

Janusz Kołodziej, Marcin Kowol, Marian Łukaniszyn
Politechnika Opolska

ZASTOSOWANIE KARTY SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA DS1104 DO STEROWANIA PRZELĄCZALNYM SILNIKIEM RELUKTANCYJNYM ZE STRUMIENIEM OSIOWYM

APPLICATION OF THE DS1104 R&D CONTROLLER BOARD FOR SWITCHED RELUCTANCE MOTOR WITH AXIAL FLUX CONTROL

Abstract: In the paper a laboratory test-stand for validation of steady and dynamic states of modular switched reluctance motor with outer rotor and co-axial flux in the stator (TFM) is presented. The basis for the construction of the laboratory setup is a DS1104 R&D Controller Board with CP1104 Connector Panel. The mathematical model for dynamic analysis of TFM was built in Matlab/Simulink environment. The model has a hierarchic structure with its fundamental part being a single phase-belt of the motor. The experimental validation was divided into two parts. In the first step, the mathematical model of TFM's under steady-state operation was examined. In the second step, the validation of results obtained from circuit models that regarded dynamic operation was performed. The results of simulations, confirmed by the experimental validation presented in this work, allow to determine and to improve the most important characteristic of TFM in both dynamic and steady conditions.

1. Wstęp

W obecnej chwili przelączalne silniki reluktancyjne (SRM) coraz częściej zastępują konwencjonalne napędy. Maszyny tego typu wymagają jednak zewnętrznego układu energoelektronicznego, który w dużym stopniu odpowiada za charakter pracy maszyny [1, 7, 8]. Sterowanie przelączalnym silnikiem reluktancyjnym polega na odpowiednim załączaniu pasm, które jest ściśle uzależnione od położenia wirnika względem stojana [2, 8]. W tym celu stosowane są różnego rodzaju układy z wykorzystaniem czujników położenia, lub złożonych układów bezczujnikowych. Za załączanie odpowiednich pasm silnika odpowiedzialny jest zwykle mikrokontroler, dla którego wcześniej należy opracować odpowiedni algorytm sterowania. Tworzenie kodu programu w sposób tradycyjny jest zwykle procesem bardzo czasochłonnym. Jednym z najnowszych sposobów szybkiego prototypowania układów sterowania maszyn elektrycznych jest zastosowanie środowiska Matlab/Simulink wraz ze specjalistycznymi kartami zawierającymi procesory DSP. Zastosowanie bazującego na ww. środowisku, w połączeniu z kartą pomiarowo-sterującą, stanowiska badawczego niesie za sobą szereg zalet [3]:

- prosta i przejrzysta graficzna reprezentacja modeli matematycznych i układów pomiarowych,

- prostota komunikacji pomiędzy użytkownikiem a środowiskiem,
- dostęp do rozbudowanych bibliotek procedur i funkcji,
- wykonywanie całej aplikacji poprzez procesor dołączonej karty, co zasadniczo zmniejsza obciążenie procesora PC,
- łatwość w akwizycji i obróbce danych otrzymanych z pomiarów i symulacji.

Proces projektowania i testowania układu sterowania oraz oceny zachowania się obiektu badań oparty jest na kilku podstawowych krokach:

1. budowa modelu matematycznego w programie Simulink,
2. wygenerowanie kodu źródłowego w języku C, za pomocą RTW (ang. Real Time Workshop),
3. kompilacja, linkowanie oraz wygenerowanie kodu źródłowego dla danego procesora,
4. uruchomienie oraz testowanie aplikacji,
5. akwizycja danych za pomocą urządzeń peryferyjnych i ocena, jakości działania układu.

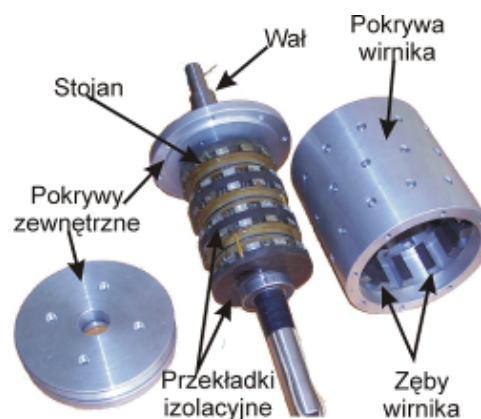
Zasadniczą zaletą takiej konfiguracji stanowiska badawczego jest imitacja rzeczywistego układu pracy np.: maszyny elektrycznej wraz z układem sterowania. Komputer PC staje się jedynie narzędziem wymiany informacji pomiędzy użytkownikiem a układem sterowania oraz narzędziem służącym do oceny przydatności danej konfiguracji układu: obiekt – sterownik.

2. Układ sterowania z wykorzystaniem karty DS1104

W niniejszej pracy zastosowano kartę szybkiego prototypowania firmy dSPACE DS1104, przeznaczoną do współpracy z magistralą PCI w połączeniu z panelem we/wy CP1104. Do najważniejszych elementów składowych karty szybkiego prototypowania DS1104 można zaliczyć [3]: Procesor MPC8240 oparty na rdzeniu PowerPC 603e, 32 MB pamięci SDRAM, dwa kanały wejściowe dla enkoderów inkrementalnych (o rozdzielczości 24 bitów), osiem wejść/wyjść analogowych, dwadzieścia dwukierunkowych kanałów cyfrowych, trójfazowe wyjście PWM. Dodatkowymi elementami ułatwiającymi współpracę z kartą DS1104 są: moduł RTI (ang. Real Time Interface) oraz moduł ControlDesk. Pierwszy z nich pozwala na tworzenie aplikacji w Simulinku z poziomu graficznego, dedykowanej dla zainstalowanej karty, wraz z kompilacją wygenerowanego kodu, właściwą dla uruchomienia na procesorze sygnałowym. Drugi z wymienionych wyżej modułów – moduł ControlDesk zapewnia wizualizację graficzną wszelkich parametrów związanych z prowadzonymi przy użyciu ww. karty badań w trakcie trwania symulacji (on-line). Łatwy dostęp do szeregu narzędzi umożliwiających modyfikację istotnych zmiennych w prowadzonej symulacji ma tym większe znaczenie, gdyż nie ma konieczności zmiany i ponownej generacji kodu źródłowego dla procesora DSP. Ponadto utworzenie szeregu różnego rodzaju wskaźników, liczników i przycisków pozwala na uzyskanie przejrzystego pulpitu sterowniczego informującego o stanie sterowanego obiektu i możliwych do wprowadzenia w nim modyfikacjach.

3. Prototyp przełączalnego silnika reluktancyjnego

Przedmiotem badań w niniejszej pracy jest konstrukcja prototypu przełączalnego silnika reluktancyjnego trójmodułowego ze strumieniem poprzecznym (Transverse Flux Motor - TFM), przedstawionego na rysunku 1. Silnik ten składa się z trzech jednakowych modułów, w których zęby wirnika są przesunięte względem siebie o 10 stopni mechanicznych. Każdy moduł posiada dwanaście zębów wirnika i stojana oraz jedno pasmo uzwojenia w postaci cewki toroidalnej. Dokładna analiza pracy tego rodzaju maszyn została przedstawiona szczegółowo w pracach [3, 4].

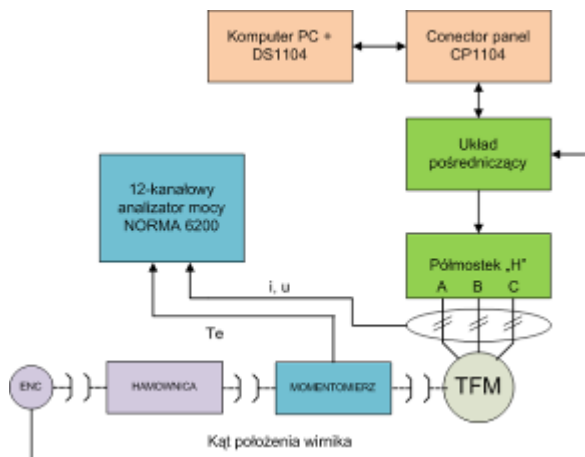


Rys. 1. Prototyp trójmodułowego silnika TFM.

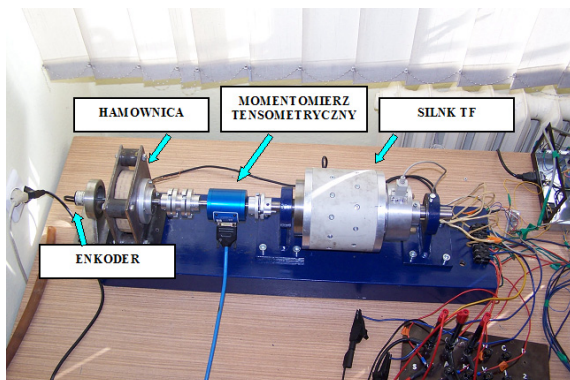
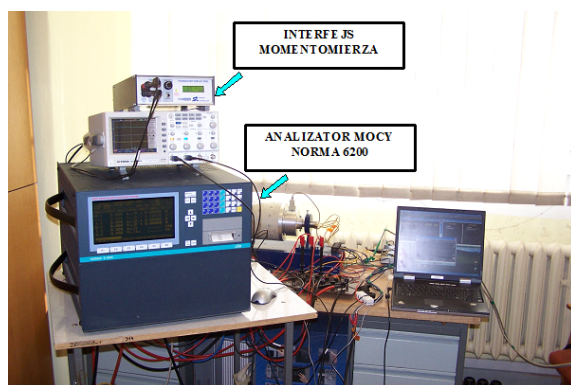
Najprostsze sterowanie silnika polega na włączaniu pasma w sekwencji 1,2,3,1. Włączenie dowolnego pasma powoduje odpowiednie ustawienie się wirnika względem stojana. Ponieważ moduły są przesunięte względem siebie, kolejne włączanie pasm wywołuje ruch wirnika. Sygnał do włączania kolejnych pasm pochodzi z czujnika położenia (przetwornik obrotowo-impulsowy).

4. Stanowisko pomiarowe

Schemat blokowy stanowiska badawczego umożliwiające prowadzenie badań nad zachowaniem się silnika TFM oraz rejestrację przebiegów w stanach dynamicznych przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Schemat blokowy stanowiska badawczego z silnikiem TFM.



Rys.3. Stanowisko pomiarowe do badania silnika TFM.

Do zasilania silnika TFM zastosowano akumulatory. Do pomiaru momentu wykorzystano momentomierz tensometryczny – E300-RWT1-02. Informację on-line na temat aktualnego położenia kąтового wirnika względem stojana uzyskano z przetwornika obrotowo-impulsowego MOK-30 o rozdzielczości 1000 imp./obr. Do obciążenia silnika

TFM wykorzystano hamownicę proszkową wraz z zasilaczem stabilizowanym. Jako nadrzędny układ sterujący zastosowano kartę szybkiego prototypowania DS1104 wraz z panelem CP1104. Karta ta umożliwia również pomiar sygnałów zarówno cyfrowych jak i analogowych. Jednak ze względu na brak układu separacji do pomiaru przebiegów prądów i napięć poszczególnych pasm silnika wykorzystano 12-kanalowy analizator mocy NORMA 6200.

5. Weryfikacja pomiarowa

Do badań eksperymentalnych zastosowano model blokowy zbudowany w oparciu o bibliotekę Real-Time Interface Library (RTILIB) w Simulinku. Układ ten realizuje kilka istotnych funkcji:

- pozycjonowanie wirnika;
- zatrzymanie i wznowienie pracy silnika;
- praca z enkoderem przemysłowym i dedykowanym przetwornikiem obrotowo-impulsowym
- zmiana kątów załączenia i wyłączenia pasm silnika;
- pomiar prędkości oraz położenia wirnika względem stojana.

Silnik reluktancyjny przełączalny, w zależności od zastosowanej metody sterowania, wymaga określenia dokładnej pozycji wirnika w odniesieniu do stojana. Ten wymóg został zrealizowany poprzez zasilanie jednego z pasm silnika TFM, co spowodowało ustawienie się wirnika maszyny w znanej pozycji. Możliwość wyzerowania enkodera w tej pozycji pozwala na osiągnięcie jednakowych warunków startowych w każdej z prób. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono porównanie wyznaczonych na drodze symulacji za pomocą modelu obwodowego oraz pomiarów, charakterystyk mechanicznych $n = f(T_m)$ ww. prototypu silnika, dla różnych wartości kątów załączenia α_{on} i wyłączenia α_{off} . Model obwodowy maszyny opracowano na podstawie równania napięciowego (1) oraz mechanicznego (2), które zostały zaimplementowane w środowisku Matlab/Simulink.

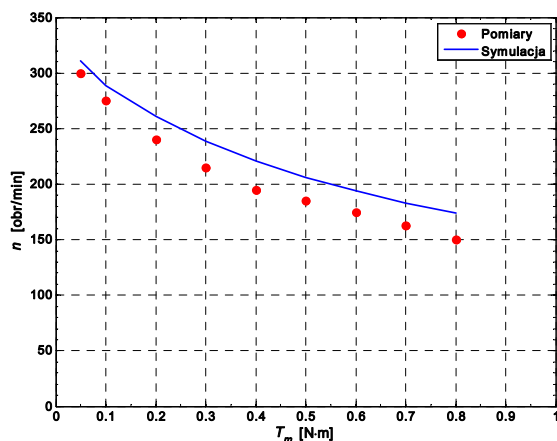
$$u_n = R_n i_n + \frac{d\psi_n}{dt}, \quad n = 1, 2, 3 \quad (1)$$

gdzie: u_n – wartości chwilowe napięcia zasilania pasm, R_n – rezystancje pasm, ψ_n – strumienie skojarzone pasm, i_n – prądy w pasmach.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_l - D_\omega \cdot \omega \quad (2)$$

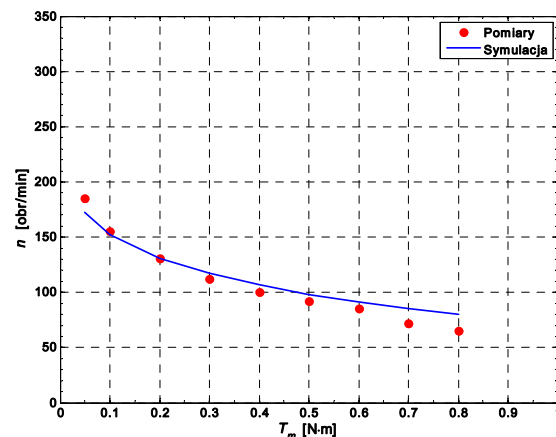
gdzie: J – moment bezwładności wirnika, ω – prędkość obrotowa silnika, T_e – wartość chwilowa momentu elektromagnetycznego rozwijanego przez silnik, T_m – wartość chwilowa momentu obciążenia, D_ω – współczynnik tarcia.

Dokładny opis budowy obwodowego modelu matematycznego szczegółowo badanego przetwornika został przedstawiony w pracach [3, 5, 6].

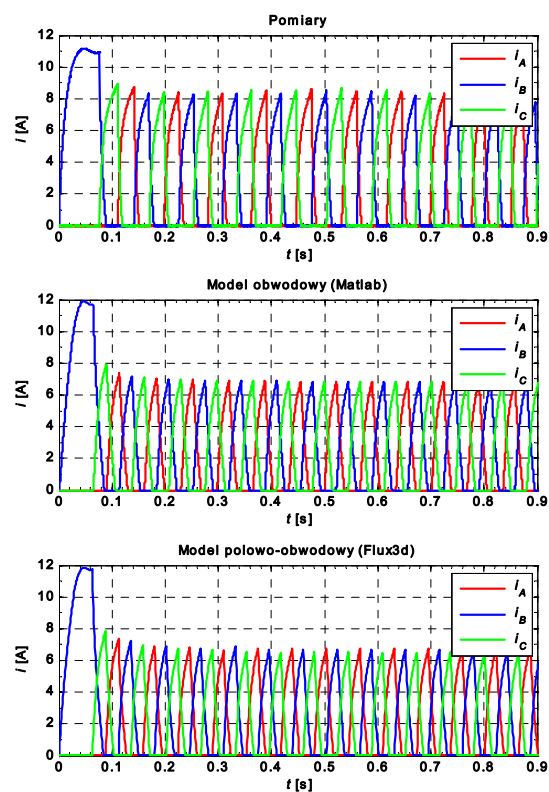


Rys.4. Charakterystyki $n=f(T_m)$ dla kątów wysterowania $\alpha_{on}=17^\circ$, $\alpha_{off}=27^\circ$, dla napięcia zasilania $U_{zas}=24V$.

Niewielkie różnice (około 10-20%) pomiędzy charakterystykami otrzymanymi z pomiarów oraz z symulacji wynikają przede wszystkim z założeń upraszczających przyjętych w modelu obwodowym. W modelu matematycznym pominięto sprzężenia magnetyczne pomiędzy sąsiadującymi ze sobą modułami. Autorzy nie uwzględnili również wpływu temperatury na rezystancję uzwojeń poszczególnych pasm maszyny oraz zjawiska indukowania się prądów wirowych. Zjawisko to, w przypadku badanej maszyny, ma szczególne znaczenie w związku z wykonaniem zarówno stojana jak i wirnika z litej stali.



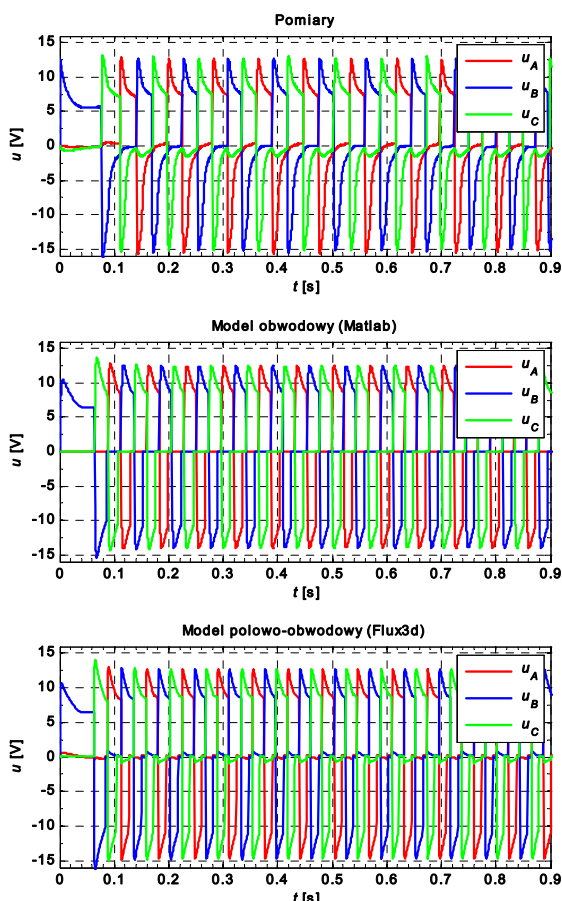
Rys.5. Charakterystyki $n=f(T_m)$ dla kątów wysterowania $\alpha_{on}=14^\circ$, $\alpha_{off}=27^\circ$, dla napięcia zasilania $U_{zas}=12V$.



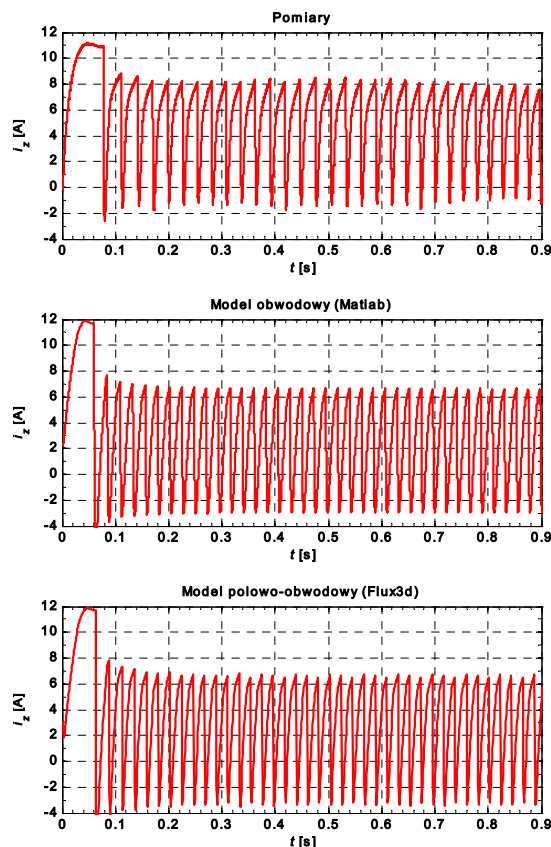
Rys.6. Porównanie przebiegów prądów pasm A, B, C (pomiar, Matlab, Flux3D), dla napięcia zasilania $U_{zas}=12V$, obciążenia $T_m=0,7N\cdot m$ oraz kątów wysterowania $\alpha_{on}=18^\circ$, $\alpha_{off}=28^\circ$

Zamieszczone porównanie charakterystyk mechanicznych przełączalnych silników reluktancyjnych ze strumieniem poprzecznym, ukazuje dobrą zgodność modelu symulacyjnego obiektem rzeczywistym. Jednak przedstawione badania dotyczyły

jedynie ustalonych stanów pracy. W dalszej części artykułu przedstawiono porównanie wyników obliczeń dla stanów nieustalonych, otrzymanych przy zastosowaniu modelu obwodowego, z pomiarami. Dodatkowo w celu weryfikacji wyników obliczeń otrzymanych za pomocą modelu matematycznego, opracowano trójwymiarowy model polowo-obwodowy badanej maszyny oraz przeprowadzono obliczenia numeryczne za pomocą metody elementów skończonych. Do analizy silnika trójmodułowego wybrano przykład rozruchu maszyny obciążonej momentem $T_m = 0,7 N \cdot m$. Na rysunkach 6, 7 i 8 zilustrowano porównanie przebiegów prądów oraz napięć na poszczególnych pasmach oraz prądu przepływającego przez źródło zasilania maszyny.



Rys. 7. Porównanie przebiegów napięć pasm A, B, C (pomiary, Matlab, Flux3D), dla napięcia zasilania $U_{zas}=12V$, obciążenia $T_m=0,7N \cdot m$ oraz kątów wysterowania $\alpha_{on}=18^\circ$, $\alpha_{off}=28^\circ$



Rys. 8. Porównanie przebiegów prądu źródła (pomiary, Matlab, Flux3D), dla napięcia zasilania $U_{zas}=12V$, obciążenia $T_m=0,7N \cdot m$ oraz kątów wysterowania $\alpha_{on}=18^\circ$, $\alpha_{off}=28^\circ$

Weryfikacja pomiarowa maszyny trójmodułowej wykazała dobrą zgodność modelu polowo-obwodowego i obwodowego z pomiarami. Rozbieżności na poziomie 20-30% wynikają głównie z przyjętych w modelach matematycznych założeń upraszczających.

6. Podsumowanie

Pierwotna wersja układu sterowania silników TFM była oparta na układzie mikrokontrolera ATMEL rodziny AT89. Układy te z powodzeniem stosowane są w szerokim zakresie układów sterowania maszynami elektrycznymi. Są to rozwiązania sprawdzone pod wieloma względami. Niemniej jednak wyeliminowanie mikrokontrolera oraz zastąpienie go kartą szybkiego prototypowania z procesorem sygnałowym pozwoliło na znaczne zwiększenie możliwości zarówno w akwizycji danych jak i szybkości oraz jakości sterowania. Dodatkową zaletą wynikającą z zastosowania karty DS1104 jest

dużo większa przejrzystość programowania wynikająca z możliwości implementacji algorytmu sterowania w oparciu o blokowy model w programie Simulink.

W dalszej pracy, autorzy wzbogacą układ sterowania o pomiar prądu i napięcia dla poszczególnych pasm silnika TFM przy wykorzystaniu wejść analogowych karty DS1104. Pozwoli to na zastosowanie modulacji PWM do kontroli prądów. Powstałe sprzężenie zwrotne w znaczny sposób rozszerzy możliwości sterowania badanymi prototypami silników TFM.

7. Literatura

- [1] Andriollo M., Morini A., Martinelli G., Tortella A., Zerbetto M.: *Performance Analysis of a Transverse Flux Motor by a Non-Linear Mathematical Model*. ICEM, 5 – 8 September, Cracow, 2004, Vol. 2, pp. 231-232.
- [2] Ding W., Liang D., Sui H.: *Dynamic Modeling and Performance Prediction for Dual-Channel Switched Reluctance Machine Considering Mutual Coupling*. IEEE, Transactions on Magnetics, Vol. 46, No. 9, September 2010, pp. 3652 – 3663.
- [3] Kołodziej J.: *Analiza dynamicznych i ustalonych stanów pracy silnika reluktancyjnego ze strumieniem poprzecznym*. Rozprawa doktorska, Opole, 2010.
- [4] Kowol M.: *Analiza pracy przełączalnego silnika reluktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym do napędu lekkich pojazdów*. Rozprawa doktorska, Opole, 2007.
- [5] Kowol M., Mynarek P., Mrocheń D.: *Model matematyczny przełączalnego silnika reluktancyjnego do analizy stanów dynamicznych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 88/2010, Komel, s.7-11.
- [6] Kowol M., Kołodziej J.: *Construction of a dynamic model for a transverse flux motor*. Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 240, 2009, s 129-139.
- [7] Tomczewski K., Wach P.: *Control characteristics for quasi-optimal operation of switched reluctance motors*. Springer, 2003, Electrical Engineering 85, pp. 275–281.
- [8] Tomczewski K., Wróbel K.: *Jednoczesna optymalizacja kształtu obwodu magnetycznego i parametrów zasilania przełączalnego silnika reluktancyjnego*. Przegląd Elektrotechniczny, 03/2009, s. 107-110.

Autorzy:

dr inż. Janusz Kołodziej, e-mail: ja.kolodziej@po.opole.pl

dr inż. Marcin Kowol, e-mail: m.kowol@po.opole.pl

prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn,

e-mail: m.lukaniszyn@po.opole.pl

Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki,
Automatyki i Informatyki,
ul. Mikołajczyka 5, 45 - 271 Opole

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski