

Paweł Pistelok, Tomasz Kądziołka
BOBRME KOMEL, Katowice

NOWA SERIA WYSOKOSPRAWNYCH DWUBIEGUNOWYCH GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH WZBUDZANYCH MAGNESAMI TRWAŁYMI

NEW SERIES OF HIGH EFFICIENCY 2-POLE SYNCHRONOUS GENERATOR WITH PERMANENT MAGNETS

Streszczenie: Artykuł przedstawia konstrukcję obwodu elektromagnetycznego dwubiegunowej prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi zaprojektowanej i przeznaczonej do pracy w agregacie spalinowo-elektrycznym. W artykule zaprezentowano model obliczeniowy generatora, pokazano obwodowy rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej oraz widmo harmonicznego rozkładu indukcji. W ramach pracy zbadano wpływ liczby magnesów przypadającej na biegun na uzyskane charakterystyki napięcia wyjściowego oraz parametry maszyny. Pokazano przekrój poprzeczny maszyn i poziomy nasycen indukcji magnetycznej w poszczególnych częściach obwodu magnetycznego generatorów. Przedstawiono charakterystyki sprawności w funkcji obciążenia oraz momentu zaczepowego.

Abstract: This paper presents the construction of electromagnetic circuit of 2-pole synchronous generator with permanent magnets designed for power unit diesel generator. The computational model of 2-pole synchronous generator with permanent magnets were shown. The Flux density in the air gap and harmonic spectrum of magnetic induction distributed in air gap are presented. During designing of electromagnetic circuit for 2-pole generator influence of magnetic-pole embrace, shape of magnets and number of magnets per pole was taken into account to obtain the best electromechanical parameters. The cross section with graphically presentation of magnetic induction in particular parts of electromagnetic circuits was shown. Comparison of efficiency and cogging torque according to specific design of rotor are shown.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, generator synchroniczny, prądnica dwubiegunowa, magnesy trwałe

Keywords: electrical machines, synchronous generator, 2-pole generator, permanent magnets

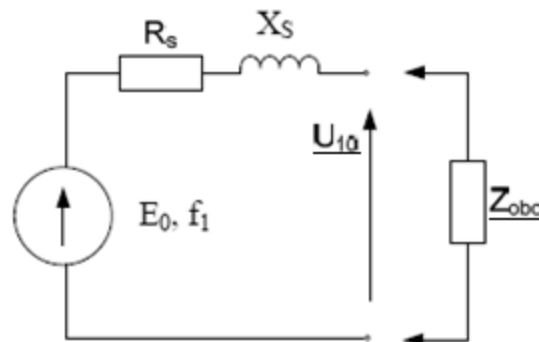
1. Wstęp

Prądnice synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi w porównaniu z innymi maszynami elektrycznymi charakteryzują się najwyższą sprawnością przetwarzania energii oraz największą gęstością mocy [1-8]. Z uwagi na ich bardzo dobre parametry eksploatacyjne stają się one coraz bardziej popularne. Są one stosowane między innymi w małych elektrowniach wiatrowych lub wodnych [4,8], czy w agregatach prądotwórczych [2] nierzadko zasilanych gazem pozyskanym z odnawialnych zasobów. W wyniku realizacji projektu badawczo-rozwojowego pt. „Nowa generacja wysokosprawnych agregatów spalinowo-elektrycznych” zrealizowanego w Instytucie BOBRME KOMEL, zaprojektowano serię wysokosprawnych dwubiegunowych generatorów synchronicznych z magnesami trwałymi, dedykowanych do pracy w agregatach prądotwórczych. W ramach niniejszej pracy zaprezentowano wyniki obliczeń projektowych tych prądnic na przykładzie konstrukcji generatora typu

PMwg160M-2. Zaprezentowano wpływ ilości magnesów w jednym biegunie maszyny na uzyskiwane parametry eksploatacyjne maszyny.

2. Modele obliczeniowe

Modele obliczeniowe każdej z analizowanych konstrukcji opracowano korzystając ze schematu zastępczego [7] (rys.1), którego parametry obliczono metodą obwodową wykorzystując zależności analityczne [9,10] oraz dane konstrukcyjne maszyny.



Rys. 1. Schemat zastępczy prądnicy wzbudzonej magnesami trwałymi

Opis parametrów schematu zastępczego:

\underline{E}_0 – siła elektromotoryczna rotacji pochodząca od magnesów trwałych,

f_l – częstotliwość generowanego napięcia,

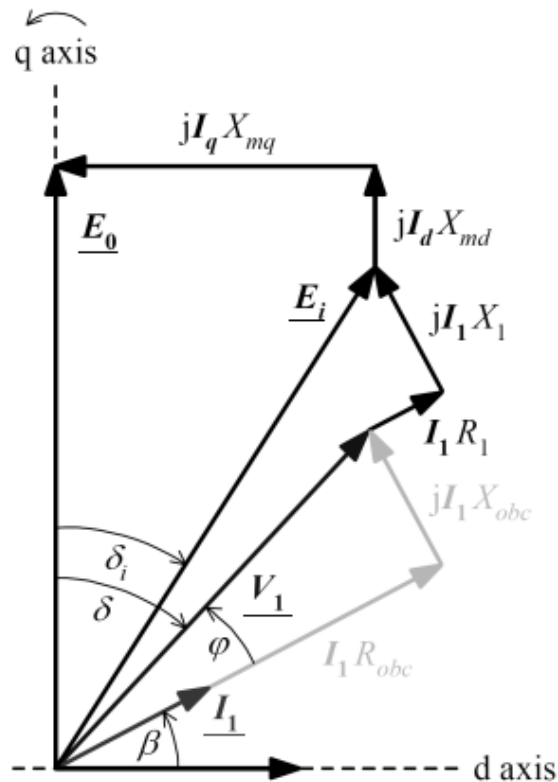
R_S – rezystancja fazowa uzwojenia twornika (stojana),

X_S – reaktancja synchroniczna uzwojenia stojana,

\underline{U}_{10} – napięcie biegu jałowego,

\underline{Z}_{obc} – impedancja obciążenia.

Charakterystyki zewnętrzne prądnic synchronicznych obliczono metodami obwodowo-polowymi [12] bazującymi na klasycznych równaniach maszyny synchronicznej wynikających z jej schematu zastępczego oraz wykresu wektorowego dla układu współrzędnych d-q-0 (rys.2).



Rys.2. Wykres wektorowy prądnicy synchronicznej [11]

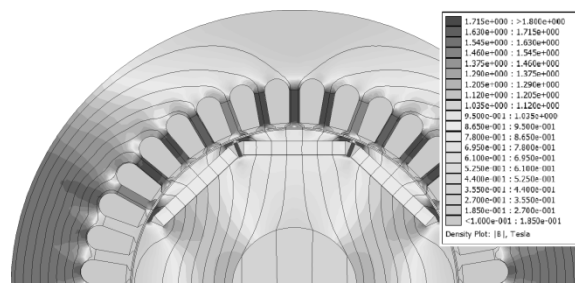
Napięcie rotacji \underline{E}_0 indukowane w uzwojeniu twornika przez wirujące magnesy trwałe, reaktancję magnesującą w osi podłużnej X_{md} , oraz reaktancję magnesującą w osi poprzecznej X_{mq} obliczono wykorzystując dwuwymiarową, stałoprądową analizę rozkładu pola magnetycznego w maszynie [11].

Modele obliczeniowe opracowano w środowisku obliczeniowym FEMM 2D, a rozkłady indukcji magnetycznej w rdzeniu analizowanych konstrukcji zaprezentowano na rysunkach 3,4,5.

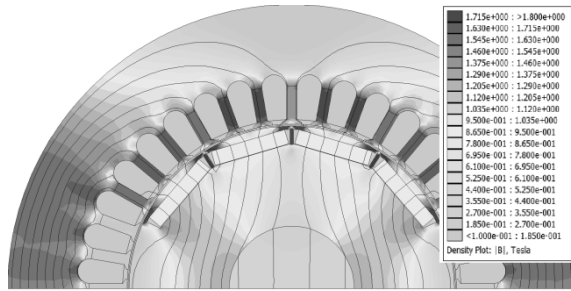
3. Obliczenia i wyniki symulacji

Prądnice dwubiegunowe charakteryzują się nieco innymi wytycznymi projektowymi w odniesieniu do maszyn wielobiegunowych ($2p=4$ i więcej) [6,7]. Z uwagi na duży kąt wypełnienia jednego bieguna magnesami (180°) konieczne jest zastosowanie odpowiedniej konstrukcji wirnika generatora. Magnesy w biegunie maszyny muszą być odpowiednio podzielone, tak aby maszyna uzyskiwała założone wcześniej parametry eksploatacyjne. Przykład takiej konstrukcji wirnika zaprezentowano na rysunkach 3, 4 i 5. W procesie poszukiwania optymalnej konstrukcji omawianej prądnicy opracowano trzy modele obliczeniowe i przyjęto następujące założenia:

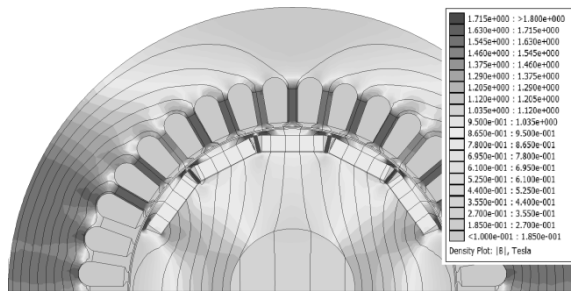
- każda z trzech zaprezentowanych konstrukcji została zaprojektowana na te same parametry znamionowe: $P_N=11,5$ kW, $U_N=400$ V, $n_N=3000$ obr./min, $\cos\varphi=1$;
- we wszystkich konstrukcjach założono tą samą długość rdzenia magnetycznego;
- każda z omawianych konstrukcji prądnicy ma identyczne wymiary obwodu magnetycznego stojana oraz zewnętrzną i wewnętrzną średnicę rdzenia wirnika;
- parametry uzwojenia twornika (stojana) każdej konstrukcji również pozostały bez zmian;
- w każdej z trzech prezentowanych w artykule konstrukcji zastosowano te same magnesy neodymowe.



Rys.3. Rozkład indukcji magnetycznej i strumienia magnetycznego w stanie biegu jałowego, konstrukcja I – trzy magnesy w biegunie wirnika maszyny

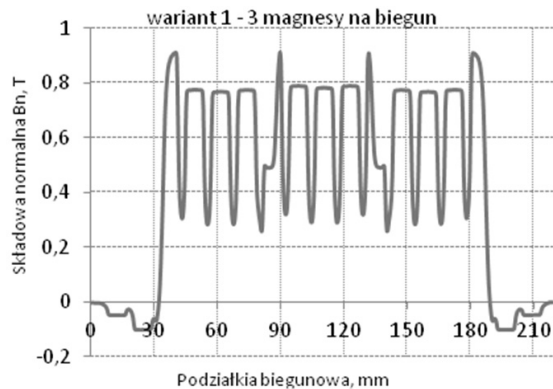


Rys.4. Rozkład indukcji magnetycznej i strumienia magnetycznego w stanie biegu jałowego, konstrukcja II – cztery magnesy w biegunie wirnika maszyny

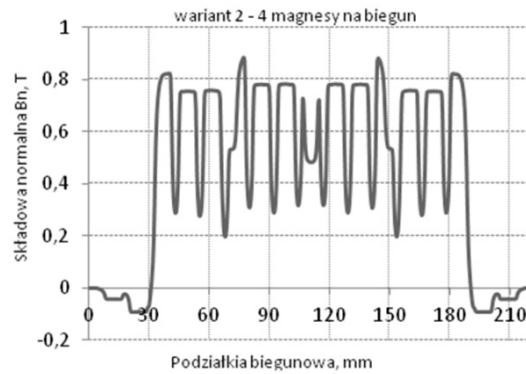


Rys.5. Rozkład indukcji magnetycznej i strumienia magnetycznego w stanie biegu jałowego, konstrukcja III – pięć magnesów w biegunie wirnika maszyny

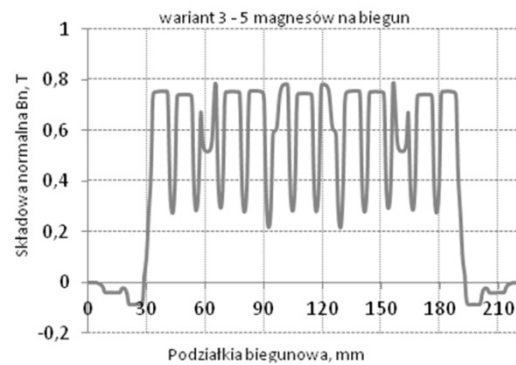
W celu opracowania optymalnej konstrukcji w każdej z trzech prezentowanych prądnic zmieniono liczbę magnesów w jednym biegunie, tak aby maszyna miała założone parametry znamionowe. W procesie projektowania omawianych prądnic wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie korzystając z modelu połowego - rysunki 6, 7 i 8. Dla każdego z tych rozkładów obliczono zawartość wyższych harmonicznych - rysunek 9.



Rys.6. Rozkład indukcji magnetycznej jednego bieguna w połowie grubości szczeliny powietrznej dla trzech magnesów w biegunie wirnika

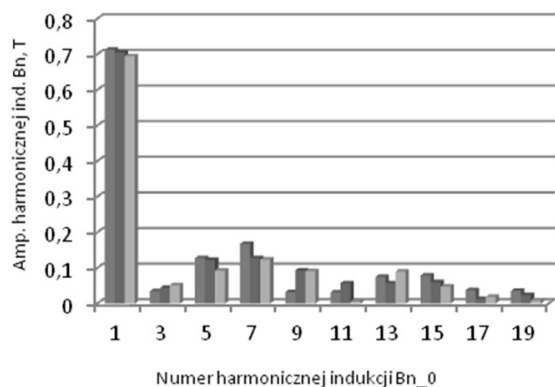


Rys.7. Rozkład indukcji magnetycznej jednego bieguna w połowie grubości szczeliny powietrznej dla czterech magnesów w biegunie wirnika

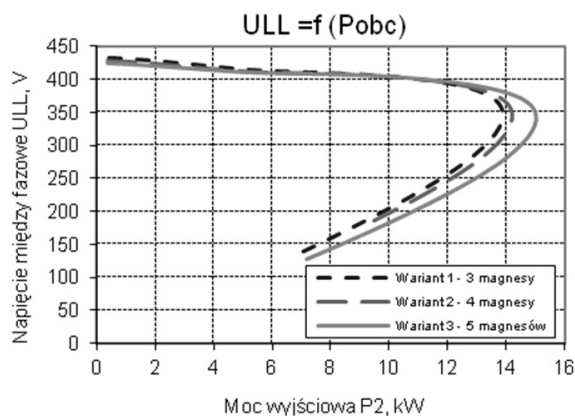


Rys.8. Rozkład indukcji magnetycznej jednego bieguna w połowie grubości szczeliny powietrznej dla pięciu magnesów w biegunie wirnika

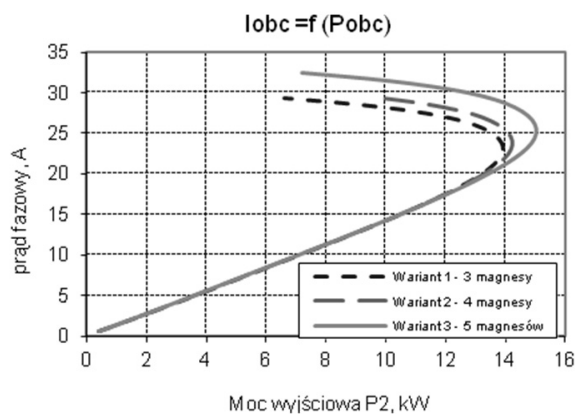
Rozkład strumienia magnetycznego dla każdej z omawianych konstrukcji wirnika jest podobny, za wyjątkiem odkształceń, których przyczyną są mostki pomiędzy magnesami. Na rysunku 9 przedstawiono widmo rozkładu indukcji magnetycznej dla trzech konstrukcji wirnika maszyny (kolejno od lewej do prawej: wariant 1, wariant 2 oraz wariant 3). Analizując go zauważyć można tendencję do zmniejszania się wartości pierwszej harmonicznej indukcji magnetycznej wraz ze wzrostem liczby magnesów w biegunie wirnika maszyny dwubiegunowej. Na rysunkach 10, 11 i 12 zaprezentowano obliczone charakterystyki generatora w stanie obciążenia, które świadczą o zachowaniu zbliżonych parametrów eksploatacyjnych dla trzech rozpatrywanych konstrukcji wirnika. Jak widać na rysunku 12, znamionowa sprawność każdej z trzech konstrukcji generatora wyniosła 95%.



Rys.9. Widmo rozkładu indukcji magnetycznej jednego bieguna dla 3 wariantów konstrukcyjnych wirnika kolejno od lewej do prawej – wariant 1, wariant 2, wariant 3



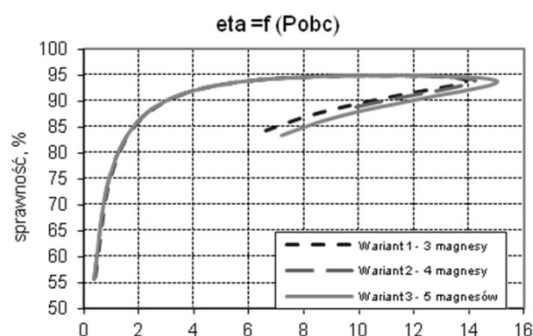
Rys.10. Charakterystyki napięcia międzyfazowego w funkcji mocy obciążenia dla trzech rozpatrywanych konstrukcji wirnika



Rys.11. Charakterystyki prądu fazowego w funkcji mocy obciążenia dla trzech rozpatrywanych konstrukcji wirnika

Jak widać na zaprezentowanych rysunkach 10-12, każda z rozpatrywanych konstrukcji generatora została zaprojektowana na te same parametry eksploatacyjne. W zakresie mocy

obciążenia do 11,5 kW obliczeniowe charakterystyki generatorów (rys. 10-12) są praktycznie takie same.

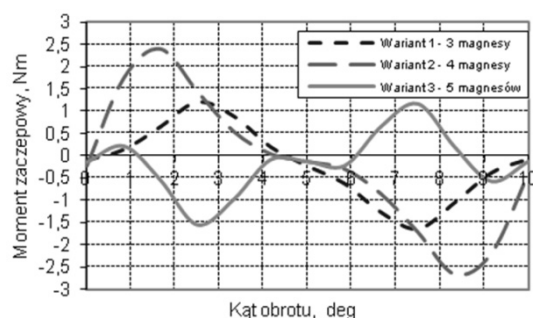


Rys.12. Charakterystyki sprawności w funkcji mocy obciążenia dla trzech rozpatrywanych konstrukcji wirnika

Tabela 1. Objętość magnesów w generatorze PMwg160M2 dla trzech omawianych konstrukcji wirnika

Objętość magnesów w wirniku generatora PMwg160M2			
konstrukcja	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
Objętość magnesów	213,84 cm ³	217,40 cm ³	250,42 cm ³

Jak wynika z tabeli 1 w celu zaprojektowania maszyny o wymaganych parametrach znamionowych, dla generatora z pięcioma magnesami w biegunie wirnika wykorzystano największą ilość magnesów w stosunku do pozostałych omawianych w niniejszym artykule konstrukcji. Na rysunku 13 zaprezentowano wykres momentu zaczepowego dla 3 rozpatrywanych konstrukcji generatora.



Rys.13. Charakterystyki momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu o jedną podziałkę żłobkową dla trzech rozpatrywanych konstrukcji wirnika generatora

Jak widać na wykresie zamieszczonym na rys. 3, najmniejszą wartość momentu zaczepowego

ma generator wykonany w wariantcie 1, w którym zastosowano trzy magnesy w biegunie wirnika.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Z przeprowadzonych obliczeń i symulacji wynika, że w przypadku dwubiegunowych generatorów synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi wraz ze wzrostem liczby magnesów w biegunie generatora maleje wartość pierwszej harmonicznej rozkładu indukcji magnetycznej w szczeliny maszyny (rys 9). Zmniejszenie wartości indukcji magnetycznej jest spowodowane większym strumieniem rozproszenia, którego źródłem są mostki pomiędzy magnesami. Jak widać na rysunku 13 wartość maksymalna momentu zaczepowego dla konstrukcji z 4 magnesami (wariant 2) w biegunie generatora jest o ok. 65% większa w porównaniu do konstrukcji z 3 i 5 magnesami (warianty 1 i 3). Jak wynika z tabeli 1, wraz ze wzrostem liczby magnesów w jednym biegunie generatora wzrasta objętość magnesów co jest niezbędne do osiągnięcia założonych parametrów maszyny. Większa liczba mostków pomiędzy magnesami wynika z większej liczby magnesów. Mostki te są źródłem dodatkowych rozprożeń strumienia wzbudzenia rozpatrywanego generatora. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, iż wariant 1 konstrukcji wirnika zaprezentowany w artykule jest rozwiązaniem optymalnym dla generatora dedykowanego do pracy w agregacie prądowórczym. Praca została wykonana w ramach projektu badawczo-rozwojowego zrealizowanego w instytucie BOBRME KOMEL o nazwie „Nowa generacja wysokosprawnych agregatów spalinowo elektrycznych”, który to zakładał zaprojektowanie nowej serii wysokosprawnych generatorów dwubiegunowych do pracy w agregatach prądowórczych.

Projekt był współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Innowacyjna Gospodarka, 2007-2013.

Literatura

- [1]. GLINKA T.: „*Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*” Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
 [2]. ROSSA R., PISTELOK P.: „*Generator z magnesami trwałymi do pracy w agregacie*

prądowórczym”, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 66, Studia i Materiały nr 32/2012.

- [3]. ROSSA R., PISTELOK P.: „*Trójfazowy generator z magnesami trwałymi w reżimie pracy jednofazowej*” Zeszyty Problemowe Maszyn Elektrycznych, nr 2/2012 (95).
 [4]. BERNATT J.: „*Wykorzystanie prądnic synchronicznych do budowy małych elektrowni wiatrowych*” Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne. Nr 68/2004, Wydawnictwo BOBRME KOMEL, Katowice 2004.
 [5]. ROSSA R., KRÓL E.: „*Modern electric machines with permanent magnet*”. Przegląd Elektrotechniczny nr 12/2008.
 [6]. GAWRON S.: „*Prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi o niskiej zmienności napięcia wyjściowego*” XLV International Symposium of Electrical Machines – Krańcizyn 2009, Zeszyty Problemowe Maszyn Elektrycznych, Nr 84/2009.
 [7]. BERNATT J., GAWRON S.: „*Nowe rozwiązania konstrukcyjne dwubiegunowej prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi*”. Zeszyty Problemowe Maszyn Elektrycznych, nr 88/2010.
 [8]. ROSSA R., PISTELOK P., DĄBROWSKI A.: „*Projekt prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi do odnawialnych źródeł energii*”. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 3/2012 (96).
 [9]. JEZIERKSI E.: „*Maszyny synchroniczne*”, Warszawa, PWT 1951;
 [10]. GŁOWACKI A.: „*Obliczenia elektromagnetyczne silników indukcyjnych trójfazowych*”, WNT Warszawa 1993;
 [11]. ROSSA R., KRÓL E.: „*Metoda obwodowo-polowa obliczania charakterystyk zewnętrznych prądnic synchronicznych z magnesami trwałymi pracujących samotnie na odbiorniki typu R lub RL*”, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, BOBRME KOMEL, nr 80/2008;
 [12]. Ping Zhou, T.E. McDermott, Z.J. Cendes, M.A. Rahman: “*Steady state analysis of synchronous generators by a coupled field-circuit method*”, Electric Machines and Drives Conference Record, IEEE International, 18-21 May 1997, Milwaukee, USA, Pages: WC2/2.1 - WC2/2.3.

Autorzy:

Mgr inż. Tomasz Kądziołka
 e-mail: t.kadziolka@komel.katowice.pl

Mgr inż. Paweł Pistelok
 e-mail: p.pistelok@komel.katowice.pl

Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych „KOMEL”,
 40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188

Recenzent

prof. dr hab. inż. Roman Krok

