

Krzysztof Bieńkowski*, Adam Rogalski**, Marcin Flaszczczyński***
 Politechnika Warszawska, Warszawa

DOBÓR PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH SILNIKA RELUKTANCYJNEGO PRZEŁĄCZALNEGO ORAZ ICH WPŁYW NA CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE MOMENTU

ASSORTMENT OF CONSTRUCTIONAL PARAMETERS OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR AND THEIR INFLUENCE ON STATIC TORQUE CHARACTERISTICS

Abstract: The influences of geometrical parameters of three phase 12/8 SRM on static torque were presented on this paper. Electromagnetic torque was obtained in result of solving FEM magnetostatic model of the motor. Assortment of internal stator diameter, breaths of the poles in dependence of external stator diameter for maximum torque was presented.

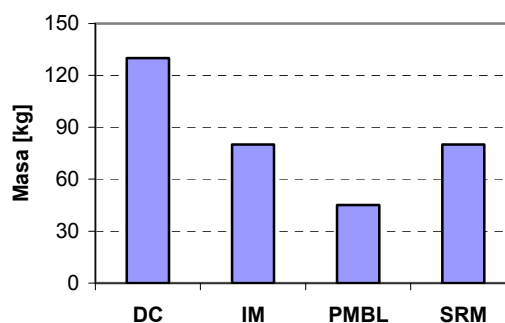
1. Wstęp

Przełączalne silniki reluktancyjne (ang: Switched Reluctance Motor) znajdują, w ostatnich latach, coraz szersze zastosowanie w napędach o regulowanej prędkości obrotowej, zarówno w przemyśle, jak i w aplikacjach powszechnego użytku [1,3]. W stosunku do innych typów maszyn charakteryzują się, prostą technologią wytwarzania i niższymi kosztami układu napędowego. Możliwość pracy w bardzo trudnych warunkach, przy wysokiej wilgotności, temperaturze, zapyleniu oraz łatwe kształtowanie charakterystyki mechanicznej przy wysokiej sprawności skłaniają do stosowania silników reluktancyjnych w maszynach roboczych i napędach trakcyjnych [4] oraz pompach wirnikowych i wentylatorach.

Niewielki koszt wytwarzania i wysoka niezawodność silników SRM wynika z ich prostej i trwałej budowy [1,2]. Brak mechanicznego komutatora, uzwojeń na wirniku i brak magnesów trwałych czyni je odpornymi na przeciążenia mechaniczne i umożliwia pracę w wysokich temperaturach. Mikroprocesorowy sterownik [2,10] kontroluje stan elektryczny silnika zabezpieczając przed przeciążeniami elektrycznymi i zapewnia wysoką sprawność napędu w szerokim zakresie prędkości obrotowych [3].

W napędach o regulowanej prędkości obrotowej z przekształtnikami silniki SRM wykazują wyższą sprawność, niższy koszt i mniejszy ciężar niż komutatorowe silniki prądu stałego. Po

równanie masy napędów różnych typów przedstawione jest na rys. 1.

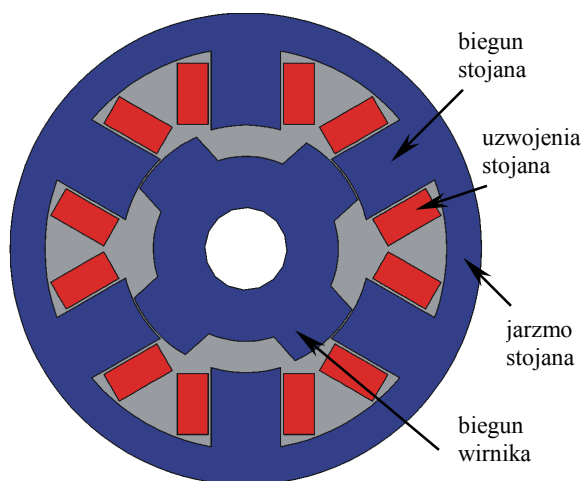


Rys. 1. Porównanie masy silników o mocy 50 kW prądu stałego, indukcyjnego, bezszczotkowego z magnesami trwałymi i reluktancyjnego.

W dalszej części artykułu przedstawiono zależność momentu wytwarzanego przez silnik od jego średnicy zewnętrznej oraz stosunku średnicy wewnętrznej stojana do średnicy zewnętrznej, stosunku szerokości bieguna stojana do podziałki biegunowej oraz stosunku szerokości biegunów wirnika i stojana.

2. Budowa i zasada działania SRM

Silnik reluktancyjny przełączalny posiada wydane bieguny zarówno na stojanie jak i na wirniku (rys.2.). Liczby par biegunów nie są sobie równe. Najczęściej wirnik posiada o jedną parę biegunów mniej niż stojan.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny silnika trójfazowego.

Koncentryczne cewki umieszczone są jedynie na biegunach stojana. Cewki znajdujące się na przeciwnych biegunach połączone są szeregowo tworząc pasma uzwojeń stojana. Układ łączników tranzystorowych łączy poszczególne pasma fazowe uzwojeń do źródła napięcia stałego.

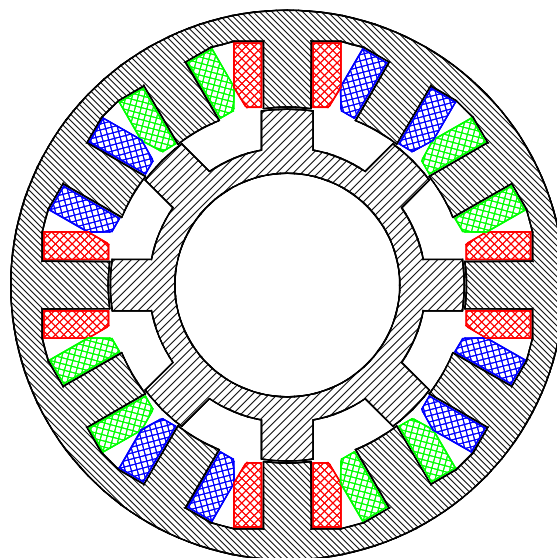
Liczba pasm fazowych silnika jest jednym z najważniejszych parametrów, którego wpływ jest decydujący na charakterystyki eksploatacyjne jak i na koszt maszyny. Ze względu na pulsacje momentu korzystne jest zwiększenie liczby pasm fazowych, jednak powoduje to zwiększenie liczby łączników tranzystorowych i zmniejszenie współczynnika wykorzystania uzwojeń.

Po wzbudzeniu pasma fazowego silnika wirnik dąży do przyjęcia pozycji, w której reluktancja obwodu magnetycznego jest najmniejsza – osie biegunów wirnika pokrywają się z osiami wzbudzonych biegunów stojana. Sekwencyjne przełączanie pasm fazowych powoduje obrót wirnika.

Momenty załączenia i wyłączenia pasm fazowych są ściśle uzależnione od położenia wirnika. Zapewnienie wysokiej sprawności napędu oraz niskich pulsacji momentu wymaga wyznaczenia optymalnych wartości kątów załączenia i wyłączenia w całym zakresie prędkości obrotowych i stopnia obciążenia silnika.

W napędach wolnoobrotowych większych mocy zastosowanie znajdują silniki o zwiększonej liczbie biegunów na pasmo fazowe ($q \geq 1$) [9]. Przekrój poprzeczny tego typu silnika

przedstawiono na rys. 2. Stojan posiada 12 wydających biegunów a wirnik 8. Odległość kątowa pomiędzy osiami biegunów stojana wynosi 30° a wirnika 45° . Na jeden obrót wirnika przypada 24 cykle przełączeń 3 pasm fazowych. W danej chwili moment jest wytwarzany przez 2 pary biegunów stojana i wirnika rozmieszczonych co 90° .



Rys. 3. Przekrój trójfazowego silnika 12/8 (2 pary biegunów na pasmo fazowe).

2. Obliczenia momentu statycznego

Dokładne obliczenia silników przełączalnych wymagają zastosowania połowego opisu zjawisk elektromagnetycznych. W publikacji [6] opisano magnetostacyjny model połowy oraz algorytm automatyzacji obliczeń umożliwiający wyznaczenie momentu elektromagnetycznego silnika w funkcji położenia wirnika dla zmiennych parametrów geometrycznych, wymuszeń prądowych i materiału rdzenia.

Obliczenia pola magnetycznego (rys. 4.) dokonano w przekroju maszyny prostopadłym do osi wału wirnika, zakładając płaskorównoległy charakter pola w silniku. Dzięki temu można było wykorzystać prostą dwuwymiarową metodę elementów skończonych.

Po niezbędnych modyfikacjach – zwiększeniu liczby biegunów – model i metoda obliczeń przedstawione w [6] posłużyły do badań symulacyjnych silnika SRM 12/8.

Przy znanym rozkładzie pola (rys. 3.) w obszarze modelu silnika statyczny moment obrotowy można obliczyć przez całkowanie tensora naprężeń Maxwella wzdłuż szczeliny powietrznej. W przypadku dwuwymiarowego rozkładu pola magnetycznego wyznaczonego przy określonym przepływie θ zasilanego pasma i przy danym położeniu kątowym α wirnika względem stojana, wyrażenie na moment ma postać:

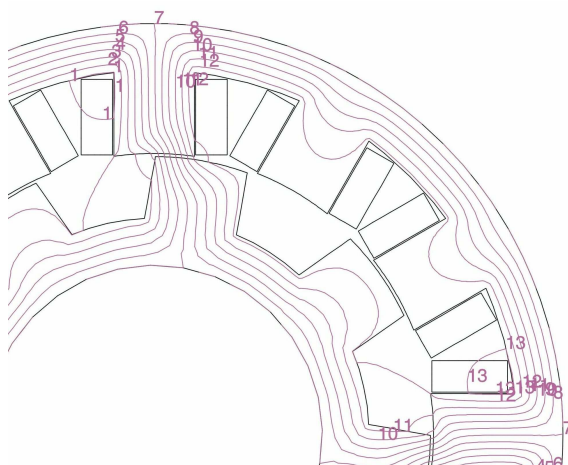
$$T(\theta, \alpha) = r^2 l \int_0^{2\pi} \frac{B_n(\alpha, r) B_t(\alpha, r)}{\mu_0} d\alpha \quad (1)$$

gdzie:

r – promień okręgu w szczelinie powietrznej,

l – efektywna długość rdzenia,

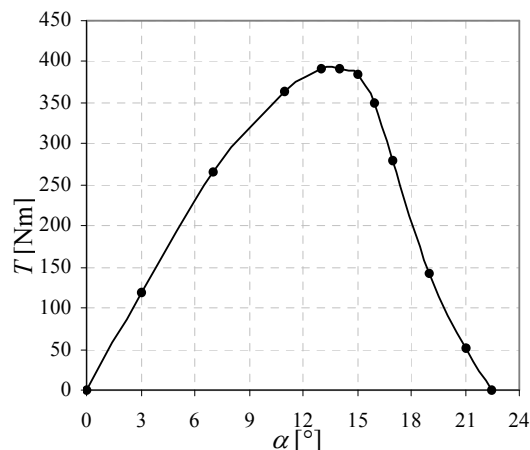
$B_n(\alpha, r), B_t(\alpha, r)$ – składowe indukcji magnetycznej, normalna i styczna do łuku w punkcie (α, r) .



Rys. 4. Izolinie potencjału magnetycznego w modelu magnetostatycznym silnika SRM

Obliczenie charakterystyki statycznego momentu obrotowego w silniku SRM sprowadza się do wyznaczenia jego zależności od kąta położenia wirnika dla danej wartości przepływu uzwojenia. Usytuowanie wirnika względem zasilanego pasma stojana powtarza się co kątową podziałkę biegunowa wirnika τ_r , zatem zależność momentu obrotowego T od kąta określającego położenie wirnika α jest funkcją okresową o okresie τ_r .

Na rysunku 3. przedstawiono charakterystykę kątową momentu statycznego uzyskaną w wyniku obliczeń momentu w 12 położeniach wirnika przy stałym przepływie θ zasilanego pasma.



Rys. 5. Zależność momentu statycznego od położenia wirnika

3. Wpływ parametrów silnika na charakterystyki kątowe momentu

Obliczenia wpływu wybranych parametrów na charakterystyki kątowe momentu zostały wykonane dla silników o następujących parametrach:

- liczba biegunów stojana/wirnika $p_s/p_r = 12/8$,

- średnica zewnętrzna stojana

$$d_{se} = 300, 400, 500 \text{ i } 600 \text{ mm},$$

- długość czynna rdzenia stojana $l_{fe} = 100 \text{ mm}$.

Zwiększająca się średnica zewnętrzna rdzenia umożliwia odprowadzenie większej ilości ciepła przez większą powierzchnię boczną stojana. Dlatego straty w uzwojeniach silnika mogą rosnąć co najmniej proporcjonalnie wraz ze średnicą zewnętrzną. Przy przeprowadzaniu obliczeń przyjęto następujące wartości strat w uzwojeniach maszyny:

$$P_u = 150 \text{ W dla } d_{se} = 300 \text{ mm},$$

$$P_u = 200 \text{ W dla } d_{se} = 400 \text{ mm},$$

$$P_u = 250 \text{ W dla } d_{se} = 500 \text{ mm},$$

$$P_u = 300 \text{ W dla } d_{se} = 600 \text{ mm}.$$

Dla silnika o danej średnicy zewnętrznej, dokonano obliczeń dla zmiennych wartości następujących parametrów geometrycznych:

- średnica wewnętrzna stojana d ,

- szerokość bieguna stojana b_{ps} ,

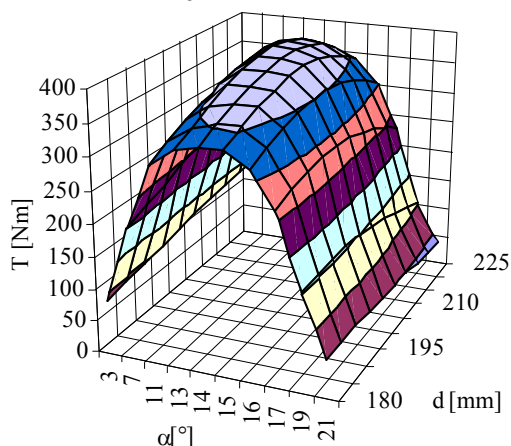
- szerokość bieguna wirnika b_{pr} .

Parametry te mają, zdaniem autorów, największy wpływ na wartość momentu statycznego silnika SRM. Pozostałe wymiary rdzenia ulegały zmianom w zależności od wartości zmiennych tak, aby wysokość jarzm stojana i wirnika była nie mniejsza od połowy szerokości biegunów a wysokość bieguna wirnika

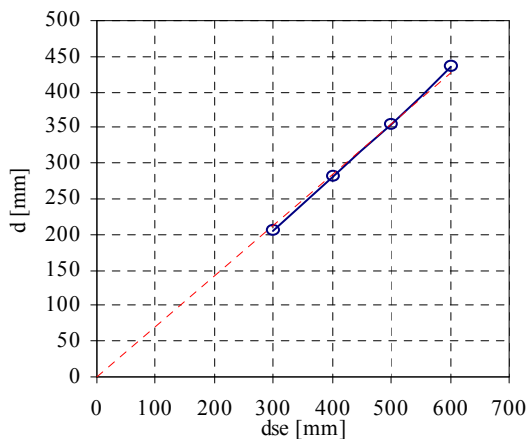
była większa od dwudziestokrotnej wartości szczeliny powietrznej. Obliczenia wykonano przy danej średnicy zewnętrznej stojana dla szeregu średnic wewnętrznych stojana, następnie wybrano taką wartość średnicy wewnętrznej, przy której średnia wartość momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik miała największą wartość [8]. W kolejnym etapie zmianie ulegała szerokość bieguna stojana, a następnie szerokość bieguna wirnika. Wartość przepływu uzwojenia dobierano w każdym przypadku tak, aby zachować stałą wartość strat w miedzi.

3.1. Zależność średnicy wewnętrznej stojana od średnicy zewnętrznej stojana

Na rysunku 6. przedstawiono wykres zależności statycznego momentu elektromagnetycznego silnika w funkcji położenia wirnika α i średnicy wewnętrznej stojana d dla średnicy zewnętrznej silnika d_{se} równej 300 mm.



Rys. 6. Moment w funkcji kąta położenia wirnika i średnicy wewnętrznej stojana dla średnicy zewnętrznej stojana 300 mm



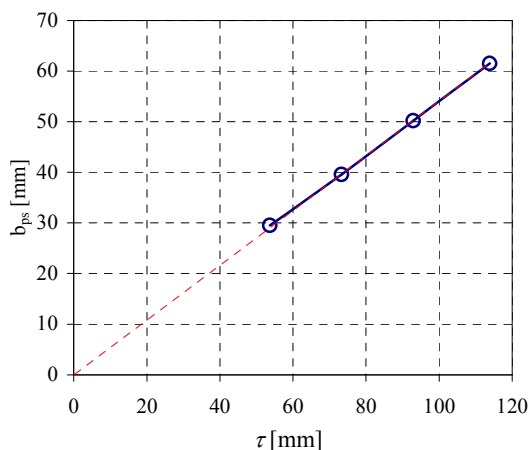
Rys. 7. Zależność średnicy wewnętrznej stojana d od średnicy zewnętrznej stojana d_{se} .

Dla średnic zewnętrznych $d_{se} = 300, 400, 500$ i 600 mm przeprowadzono obliczenia momentu w funkcji kąta położenia wirnika i średnicy wewnętrznej stojana a następnie wyznaczono średnice wewnętrzne d , dla których uzyskano największą wartość średniego momentu. Na rysunku 7. przedstawiono wykres zależności dobranej średnicy wewnętrznej stojana od średnicy zewnętrznej stojana.

3.2. Zależność szerokości bieguna stojana od podziałki biegunowej stojana

Dla wyznaczonych w punkcie 3.1. średnic wewnętrznych stojana ($d = 205, 280, 355$ i 435 mm) oraz stałego stosunku szerokości bieguna stojana do szerokości bieguna wirnika $b_{pr}/b_{ps}=1,1$ wyznaczono szerokości biegunów stojana, dla których wytwarzany moment średni osiąga maksymalną wartość.

Na rysunku 8. przedstawiono zależność szerokości bieguna stojana b_{ps} od podziałki biegunowej stojana τ , równej $\pi d/12$.

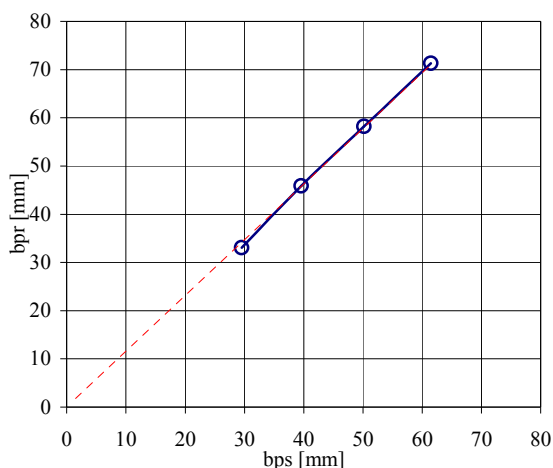


Rys. 8. Zależność szerokości bieguna stojana od podziałki biegunowej stojana

3.3. Zależność szerokości bieguna wirnika od szerokości bieguna stojana

W oparciu o wartości parametrów wyznaczonych w punktach 3.1. i 3.2. zbadano, jak zmienia się szerokość bieguna wirnika b_{pr} , dla zwiększających się średnic zewnętrznych silnika.

Na rysunku 9 przedstawiono zależność szerokości biegunów wirnika, dla których moment średni osiągał największą wartość od szerokości odpowiadających im biegunów stojana.

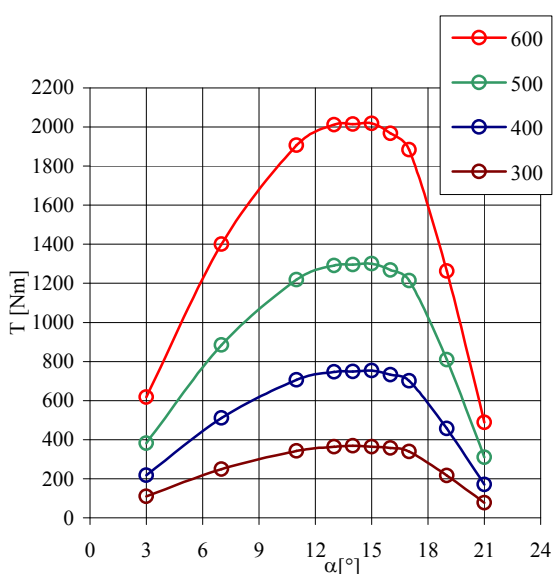


Rys. 9. Zależność szerokości bieguna wirnika od szerokości bieguna stojana

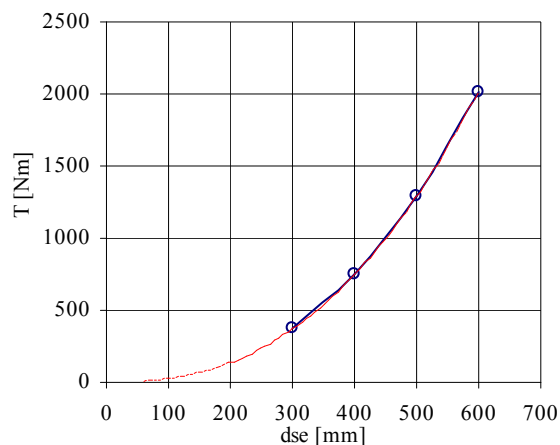
3.4. Charakterystyki statyczne momentu dla dobranych parametrów konstrukcyjnych

Na podstawie wyników obliczeń z punktów 3.1-3.3 wyznaczono charakterystyki kątowe statycznego momentu czterech badanych silników o wzrastających średnicach zewnętrznych i stratach w uzwojeniach oraz pozostałych parametrach dobranych pod kątem maksymalizacji średniego momentu statycznego. Charakterystyki przedstawiono na rys. 10.

Maksymalną wartość momentu statycznego uzyskano we wszystkich przypadkach dla kąta $\alpha = 14^\circ$. Zależność momentu maksymalnego od średnicy zewnętrznej stojana przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 10. Charakterystyki momentu statycznego badanych silników



Rys. 11. Wartość maksymalna momentu elektromagnetycznego (dla kąta $\alpha=14^\circ$) w funkcji średnicy zewnętrznej stojana

3. Wnioski

Trójfazowy silnik SRM 12/8 wytwarza największy moment statyczny gdy stosunek średnicy wewnętrznej do zewnętrznej stojana wynosi $d/d_{se} = 0,69$, współczynnik zapelnienia podziałki biegunowej b_{pr}/τ jest bliski 0,5 a biegun wirnika jest nieco szerszy od bieguna stojana $b_{pr}/b_{ps}=1,15$.

Moment statyczny silnika, dla przyjętych wstępnie założeń rośnie proporcjonalnie do kwadratu średnicy zewnętrznej stojana.

Charakterystyka magnesowania materiału rdzenia maszyny powinna, przede wszystkim umożliwiać uzyskanie dużego strumienia przy niewielkich wymuszeniach prądowych. Z tego względu również szczelina powietrzna powinna przyjmować możliwie małą wartość.

Z punktu widzenia efektywności przetwarzania energii mniej istotna jest wysoka indukcja nasycenia rdzenia. Silnik reluktancyjny wytwarza duży moment już przy niewielkim stopniu pokrycia się biegunów stojana i wirnika, a więc przy strumieniu dużo mniejszym od maksymalnego [7,8].

W badanym zakresie, silniki reluktancyjne wykazują proporcjonalność skalowania. Dla zwiększających się średnic zewnętrznych stosunki pozostałych parametrów pozostają stałe – otrzymane zależności są liniowe.

Należy zauważyć, że uzyskane proporcje wymiarowe silnika nie są ogólnymi zaleceniami konstrukcyjnymi dla wszystkich maszyn SRM. Ich wartości będą zależne od liczby par biegunów, liczby pasm fazowych, wielkości strat w uzwojeniach, współczynnika zapelnienia cewki

miedzią, charakterystyki magnesowania i innych parametrów [3,6,8].

Prezentowane wyniki nie stanowią próby optymalizacji przełączalnego silnika reluktancyjnego. Wskazują jedynie na charakter zmian parametrów przy zwiększaniu średnicy zewnętrznej silnika koniecznej przy konstruowaniu silników coraz większych mocy.

4. Literatura

- [1]. Miller, T.J.E.: *Switched Reluctance Motors and Their Control*. Magna Physics Publishing Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [2]. Krishan R.: *Swithes reluctance motor drives*. CRC Press London, 2001
- [3]. Binder A.: Switched reluctance Drive and inverter-fed induction machine – a comparison of design parameters and drive performance. *Electrical Engineering* (2000) pp. 239-248 Springer-Verlag.
- [4]. Ramamurthy S.S., Balda J.C.: Sizing a switched reluctance motor for electric vechicles. *IEE Trans. Ind. App.* V.37, no5, 2001.
- [5]. Bieńkowski K., Bucki B.: *Trójfazowe reluktancyjne silniki przełączalne*. XXXIX Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Gdańsk-Jurata 9-11 czerwca 2003
- [6]. Bieńkowski K., Bucki B.: *Model polowy przełączalnego silnika reluktancyjnego*. XL Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, 15–18 czerwca 2004, Hajnowka
- [7]. Bieńkowski K., Szypior J., Bucki B., Biernat A., Rogalski A.: *Influence of Geometrical Parameters of Switched Reluctance Motor on Electromagnetic Torque*. *Proceedings of XVI International Conference of Electrical Machines - Kraków*, 5-8 września 2004,
- [8]. Bieńkowski K., Rogalski A., Flaszczński M.: *Wpływ parametrów konstrukcyjnych na charakterystyki statyczne momentu silnika reluktancyjnego przełączalnego*. XLI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych 14-17 czerwca 2005, Jarosław, vol.1 s.125-130
- [9]. Lovatt, H.C.: Stephenson, J.M.: *Influence of number of poles per phase in switched reluctance motors*. *Proc. IEE*, 139, No. 4, 1992, p. 307-314
- [10]. Holling, G. H.: *Design of Switched Reluctance Motor Drives*. *Advanced Motion Controls, Inc*, November, 1999

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2003-2006 jako projekt badawczy.

Autorzy

- * E-mail: bienkowski@ime.pw.edu.pl
- ** E-mail: rogalski@ime.pw.edu.pl
- *** E-mail: flaszczm@ee.pw.edu.pl