

Mariusz Korkosz
Politechnika Rzeszowska

ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI DWUPASMOWYCH SILNIKÓW RELUKTANCYJNYCH PRZEŁĄCZALNYCH O RÓŻNYCH ROZWIĄZANIACH KONSTRUKCYJNYCH WIRNIKÓW

THE PROPERTIES ANALYSIS OF TWO-PHASE SWITCHED RELUCTANCE MOTORS WITH VARIOUS ROTORS CONSTRUCTION

STRESZCZENIE: W sprzęcie gospodarstwa domowego stosowany jest tradycyjnie silnik komutatorowy. Jest to niewątpliwie sprawdzone rozwiązanie i co najważniejsze stosunkowo tanie. Jednak w najbliższym czasie sytuacja może ulec znaczącej zmianie z uwagi na ograniczenia dotyczące dopuszczalnej mocy pobieranej z sieci zasilającej. Dotyczy to szczególnie napędów wysokoobrotowych, takich jak agregaty ssące. Rozwiązaniem alternatywnym są silniki z komutacją elektroniczną o znacznie wyższej sprawności. Jednym z takich silników jest silnik reluktancyjny przełączalny. W przypadku silników z komutacją elektroniczną częstotliwość komutacji jest ściśle związana z prędkością obrotową oraz liczbą biegunów wirnika. To sugeruje stosowanie możliwie najmniejszej liczby biegunów wirnika tj. 2. Koszt wykonania układu zasilającego zależy od liczby pasm silnika. Ograniczenie liczby pasm do wartości minimalnej pozwala zmniejszyć koszt układu zasilającego. W przypadku silnika reluktancyjnego przełączalnego wartość minimalną liczby pasm ogranicza problem rozruchu. W przypadku zastosowania liczby pasm równej 2 możliwy jest rozruch silnika z każdego położenia wirnika. W artykule zaprezentowano kilka rozwiązań konstrukcyjnych wirnika projektowanego silnika dwupasmowego. Badano wpływ różnych wirników na wypadkowe charakterystyki statyczne i ruchowe. Zamieszczono wnioski odnośnie poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych wirników.

Abstract: In domestic appliances traditionally the universal motor is used. It is undoubtedly proven and relatively cheap solution. However, this situation may change in the near future, because of limitations concerning consumption of power from mains. It concerns particularly the high-speed drives such as suction unit. Motors with electronic commutation are alternative solution with considerably higher efficiency. One such solution is a switched reluctance motor. In case of motors with an electronic commutation, a frequency of commutation is closely connected with a speed and the number of rotor poles. This suggests usage of the smallest possible number of rotor poles, i.e. 2. A cost of a power system depends on number of motor phases. Limiting the number of phases to minimum helps to reduce the cost of power system. In switched reluctance motors the minimum number of phases is limited by the problem with start-up. In the case of use 2 phases the start-up is possible in all positions of rotor. In the paper various rotors constructions of two-phase motors are presented. An impact of different rotors on the static and dynamic characteristics are studied.

Słowa kluczowe: silnik reluktancyjny przełączalny, dwufazowy, napęd wysokoobrotowy, konstrukcje wirnika

Keywords: switched reluctance motor, two-phase drives, high-speed drives, asymmetrical stator, rotor constructions

1. Wstęp

W wielu urządzeniach AGD stosowane są napędy wysokoobrotowe lub napędy o regulowanej prędkości obrotowej. Zaliczyć do nich można np. odkurzacze, pralki, roboty kuchenne, itp. W aplikacjach wysokoobrotowych (odkurzacze, roboty kuchenne) powszechnie stosuje się silniki komutatorowe. Są to maszyny które charakteryzują się stosunkowo niską sprawnością przetwarzania energii elektrycznej. Są one bardzo podatne na uszkodzenia i mało odporne na przeciążenia. Silniki komutatorowe są jednak chętnie stosowane z uwagi na niski

wypadkowy koszt układu napędowego (silnik, układ energoelektroniczny). Przewidywane wprowadzenie ograniczenia w zakresie mocy pobieranej przez silniki elektryczne stosowane w sprzęcie AGD otwiera jednak możliwość aplikacji maszyn z komutacją elektroniczną. Jedną z maszyn możliwych do zastosowania w sprzęcie AGD jest silnik reluktancyjny przełączalny. Aby napęd oparty o silnik reluktancyjny przełączalny był możliwie jak najtańszy już na etapie projektowania należy przyjąć rozwiązania ograniczające potencjalne koszty. Na przykładzie napędu wysokoobrotowego jakim jest niewątpliwie

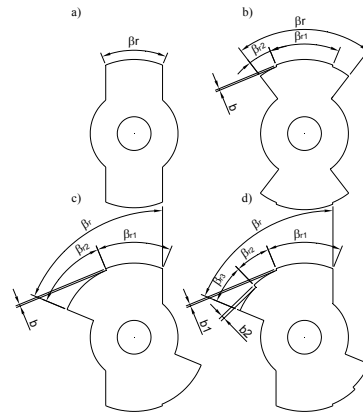
agregat ssący zostanie pokazana możliwość zastosowania silnika reluktancyjnego przełączalnego. Ograniczanie kosztów wykonania układu napędowego wymusza stosowanie silnika z możliwie minimalną liczbą pasm silnika m . W przypadku napędu gdzie wymagana jest prędkość robocza dochodząca do 50000 obr/min oraz mocy na wale nie mniejszej niż 700W minimalną liczbę pasm m można ograniczyć do wartości nie mniejszej niż 2. Jednak konstrukcje dwupasmowe silnika reluktancyjnego przełączalnego o budowie symetrycznej nie wytwarzają momentu rozruchowego z każdego położenia wirnika. Napęd agregatu ssącego jest przykładem aplikacji gdzie wymagana jest stosunkowo niewielka wartość momentu rozruchowego. To dopuszcza możliwość zastosowania procedury startowej silnika dwupasmowego o budowie symetrycznej opisanej w [1]. Rozwiązaniem alternatywnym jest zastosowanie celowej deformacji wirnika dla uzyskania momentu rozruchowego z każdego położenia wirnika [2-3]. W niniejszej pracy zostały przeanalizowane różne warianty konstrukcyjne wirników. Zostały wyznaczone charakterystyki statyczne dla poszczególnych wariantów konstrukcyjnych wirników. Dla wybranych przypadków zostały wyznaczone charakterystyki ruchowe. Dokonano porównania wpływu poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych na charakterystyki i właściwości silnika reluktancyjnego przełączalnego. W warunkach laboratoryjnych wyznaczono przykładowe zależności momentu elektromagnetycznego w funkcji położenia wirnika dla dwóch wybranych konstrukcji wirnika silnika dwupasmowego. Zamieszczono wnioski dotyczące poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych wirników.

2. Rozwiązania konstrukcyjne wirników

Napęd wysokoobrotowy wymaga nieco innego podejścia do problemu doboru liczby biegunów wirnika N_r . Częstotliwość przełączeń f_k uzwojeń stojana zależy od liczby biegunów wirnika. Zastosowanie jednej pary biegunów wirnika ($N_r=2$) pozwala maksymalnie ograniczyć częstotliwość przełączeń f_k uzwojeń stojana. Częstotliwość przełączeń f_k wpływa na straty w żelazie silnika. Zastosowanie minimalnej liczby biegunów $N_r=2$ wirnika pozwala ograniczyć w sposób konstrukcyjny straty w żelazie. Konstrukcje wirników można podzielić na pięć kategorii [1-3]:

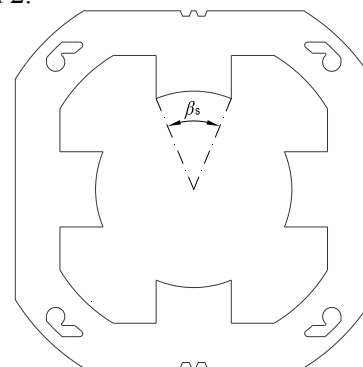
- symetryczne,
- symetryczne ze skokową szczeliną powietrzną,
- niesymetryczne z pojedynczą skokową szczeliną powietrzną,
- niesymetryczne z k skokową szczeliną powietrzną,
- niesymetryczne z profilowaną szczeliną powietrzną.

Wirniki o konstrukcji symetrycznej oraz symetrycznej z skokową szczeliną powietrzną wymagają stosowania procedury startowej opisaną w [1]. Konstrukcje niesymetryczne nie wymagają już stosowania zaawansowanej procedury startowej. Wybrane rozwiązania konstrukcyjne wirników pokazano na rysunku 1.



Rys.1. Wybrane rozwiązania konstrukcyjne wirników a) symetryczny, b) symetryczny ze skokową szczeliną powietrzną, c) niesymetryczny ze skokową szczeliną powietrzną, d) niesymetryczny z podwójną skokową szczeliną powietrzną

Stojan silnika dwupasmowego projektowanego do napędu wysokoobrotowego pokazano na rysunku 2.



Rys.2. Widok stojana silnika projektowanego do napędu wysokoobrotowego

Stojan silnika został przewidziany do zamontowania z wykorzystaniem seryjnych

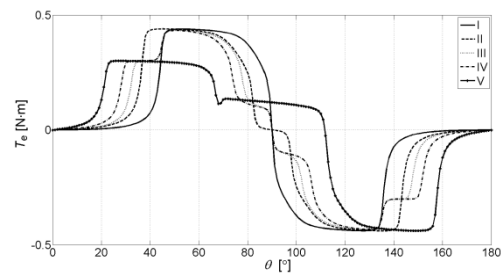
tarcz łożyskowych. Na rysunku widoczne są otwory montażowe tarcz łożyskowych. W pracy zostały zamieszczone wyniki badań symulacyjnych na podstawie których zostało wytypowanych kilka konstrukcji do dalszych badań [4]. Poszczególne wirniki będą oznaczone jako:

- I - konstrukcja symetryczna (rys.1a) z kątem bieguna wirnika $\beta_f=45^\circ$,
- II - konstrukcja symetryczna (rys.1a) z kątem bieguna wirnika $\beta_f=60^\circ$,
- III - konstrukcja symetryczna ze skokową szczeliną powietrzną (rys.1b) z kątem bieguna wirnika $\beta_{f1}=45^\circ$, $\beta_{f2}=12^\circ$ oraz parametrem $b=0.15\text{mm}$,
- IV - konstrukcja symetryczna ze skokową szczeliną powietrzną (rys.1b) z kątem bieguna wirnika $\beta_f=45^\circ$, $\beta_{f2}=16^\circ$ oraz parametrem $b=0.15\text{mm}$,
- V - konstrukcja niesymetryczna symetryczna ze skokową szczeliną powietrzną (rys.1b) z kątem bieguna wirnika $\beta_{f1}=45^\circ$, $\beta_{f2}=45^\circ$ oraz parametrem $b=0.15\text{mm}$.

3. Badania symulacyjne - wyznaczenie charakterystyk statycznych

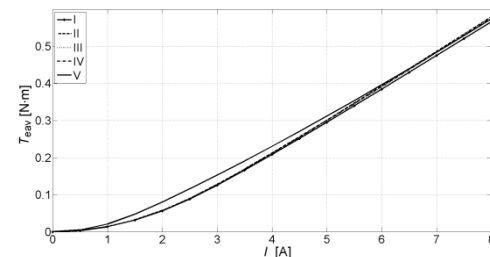
Obliczenia symulacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Na bazie modelu polowego została przeprowadzona analiza właściwości poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych wirników w odniesieniu do charakterystyk statycznych silnika. Wszystkie zamieszczone charakterystyki statyczne wyznaczano przy prądzie pasma I zmienianym w zakresie (0.5÷8)A ze skokiem co 0.5A. W trakcie obliczeń położenie wirnika zmieniano w zależności rodzaju konstrukcji wirnika od położenia niewspółosiowego (umowne 0°) do położenia współosiowego (90°) w przypadku rozwiązań symetrycznych (rys.1a-1b) lub do następnego położenia niewspółosiowego (180°) dla rozwiązań niesymetrycznych (rys.1c).

Na rysunku 3 pokazano zależności momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prądzie pasma $I=4\text{A}$ wszystkich analizowanych konstrukcji wirników.



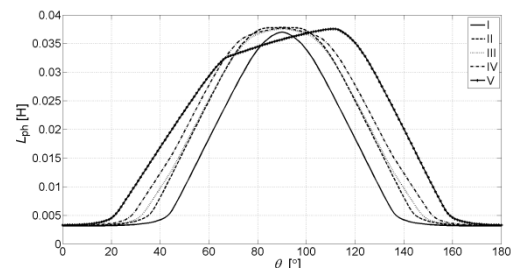
Rys.3. Zależności momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prądzie pasma $I=4\text{A}$ wszystkich analizowanych konstrukcji wirników

Z obliczonych momentowych charakterystyk statycznych zostały wyznaczone wartości średnie wytwarzanego momentu elektromagnetycznego T_{eav} poszczególnych rozwiązań. Zależności średniego momentu elektromagnetycznego T_{eav} poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych wirników w funkcji prądu pasma I pokazano na rysunku 4.



Rys.4. Zależności wartości średniej momentu elektromagnetycznego T_{eav} w funkcji prądu pasma I wszystkich analizowanych konstrukcji wirników

Rodzaj zastosowanej konstrukcji wirnika ma stosunkowo niewielki wpływ na wartość średnią momentu elektromagnetycznego T_{eav} wyznaczaną z momentowych charakterystyk statycznych. Zależność indukcyjności własnej L_{ph} w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prądzie pasma $I=4\text{A}$ wszystkich analizowanych konstrukcji wirników pokazano na rysunku 5.



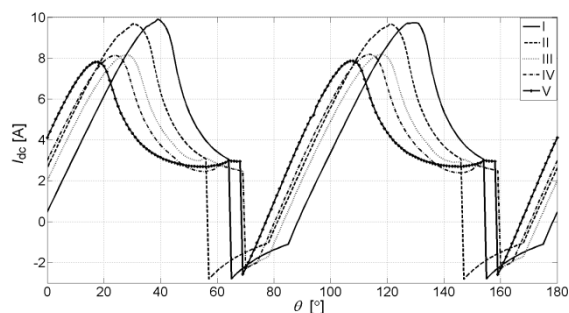
Rys.5. Zależności indukcyjności własnej L_{ph} w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prądzie

pasma $I=4A$ wszystkich analizowanych konstrukcji wirników

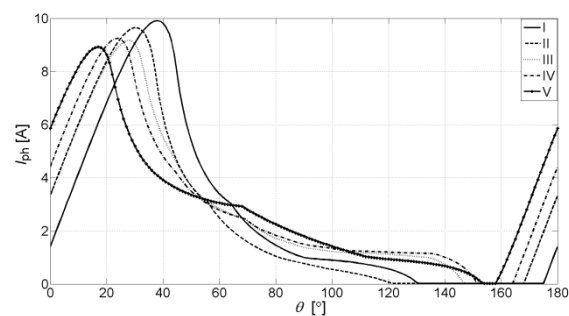
4. Badania symulacyjne - wyznaczenie prądów i momentu elektromagnetycznego

Od projektowanego silnika wymaga się pracy z prędkością obrotową $n=45000$ obr/min oraz mocą na wale nie mniejszą niż 700W. Na bazie modelu połowo-obwodowego zostały wyznaczone wartości prądów oraz momentu elektromagnetycznego w projektowanym punkcie pracy silnika. Kąty sterowania zostały tak dobrane, aby uzyskać wymaganą moc na wale. W układzie zasilania zamodelowano klasyczny półmostek typu H. Na rysunkach 6-8 pokazano zależności prądu źródła I_{dc} (rys.6), prądu pasma I_{ph} (rys.7) oraz momentu elektromagnetycznego T_e (rys.8) w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prędkości $n=45000$ obr/min dla poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych wirników.

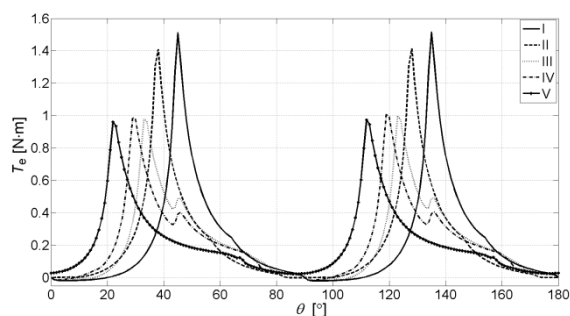
W tabeli 1 dokonano zestawienia parametrów silnika w projektowanym punkcie pracy dla badanych konstrukcji wirników.



Rys.6. Zależności prądu źródła zasilającego I_{dc} w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prędkości $n=45000$ obr/min dla badanych wirników



Rys.7. Zależności prądu wybranego pasma I_{ph} w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prędkości $n=45000$ obr/min dla badanych wirników



Rys.8 Zależności momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prędkości $n=45000$ obr/min dla badanych konstrukcji wirników

Tabela 1 Zestawienie wybranych parametrów silnika w projektowanym punkcie pracy dla badanych konstrukcji wirników

	I	II	III	IV	V
θ_{on} [°]	-2	-9	-11	-15	-22
θ_{off} [°]	67	55	70	70	68
T_{eav} [Nm]	0,206	0,206	0,213	0,216	0,222
I_{dcav} [A]	3,36	3,34	3,43	3,48	3,62
I_{phrms} [A]	3,74	4,19	3,81	3,85	3,89
P_{cu} [W]	45,3	56,9	47	48	49
P_{Fe} [W]	161,4	154	186,4	196,6	205,5
P_{mech} [W]	109	109	109	109	109
P_{out} [W]	700,2	707	707,3	712,2	730,6
P_1 [W]	1041,6	1035,4	1063,3	1078,8	1122,2
η [%]	67,2	68,3	66,3	66	65,1

Najwyższą sprawność uzyskano w przypadku wirnika symetrycznego oznaczonego jako II. Wprowadzenie dodatkowej szczeliny powietrznej zarówno w konstrukcji

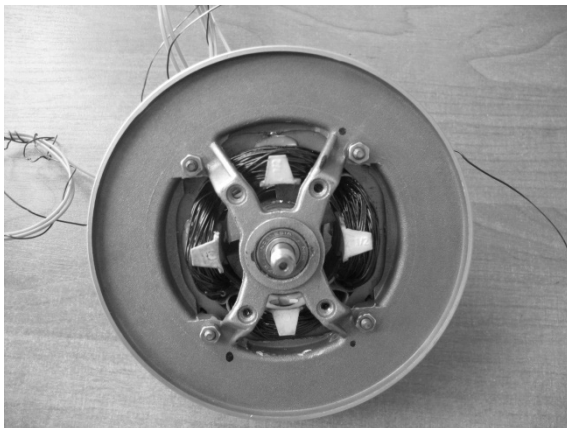
symetrycznej czy też niesymetrycznej powoduje zmniejszenie sprawności wypadkowej przy jednoczesnym zmniejszeniu tętnień momentu elektromagnetycznego

5. Model fizyczny silnika oraz wybrane wyniki badań laboratoryjnych

Zaprojektowany stojan silnika dwupasmowego 4/2 z różnymi rozwiązaniami wirników został wykonany praktycznie. Na rysunku 9 pokazano pakiet blach stojana z wirnikami. Złożony prototyp zaprojektowanego silnika pokazano na rysunku 10.



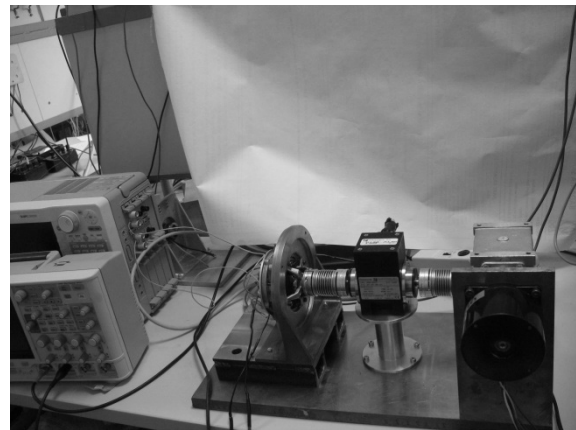
Rys.9. Widok pakietu stojana z różnymi wersjami wirnikami



Rys.10. Widok prototypu zaprojektowanego silnika reluktancyjnego przelączalnego 4/2 przeznaczonego do napędu agregatu ssącego

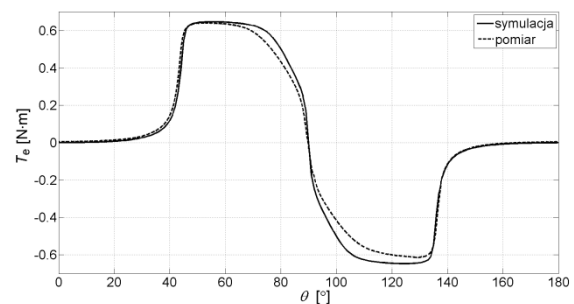
W warunkach laboratoryjnych wyznaczono momentowe charakterystyki statyczne. Stanowisko do wyznaczania charakterystyk statycznych pokazano na rysunku 11. W uzwojeniach silnika oraz rdzeniu stojana zostały zamontowane termopary typu K. Pozwala to kontrolować temperaturę aktualnie zasilanego uzwojenia w trakcie badań

statycznych. Badania statyczne są znacznie bardziej niekorzystne z punktu widzenia termicznego z uwagi na brak chłodzenia uzwojenia. W praktycznej aplikacji zasysane przez turbinę agregatu powietrze przepływa wzdłuż pakietu stojana i wirnika powodując intensywne schładzanie uzwojeń silnika. W warunkach laboratoryjnych przy zdemontowanej turbinie i praktycznie nieruchomym wirniku należało znacząco ograniczyć wartość płynącego prądu.

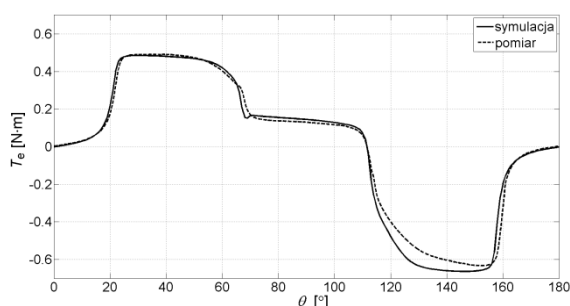


Rys.11. Widok stanowiska do wyznaczania charakterystyk statycznych

Na rysunkach 12-13 pokazano zależności momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ dla wirników oznaczonych jako I (rys.12) i V (rys.13) przy prądzie pasma 5A uzyskane w warunkach laboratoryjnych oraz symulacyjnych.



Rys.12. Zależności momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ dla wirnika I przy prądzie pasma 5A uzyskane w warunkach laboratoryjnych oraz symulacyjnych



Rys.13. Zależności momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ dla wirnika V przy prądzie pasma 5A uzyskane w warunkach laboratoryjnych oraz symulacyjnych

Wyznaczone w warunkach laboratoryjnych zależności momentu elektromagnetycznego dwupasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego należy uznać za zbliżone do tych uzyskanych w warunkach symulacyjnych. To pozwala przypuszczać, że wyznaczone parametry eksploatacyjne silnika zamieszczone w Tabeli I będą możliwe do uzyskania w warunkach laboratoryjnych.

6. Wnioski

Przeprowadzona analiza różnych rozwiązań konstrukcyjnych wirników przeznaczonych do wysokoobrotowego silnika dwupasmowego pozwala wyciągnąć następujące wnioski:

- kształt zastosowanego wirnika ma wpływ na przyjętą strategię rozruchu,
- wirniki o budowie symetrycznej wymagają zastosowania specjalnej procedury startowej,
- zastosowanie wirnika o budowie niesymetrycznej ułatwia rozruch silnika,
- zastosowanie dodatkowej szczeliny powietrznej w rozwiązaniu o budowie symetrycznej zmniejsza strefę martwą silnika (brak momentu elektromagnetycznego),
- zastosowanie skokowej szczeliny powietrznej w rozwiązaniu o budowie niesymetrycznej umożliwia eliminację strefy martwej silnika,
- zastosowanie dodatkowej szczeliny powietrznej prowadzi do redukcji sprawności wypadkowej,
- parametry sterowania zależą od rodzaju wirnika przy identycznych danych nawojowych oraz kształcie obwodu magnetycznego stojana.

Dalsze prace będą polegały na wyznaczeniu rodziny charakterystyk statycznych oraz

ruchowych silnika dla poszczególnych wykonanych wirników.

7. Literatura

- [1] Hamdy R., Fletcher J.E., Williams B.W.: *Bidirectional starting of a symmetry two-phase switched reluctance machine*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 2, 2000, pp.211-217.
- [2] Khater M.M., Afifi W.A., Ei-Khazendar M.A.: *Operating performances of a two-phase switched reluctance motor*, 11-th International Power Systems Conference, MEPCON 2006, Vol. 2, pp. 636-642.
- [3] Wróbel K., Tomczewski K.: *Jednoczesna optymalizacja kształtu obwodu magnetycznego i parametrów zasilania przełączalnego silnika reluktancyjnego*, Przegląd Elektrotechniczny, 2009 R 85, Nr 3, 2009, s. 107-110.
- [4] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Analiza rozwiązań konstrukcyjnych silników reluktancyjnych przełączalnych przeznaczonych do napędów wysokoobrotowych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 1/2012 (94), str. 25-31.

Autor

dr inż. Mariusz Korkosz, mkosz@prz.edu.pl
 Politechnika Rzeszowska
 ul. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Informacje dodatkowe

Praca wykonana w ramach projektu badawczego NN511 312 440

Badania przeprowadzono z aparatury zakupionej w wyniku realizacji Projektu nr POPW.01.03.00-18-012/09 "Rozbudowa infrastruktury naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej" współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013, Priorytet I. Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3 Wspieranie innowacji.

Aparatura wykorzystana do przeprowadzenia badań została zakupiona w wyniku realizacji Projektu „Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013, Priorytet I. Konkurencyjna i Innowacyjna Gospodarka, Działanie 1.3 Regionalny system innowacji.

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Mariusz Jagiela