

Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów  
i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej

66

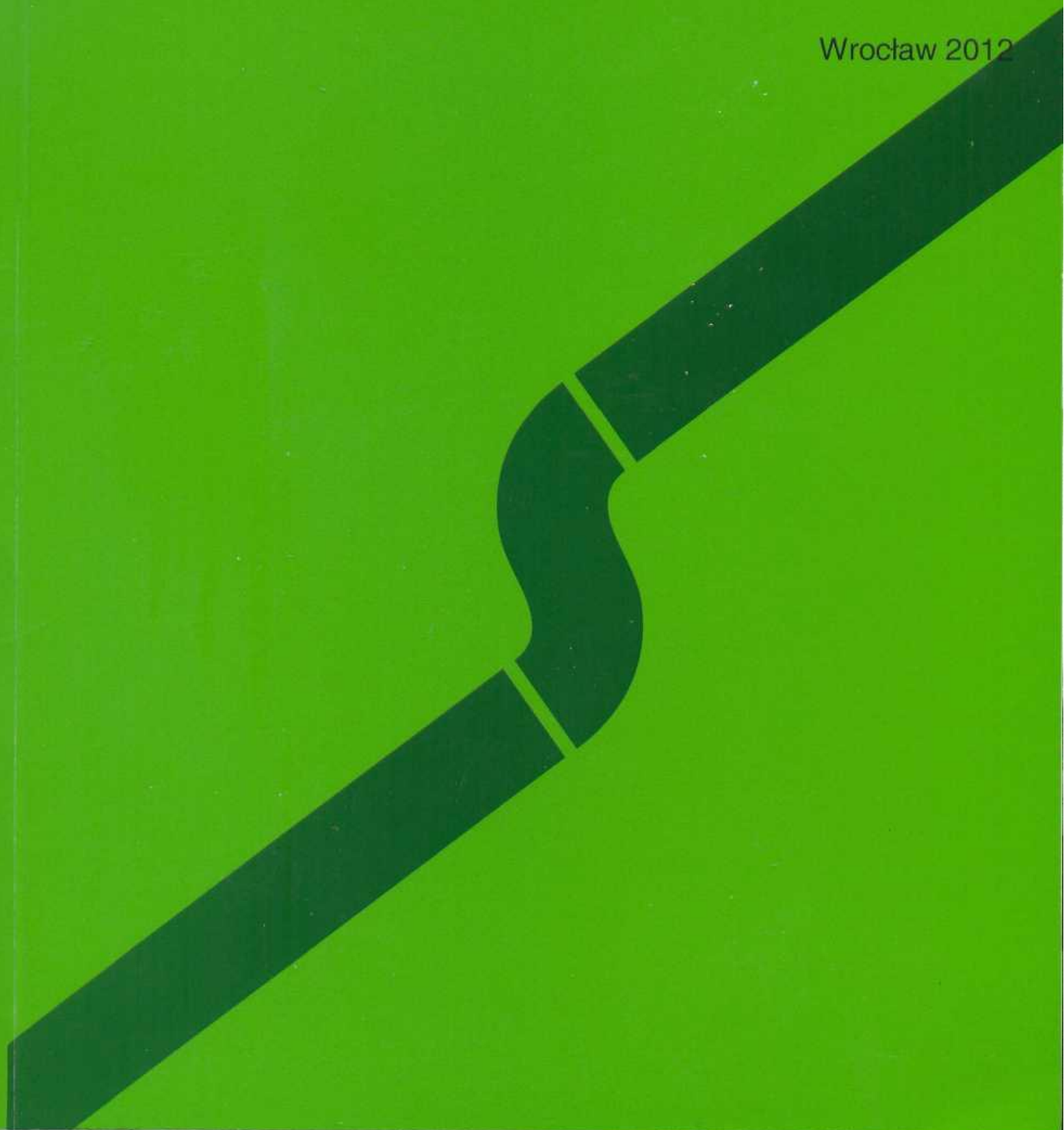
Seria: Studia i Materiały

32

# 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



## 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](mailto:oficwyd@pwr.wroc.pl)

[zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl](mailto: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 DAJBROWSKI, 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 KNYPÍŃSKI, Lech NOWAK, Algorytm optymalizacji magnetoelektrycznych silników synchronicznych z uwzględnieniem polowego modelu zjawisk elektromagnetycznych .....	60
Lukasz KNYPÍŃSKI, 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, Bezczylnikowy 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 prądowórczym .....	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 turbogeneratora .....	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 LUCZAK, 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 <sup>CC</sup> 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 wywoływanych 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 URBAŃSKI, 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 synchroniczna, regulator histerezy  
analiza polowa, analiza obwodowa*

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

## **ANALIZA POŁOWA I OBWODOWA SILNIKA SYNCHRONICZNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI STEROWANEGO REGULATOREM HISTEREZOWYM**

W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych pewnej maszyny z magnesami trwałymi umocowanymi na wirniku z zewnętrznym pakietowanym stojanem o konstrukcji konwencjonalnej, sterowanej regulatorem histerezy. Celem przeprowadzonych badań była analiza możliwości wykorzystania modelu polowo-obwodowego maszyny do poprawienia jakości regulacji. Na podstawie badań symulacyjnych wykorzystujących metodę elementów skończonych wyznaczono przebieg prądów, prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego i porównano je z wynikami metody obwodowej. Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano wnioski dotyczące możliwości wykorzystania metody elementów skończonych i metod obwodowych w procesie syntezy regulatorów prądu.

### **1. WSTĘP**

W układach napędowych z silnikami synchronicznymi ze wzbudzeniem od magnesów trwałych PMSM (ang. *Permanent Magnet Synchronous Motor*) przekształtnik pełni rolę wzmacniacza mocy, który zamienia sygnały wygenerowane w układzie sterowania na sygnały o mocy koniecznej do zasilania sterowanego silnika. Wektorowe układy sterowania silników PMSM z orientacją względem wektora pola FOC (ang. *Field Oriented Control*) wypracowują odpowiednie sygnały sterujące, które wymuszają taki prąd w maszynie, aby spełniony był nadrzędny cel regulacji. Wykorzystanie prądów jako wielkości regulowanych oraz transformacji prądów opisanych w układzie trójfazowym do układu dwufazowego wirującego synchronicznie z wektorem pola daje możliwość sterowania silnikiem PMSM w sposób zbliżony do sterowania ob-

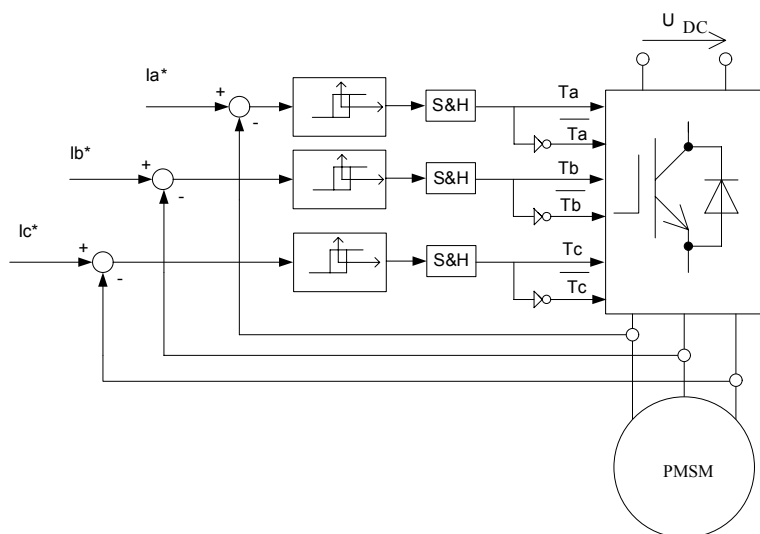
---

\* 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

cowzbudnym silnikiem prądu stałego, gdzie istnieje możliwość niezależnego kształtowania zarówno strumienia jak i momentu elektromagnetycznego (przy zadanym strumieniu) [6]. W pętli prędkości zazwyczaj wykorzystywane są regulatory PI [4, 9]; w torze prądowym proponowane różne inne regulatory, ale bardzo popularną ze względu na prostotę i pewność działania jest regulator histerezowy. Coraz większe zainteresowanie analizą polową w celu projektowania i optymalizacji maszyn elektrycznych [5] skłoniło autorów do analizy możliwości poprawy jakości regulacji napędu przy wykorzystaniu regulatora histerezowego.

## 2. HISTEREZOWY REGULATOR PRĄDU

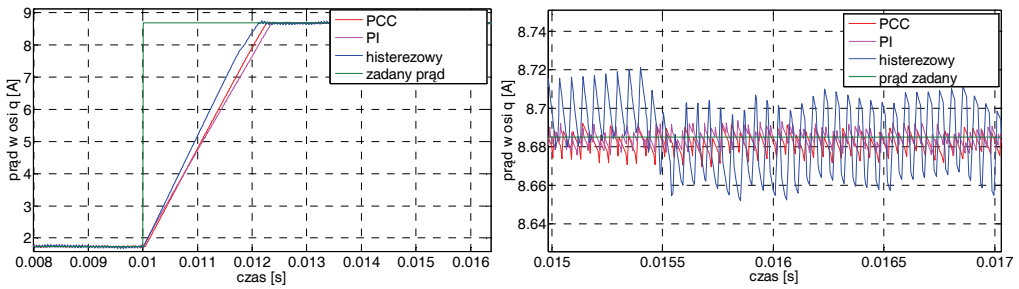
Regulator histerezowy należy do grupy regulatorów nieliniowych, które w najprostszej konfiguracji działają na podstawie detekcji znaku uchybu prądu. Zmiana znaku uchybu prądu np. w danej fazie jest wykrywana przez układ sterowania, który wymusza pożądaną zmianę natężenia prądu poprzez odpowiednią zmianę stanu łączników energoelektronicznych. W regulatorze nieliniowym zbudowanym z wykorzystaniem idealnego komparatora warunek odtwarzania prądu zadanego z zerowym lub bliskim zeru uchybem prowadzi do wzrostu częstotliwości modulacji do nieskończoności. W konsekwencji straty w nich wydzielane mogą prowadzić do zniszczenia struktury półprzewodnikowej [6]. W związku z tym proponuje się wprowadzenie pętli histerezy w komparatorze.



Rys. 1. Schemat predykcyjnego regulatora prądu

Fig. 1. Predictive current controller scheme





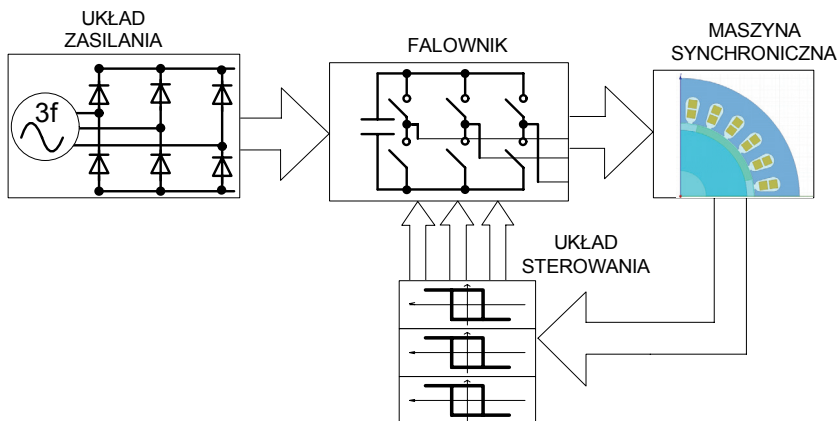
Rys. 2. Porównanie działania wybranych regulatorów prądu [4]  
 Fig. 2. Comparison between selected current controllers [4]

Znakomite właściwości regulacyjne wraz z prostotą i niezawodnością czynią regulator histerezyowy powszechnie wykorzystywanym regulatorem w przemyśle.

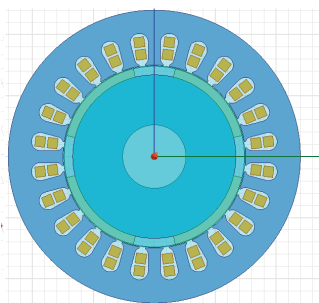
### 3. BADANIA SYMULACYJNE

#### 3.1. ŚRODOWISKO PROGRAMISTYCZNE

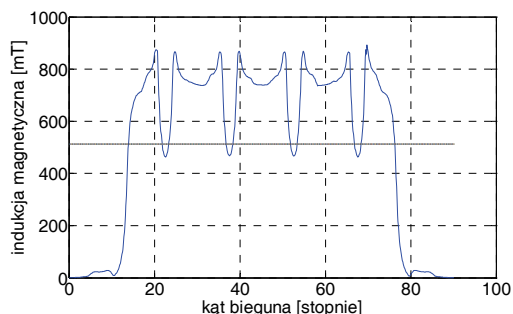
Badania symulacyjne zostały wykonane w programach Matlab, Simplorer oraz Maxwell. Schemat ideowy badanego układu przedstawia rys. 3. W programie Simplorer oraz Matlab został zamodelowany prezentowany układ. Model silnika został wygenerowany z wykorzystaniem narzędzia RMxprrt, a na jego podstawie stworzono model 2D. Dodatkowo wykorzystano mechanizm połączenia obu pakietów symulacyjnych – Simplorer i Maxwell (rys. 4).



Rys. 3. Schemat ideowy badanego układu  
 Fig. 3. Idea scheme of the examined circuit



Rys. 4a. Model silnika 2D  
Fig. 4a. 2D motor model

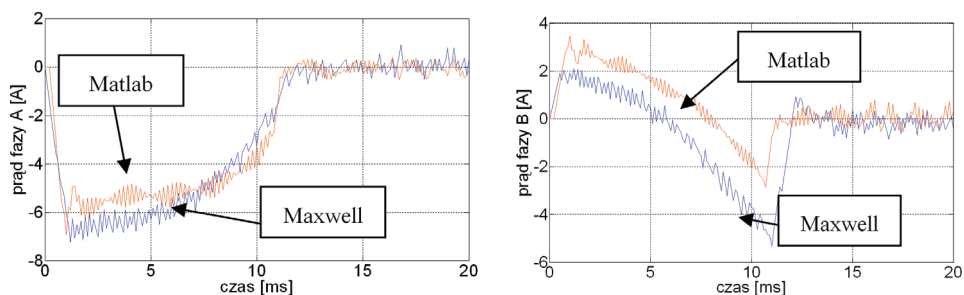


Rys. 4b. Indukcja w szczelinie wyznaczona metodą MES  
Fig. 4b. Flux magnetic density calculated with FEM

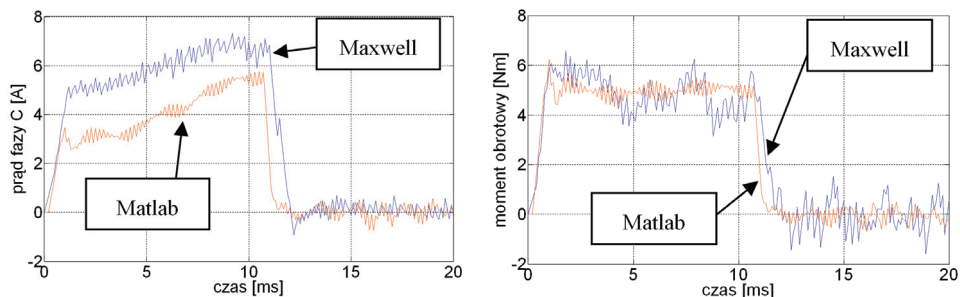
Wybrane parametry maszyny:

$$R_a = 4,7 \text{ Ohm}, L_d = 0,032 \text{ mH}, L_q = 0,032 \text{ mH}, J = 0,0015 \text{ kgm}^2, p = 2$$

niezbędne do przeprowadzenia badań symulacyjnych, zostały wyznaczone na podstawie metody analitycznej w programie Maxwell (RMxprt) oraz symulacji MES. Porównanie wybranych wyników badań symulacyjnych (przebiegi czasowe prądów fazowych oraz momentu obrotowego) przedstawiono na rys. 5 i 6.



Rys. 5. Porównanie wyników dla modelu obwodowego (Matlab i Simplorer) – prądy fazowe  
Fig. 5. Comparison of results (Matlab and Simplorer) – phase currents



Rys. 6. Porównanie wyników dla modelu obwodowego (Matlab, Maxwell) – prąd i moment  
Fig. 6. Comparison of results (Matlab and Maxwell) – current and torque



#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Porównanie wyników uzyskanych w różnych pakietach symulacyjnych wykazuje dużą zbieżność. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem analizy polowej dają zdecydowanie szerszy obraz procesów zachodzących w maszynie. Pozwalają poznać rozkład pola w każdej chwili czasu, a także pozwalają uwzględnić zjawisko nasycenia obwodu magnetycznego. Wykorzystanie analizy polowej i analizy obwodowej modelu maszyny oraz obwodów elektrycznych wydaje się stwarzać nowe możliwości w procesie syntezy regulatorów prądu. Wiele nowoczesnych regulatorów prądu bazuje na modelu obwodowym, podczas gdy dzisiejsze techniki symulacji komputerowej pozwalają w sposób bardzo dokładny wyznaczyć parametry maszyny i uwzględnić zachodzące w niej zjawiska w procesie syntezy regulatora już na etapie projektowania maszyny.

*Praca finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki, nr projektu N N510 508040 (2011–2013).*

#### LITERATURA

- [1] GIERAS J., WING M., *Permanent Magnet Motor Technology Design and Applications*, University of Cape Town Rondebosch, South Africa, 1997.
- [2] KAJSTURA K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Sterowanie ślizgowe silnikiem indukcyjnym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, 2004.
- [3] OHM D.Y., *Dynamic Model of PM Synchronous Motors*, Drivetech, Inc., Blacksburg, Virginia, 2000.
- [4] PIOTUCH R., PAŁKA R., *Porównanie wybranych regulatorów prądu w układzie sterowania silnikiem synchronicznym ze wzbudzeniem od magnesów trwałych*, Maszyny Elektryczne, Zeszyty problemowe Nr 93 (2011), 173–178.
- [5] PUTEK P., PAPLICKI P., SŁODIČKA M., PAŁKA R., *Minimization of cogging torque in permanent magnet machines using the topological gradient and adjoint sensitivity in multi-objective design*, Proc. of ISEM 2011, Napoli, Italy 2011.
- [6] RUSZCZYK A., *Nowe algorytmy predykcyjnych metod regulacji prądów przekształtników AC/DC i DC/AC*, rozprawa doktorska. PB, 2005.
- [7] RUSZCZYK A., SIKORSKI A., *Trójfazowy falownik napięcia do zastosowań napędowych z predykcyjnym regulatorem prądu*, Przegląd Elektrotechniczny, 2008, Vol. 84, No.4.
- [8] SOBCZUK D., *Application of ANN for PMSM of Inverter Fed Induction Motor Drives*, PhD Thesis, Warszawa 1999.
- [9] ŚWIERCZYŃSKI D., *Direct Torque Control with Space Vector Modulation (DTC-SVM) of Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motor Drive*, PhD Thesis, PW, 2005.
- [10] TUNIA H., KAŻMIERKOWSKI M., *Podstawy automatyki napędu elektrycznego*, PWN, Warszawa 1983.
- [11] UTKIN V., GULDNER J., SHI J., *Taylor&Francis Sliding-Mode Control in Electromechanical Systems*, London, 1999.

## FIELD AND CIRCUIT ANALYSIS OF PM SYNCHRONOUS MACHINE WITH HYSTHERESIS CURRENT CONTROLLER

The paper presents results of simulations of a synchronous motor with PM mounted on a rotor controlled with hysteresis current controller. The aim of the research was to show the possibility of using field-circuit analysis for increasing control quality. Based on a 2D simulations using Finite Element Method and control circuit designed in Simplorer, speed, current and torque signals were calculated and the results were compared with circuit analysis carried out in Matlab/Simulink.