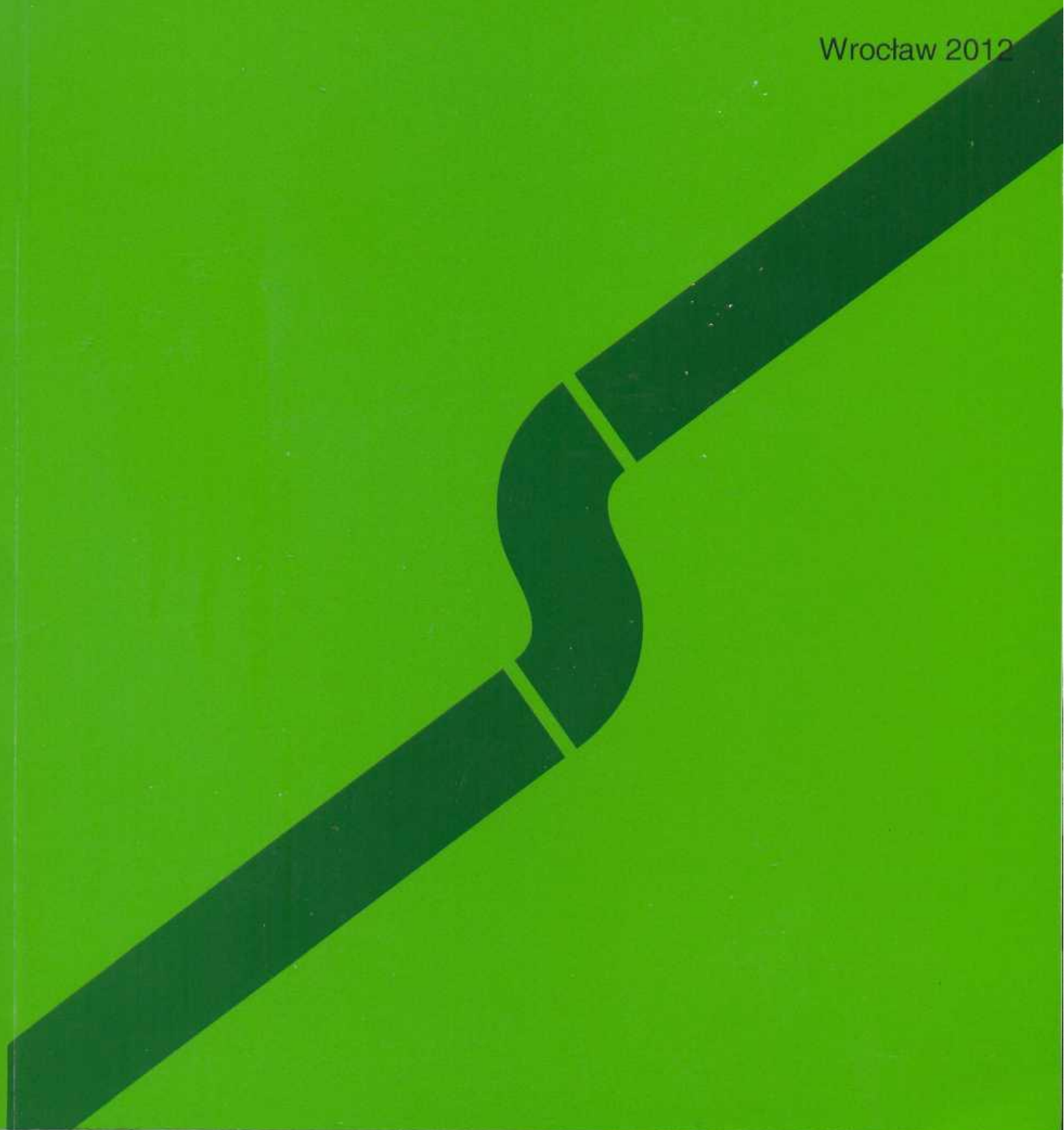


Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych

Tom 1

Wrocław 2012



Scientific Papers of the Institute of Electrical Machines
Drives and Measurements

No. 66

of the Wrocław University of Technology

No. 66

Studies and Research

No. 32

2012

Problems concerning electric machines,
drives and measurements

Volume 1

Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych

Tom 1



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej • Wrocław 2012

Recenzenci

Ludwik ANTAL, Andrzej BYTNAR, Andrzej DEMENKO, Maria DEMS, Bronisław DRAK, Piotr DROZDOWSKI, Ignacy DUDZIKOWSKI, Tadeusz GLINKA, Zbigniew GORYCA, Grzegorz KAMIŃSKI, Bogusław KAROLEWSKI, Piotr KISIELEWSKI, Krzysztof KLUSZCZYŃSKI, Czesław KOWALSKI, Marian ŁUKANISZYN, Krystyna MACEK-KAMIŃSKA, Zdzisław NAWROCKI, Lech NOWAK, Teresa ORŁOWSKA-KOWALSKA, Ryszard PAŁKA, Marian PASKO, Leszek PAWLACZYK, Marcin PAWLAK, Krzysztof PIENKOWSKI, Włodzimierz PRZYBOROWSKI, Mieczysław RONKOWSKI, Jan RUSEK, Tadeusz SOBCZYK, Leon SWĘDROWSKI, Wojciech SZELAĞ, Sławomir SZYMANIEC, Bronisław TOMCZUK, Artur WILCZYŃSKI, Paweł WITCZAK, Jan ZAWILAK, Tomasz ZAWILAK, Zdzisław ŻYCKI

Kolegium Redakcyjne

Ludwik ANTAL – redaktor naczelny,
Ignacy DUDZIKOWSKI,
Czesław KOWALSKI,
Zdzisław NAWROCKI,
Teresa ORŁOWSKA-KOWALSKA,
Jan ZAWILAK

Wydrukowano na podstawie dostarczonych materiałów

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właścicieli praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>

e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISSN 1733-0718

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 547/2012.

Spis rzeczy

TOM 1

Kazimierz ZAKRZEWSKI, Prace diagnostyczne w dziedzinie dużych transformatorów w Polsce	3
Mirosław DĄBROWSKI, Polskie osiągnięcia badawcze nad naciągami magnetycznymi w maszynach elektrycznych	17
Zbigniew GORYCA, Metody sterowania silników BLDC	32
Ján KAŇUCH, Želmíra FERKOVÁ, Design and electromagnetic field simulation of disk stepper motor with permanent magnets	48
Lukasz KNYPIŃSKI, Lech NOWAK, Algorytm optymalizacji magnetoelektrycznych silników synchronicznych z uwzględnieniem polowego modelu zjawisk elektromagnetycznych	60
Lukasz KNYPIŃSKI, Lech NOWAK, Dwuetapowa optymalizacja magnetoelektrycznych silników synchronicznych z uwzględnieniem współczynnika THD	70
Mariusz BARAŃSKI, Wojciech SZELAĞ, Cezary JĘDRYCZKA, Jacek MIKOŁAJEWICZ, Analiza silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim i magnesach w wirniku rozłożonych w kształcie litery U	78
Cezary JĘDRYCZKA, Wiesław ŁYSKAWIŃSKI, Jacek MIKOŁAJEWICZ, Rafał WOJCIECHOWSKI, Analiza struktur magnetoelektrycznych silników synchronicznych o rozruchu częstotliwościowym. Modelowanie	86
Cezary JĘDRYCZKA, Wiesław ŁYSKAWIŃSKI, Jacek MIKOŁAJEWICZ, Rafał WOJCIECHOWSKI, Analiza struktur magnetoelektrycznych silników synchronicznych o rozruchu częstotliwościowym. Obliczenia	92
Stefan BROCK, Tomasz PAJCHROWSKI, Bezczytnikowy i energooszczędny napęd wentylatora z silnikiem PMSM	98
Tomasz ZAWILAK, Wykorzystanie efektu wypierania prądu w rozruchu bezpośrednim maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi	105
Ludwik ANTAL, Paweł ZALAS, Rozruch magnetoelektrycznego silnika synchronicznego zasilanego z falownika	112
Ryszard PAŁKA, Piotr PAPLICKI, Rafał PIOTUCH, Marcin WARDACH, Analiza polowa i obwodowa silnika synchronicznego z magnesami trwałymi sterowanego regulatorem histerezy	122
Ryszard PAŁKA, Piotr PAPLICKI, Rafał PIOTUCH, Marcin WARDACH, Maszyna z magnesami o regulowanym wzbudzeniu – wybrane wyniki prac projektowych	128
Olgierd MAŁYSZKO, Ryszard PAŁKA, Sebastian SZKOLNY, Analiza stanów dynamicznych maszyny elektrycznej z regulacją strumienia magnesów trwałych do napędu samochodów	134
Wolf-Rüdiger CANDERS, Hardo MAY, Ryszard PAŁKA, Piotr PAPLICKI, Sebastian SZKOLNY, Model obwodowy maszyny elektrycznej z regulacją strumienia magnesów trwałych do napędu samochodów	140

Piotr PAPLICKI, Optymalizacja maszyny tarczowej z magnesami trwałymi z wykorzystaniem metod polowych	146
Konrad DĄBAŁA, Andrzej RUDENSKI, Silnik magnetoelektryczny tarczowy z twornikiem bez rdzenia ferromagnetycznego	152
Adrian MŁOT, Mariusz KORKOSZ, Marian ŁUKANISZYN, Analiza bezzłobkowego 3-fazowego generatora tarczowego dla małej przydomowej elektrowni wiatrowej	158
Adrian MŁOT, Mariusz KORKOSZ, Analiza wybranych parametrów całkowych bezzłobkowego 3-fazowego generatora tarczowego z podwójnym wirnikiem	164
Emil KRÓL, Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi w napędzie pojazdu hybrydowego	170
Robert ROSSA, Paweł PISTELOK, Generator z magnesami trwałymi do pracy w agregacie prądotwórczym	176
Robert ROSSA, Tomasz WOLNIK, Obliczenia charakterystyk obciążenia prądnic synchronicznych z magnesami trwałymi – porównanie wyników szybkiej metody polowo-obwodowej z wynikami analizy MES dla stanów przejściowych	182
Tomasz WOLNIK, Tadeusz GLINKA, Weryfikacja metod obliczeniowych silników tarczowych z magnesami trwałymi	190
Piotr BOGUSZ, Mariusz KORKOSZ, Adam MAZURKIEWICZ, Jan PROKOP, Modelowanie maszyny SRM jako układu o zmiennych indukcyjnościach przy użyciu programu PSpice	196
Piotr BOGUSZ, Mariusz KORKOSZ, Jan PROKOP, Silnik reluktancyjny przełączalny przeznaczony do napędu małego mobilnego pojazdu elektrycznego	203
Piotr BOGUSZ, Mariusz KORKOSZ, Jan PROKOP, Piotr WYGONIK, Badania laboratoryjne napędu hybrydowego bezzałogowego aparatu latającego	209
Piotr BOGUSZ, Mariusz KORKOSZ, Jan PROKOP, Piotr WYGONIK, Badania silnika BLDC przeznaczonego do hybrydowego napędu bezzałogowego aparatu latającego	215
Piotr BOGUSZ, Mariusz KORKOSZ, Jan PROKOP, Badania symulacyjne silników reluktancyjnych przełączalnych przeznaczonych do napędu wysokoobrotowego	221
Tomasz WĘGIEL, Model generatora synchronicznego z magnesami trwałymi współpracującego z przekształtnikowym układem generacyjnym	227
Wiesław JAŹDŻYNSKI, Martin BAJEK, A comparison of operation properties of a high-efficiency squirrel-cage induction motor and LSPMSM	238
Zbigniew GORYCA, Mariusz MALINOWSKI, Artur PAKOSZ, Wpływ kompensacji indukcyjności uzwojenia na napięcie wyjściowe wolnoobrotowej prądnicy do elektrowni wiatrowej	244
Marek CIURYS, Manswet BAŃKA, Ignacy DUDZIKOWSKI, Prądnica trójfazowa małej mocy wzbudzana magnesami trwałymi	251
Marek CIURYS, Ignacy DUDZIKOWSKI, Paweł KMIEĆ, Analiza wpływu sposobu namagnesowania magnesów na przebiegi czasowe wielkości elektrycznych i mechanicznych w silniku bezszczotkowym	258
Maciej GWOŹDZIEWICZ, Jan ZAWILAK, Influence of the permanent magnets arrangement on the single-phase line start permanent magnet synchronous motor performances	267
Filip KUTT, Grzegorz KOSTRO, Michał MICHNA, Mieczysław RONKOWSKI, Study of prototype multi-pole non-salient field winding for high speed brushless synchronous generator	273
Jerzy PODHAJECKI, Sławomir SZYMANIEC, Wpływ warunków brzegowych na formę odkształceń drgań własnych i wymuszonych stojana silnika BLDC – analiza numeryczna	279
Jerzy PODHAJECKI, Sławomir SZYMANIEC, Wpływ ekscentryczności statycznej wirnika i niejednakowego namagnesowania magnesów na postać deformacji stojana w silniku BLDC	285
Andrzej SIKORA, Adam ZIELONKA, Stanowisko do badania silnika BLDC z możliwością zadania prędkości i momentu obciążenia	291
Zdzisław KRZEMIENI, Praca równoległa prądnic synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi	298

Andrzej WAINDOK, Obliczanie i pomiar nagrzewania tubowego silnika liniowego z magnesami trwałymi	304
Bogusław KAROLEWSKI, Paweł LUDWICZAK, Tomasz WALSZCZAK, Budowa modelu prądnicy tarczowej	312
Dominik ADAMCZYK, Michał MICHNA, Mieczysław RONKOWSKI, Uniwersalny model symulacyjny układu napędowego prototypu samochodu elektrycznego „ELV001”	319
Jean-Francois ROUCHON, Dominique HARRIBEY, Duc-Hoan TRAN, Roland RYNDZIONEK, Łukasz SIENKIEWICZ, Mieczysław RONKOWSKI, Hybrid piezoelectric motor based on electroactive lubrication principle	326
Masen AL NAHLAOU, Hendrik STEINS, Stefan KULIG, Sven EXNOWSKI, Comparison of numerically determined noise of a 290 kW induction motor using FEM and measured acoustic radiation	333
Bronislav FIRAGO, Dmitry VASILYEV, Soft starting and braking application for squirrel-cage induction motors operating in intermittent duty	339
Petr ORSAG, Stanislav KOCHAN, Pavel SVOBODA, The influence of power quality of the mains on operation characteristics of an uncontrolled and controlled induction motor	350
Alejandro FERNANDEZ GOMEZ, Tadeusz J. SOBCZYK, Influence of design data of induction motor on effects of cage asymmetry	357
Jan MRÓZ, Znaczenie zjawisk termicznych w nieustalonych stanach elektromechanicznych silników dwuklatkowych	365
Piotr MYNAREK, Marcin KOWOL, Marian ŁUKANISZYN, Modelowanie, analiza i weryfikacja zjawisk cieplnych na przykładzie 3-fazowego silnika indukcyjnego	371
Marcin NOWAK, Wojciech PIETROWSKI, Stanisław RAWICKI, Udoskonalony dobór pojemności kondensatora przy pracy jednofazowej silnika indukcyjnego z trójfazowym uzwojeniem stojana	377
Wojciech PIETROWSKI, Field-circuit analysis of AC machine taking into account stator winding asymmetry	386
Radosław FIGURA, Leszek SZYCHTA, Wpływ błędów pomiarowych na charakterystykę estymacji współczynnika sprawności silnika indukcyjnego klatkowego	393

TOM 2

Zbigniew Hilary ŻUREK, Dominik KUKLA, Dariusz BARON, Materiałowe warunki brzegowe blach elektrotechnicznych krzemowych	3
Zbigniew Hilary ŻUREK, Dariusz BARON, Pomiar zmian wartości przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej właściwej kołpaków generatorów	9
Andrzej BYTNAR, Roman KROK, Badanie przyczyn nadmiernego nagrzewania się elementów skrajnych rdzenia stojana dużego turbogenerатора	15
Michał RADZIK, Tadeusz J. SOBCZYK, Analiza pracy maszyny synchronicznej przy zaburzeniach momentu mechanicznego zależnych od kąta obrotu	24
Henryk BANACH, Modernizacja układu wentylacyjnego maszyn elektrycznych jako środek do ograniczania emisji hałasu	30
Piotr DROZDOWSKI, Arkadiusz DUDA, Matlab-Simulink modelling of induction machine incorporating magnetic saturation	38
Błażej Jakubowski, Krzysztof Pieńkowski, Autonomiczne generatory indukcyjne z przekształtnikami typu STATCOM	45
Mateusz DYBKOWSKI, Grzegorz TARCHAŁA, Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi w zastosowaniach trakcji miejskiej	53

Dominik ŁUCZAK, Identification of the parameters of multi-mass direct drive system	62
Piotr DERUGO, Mateusz DYBKOWSKI, Krzysztof SZABAT, Adaptacyjne wektorowe sterowanie układem napędowym z połączeniem sprzężystym	67
Błażej JAKUBOWSKI, Krzysztof PIENKOWSKI, Synteza przekształtnikowego układu sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym. Część I – Analiza	77
Błażej JAKUBOWSKI, Krzysztof PIENKOWSKI, Synteza przekształtnikowego układu sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym. Część II – Badania symulacyjne	85
Marcin KAMIŃSKI, Mateusz DYBKOWSKI, Badania eksperymentalne estymatora MRAS ^{CC} z neuronowym mechanizmem wyznaczania prędkości kątowej	92
Sebastian KNYCHAS, Parametryzacja neuronowo-rozmytych regulatorów typu TSK pracujących w adaptacyjnej strukturze sterowania prędkością układu napędowego	102
Piotr J. SERKIES, Zastosowanie sterowania predykcyjnego w układzie napędowym z silnikiem indukcyjnym	111
Piotr J. SERKIES, Krzysztof SZABAT, Adaptacyjny filtr Kalmana dla układu napędowego z połączeniem sprzężystym	118
Grzegorz TARCHAŁA, Teresa ORŁOWSKA-KOWALSKA, Khanh NGUYEN-THAC, Mateusz DYBKOWSKI, Analiza bezczujnikowego indukcyjnego napędu trakcyjnego z optymalnym algorytmem osłabiania pola	125
Than TRAN VAN, Marcin KAMIŃSKI, Krzysztof SZABAT, Rozmyty obserwator Luenbergera dla układu napędowego z połączeniem sprzężystym	135
Piotr SOBAŃSKI, Teresa ORŁOWSKA-KOWALSKA, Analiza wpływu uszkodzenia tranzystora IGBT falownika napięcia na przebiegi zmiennych stanu w napędzie indukcyjnym	145
Andrzej BOBOŃ, Stefan PASZEK, Marian PASKO, Piotr PRUSKI, Maria BOJARSKA, Porównanie wyników estymacji parametrów różnych modeli generatorów synchronicznych uzyskanych na podstawie testów pomiarowych	153
Adrian NOCOŃ, Dominik SZUSTER, Badania symulacyjne stanów przejściowych generatorów źródeł rozproszonych	160
Tadeusz GLINKA, Bronisław DRAK, Mocowanie chorągiewek w silnikach prądu stałego dużej mocy	166
Paweł IDZIAK, Krzysztof KOWALSKI, Numeryczne modelowanie wpływu asymetrii przepływu uzwojeń kompensacyjnych na przebieg komutacji	175
Piotr ZIENTEK, Drogi przepływu prądów łożyskowych w układach napędowych dużej mocy zasilanych napięciem sieciowym	183
Sławomir SZYMANIEC, Zbigniew PLUTECKI, Praca maszyn elektrycznych w różnych warunkach mikroklimatycznych	189
Sławomir SZYMANIEC, Zbigniew PLUTECKI, Wpływ warunków otoczenia na emisję wyładowań niezupełnych w maszynach elektrycznych	200
Dariusz KOTERAS, Analiza pola magnetycznego w próbkach otwartych i zamkniętych magnetycznie	211
Bronisław TOMCZUK, Dawid WAJNERT, Wpływ kształtu zębów stojana siłownika łożyska magnetycznego na jego parametry elektromagnetyczne	218
Andriy CZABAN, Marek LIS, Model matematyczny i analiza układu napędowego silnika indukcyjnego z długim elementem sprzężystym dla parametrów rozłożonych	224
Andrzej POPENDA, Modelowanie procesów elektromechanicznych w układzie napędowym reaktora polimeryzacji	231
Andrzej RUSEK, Zastosowanie charakterystyk rzeczywistego obciążenia reaktora polimeryzacji do stanów dynamicznych układu napędowego z silnikiem indukcyjnym specjalnego wykonania	238
Andrzej RUSEK, Andrzej POPENDA, Analiza stanów dynamicznych samotokowej linii transportowej z uwzględnieniem różnych długości elementu transportowanego	244

rzegorz KAMIŃSKI, Paweł GÓRALSKI, Przetwornik położenia o ruchu złożonym o wspólnym obwodzie magnetycznym	250
onrad WALECKI, Analiza elektromechanicznego przetwornika momentu i prędkości obrotowej	260
ławomir WRÓBLEWSKI, Andrzej BYTNAR, Przemysław JUSZKIEWICZ, Predykcja czasu życia turbogeneratorsa na podstawie obserwacji trendu zmian poziomu wibracji	267
ławomir WRÓBLEWSKI, Andrzej BYTNAR, Analiza odkształceń stojana turbogeneratorsa wywołanych zjawiskami magnetycznymi i elektromagnetycznymi	273
Andrzej WILK, Implementacja modelu histerezy Preisacha ze sprzężeniem zwrotnym do modelowania histerezy magnetycznej rdzenia transformatora zwijanego z blachy	281
Piotr GNACIŃSKI, Marcin PEPLIŃSKI, Wpływ wahań napięcia na obciążenia cieplne silnika indukcyjnego – badania wstępne	287
Michał BONISŁAWSKI, Rafał PAJDIK, Krzysztof PIETRUSEWICZ, Szybkie prototypowanie algorytmów sterowania napędami zespołów posuwowych stolika X-Y frezarki z silnikami synchronicznymi prądu zmiennego ze wzbudzeniem od magnesów trwałych	293
Marcin HOŁUB, Stanisław KALISIAK, Marcin MARCINEK, Ryszard PAŁKA, Metoda aktywnej kompensacji zmian indukcyjności rozproszenia w transformatorze bezrdzeniowym	302
Piotr KISIELEWSKI, Ludwik ANTAL, Zjawiska w obwodach tłumiących podczas zakłóceń pracy turbogeneratorsa	309
Ludwik ANTAL, Maciej GWOŹDZIEWICZ, Tomasz MARCINIAK, Maciej ANTAL, Badania skutków cieplnych zwarć zwojowych w uzwojeniach stojana silnika indukcyjnego	315
Marcin WOLKIEWICZ, Czesław T. KOWALSKI, Zastosowanie sieci neuronowych do wykrywania i lokalizacji zwarć zwojowych silnika indukcyjnego zasilanego z przekształtnika częstotliwości	324
Marcin PAWLAK, Zdalny system pomiarowy silnika indukcyjnego dla urządzeń przenośnych z systemem android	332
Paweł EWERT, Czesław T. KOWALSKI, Zastosowanie analizy falkowej do diagnostyki łożysk tocznych silników indukcyjnych	338
Krzysztof P. DYRCZ, Marcin PAWLAK, Automatyczny system sterowania i monitorowania oczyszczalni ścieków	345
Krystyna MACEK-KAMIŃSKA, Marcin KAMIŃSKI, Metody realizacji wybranych algorytmów numerycznych do modelowania układów elektromechanicznych za pomocą aplikacji internetowej	353
Daniel DUSZA, Właściwości metrologiczne przekładnika Brooksa i Holtza	359
Józef NOWAK, Jerzy BAJOREK, Dominika GAWORSKA-KONIAREK, Tomasz JANTA, Kompensacja uogólnionej mocy biernej	369
Piotr PRUSKI, Stefan PASZEK, Ocena stabilności kątowej krajowego systemu elektroenergetycznego na podstawie analizy przebiegów zakłóceńowych mocy chwilowej	377
Krzysztof BILLEWICZ, Load management via AMI and risk of overloading the power system	383
Wojciech URBĄSKI, Aktualne zagadnienia nauczania maszyn elektrycznych zgodnie z procesem bolońskim oraz krajowymi ramami kwalifikacji	388
Jan SZCZYPIOR, Rafał JAKUBOWSKI, Konstrukcja maszyny do napędu samochodu elektrycznego o specjalnych wymaganiach	395
Jan SZCZYPIOR, Rafał JAKUBOWSKI, Układ chłodzenia i obliczenia cieplne maszyny z magnesami trwałymi i zewnętrznym wirnikiem	407

Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w księgarni „Tech”
plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław
budynek D-1 PWr., tel. 71 320 29 35
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową
zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISSN 1733-0718

*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 wzbudzanej 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

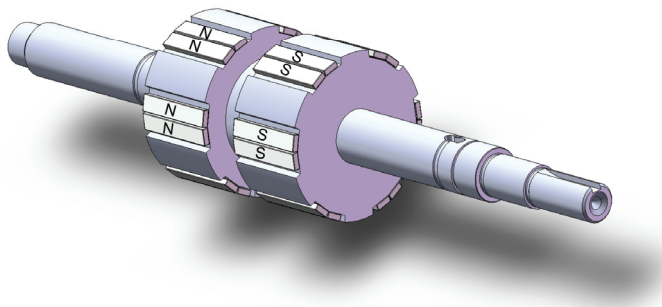
* Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin; rpalka@zut.edu.pl, paplicki@zut.edu.pl, marwar@zut.edu.pl, rpiotuch@zut.edu.pl

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

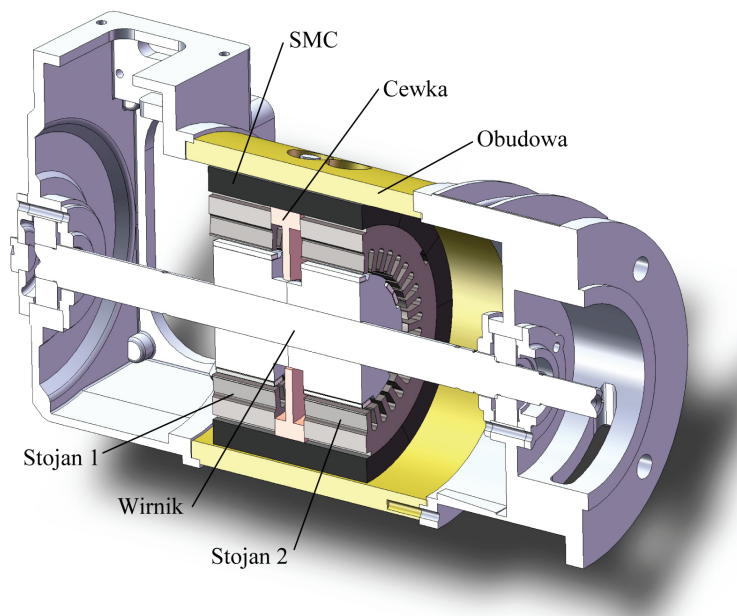
Wirnik proponowanej maszyny ECPSM, zaprezentowanej na rys. 1, składa się z dwóch identycznych części. Jedna z tych części posiada magnesy trwałe spolaryzowane w kierunku zewnętrznym (biegun północny), natomiast druga – spolaryzowana jest w kierunku przeciwnym. Cechą charakterystyczną tego układu jest 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.



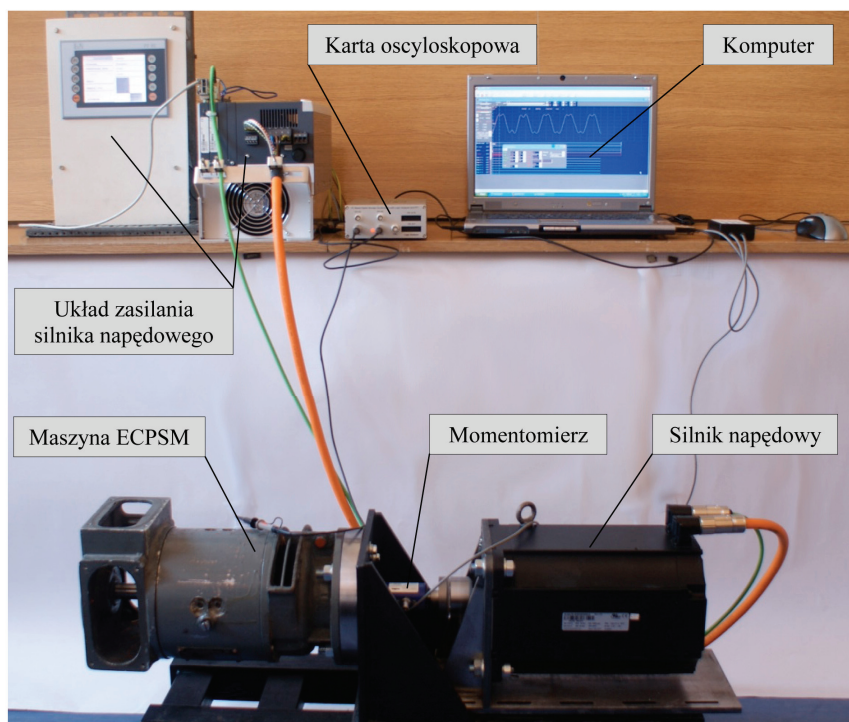
Rys. 2. Przekrój maszyny ECPSM
Fig. 2. Cross-section of the ECPS-machine

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

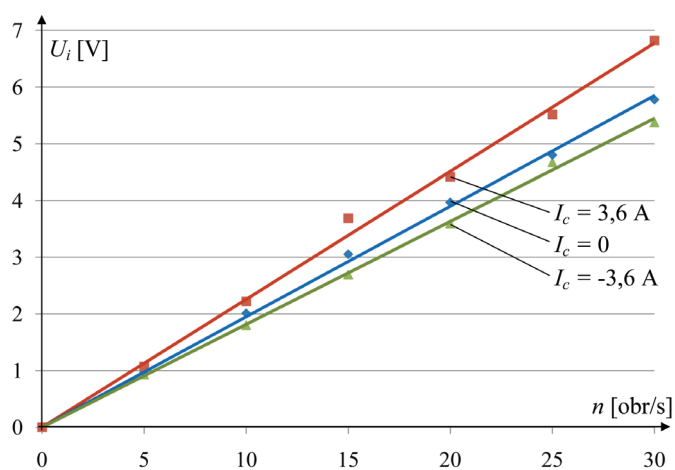
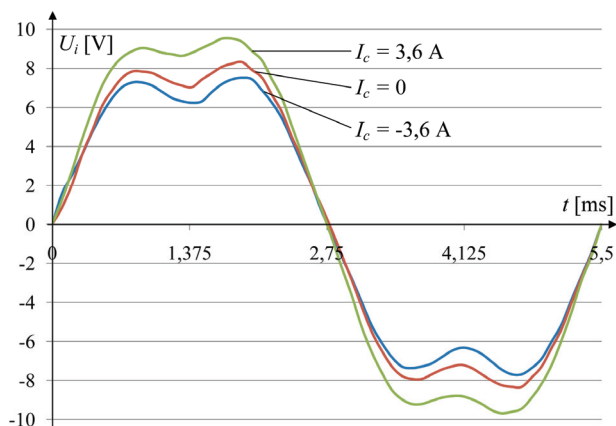
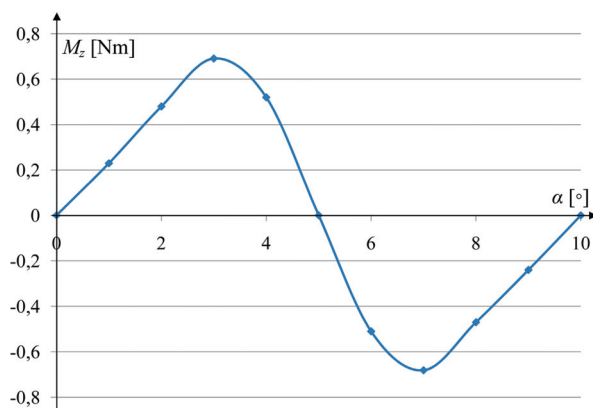
Rys. 4. Charakterystyka zależności wartości skutecznej napięcia indukowanego U_i od prędkości obrotowej n dla trzech wartości prądu zasilania cewki pomocniczej I_c Fig. 4. Induced voltage value U_i vs. rotational speed n for three values of the auxiliary coil current I_c

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., PALKA 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.