

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

WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH MASZYN RELUKTANCYJNYCH PRZEŁĄCZALNYCH

ASSIGN OF STATIC CHARACTERISTICS FOR SWITCHED RELUCTANCE MACHINES

Abstract: The issue assign of static characteristics of switched reluctance machines with using finite element method and experimental tests are described in the present work. Computation with using ANSYS software are made for four work out SRM constructions (12/8, 8/6, 6/4, and 4/2). Analysis of magnetic field for discussed SRM models are presented. Characteristics of electromagnetic torque, magnetic flux and inductance coil coefficients as a function current and rotor position angle are also shown. There are presented the results of experimental tests of described machines. Experimental tests are made on laboratory stand with card DS 1104. There are presented conclusion too.

1. Wstęp

W procesie projektowania i modelowania na potrzeby sterowania maszyn reluktancyjnych przełączalnych (ang. *Switched Reluctance Motors - SRM*) czynnikiem krytycznym staje się znajomość niektórych charakterystyk statycznych. Zaliczyć do nich można zależności strumienia magnetycznego oraz momentu elektromagnetycznego w funkcji prądu i kąta obrotu wirnika. Charakterystyki te nazywane są popularnie charakterystykami strumieniowo - prądowo - kątowymi ($\psi - i - \theta$) oraz odpowiednio charakterystykami momentowo - prądowo - kątowymi ($T_e - i - \theta$). Mogą one być wyznaczone na etapie projektowania maszyny lub dla istniejącego egzemplarza maszyny na drodze badań laboratoryjnych [1, 4, 6].

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników wyznaczania charakterystyk statycznych różnych odmian konstrukcyjnych maszyn reluktancyjnych przełączalnych na drodze obliczeń symulacyjnych i badań laboratoryjnych.

Na etapie projektowania maszyny zastosowano metody polowe obliczania rozkładu pola magnetycznego pozwalające na badanie wpływu zarówno wymiarów geometrycznych obwodu magnetycznego silnika, jak i rodzaju zastosowanego materiału magnetycznego na wypadkowe charakterystyki silnika.

Wyznaczanie omawianych charakterystyk na drodze laboratoryjnej zrealizowano dla modelowych silników na specjalistycznym stanowisku pomiarowym opracowanym w Politechnice Rzeszowskiej [3].

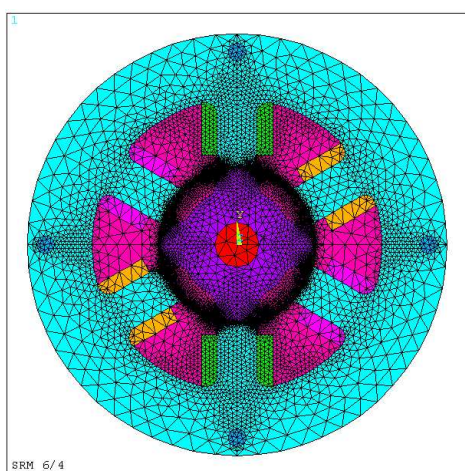
2. Obliczenia polowe modeli SRM

2.1. Analiza rozkładu pola magnetycznego

Do analizy pola magnetycznego maszyn SRM autorzy zastosowali program ANSYS [2], umożliwiającą profesjonalne obliczenia polowe oparte na metodzie elementów skończonych (MES). Do obliczania charakterystyk statycznych maszyn SRM zastosowano analizę stałoprądową w przestrzeni 2D. Pierwszym krokiem w programie ANSYS po zdefiniowaniu typu środowiska fizycznego jest zbudowanie modelu maszyny. Geometrię maszyny można opracować bezpośrednio w programie ANSYS lub importować ją z innego programu, np. z programu AutoCAD. Mając gotową geometrię maszyny należy poszczególnym typom elementów skończonych (blachy magnetyczne, uzwojenia, powietrze, wałek, mocowania blach, itp.) przyporządkować odpowiedni rodzaj materiału. Następnie można przystąpić do tworzenia siatki elementów skończonych i jej ewentualnego zagęszczenia. Jedną z metod zagęszczenia siatki w programie ANSYS jest wykorzystanie opcji *Size Control*, która umożliwia zagęszczenie, np. wzdłuż linii tworzących strefy przyszczelinowe oraz dla samej szczeliny powietrznej. Po utworzeniu siatki elementów przystępuje się do tworzenia komponentów, a następnie definiuje się warunki brzegowe oraz poszczególne wymuszenia. Kolejnym krokiem jest określenie typu analizy, w omawianym przypadku wybrana została analiza *Static*. Do obliczania strumienia i współczynników indukcyjności stosuje się makro *LMATRIX*, natomiast do obliczania momentu służy makro *TORQSUM*.

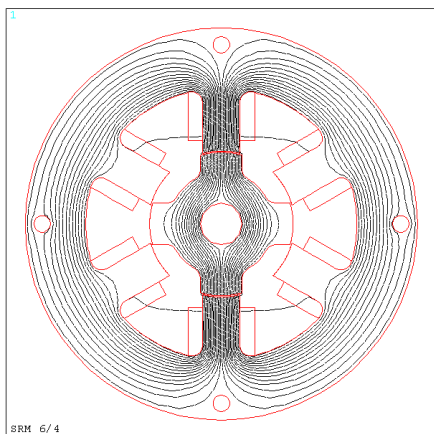
Do obliczeń wybrano cztery modele maszyn reluktancyjnych przełączalnych o stosunku liczby biegunów stojana N_s , do liczby biegunów wirnika N_r , odpowiednio: 4/2, 6/4, 8/6 i 12/8. Są to najczęściej spotykane w praktyce rozwiązania konstrukcyjne SRM. Wszystkie modele maszyn posiadają jednakową średnicę zewnętrzną blach stojana d_{se} , wewnętrzną blach wirnika d_{ri} , minimalną grubość szczeliny powietrznej δ . Konstrukcja 4/2 ma niesymetryczną budowę wirnika.

Widok siatki elementów skończonych dla modelu maszyny o konstrukcji 6/4 przedstawiono na rysunku 1.

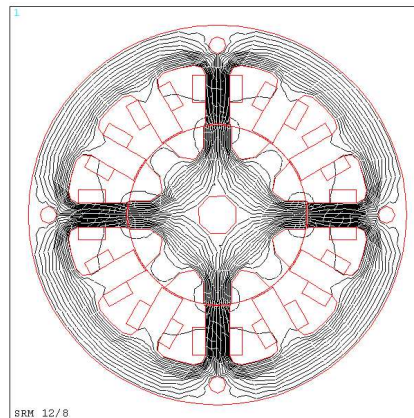


Rys.1. Widok siatki elementów skończonych modelu maszyny 6/4

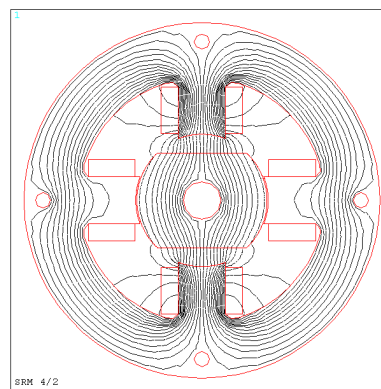
Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono rozkład strumienia magnetycznego odpowiednio dla konstrukcji 6/4 i 12/8 dla wirnika znajdującego się w położeniu współosiowym, zaś na rysunku 4 dla konstrukcji 4/2 dla wirnika znajdującego się w położeniu niewspółosiowym.



Rys.2. Rozkład strumienia dla konstrukcji 6/4 w położeniu współosiowym wirnika

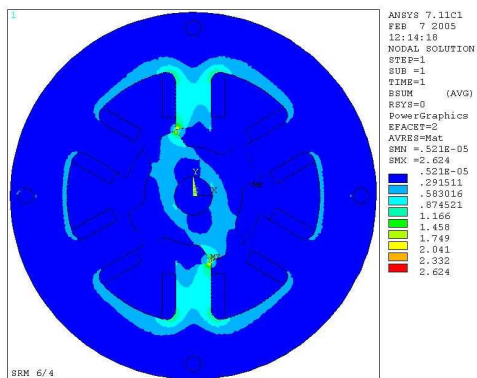


Rys.3. Rozkład strumienia dla konstrukcji 12/8 w położeniu współosiowym wirnika

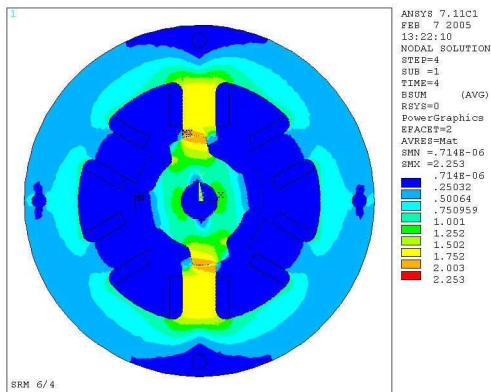


Rys.4. Rozkład strumienia dla konstrukcji 4/2 dla wirnika znajdującego się w położeniu niewspółosiowym

Maszyny reluktancyjne przełączalne charakteryzują się dużą nieliniowością obwodu magnetycznego. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono rozkład gęstości indukcji magnetycznej dla silnika o konstrukcji 6/4 w przypadku zajmowania przez wirnik położenia pośrednich. Obliczenia wykonano przy założeniu tej samej gęstości prądu we wzbudzonym paśmie.



Rys.5. Rozkład gęstości indukcji dla konstrukcji 6/4 w przypadku zajmowania przez wirnik położenia pośredniego 1



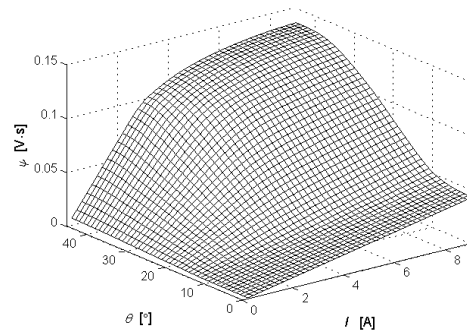
Rys.6. Rozkład gęstości indukcji dla konstrukcji 6/4 w przypadku zajmowania przez wirnik położenia pośredniego 2

Na rysunku 5 wirnik znajduje się w położeniu w którym występuje największa wartość wytwarzanego momentu silnika. Od tego położenia, aż do osiągnięcia przez wirnik położenia współosiowego występują silne lokalne nasycenia obwodu magnetycznego. Zbyt duże nasycenie obwodu magnetycznego prowadzi w konsekwencji do znacznego ograniczenia wartości wytwarzanego momentu.

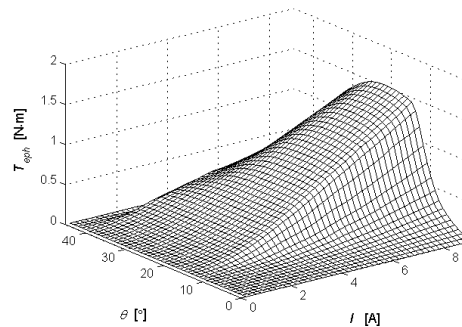
2.2. Obliczanie charakterystyk statycznych

Korzystając z wyników obliczeń polowych wyznaczono następujące charakterystyki statyczne konstrukcji 4/2, 6/4, 8/6 i 12/8: momentowo-prądowo - kątowe ($T_e - i - \theta$), strumieniowo-prądowo - kątowe ($\psi - i - \theta$). Ponadto wyznaczono współczynniki indukcyjności własnej statycznej $L_{self}(i, \theta)$ i dynamicznej $L_{inc}(i, \theta)$ dla poszczególnych konstrukcji maszyn. Z uwagi na symetrię budowy maszyn obliczenia zostały wykonane tylko w zakresie zmian położenia wirnika od położenia niewspółosiowego ($\theta = 0^\circ$) do położenia współosiowego ($\theta = 22.5^\circ$ dla konstrukcji 12/8, $\theta = 30^\circ$ dla konstrukcji 8/6 oraz $\theta = 45^\circ$ dla konstrukcji 6/4). W przypadku konstrukcji 4/2 obliczenia wykonano dla pełnego zakresu zmian kąta, tj. od umownego pierwszego położenia niewspółosiowego do następnego położenia niewspółosiowego ($\theta \in 0^\circ \div 180^\circ$).

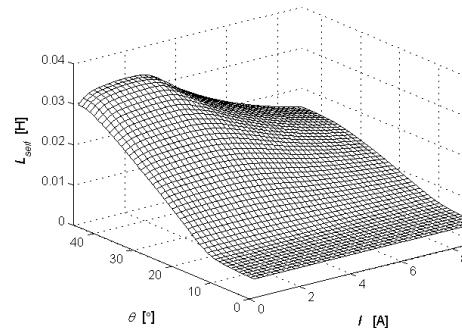
Na rysunkach 7 - 15 przedstawiono wyniki obliczeń polowych wybranych charakterystyk dla omawianych czterech odmian konstrukcyjnych modelowanych silników SRM.



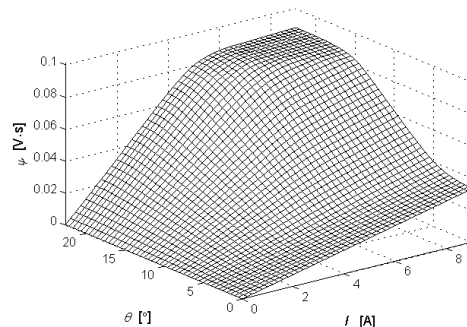
Rys.7. Charakterystyka strumieniowo-prądowo - kątowna dla konstrukcji silnika 6/4



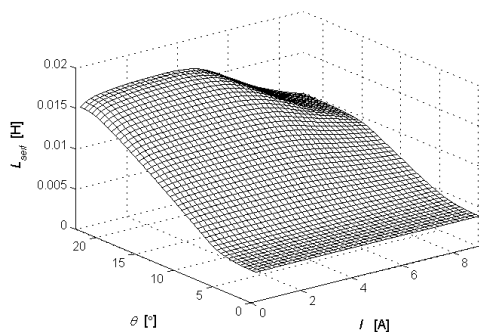
Rys.8. Charakterystyka momentowo-prądowo - kątowna dla konstrukcji silnika 6/4



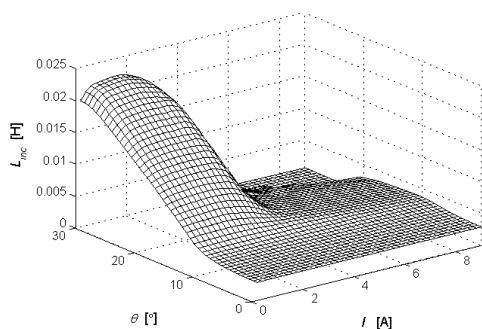
Rys.9. Zależność indukcyjności własnej L_{self} w funkcji prądu i i kąta θ dla konstrukcji 6/4



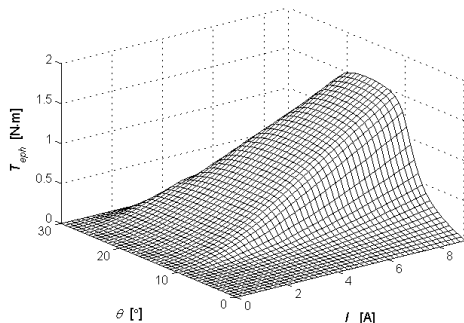
Rys.10. Charakterystyka strumieniowo-prądowo - kątowna dla konstrukcji 12/8



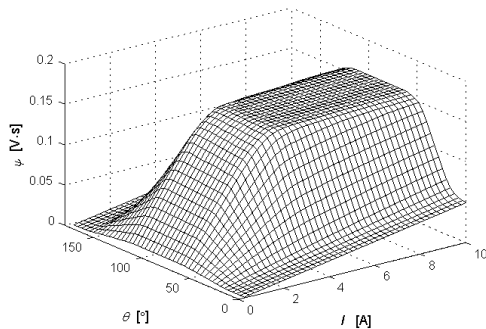
Rys.11. Zależność indukcyjności własnej L_{self} w funkcji prądu i kąta dla konstrukcji 12/8



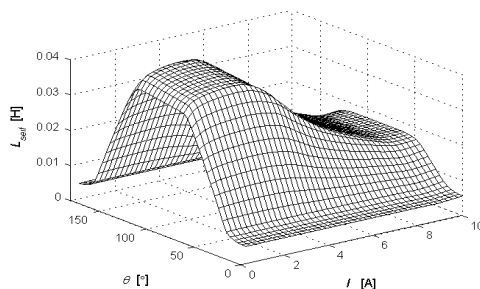
Rys.12. Zależność indukcyjności dynamicznej L_{inc} w funkcji prądu i kąta dla konstrukcji 8/6



Rys.13. Charakterystyka momentowo-prądowo-kątowa dla silnika 8/6



Rys.14. Charakterystyka strumieniowo-prądowo-kątowa dla konstrukcji 4/2



Rys.15. Zależność indukcyjności własnej L_{self} w funkcji prądu i kąta dla konstrukcji 4/2

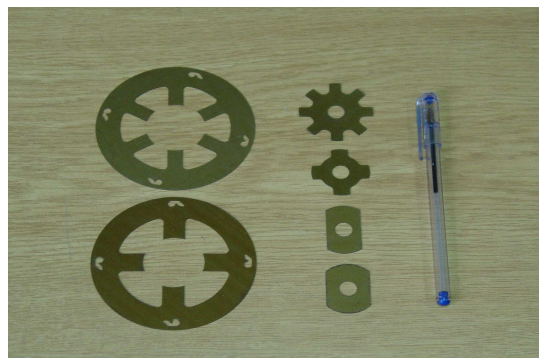
Zmieniając wymiary silnika można na drodze symulacyjnej kształtować charakterystyki omawianych modeli SRM.

3. Wybrane wyniki pomiarów

Obiektem badań laboratoryjnych są wykonane na bazie obliczeń polowych cztery modele funkcjonalne silników SRM o konstrukcjach 12/8, 8/6, 6/4 oraz 4/2. Wszystkie omówione konstrukcje maszyn zostały wykonane na bazie silnika agregatu ssącego typu 306 produkowanego przez firmę Zelmer. Widok wykonanych modeli maszyn oraz wybranych blach stojana i wirnika przedstawiono na rysunkach 16 i 17.



Rys.16. Widok wykonanych modeli maszyn re-luktancyjnych przelączalnych

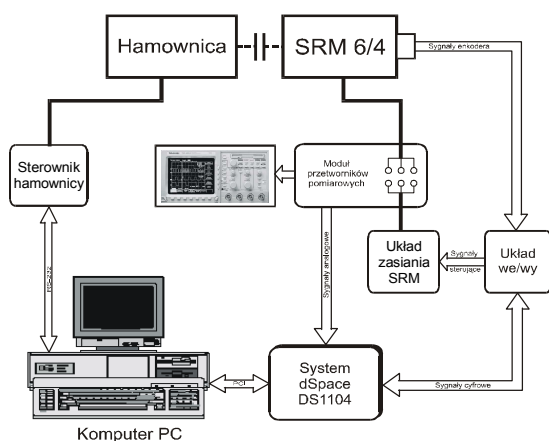


Rys.17. Widok wybranych blach stojana i wirnika dla wykonanych modeli SRM

Pomiar charakterystyk modelowych silników reluktancyjnych przełączalnych wykonano na stanowisku badawczym w skład którego wchodzi:

- komputer PC z kartą DS1104 firmy dSpace oraz oprogramowanie ControlDesk współpracujące z systemem Matlab/Simulink,
- układ pośredniczący zawierający przetworniki pomiarowe oraz tranzystorowo-diodowy układ zasilania silnika SRM,
- pozostałe elementy jak: hamownica, oscyloskop cyfrowy, drukarka.

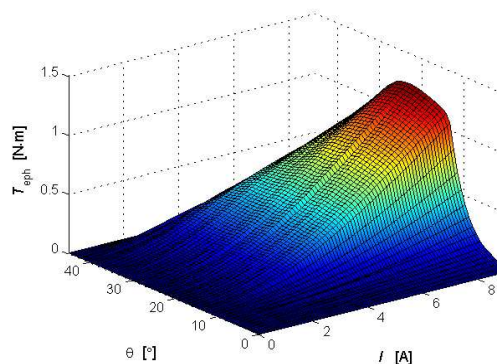
Przykładową strukturę blokową stanowiska badawczego z silnikiem trójfazowym 6/4 przedstawiono na rysunku 18.



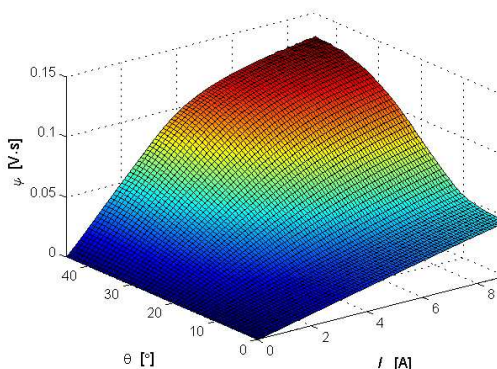
Rys.18. Schemat blokowy stanowiska badawczego silników SRM

Opis stanowiska do badań eksperymentalnych silników SRM przedstawiono w [3].

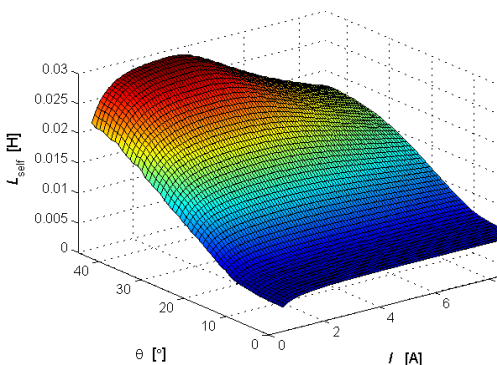
Na rysunkach 19 - 21 zamieszczono wybrane wyniki badań eksperymentalnych omawianych modeli maszyn. Ogólnie uzyskano dobrą zgodność co do kształtu pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych oraz obliczeniami polowymi. Wyznaczone charakterystyki momentowe i strumieniowe osiągają mniejsze wartości niż w przypadku obliczeń polowych. Jest to spowodowane zastosowaniem analizy w przestrzeni 2D. Aby poprawić zbieżność wyników należałoby przeprowadzić analizę zagadnienia w przestrzeni trójwymiarowej, szczególnie, że omawiane maszyny są małymi modelami o niewielkiej długości pakietu żelaza l_{Fe} [5].



Rys.19. Charakterystyka pomiarowa momentowo - prądowo - kątowa konstrukcji 6/4

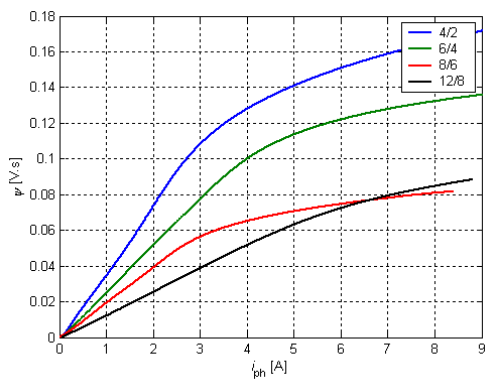


Rys.20. Charakterystyka pomiarowa strumieniowo-prądowo-kątowa konstrukcji 6/4



Rys.21. Indukcyjność własna pasma w funkcji prądu i kąta obrotu wirnika dla konstrukcji 6/4

Na rysunku 22 przedstawiono wyznaczoną pomiarowo zależność strumienia sprzężonego w położeniu współosiowym w funkcji wartości płynącego prądu dla wszystkich wykonanych modeli maszyn SRM.



Rys.22. Zależność strumienia sprzężonego w położeniu współosiowym w funkcji prądu dla różnych odmian konstrukcyjnych SRM

4. Wnioski

Znajomość charakterystyk statycznych silników SRM jest niezbędna zarówno na etapie projektowania maszyny, jak również dla istniejącej maszyny na potrzeby sterowania silnika. Charakterystyki te mogą być wyznaczane na drodze symulacji komputerowych lub na drodze badań laboratoryjnych. Zastosowanie w procesie projektowania silników SRM obliczeń polowych powoduje zwiększenie możliwości badawczych oraz skrócenie czasu procesu modelowania SRM wraz z możliwością analizy wielowariantowej otrzymanych modeli. Obliczenia polowe umożliwiają także optymalizację projektu maszyny bez konieczności wykonywania modelu maszyny. Wzrost dokładności obliczeń polowych można uzyskać przez zastosowanie analizy trójwymiarowej.

5. Literatura

- [1]. Anawar M.N., Husain I., Radun A. V.: *A comprehensive desing methodology for switched reluctance machines*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, November/December 2001, pp. 1684-1692
- [2]. Ansys 7.1 *Documentation*, 2003, ANSYS, Inc.
- [3] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Stanowisko do badań silników reluktancyjnych przelączalnych z zastosowaniem procesora sygnałowego*, Maszyny elektryczne, Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych, KOMEL, Zeszyty problemowe, Nr 69, 2004, str. 7-12
- [4]. Krishnan R.: *Switched reluctance motor drive: modeling, simulation, analysis, desing, and applications*, CRC Press LLC, 2001.
- [5]. Michaelides A. M., Pollock C.: *Effect of end core flux on the performance of the switched reluctance motor*, IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 141, No. 6, November 1994, pp. 308-316

- [6]. Wu W. Dunlop J. B., Collocoott S. J. Kalan B.: *Desing optimization of a switched reluctance motor by electromagnetic and thermal finite-element analysis*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, No. 5, September 2003, pp.3334- 3336

Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz, pbogu@prz.rzeszow.pl
 dr inż. Mariusz Korkosz, mkosz@prz.rzeszow.pl
 dr inż. Jan Prokop, jprokop@prz.rzeszow.pl
 Politechnika Rzeszowska
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki
 ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów