

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

ANALIZA WPLYWU GRUBOŚCI SZCELINY POWIETRZNEJ NA CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE SILNIKA RELUKTANCYJNEGO PRZEŁĄCZALNEGO

INFLUENCE OF AIR-GAP THICKNESS ON STATIC CHARACTERISTICS IN SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Abstract: In the article we discuss the influence of an air-gap thickness on the switched reluctance motor with 6/4 configuration static characteristics. This motor has been designed for household equipment purpose and it is characterized by non-symmetrical construction of magnetic circuit. In the work we present field computation results of motor magnetic circuit for particular changes of air-gap thickness range for two different (because of non-symmetrical construction) motor phases. There is also presented the dependence of mean value of motor torque versus current on air-gap thickness changes for two different phases. We present laboratory research results of windings self-inductances profiles estimation versus rotor angle for few cases of motor air-gap thickness.

1. Wstęp

Współczesne układy napędowe przeznaczone do sprzętu AGD wymagają stosowania silników elektrycznych umożliwiających regulację prędkości obrotowej w szerokim zakresie i pracujących jednocześnie z jak największą sprawnością. Dodatkowym kryterium jest minimalizacja kosztów takiego układu napędowego. Wiele obecnie produkowanych układów napędowych spełnia częściowo powyższe wymagania. Klasyczne silniki komutatorowe powszechnie stosowane w sprzęcie AGD umożliwiają regulację prędkości obrotowej w szerokim zakresie, są relatywnie w miarę tanie w produkcji masowej, ale są stosunkowo zawodne i sprawność takich napędów jest niezadowalająca. Silniki z magnesami trwałymi (BLDC) oferują znacznie większą sprawność przetwarzania energii w szerokim zakresie zmian prędkości. Trwałość takiego rozwiązania znacznie przewyższa maszynę komutatorową, w której zawsze po pewnym czasie następuje zużycie szczotek lub uszkodzenie zestyku szczotka-komutator. Natomiast wadą układów napędowych z silnikami z magnesami trwałymi jest zmiana właściwości silnika związana z procesem, tzw. starzenia się magnesu trwałego oraz stosunkowo duża cena z uwagi na konieczność zastosowania magnesów stałych.

Rozwiązaniem pośrednim pomiędzy silnikiem z komutatorem mechanicznym, a silnikiem z magnesami trwałymi jest silnik reluktancyjny

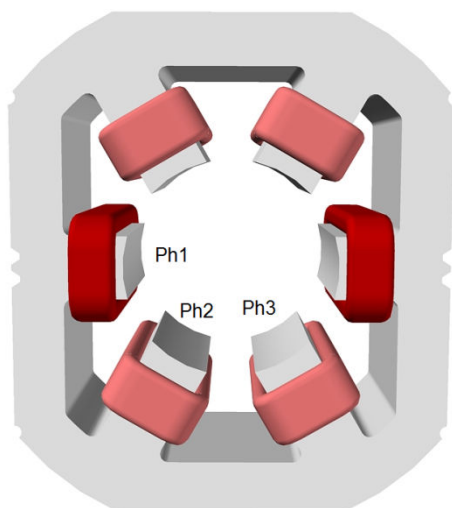
przełączalny (SRM) [1,2,3,4]. Umożliwia on regulację prędkości obrotowej w bardzo szerokim zakresie z jednocześnie wysoką sprawnością, która jednak w sposób istotny zależy od konstrukcji samego silnika, jego wykonania i układu sterującego. Koszt wykonania maszyny SRM jest zdecydowanie mniejszy niż klasycznego silnika komutatorowego, a także silnika BLDC. Właściwości silnika SRM zależą od typu konstrukcji silnika (4/2, 6/4, 12/8), danych nawojowych oraz sposobu sterowania. Jednym z istotniejszych parametrów silników SRM z uwagi na charakter wytwarzanego momentu elektromagnetycznego jest grubość szczeliny powietrznej.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań, zarówno symulacyjnych, jak i laboratoryjnych, dotyczących wpływu grubości szczeliny powietrznej na właściwości silnika reluktancyjnego przełączalnego zaprojektowanego pod kątem zastosowań w sprzęcie gospodarstwa domowego. Omawiany silnik charakteryzuje się budową obwodu magnetycznego wykazującą cechy niesymetrii zarówno magnetycznej, jak i elektrycznej. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń elektromagnetycznych obwodu magnetycznego silnika dla określonego zakresu zmian grubości szczeliny powietrznej, dla dwóch różnych, ze względu na niesymetrię budowy, pasm silnika. Przedstawiono zależności wartości średniej momentu elektromagnetycznego silnika w

funkcji prądu przy zmieniającej się grubości szczeliny powietrznej, odpowiednio dla dwóch różnych pasm. Przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych pomiaru kształtu indukcji własnych uzwojeń w funkcji kąta obrotu wirnika dla kilku grubości szczeliny powietrznej silnika. Zamieszczono wnioski dotyczące możliwości zastosowania rozwiązania konstrukcyjnego silnika SRM z obwodem magnetycznym charakteryzującym się niesymetrią magnetyczną, jak i elektryczną.

2. Projektowany silnik o budowie niesymetrycznej

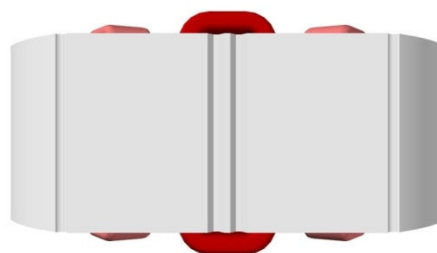
Na rysunku 1 przedstawiono model stojana zaprojektowanego silnika SRM o konstrukcji 6/4 wraz z umieszczonymi na biegunach uzwojeniami poszczególnych pasm.



Rys. 1. Model zaprojektowanego stojana silnika SRM o niesymetrycznej budowie

Kształt stojana został wymuszony koniecznością dostosowania wymiarów silnika do istniejącego mocowania tarcz łożyskowych klasycznego układu napędowego robota kuchennego. Podyktowane to zostało względami ekonomicznymi. Ze względu na narzucone zewnętrzne wymiary silnika jedna para biegunów stojana posiada zmienione wymiary geometryczne. Tym samym umieszczone na tych biegunach uzwojenia różnią się od uzwojeń na pozostałych biegunach. Pasma o zmienionych wymiarach geometrycznych będzie w dalszej części pracy umownie oznaczane symbolem *Ph1*.

Wszystkie pasma silnika posiadają jednakowe dane nawojowe, ale z uwagi na niesymetryczną budowę stojana uzwojenie oznaczone jako *Ph1* posiada dłuższe połączenia czołowe, co przedstawiono w widoku na rysunku 2. Uzwojenie to przy takiej samej liczbie zwojów jak w pozostałych pasmach ma zwiększoną rezystancję pasma.



Rys. 2. Widok połączeń czołowych modelu stojana silnika SRM o niesymetrycznej budowie

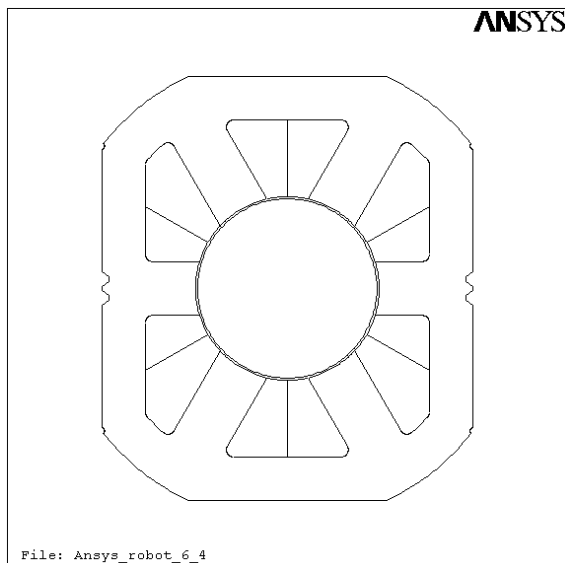
3. Obliczenia polowe

Autorzy do obliczeń polowych metodą elementów skończonych (MES) zastosowali komercyjny pakiet ANSYS [5]. Do obliczania charakterystyk statycznych maszyny SRM zastosowano analizę stałoprądową w przestrzeni 2D.

Geometrię projektowanego modelu obwodu elektromagnetycznego silnika można utworzyć stosując jedną z trzech metod:

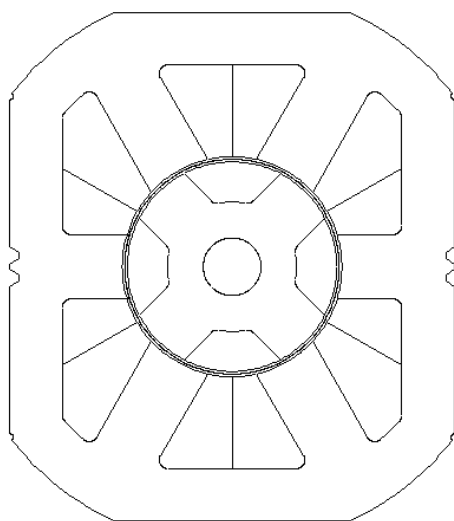
- metodę bezpośrednią tworzenia geometrii w środowisku programu ANSYS,
- metodę pośrednią polegającą na imporcie do programu ANSYS geometrii z programu typu CAD,
- metodę mieszaną związaną z importem części geometrii z programu typu CAD i realizację pozostałej części w środowisku programu ANSYS.

Autorzy wybrali metodę mieszaną polegającą na imporcie geometrii obwodu magnetycznego stojana zamodelowanej w programie CAD (rys.1), geometria wirnika została utworzona w programie ANSYS. Takie rozwiązanie umożliwiło łatwiejsze uwzględnienie niesymetrycznej konstrukcji stojana oraz pozwoliło na sparametryzowanie modelu wirnika, tak aby można było uwzględniać obrót wirnika i różną grubość szczeliny powietrznej. Na rysunku 3 przedstawiono widok geometrii stojana po imporcie do programu ANSYS z programu CAD.



Rys. 3. Widok geometrii stojana po imporcie z programu CAD do programu ANSYS

Rysunek 4 przedstawia pełny widok geometrii modelu silnika SRM po dodaniu geometrii wirnika zrealizowanej w programie ANSYS.



Rys. 4. Widok pełnej geometrii silnika SRM po uzupełnieniu jej o wirnik w programie ANSYS

Kolejnym krokiem dla realizacji zamierzonego celu było opracowanie metody obliczeń rozkładu pola magnetycznego dla różnych położenia wirnika i dla różnych grubości szczeliny powietrznej. W tym celu zastosowano wewnętrzny język programowania parametrycznego APDL (ang. *Ansys Parametric Design Language*) pozwalający na napisanie, tzw. makra do obliczeń realizujących obliczenia polowe w pętli [5], w zależności od zmieniającego się parametru, np. grubości szczeliny powietrznej. Fragment makra realizują-

cego omawiane obliczenia przedstawiono na listingu 1.

Listing 1

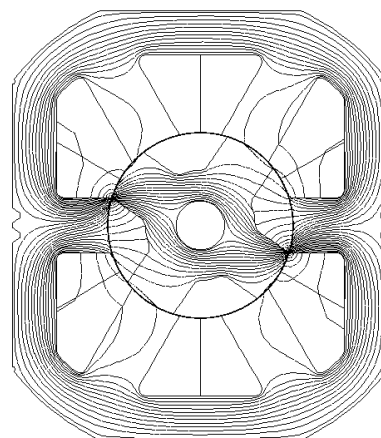
```

....
! Wczytywanie geometrii stojana silnika
!*
~SATIN,'Ansys_robot_6_4','sat',,ALL,0,0,0
.....
! Pętla do zmiany wymuszenia prądowego
*do,i,i_start,i_end,i_step
! Określenie gęstości prądu po zmianie wymuszenia
*set,js,N*i/S_coil
! Pętla do obracania wirnika o zadana wartość fi_1
*do,obr,fi_start,fi_end,fi_1
....

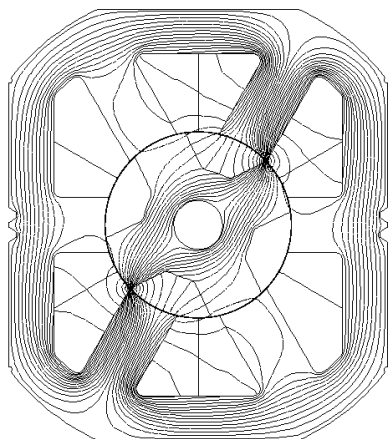
```

W trakcie obliczeń wymiary obwodu magnetycznego stojana silnika pozostawały stałe, zmianie uległa tylko średnica zewnętrzna wirnika d_r . Pozostałe wymiary obwodu wirnika nie były zmieniane. Do obliczania strumienia i współczynników indukcyjności zastosowano makro o nazwie *LMATRIX*, natomiast do obliczania momentu makro *TORQSUM*. Na rysunku 5 przedstawiono rozkład linii strumienia dla grubości szczeliny powietrznej $\delta=0.1\text{mm}$ przy zasilaniu umownych pasm *Ph1* (rys.5a) i *Ph2* (rys.5b) dla pierwszego położenia brzegowego wirnika (θ_1). Położenie to określają kąty szerokości biegunów stojana ($\beta_s=34^\circ$) i wirnika ($\beta_r=35^\circ$). Dla podanych wartości kątów stojana i wirnika kąt położenia brzegowego wynosi $\theta_1=10.5^\circ$ (w odniesieniu do położenia niewspółosiowego θ_0 danego pasma).

a)



b)

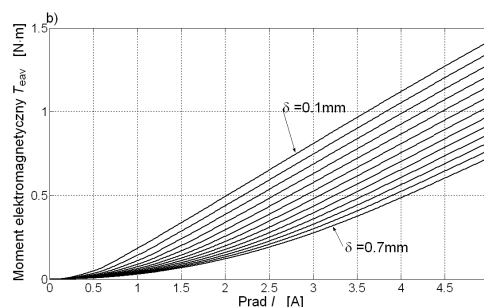
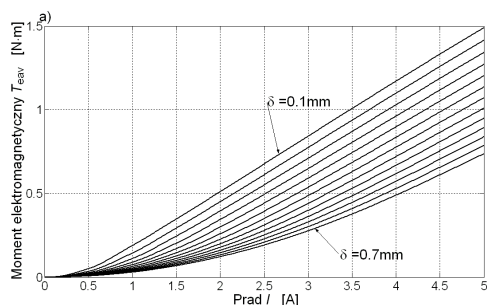


Rys. 5. Rozkład linii strumienia dla grubości szczeliny $\delta=0.1\text{mm}$ w pierwszym położeniu brzegowym wirnika dla pasma: a) Ph1, b) Ph2

4. Analiza wpływu grubości szczeliny powietrznej na charakterystyki statyczne silnika

Wykorzystując symetrię budowy wirnika zakres zmian kąta ograniczono do 45 stopni mechanicznych ze skokiem co jeden stopień mechaniczny. Zakres zmian wymuszenia prądowego określono od wartości 0.001 A do 5 A z krokiem 0.5 A. Obliczenia przeprowadzono oddzielnie dla pasma Ph1 oraz pasma Ph2 z uwagi na niesymetrię modelu. Zakres zmian szczeliny powietrznej δ określono od 0.1 mm do 0.7 mm z krokiem 0.05 mm.

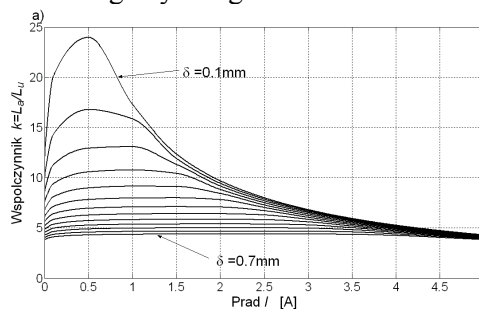
Na rysunku 6 przedstawiono zależności wartości średniej momentu elektromagnetycznego silnika T_{eav} w funkcji wartości prądu I przy zmieniającej się grubości szczeliny powietrznej δ , odpowiednio dla pasma Ph1 (rys.6a) oraz pasma Ph2 (rys.6b).

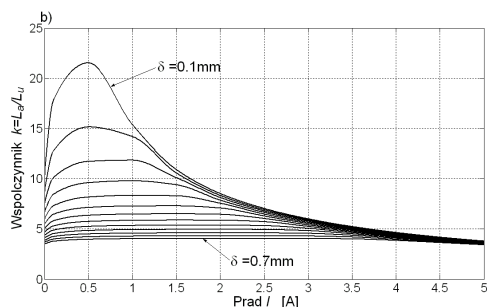


Rys. 6. Zależność wartości średniej momentu elektromagnetycznego w funkcji wartości prądu I przy zmieniającej się grubości szczeliny powietrznej dla: a) Ph1, b) Ph2

Porównując wartości momentów na rysunkach 6a i 6b można stwierdzić, że pasmo Ph1 wytwarza większą wartość średnią momentu elektromagnetycznego niż pozostałe pasma. Wzrost grubości szczeliny powietrznej w wyraźny sposób zmniejsza tę różnicę.

Innym parametrem określanym dla silników SRM jest stosunek wartości indukcyjności położenia współosiowego L_a do wartości indukcyjności położenia niewspółosiowego L_u określany jako $k=L_a/L_u$. Na rysunku 7 przedstawiono zależność współczynnika k w funkcji wartości płynącego prądu I dla różnych wartości grubości szczeliny powietrznej δ , odpowiednio dla pasma Ph1 (rys.7a) oraz pasma Ph2 (rys.7b). Uzyskane wartości współczynnika k dla pasma Ph1 są większe niż w pozostałych pasmach. Indukcyjność położenia niewspółosiowego L_u pasma Ph1 jest mniejsza w porównaniu z pozostałymi pasmami. Uzyskane wartości indukcyjności położenia współosiowego L_a dla pasma Ph1 były o kilka procent większe. Pasma Ph1 z uwagi na nieco inny kształt obwodu magnetycznego jest bardziej podatne na nasycenie się obwodu magnetycznego.





Rys. 7. Zależność współczynnika $k=L_a/L_u$ w funkcji wartości prądu I dla różnych grubości szczeliny powietrznej odpowiednio dla: a) Ph1, b) Ph2

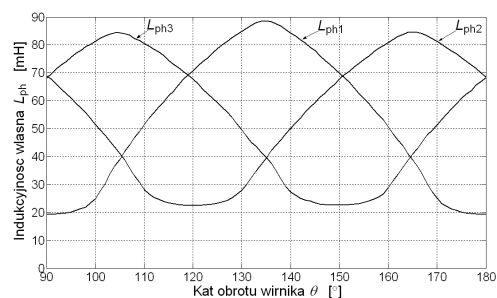
5. Wyniki badań laboratoryjnych

W warunkach laboratoryjnych dokonano pomiaru indukcyjności własnej poszczególnych pasm w funkcji położenia wirnika dla trzech grubości szczeliny powietrznej: 0.3mm, 0.4mm oraz 0.5mm. Wirniki silnika SRM użyte w badaniach przedstawiono na rys. 8.

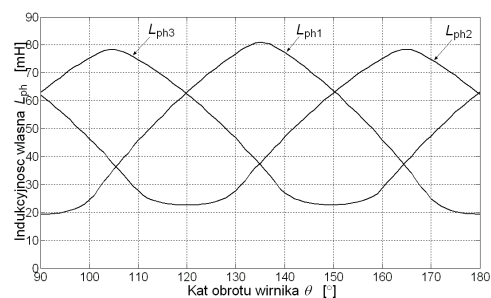


Rys. 8. Widok wirników silnika SRM będących obiektami badań laboratoryjnych

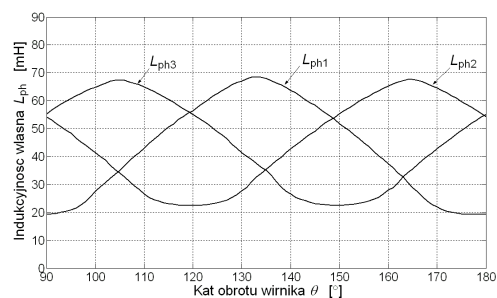
Dla usprawnienia pomiarów przygotowano stanowisko pomiarowe, pozwalające na obrót wirnika o określony kąt za pomocą silnika skokowego z możliwością jednoczesnego zapisu wartości indukcyjności do pliku. Pomiaru wykonywano w określonych odstępach czasowych determinowanych parametrami miernika służącego do pomiaru indukcyjności własnej. Na rysunkach 9-11 przedstawiono zmierzone kształty indukcyjności uzwojeń poszczególnych pasm dla wybranych grubości szczelin.



Rys. 9. Kształt indukcyjności własnych dla grubości szczeliny powietrznej równej 0.3mm

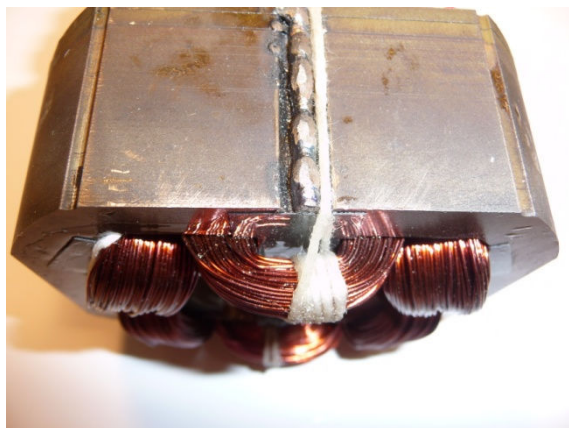


Rys. 10. Kształt indukcyjności własnych dla grubości szczeliny powietrznej równej 0.4mm



Rys. 11. Kształt indukcyjności własnych dla grubości szczeliny powietrznej równej 0.5mm

Badania laboratoryjne potwierdziły, że grubość szczeliny powietrznej w istotny sposób wpływa na zmianę kształtu indukcyjności własnych poszczególnych uzwojeń. Ogólnie uzyskane kształty indukcyjności własnych są zbliżone do tych wyznaczonych na bazie obliczeń połowych. Uzyskano nieco mniejsze wartości indukcyjności w położeniach współosiowych. Duży wpływ na to ma sam sposób łączenia blach. W badanym przypadku blachy stojana były łączone metodą spawania (rys. 12).



Rys. 12. Widok stojana z widocznym sposobem łączenia blach

Indukcyjność własna położenia niewspółosiowego pasma $Ph1$ jest zauważalnie mniejsza niż w pasmach $Ph2$ i $Ph3$, co jednocześnie jest zgodne z wynikami uzyskanymi z obliczeń. Indukcyjność własna położenia współosiowego pasma $Ph1$ jest jednak nieco większa, niż w pozostałych pasmach. Różnica ta zwiększa się w przypadku zmniejszania się grubości szczeliny powietrznej.

Wyznaczone na podstawie pomiarów współczynniki stosunku indukcyjności położen charakterystycznych $k=L_a/L_u$ zamieszczono w Tabeli 1.

Tabela 1 – Zależność współczynnika $k=L_a/L_u$ w funkcji grubości szczeliny powietrznej dla wszystkich pasm silnika

	$\delta=0.3$ mm	$\delta=0.4$ mm	$\delta=0.5$ mm
$Ph1$	4.59	4.22	3.54
$Ph2$	3.77	3.46	3.01
$Ph3$	3.7	3.44	3.01

Zauważalny spadek wartości współczynnika k dla szczeliny powietrznej $\delta=0.5$ mm spowodowany był przesunięciem się pakietu blach wirnika o kilka milimetrów w porównaniu do pozostałych wirników.

6. Wnioski

Grubość szczeliny powietrznej jest w przypadku maszyn SRM jednym z istotniejszych parametrów projektowych. Jeszcze większego znaczenia nabiera ona w przypadku zastosowania konstrukcji o niesymetrii magnetycznej i elektrycznej. W przypadku stosowania relatywnie dużych grubości szczelin niesy-

metria magnetyczna jest do zaakceptowania. Jednak w przypadku zastosowania małej wartości szczeliny powietrznej dysproporcje w charakterystykach statycznych stają się już znaczące. To oczywiście wpływa na przebiegi czasowe prądów i wytwarzanego momentu elektromagnetycznego. Wykonane pomiary indukcyjności własnej potwierdziły wyniki obliczeń symulacyjnych, że zmniejszanie grubości szczeliny powietrznej δ silnika zwiększa dysproporcje pomiędzy poszczególnymi pasmami.

7. 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]. Krishnan R.: *Switched reluctance motor drive: modeling, simulation, analysis, desing, and applications*, CRC Press LLC, 2001.
- [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]. Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Badanie wpływu grubości szczeliny powietrznej na właściwości silników reluktancyjnych przelączalnych w oparciu o badania polowe*, Maszyny elektryczne, Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych, KOMEL, Zeszyty problemowe, Nr 75, 2006, str. 195-200.
- [5]. Ansys *Documentation*, ANSYS, Inc.

Autorzy

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