

Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Jan Prokop  
Politechnika Rzeszowska, Rzeszów

## BADANIA MASZYNY RELUKTANCYJNEJ PRZEŁĄCZALNEJ PRZEZNACZONEJ DO NAPĘDU LEKKIEGO POJAZDU ELEKTRYCZNEGO

### STUDIES OF SWITCHED RELUCTANCE MACHINE FOR LIGHTWEIGHT ELECTRIC VEHICLE

**Streszczenie:** W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych napędu z prototypową maszyną reluktancyjną przełączalną o konfiguracji 8/6 przeznaczoną do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego. Badania zrealizowano na specjalnie zaprojektowanym i wykonanym stanowisku badawczym. W ramach prac badawczych dla pracy silnikowej i podstawowych metod sterowania maszyny SRM wyznaczono charakterystyki mechaniczne oraz sprawności.

**Abstract:** In the paper, the results of laboratory studies of drive with the prototype 8/6 switched reluctance machine for lightweight electric vehicle were presented. The studies were carried out on the designed and realized laboratory stand. The mechanical and efficiency characteristics of switched reluctance machine under classic control methods for motoring operation were determined.

**Słowa kluczowe:** maszyna reluktancyjna przełączalna, pojazd elektryczny, badania laboratoryjne  
**Keywords:** switched reluctance machine, electric vehicle, laboratory tests

#### 1. Wstęp

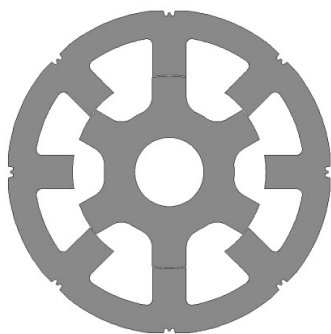
Do napędu lekkich pojazdów elektrycznych przez długi okres czasu stosowano silniki komutatorowe szeregowe i obcowzbudne prądu stałego. Jednak ze względu na stosunkowo niską sprawność, wysoką awaryjność oraz konieczność częstych przeglądów maszyny tego typu są zastępowane maszynami bezkomutatorowymi z magnesami trwałymi typu PMSM (ang. Permanent Magnet Synchronous Machines) i BLDCM (ang. Brushless DC Machines) oraz indukcyjnymi (ang. Induction Machines) i reluktancyjnymi przełączalnymi (ang. Switched Reluctance Machines – SRM). Najkorzystniejsze parametry eksploatacyjne uzyskuje się stosując napędy z maszynami typu PMSM i BLDC. Maszyny tego typu posiadają bardzo wysoką sprawność oraz małe gabaryty wynikające z zastosowania wysokoenergetycznych magnesów trwałych. Ich wadą jest wysoka cena oraz postępująca z czasem degradacja magnesów wynikająca z procesu starzenia. W maszynach z magnesami trwałymi istnieje ryzyko rozmagnesowania się magnesów pod wpływem zbyt silnego pola pochodzącego od uzwojeń stojana. Drugą grupą maszyn stosowanych do napędu pojazdów elektrycznych są maszyny indukcyjne, które posiadają gorsze parametry eksploatacyjne niż maszyny bezkomutatorowe

z magnesami trwałymi, ale są tańsze w produkcji. Kolejną grupą maszyn bezkomutatorowych braną pod kątem stosowania do napędu pojazdów elektrycznych są maszyny reluktancyjne przełączalne. Maszyny te posiadają bardzo prostą konstrukcję i są tanie w produkcji. Jednak wadą ich są duże pulsacje momentu i głośna praca [1].

Celem niniejszej pracy jest prezentacja wyników badań laboratoryjnych czteropasmowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej o konfiguracji 8/6 zaprojektowanej w Zakładzie Elektrodynamiki i Systemów Elektromaszynowych Politechniki Rzeszowskiej.

#### 2. Obiekt badań

Obiektem badań jest czteropasmowa maszyna reluktancyjna przełączalna o konfiguracji 8/6. Przekrój poprzeczny maszyny przedstawiono na rysunku 1, a podstawowe parametry zestawiono w tabeli 1. Wyniki badań symulacyjnych prowadzonych na etapie projektu maszyny przedstawiono w pracy [2].

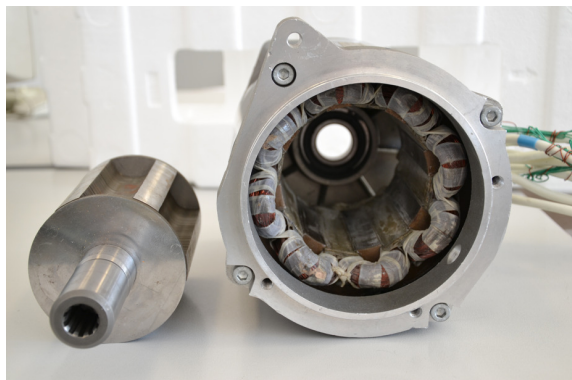


Rys. 1. Przekrój poprzeczny czteropasmowej maszyny SRM o konfiguracji 8/6

Tabela 1. Podstawowe parametry maszyny SRM

Liczba pasm $N$	4
Liczba biegunów stojana $N_s$	8
Liczba zębów wirnika $N_r$	6
Średnica zewnętrzna stojana $d_{se}$ [mm]	169
Grubość szczeliny powietrznej $\delta$ [mm]	0,5
Kąt bieguna stojana $\beta_s$ [°]	20
Kąt zęba wirnika $\beta_r$ [°]	20,5
Napięcie znamionowe [V]	48
Moc znamionowa [kW]	3,3

Zaprojektowaną maszynę SRM wykonano, a jej widok przedstawiono na rysunku 2.

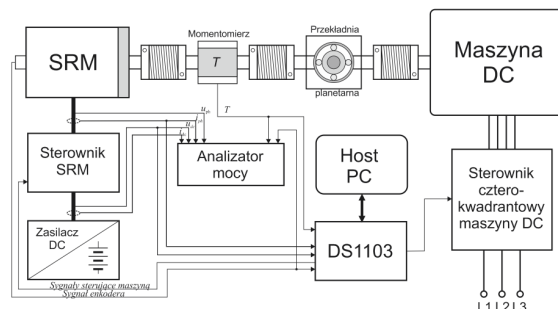


Rys. 2. Widok czteropasmowej maszyny SRM o konfiguracji 8/6

### 3. Stanowisko badawcze

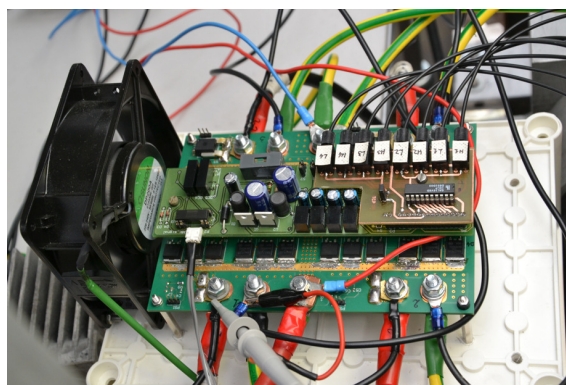
Do badania wykonanego prototypu maszyny SRM zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze, którego szczegółowy opis przedstawiono w pracy [3]. Schemat blokowy stanowiska przedstawiono na rysunku 3. Stanowisko to posiada możliwość badania maszyn SRM zarówno przy pracy silnikowej jak i generatorowej. Ponadto, przy jego niewielkiej modyfikacji istnieje możliwość testowania stanów dynamicznych maszyny niezależnie od

stanu naładowania akumulatorów. Jest to bardzo istotna właściwość, bo cena akumulatorów jest wysoka, a ich trwałość ograniczona.



Rys. 3. Schemat blokowy stanowiska badawczego

Do sterowania czteropasmowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej zastosowano klasyczny półmostek typu H [1], w którym na jedno pasmo przypadają dwa tranzystory i dwie diody. Taka topologia układu zasilania umożliwia w pełni zastosowanie sterowania czterokwadrantowego maszyny SRM. Widok zaprojektowanego i wykonanego przez autorów sterownika przedstawiono na rysunku 4. Układ mocy przeznaczony do zasilania maszyny SRM wyposażono w interfejs pozwalający na sterowanie zarówno z karty prototypującej DS1103, jak również z autonomicznego modułu procesora sygnałowego. Płytkę modułu mocy zaprojektowano, tak aby dobrze odprowadzała ciepło wydzielane na tranzystorach i diodach, dzięki czemu nie ma konieczności stosowania radiatorów.



Rys. 4. Prototypowy układ sterowania czteropasmowej maszyny SRM

Jednak w przypadku pracy maszyny z pełną mocą, płytka wymaga chłodzenia wymuszonego.

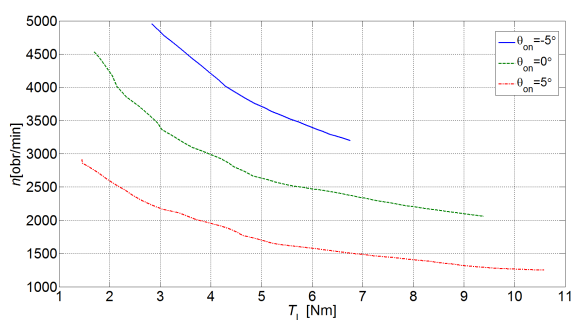
## 4. Wyniki badań laboratoryjnych

### 4.1. Wyznaczanie charakterystyk mechanicznych

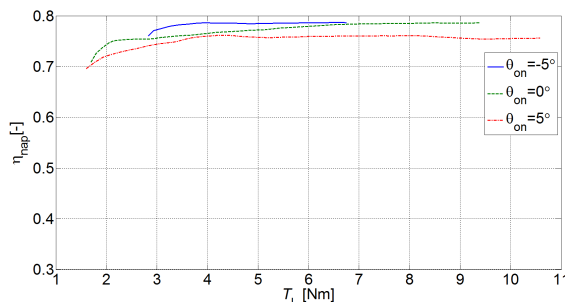
#### *Badania przy zasilaniu napięciem $U_{dc}=36\text{ V}$*

Rejestrację charakterystyk naturalnych maszyny SRM 8/6 w szerokim zakresie obciążenia przeprowadzono przy obniżonym napięciu zasilającym ( $U_{dc}=36\text{ V}$ ) i sterowaniu jednopulsowym. Wynikało, to z ograniczeń stanowiska badawczego, którego dopuszczalna prędkość wynosiła  $n_{gr}=5000\text{ obr/min}$ . Prędkość ta była podyktowana ograniczeniami zarówno przekładni planetarnej, jak i maszyny obciążającej. Ponieważ silnik SRM posiada charakterystykę mechaniczną zbliżoną do silnika szeregowego DC, niewielka zmiana obciążenia powoduje znaczące zmiany prędkości obrotowej. W związku z powyższym zastosowano zabezpieczenie programowe, które przy wzroście prędkości powyżej  $5000\text{ obr/min}$  obniża napięcie zasilające badanej maszyny. Ze względu na bezpieczeństwo sterownika maszyny oraz zasilacza DC podczas pomiarów wprowadzono ograniczenia wartości maksymalnej prądu pasmowego do  $I_{phmax}=130\text{ A}$ , a prądu źródła do  $I_{dcmax}=110\text{ A}$ .

Na rysunku 5 przedstawiono rodzinę charakterystyk mechanicznych  $n=f(T_L)$  zarejestrowanych przy napięciu zasilającym  $U_{dc}=36\text{ V}$  dla kąta zasilania  $\theta_{dwell}=20^\circ$  i kątów załączenia  $\theta_{on}=[-5^\circ, 0^\circ, 5^\circ]$  przy sterowaniu jednopulsowym. Jednocześnie na podstawie wykonanych pomiarów wyznaczono charakterystyki sprawności dla poszczególnych kątów załączenia, które przedstawiono na rysunku 6.

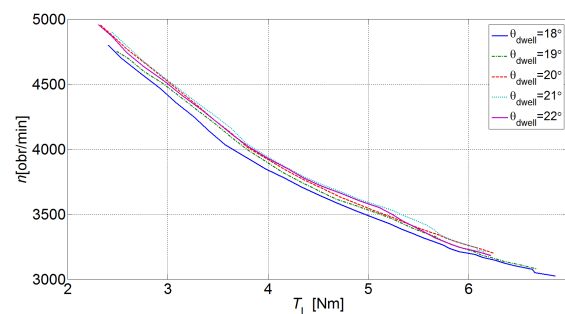


Rys. 5. Charakterystyki mechaniczne wyznaczone przy  $U_{dc}=36\text{ V}$ ,  $\theta_{dwell}=20^\circ$  i  $\theta_{on}=[-5^\circ, 0^\circ, 5^\circ]$



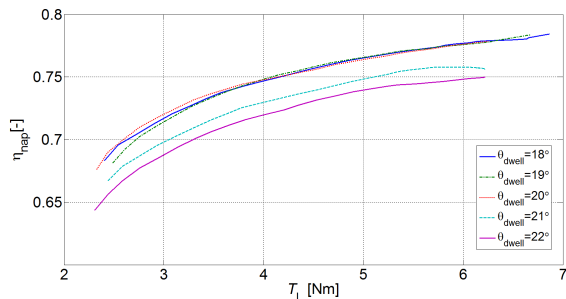
Rys. 6. Sprawność napędu SRM wyznaczona przy  $U_{dc}=36\text{ V}$ ,  $\theta_{dwell}=20^\circ$  i  $\theta_{on}=[-5^\circ, 0^\circ, 5^\circ]$

Z przedstawionych na rysunku 5 charakterystyk wynika, że zwiększenie wyprzedzenia załączenia uzwojenia zwiększa moment elektromagnetyczny wytwarzany przez silnik, co wpływa na wzrost prędkości. Sprawność napędu dla badanych przypadków była najwyższa przy kącie załączenia  $\theta_{on}=-5^\circ$ . Drugim parametrem sterującym, który testowano był kąt przedziału zasilania ( $\theta_{dwell}$ ).



Rys. 7. Charakterystyki mechaniczne czteropasmowej maszyny SRM 8/6 dla różnych przedziałów zasilania  $\theta_{dwell}$  i kątów załączenia równym  $\theta_{on}=-5^\circ$ ,  $U_{dc}=36\text{ V}$

Na rysunku 7 przedstawiono rodzinę charakterystyk mechanicznych silnika SRM wyznaczonych przy stałym kącie załączenia ( $\theta_{on}=-5^\circ$ ) i różnych przedziałach zasilania mieszczących się w przedziale od  $18^\circ$  do  $22^\circ$ . Z rysunku tego wynika, że zmiana przedziału zasilania nie wpływa zasadniczo na zmianę wytwarzanego przez silnik momentu, ale wpływa istotnie na jego sprawność, co można zauważyć obserwując charakterystyki sprawności zamieszczone na rysunku 8.



Rys. 8. Charakterystyki sprawności cztero-pasmowej maszyny SRM 8/6 dla różnych przedziałów zasilania  $\theta_{dwell}$  i kącie załączenia  $\theta_{on} = -5^\circ$ ,  $U_{dc} = 36 V$

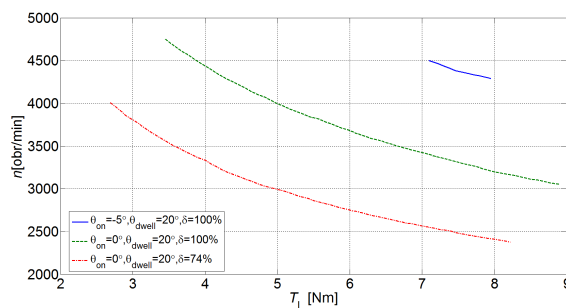
Jak wynika z rysunku 8 zwiększenie przedziału zasilania powyżej  $20^\circ$  powoduje znaczące obniżenie się sprawności napędu.

#### Badania przy zasilaniu napięciem $U_{dc} = 48 V$

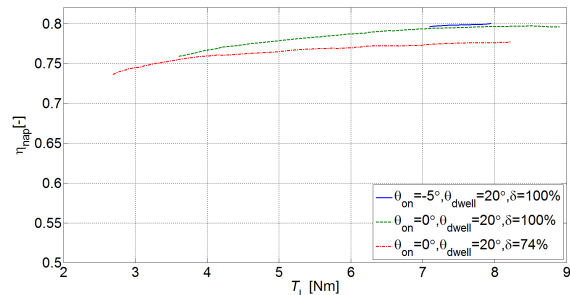
Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono odpowiednio charakterystyki mechaniczne oraz sprawności napędu wykonane przy zasilaniu napięciem znamionowym ( $U_{dc} = 48 V$ ) dla następujących przypadków parametrów sterowania:

- $\theta_{on} = -5^\circ$ ,  $\delta = 100\%$ ,  $\theta_{dwell} = 20^\circ$ ,
- $\theta_{on} = 0^\circ$ ,  $\delta = 100\%$ ,  $\theta_{dwell} = 20^\circ$ ,
- $\theta_{on} = 0^\circ$ ,  $\delta = 74\%$ ,  $\theta_{dwell} = 20^\circ$ ,

przy czym  $\delta$  - jest współczynnikiem wypełnienia sygnału PWM (ang. Pulse Width Modulation) sterującego tranzystorami układu zasilania. Niestety ze względu na ograniczenia prędkościowe stanowiska badawczego oraz dopuszczalny prąd zasilacza pomiary dla pierwszego przypadku przeprowadzono w niewielkim zakresie zmian momentu obciążenia. Pozostałe przypadki wyznaczono w znacznie szerszym zakresie zmian momentu obciążenia.



Rys. 9. Charakterystyki mechaniczne SRM wyznaczone przy napięciu  $U_{dc} = 48 V$ ,  $\theta_{dwell} = 20^\circ$ , dla przypadków, gdy:  $\theta_{on} = -5^\circ$ ,  $\theta_{on} = 0^\circ$  i  $\delta = 100\%$  oraz  $\theta_{on} = 0^\circ$  i  $\delta = 74\%$

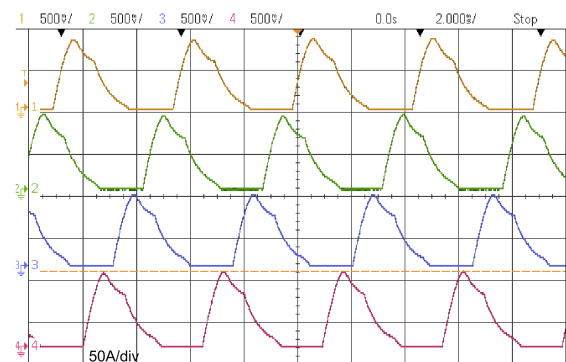


Rys. 10. Charakterystyki sprawności SRM wyznaczone przy napięciu  $U_{dc} = 48 V$ ,  $\theta_{dwell} = 20^\circ$ , dla przypadków, gdy:  $\theta_{on} = -5^\circ$ ,  $\theta_{on} = 0^\circ$  i  $\delta = 100\%$  oraz  $\theta_{on} = 0^\circ$  i  $\delta = 74\%$

Jak wynika z przedstawionych rysunków sprawność napędu osiągnęła 80% przy kącie załączenia  $\theta_{on} = -5^\circ$  i współczynniku wypełnienia  $\delta = 100\%$ . Znaczne obniżenie sprawności napędu jest zauważalne w przypadku, gdy współczynnik wypełnienia wynosił  $\delta = 74\%$ , co jest zrozumiałe ze względu na wzrost strat w układzie przekształtnikowym.

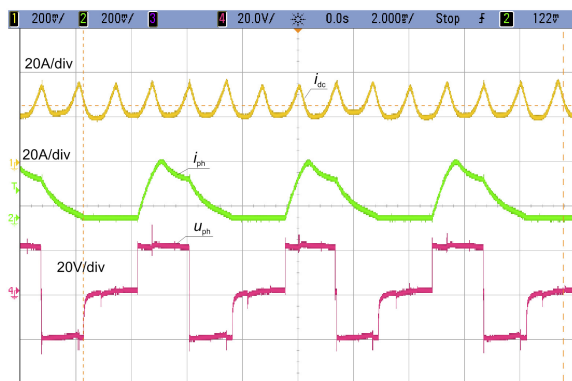
#### 4.2. Rejestracja przebiegów prądów i napięć

Podczas badań napędu zarejestrowano również przebiegi prądów pasmowych ( $i_{ph}$ ) prądu źródła ( $i_{dc}$ ) oraz napięcia pasmowego ( $u_{ph}$ ). Na rysunku 11 przedstawiono oscylogram prądów pasmowych badanej maszyny zarejestrowany przy prędkości  $n = 2250 \text{ obr/min}$  przy sterowaniu jednopulsowym.

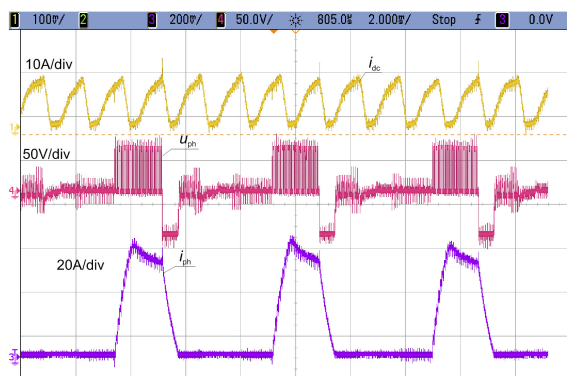


Rys. 11. Oscylogram prądów pasmowych ( $i_{ph}$ ) badanej maszyny SRM zarejestrowany przy prędkości  $n = 2250 \text{ obr/min}$

Na rysunku 12 przedstawiono oscylogram prądu źródła ( $i_{dc}$ ), prądu pasmowego ( $i_{ph}$ ) oraz napięcia pasmowego ( $u_{ph}$ ) dla sterowania jednopulsowego zarejestrowany przy prędkości  $n = 1890 \text{ obr/min}$ .



Rys. 12. Oscylogram prądu źródła ( $i_{dc}$ ), prądu pasmowego ( $i_{ph}$ ) oraz napięcia pasmowego ( $u_{ph}$ ) zarejestrowany przy prędkości  $n=1890$  obr/min dla sterowania jednopulsowego



Rys. 13. Oscylogram prądu źródła ( $i_{dc}$ ), prądu pasmowego ( $i_{ph}$ ) oraz napięcia pasmowego ( $u_{ph}$ ) zarejestrowany dla sterowania PWM  $\delta=50\%$ , przy prędkości  $n=1750$  obr/min

Na rysunku 13 przedstawiono oscylogram prądu źródła ( $i_{dc}$ ), prądu pasmowego ( $i_{ph}$ ) oraz napięcia pasmowego ( $u_{ph}$ ) dla sterowania PWM zarejestrowany przy prędkości  $n=1750$  obr/min. Na rysunkach 12 i 13 można zauważyć znaczące pulsacje prądu źródła ( $i_{dc}$ ), co jest zjawiskiem niepożądanym.

## 5. Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych maszyny SRM o konfiguracji 8/6 przeznaczonej do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego zaprojektowanej i wykonanej w Zakładzie Elektrodynamiki i Układów Elektromaszynowych Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. Badania przeprowadzono na stanowisku umożliwiającym realizację badań maszyn elektrycznych w stanach statycznych i dynamicznych. W ramach prowadzonych prac wyznaczono charakterystyki mechaniczne oraz sprawności badanego napędu w stanach statycznych dla pracy

silnikowej. Zarejestrowano również oscylogramy prądów i napięć dla podstawowych metod sterowania maszyny SRM. Obserwując wyniki badań widać, że najwyższą sprawność napęd uzyskał przy kącie załączenia równym  $\theta_{on}=-5^\circ$  i napięciu zasilającym  $U_{dc}=48$  V. Przejście sterownika w tryb PWM powoduje znaczące ograniczenie sprawności.

## 6. Literatura

- [1]. R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications", CRC Press 2001
- [2]. P. Bogusz, „Projekt i realizacja stanowiska do badań napędów dla lekkich pojazdów elektrycznych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 90 nr 1/2014, str.16-19
- [3]. P. Bogusz, M. Korkosz, J. Prokop, „Projekt silnika reluktancyjnego przełączalnego 8/6 przeznaczonego do napędu małego mobilnego pojazdu elektrycznego”, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, Nr 66, 2012, str.203-208

## Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz, [pbogu@prz.edu.pl](mailto:pbogu@prz.edu.pl)

dr hab. inż. Mariusz Korkosz

[mkosz@prz.edu.pl](mailto:mkosz@prz.edu.pl)

dr hab. inż. Jan Prokop, [jprokop@prz.edu.pl](mailto:jprokop@prz.edu.pl)

Politechnika Rzeszowska

ul. Powstańców Warszawy 12

35-959 Rzeszów

Wydział Elektrotechniki i Informatyki