akumulatorów), gdy prędkość obrotowa wirnika wynosiła przynajmniej 1000 obr/min – przy mniejszych prędkościach obrotowych napięcie na zaciskach maszyny było zbyt niskie, aby regulator napięcia był w stanie je regulować.

Podczas badań maszyny pod obciążeniem wyznaczono między innymi mapę sprawności maszyny η w zależności od prędkości obrotowej n oraz prądu obciążenia I_{obc} . Wyniki zamieszczone są w tabeli 2 i na rysunku 9.

Tabela 2. Sprawność w funkcji obrotów i prądu obciążenia.

η		n [obr/min]												
		1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000		
I_{obc} [A]	4	61%	70%	69%	62%	54%	45%	39%	34%	32%	30%	25%		
	8	71%	76%	77%	72%	65%	60%	56%	50%	48%	44%	39%		
	12	75%	81%	79%	77%	72%	68%	62%	59%	57%	54%	49%		
	16	77%	80%	81%	79%	75%	72%	67%	67%	62%	60%	55%		
	20	74%	79%	80%	79%	76%	75%	70%	68%	67%	64%	60%		
	24	72%	78%	80%	80%	77%	75%	72%	71%	69%	67%	63%		
	28	71%	76%	79%	79%	77%	76%	73%	73%	70%	69%	66%		
	32	72%	75%	78%	79%	79%	76%	73%	74%	71%	70%	67%		
	36	71%	74%	78%	78%	78%	76%	75%	73%	71%	70%	68%		
	40	62%	72%	77%	78%	76%	76%	76%	74%	72%	72%	69%		
	44					73%	74%	74%	75%	74%	72%	71%	68%	
	48					73%	74%	73%	74%	74%	72%	71%	68%	
	52					73%	72%	74%	73%	72%	72%	70%	69%	
	56					71%	72%	72%	72%	72%	71%	71%	68%	
60					71%	70%	70%	71%	69%	68%	68%			



Rys. 9. Mapa sprawności w funkcji obrotów i prądu obciążenia.

IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Dla niższych prędkości obrotowych nie udało się wyznaczyć wartości sprawności w pełnym zakresie, ponieważ po zwiększeniu prądu obciążenia, wartość napięcia na zaciskach generatora była już na tyle niska, że regulator nie był w stanie utrzymać napięcia wyjściowego na wymaganym poziomie.

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań można stwierdzić, że proponowana maszyna elektryczna, nadaje się do zastosowania jako samowzbudny generator w turbinie wiatrowej małej mocy. Proponowana konstrukcja stanowi rozwiązanie generatora wzbudzanego hybrydowo, która umożliwi zaoszczędzenie energii elektrycznej dzięki zastosowaniu magnesom trwałym, które podwyższą sprawność urządzenia – cewka wzbudzenia wirnika będzie mogła być obciążana mniejszym prądem, ponieważ magnesy trwale wytworzą już część strumienia magnetycznego.

Praca finansowana w ramach środków Narodowego Centrum Nauki, projekt nr 2015/17/B/ST8/03251.

Literatura

1. Di Barba P., Bonislawski M., Palka R., Paplicki P., Wardach M., *Design of Hybrid Excited Synchronous Machine for Electrical Vehicles*, IEEE Transactions on Magnetics, Issue: 99, DOI: 10.1109/TMAG.2015.2424392.
2. Paplicki P., Wardach M., Bonislawski M., Palka R., *Simulation and experimental results of hybrid electric machine with a novel flux control strategy*, Archives of Electrical Engineering, 64(1), 2015, 37-51.
3. 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*, Electrical Review, vol. 88, no. 12a, pp. 53-55, 2012.
4. Paplicki P., *Optimization of the electrically controlled permanent magnet excited synchronous machine to improve flux control range*, Elektronika ir electrotechnika, Vol. 20, No. 10, pp. 17-22, 2014.
5. Paplicki P., *The new generation of electrical machines applied in hybrid drive car*, Electrical Review, vol. 86, no. 6, pp. 101-103, 2010.
6. Melcescu L., Cistelean M. V., Craiu O., Popescu M., *Numerical Analysis of Claw Pole Synchronous Machine with Hybrid Contactless Excitation*, Electrical Review, 7b/2012, pp. 106-109.
7. Guo Y., Zhu J., Dorrell D., Lu H. Y., Wang Y., *Development of a Claw Pole Permanent Magnet Motor with a Molded Low-Density Soft Magnetic Composite Stator Core*, Proceedings of IEEE Energy Conversion Conference & Expo, pp. 294-301, 2009.
8. Guo Y., Zhu J. G., Zhong J. J., Wu W., *Core Losses in Claw Pole Permanent Magnet Machines With Soft Magnetic Composite Stators*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 39, no. 5, 2003, pp. 3199-3201.
9. Leroy V., Foveau V., *Claw rotor equipped with an insulator for an excitation coil and magnets, and rotary electrical machine equipped with a claw rotor*, patent US 20130009504 A1, 2013.
10. Jack A. G., Mecrow B. C., Maddison C. P., Wahab N. A., *Claw pole armature permanent magnet machines exploiting soft iron powder metallurgy*, IEEE Xplore, 1997
11. Burkhardt Y., Schleicher K., Klöpzig M., *A novel hybrid excited synchronous machine for (H)EV applications*, IEEE Xplore, 2014.

12. Putek P., Slodička M., Paplicki P., Palka 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 No.1-4, Apr. 2012, pp. 933–940.
13. Putek P., Paplicki P., Palka R., *Low Cogging Torque Design of Permanent Magnet Machine Using Modified Multi-Level Set Method With Total Variation Regularization*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 2, pp. 657–660, Feb. 2014.
14. Wardach M., Paplicki P., Palka R., Cierzniewski P., *Influence of the rotor construction on parameters of the electrical machine with permanent magnets*, Electrical Review, vol. 87, no. 11, pp. 131-134, 2011.
15. Wardach M., *Magnetic wedges influence of pulsation in electrical machine with permanent magnets*, Electrical Review, vol. 86, no. 6, pp. 163-166, 2010.
16. Wardach M., *Cogging torque reducing in electric machine by poling modification of magnetic circuit*, Electrical Review, vol. 85, no. 2, pp. 131-133, 2009.
17. Wardach M., *Minimization of torque pulsation in slotted PM machines with magnetic wedges*, Electrical Review, vol. 83, no. 11, pp. 118-120, 2007.
18. Cierzniewski P., Paplicki P., Wardach M., *Application of SMC for increasing electromagnetic torque in disc-type motors*, Electrical Review, vol. 84, no. 4, pp. 27–29, 2008.

Autorzy: dr inż. Marcin Wardach; Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail: marwar@zut.edu.pl, inż. Darian Gorzyński; e-mail: gorzynski21@gmail.com