

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

## SILNIKI RELUKTANCYJNE PRZEŁĄCZALNE PRZEZNACZONE DO ZASTOSOWAŃ W SPRZĘCIE GOSPODARSTWA DOMOWEGO

### SWITCHED RELUCTANCE MOTORS DESTINED FOR APPLICATION IN HOUSEHOLD EQUIPMENT

**Abstract:** The issue of application Switched Reluctance Motors (SRM) in household equipment are described in the present work. Solutions of the construction of designed switched reluctance motors ( 12/8, 8/6, 6/4, and 4/2) are presented. Some different power converters supplying these motors are compared. Characteristics torque-angle-current for discussed machines are presented too. These characteristics are prepared using finite elements method. Presented formulas make possible optimization of operating point of the machine. Results of experimental tests of the switched reluctance motors i.e. characteristics torque, efficiency and current as a function of speed motor for different control angles are presented. There are presented conclusion too.

#### 1. Wstęp

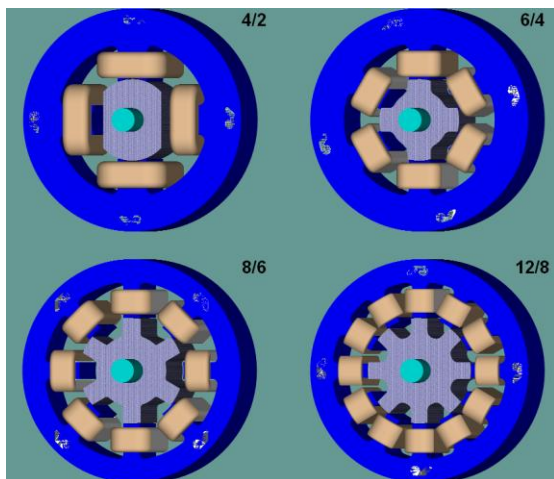
Silniki reluktancyjne przełączalne są zaliczane do grupy maszyn elektrycznych przeznaczonych do napędów o regulowanej prędkości obrotowej [6, 7]. Z uwagi na prostotę budowy, dużą trwałość oraz szerokie możliwości regulacji prędkości mogą one być stosowane między innymi w sprzęcie gospodarstwa domowego. Wśród urządzeń sprzętu gospodarstwa domowego istnieją takie, które wymagają aby silnik osiągał wysokie prędkości obrotowe (odkurzacze) oraz takie, które wymagają szerokiego zakresu regulacji prędkości obrotowej (roboty kuchenne, miksery, szlifierki, itp.) [1, 3]. Inną grupę sprzętu domowego stanowią urządzenia, które wymagają zarówno szerokiego zakresu regulacji prędkości obrotowej, jak i zmiany kierunku wirowania (np. pralka, wiertarka). Zmiana kierunku wirowania jest możliwa w większości rozwiązań konstrukcyjnych maszyn reluktancyjnych przełączalnych.

Poszczególne zastosowania stawiają różne wymagania silnikowi. Przykładowo napęd agregatu ssącego odkurzacza w zależności od rodzaju turbiny może wymagać osiągnięcia przez silnik prędkości znamionowych od 19000 do 40000 obrotów na minutę. Prędkości uzyskiwane przy pracy na podciśnieniu są odpowiednio wyższe.

#### 2. Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych oraz układów zasilających maszyn SRM

##### 2.1. Rozwiązania konstrukcyjne

Rozwiązania konstrukcyjne maszyn reluktancyjnych przełączalnych można ogólnie podzielić na jednopasmowe i wielopasmowe. Konstrukcje jednopasmowe szczególnie nadają się do zastosowań wysokoobrotowych. Jednak problem z momentem rozruchowym zasadniczo ogranicza ich możliwości wykorzystania praktycznego. Ponadto układy zasilające silników wymagają dużych pojemności filtrujących. Do konstrukcji wielopasmowych zaliczane są rozwiązania: dwupasmowe, trójpasmowe, czteropasmowe, itd. Na rysunku 1 przedstawiono opracowane w Politechnice Rzeszowskiej cztery modele funkcjonalne silników SRM. Rozwiązanie dwupasmowe jest znacznie korzystniejsze niż jednopasmowe, lecz w tego typu konstrukcji (w najprostszym przypadku o stosunku liczby biegunów stojana do zębów wirnika równym 4/2) także występuje problem z każdorazowym zajęciem przez wirnik położenia umożliwiającego rozruch silnika. W celu wyeliminowania tego problemu wprowadza się, np. celową deformację zębów wirnika (ang. *stepping the air-gap*). Rozwiązanie to nadaje się do zastosowań wysokoobrotowych w których nie jest wymagany zbyt duży moment rozruchowy.



Rys.1. Widok konstrukcji różnych modeli maszyn SRM

Konstrukcje dwupasmowe w większości przypadków posiadają budowę niesymetryczną co pozbawia je możliwości pracy rewersyjnej.

Konstrukcja trójpasmowa jest rozwiązaniem, które zapewnia pulsacje momentu na dopuszczalnym poziomie przy jednoczesnej możliwości rozruchu z każdego położenia wirnika, jak i pracy rewersyjnej. Podstawowe rozwiązanie 6/4 można zastosować w napędach wysokoobrotowych. Istnieje wiele konstrukcji pochodnych, jak np. 6/2, 12/8. Pierwsze z nich dedykowane jest również do zastosowań wysokoobrotowych i charakteryzuje się niskimi stratami w rdzeniu przy zwiększonej pulsacji momentu. Konstrukcja 12/8 jest przeznaczona do zastosowań gdzie wymagane są mniejsze pulsacje momentu. Maszyna czteropasmowa jest konstrukcją zapewniającą pulsacje momentu na stosunkowo niewielkim poziomie. Ma ona większe znaczenie dla zastosowań przemysłowych. Podstawowe rozwiązanie 8/6 można z powodzeniem stosować w napędach gdzie prędkość nie powinna przekraczać kilkunastu tysięcy obrotów na minutę.

## 2.2. Układy zasilające

Maszyna reluktancyjna przełączalna jest zintegrowanym przetwornikiem elektromechanicznym co oznacza, że jej praca bez układu zasilającego nie jest możliwa. Istnieje cała gama rozwiązań układów zasilających [4, 6]. Jednak większość z nich nie wyszła poza fazę badań laboratoryjnych. W zastosowaniach

praktycznych spotyka się zaledwie kilka rozwiązań. Zaliczyć do nich można układ: asymetryczny typu H (a), z uzwojeniami bifilarnymi (b), z dzielonym zasilaniem (c), Millera (d), z kondensatorem magazynującym (e) oraz 1.5m elementami przełączającymi i diodami zwrotnymi (f). W tabeli 1 dokonano porównania wymienionych układów. Jak wynika z przeprowadzonego porównania żaden z układów nie spełnia wymogów układu idealnego. Przykładowo układ z dzielonym zasilaniem nie nadaje się do zasilania konstrukcji z nieparzystą liczbą pasm w tym popularnego rozwiązania 6/4 czy też 12/8. Układ zasilający przeznaczony dla maszyn z uzwojeniami bifilarnymi jest bardzo podatny na uszkodzenia elementów przełączających z uwagi na pojawiające się w sposób niekontrolowany przepięcia. Problem z przepięciami występuje również w układzie z kondensatorem magazynującym. Ten układ nie jest również zalecany do zastosowań wysokoobrotowych. Oszczędnościowy układ Millera z uwagi na ograniczoną zdolność zwrotu energii do źródła zasilającego przyczynia się do obniżenia wypadkowej sprawności układu napędowego. Jedynie konstrukcja czteropasmowa może być z powodzeniem zasilana z układów

Tabela 1. Porównanie układów zasilających [4]

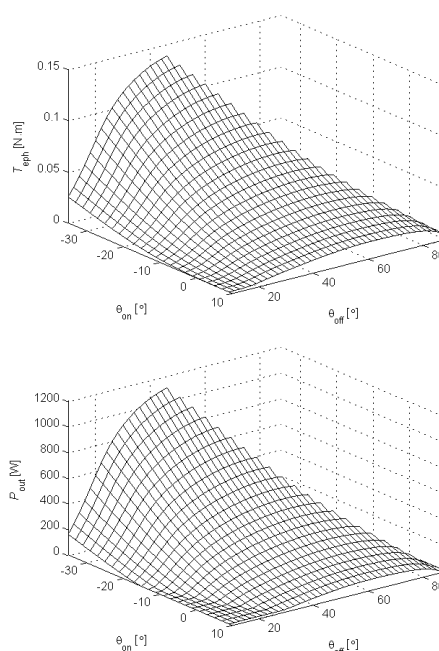
Układ	a	b	c	d	e	f
Dowolna liczba pasm $m$	tak	tak	nie	tak	tak	nie
Liczba elementów przełączających na pasmo	$2m$	$m$	$m$	$m+1$	$m+1$	$1.5m$
Liczba diod przypadająca na pasmo	$2m$	$m$	$m$	$m+1$	$m+1$	$1.5m$
Liczba przewodów pomiędzy maszyną a układem zasilającym	$2m$	$2m+2$	$3m/2$	$m+1$	$m+1$	$3m/2$
Dostępność napięcia zasilającego	$U_{dc}$	$U_{dc}$	$U_{dc}/2$	$U_{dc}$	$U_{dc}$	$U_{dc}$
Możliwość zastosowania pętli zerowego napięcia	tak	nie	nie	tak	nie	tak
Niezależność kontroli prądów fazowych	tak	tak	tak	nie	tak	tak
Wymagania napięciowe elementów przełączających	średnie	duże	średnie	średnie	duże	średnie
Podatność na uszkodzenia elementów przełączających	mała	b. duża	mała	średnia	duża	mała
Zwrot energii do źródła zasilającego	dobry	dobry	dobry	mały	średni	dobry

oszczędnościowych. W przypadku maszyn trójpasmowych w praktyce pozostaje do dyspozycji układ asymetryczny typu H. Maszyny dwupasmowe można zasiląć zarówno z układu asymetrycznego typu H jak i z układu z dzielonym zasilaniem. Najwięcej układów zasilających

można zastosować w przypadku konstrukcji czteropasmowej silnika. O cenie układu zasilającego, a w konsekwencji o cenie całego silnika decydują między innymi, liczba elementów mocy ( tranzystorów, diod) oraz pojemność kondensatorów filtrujących. Niestety układy zasilające z mniejszą liczbą elementów mocy z reguły są obciążone pewnymi wadami, które w praktyce eliminują je z zastosowań praktycznych, szczególnie w zakresie wyższych prędkości obrotowych.

### 3. Wyniki badań symulacyjnych

Wykonane w Politechnice Rzeszowskiej funkcjonalne modele maszyn reluktancyjnych przełączalnych przedstawione na rysunku 1 zostały zaprojektowane w oparciu o obliczenia połowe przeprowadzone w programie ANSYS. Ponadto na potrzeby analizy sposobów sterowania autorzy na bazie modelu matematycznego SRM zbudowali modele symulacyjne tych maszyn w środowisku programu Matlab/Simulink [5]. Badania symulacyjne prowadzono pod kątem analizy właściwości poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych dla zastosowań w sprzęcie gospodarstwa domowego. I tak, dla napędów wysokoobrotowych, takich jak odkurzacze, szlifierki, itp. zastosowanie mogą znaleźć konstrukcje dwupasmowe 4/2 i trójpasmowe 6/4 (rys.1). Dla tych modeli przeprowadzono badania symulacyjne przy prędkości  $40000 \text{ min}^{-1}$  oraz napięciu  $U_{dc}=270 \text{ V}$ . Na rysunku 2 przedstawiono zależności momentu  $T_{eph}$  oraz mocy wyjściowej  $P_{out}$  w funkcji kątów sterowania (załączenia  $\theta_{on}$  i wyłączenia  $\theta_{off}$ ) dla modelu 4/2. Odpowiedni dobór kątów sterujących umożliwia regulację momentu i mocy silnika. Do urządzeń o szerokim zakresie regulowanej prędkości obrotowej zaliczane są roboty kuchenne, pralki, itp. W takich przypadkach silnik w zakresie niższych prędkości pracuje w obszarze stałego momentu. Wiąże się to z koniecznością ograniczania wartości płynącego prądu.

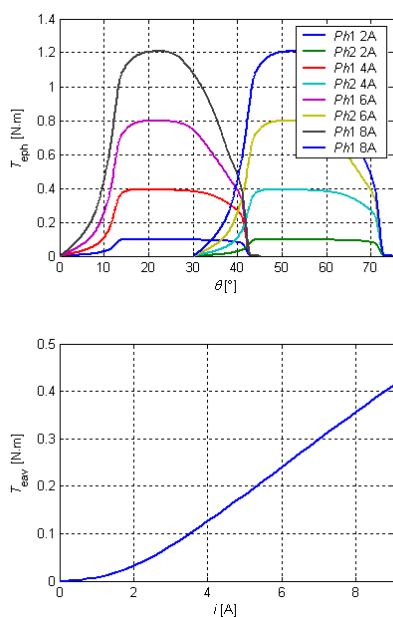


Rys.2. Zależność momentu jednego pasma oraz mocy wyjściowej w funkcji kątów sterowania

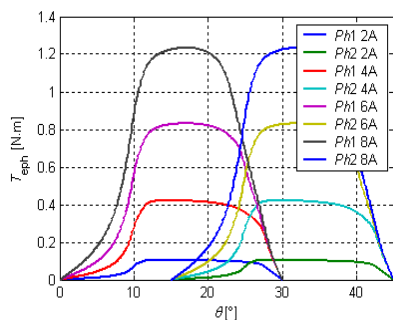
Do napędów o szerokim zakresie regulowanej prędkości mogą być stosowane silniki trójpasmowe 6/4 i 12/8 oraz czteropasmowy 8/6 (rys.1). Zbyt duże pulsacje momentu elektromagnetycznego eliminują z tego zastosowania konstrukcję dwupasmową.

Na rysunkach 3-5 przedstawiono zależności momentu elektromagnetycznego  $T_{eph}$  w funkcji kąta obrotu wirnika  $\theta$  dla  $I=const$  oraz dodatkowo na rysunku 3 średniego momentu  $T_{eav}$  w funkcji prądu pasma  $I$ . Powyższe charakterystyki zostały wyznaczone na bazie obliczeń połowych. W przypadku charakterystyk  $T_{eph}=f(\theta)$  zostały przedstawione przebiegi dla sąsiadujących ze sobą pasm. Przedstawione charakterystyki pozwalają na określenie między innymi minimalnej wartości momentu rozruchowego oraz kątów komutacji dla sterowania prądowego.

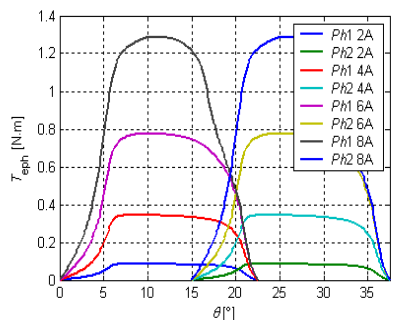
Innymi charakterystykami są zależności wartości średniej momentu pasma w funkcji prądu pasma. Mają one szczególnie duże znaczenie w przypadku pracy w zakresie stałego momentu, gdzie prąd w przybliżeniu ma stałą wartość. Jednocześnie charakterystyki te mogą służyć do wyznaczenia optymalnej wartości prądu pasma silnika.



Rys.3. Charakterystyki modelu silnika 6/4

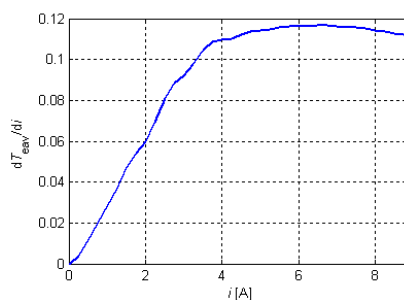


Rys.4. Zależność momentów poszczególnych pasm w funkcji kąta obrotu dla modelu 8/6

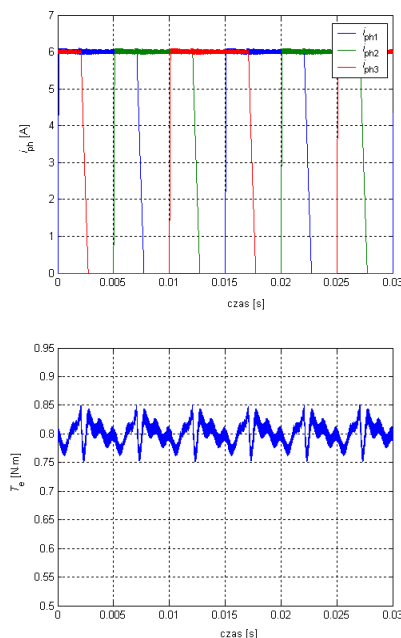


Rys.5. Zależność momentów poszczególnych pasm w funkcji kąta obrotu dla modelu 12/8

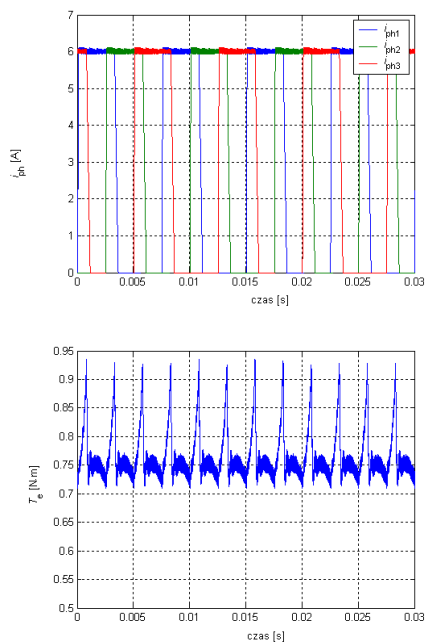
Obliczając pochodną momentu po przyroście prądu wzbudzenia określa się wartość maksymalną prądu po przekroczeniu którego następuje zmniejszenie wartości wytwarzanego momentu (rys.6).

Rys.6. Zależność  $dT_{eav}/di$  w funkcji prądu dla modelu 6/4

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi czasowe prądów poszczególnych pasm oraz wartość wypadkowego momentu elektromagnetycznego modelu 6/4 w zakresie sterowania prądowego przy prędkości  $n=1000 \text{ min}^{-1}$  oraz napięciu  $U_{dc}=270 \text{ V}$ . Kąty komutacji zostały określone na bazie przedstawionych wcześniej charakterystyk momentowych. Taki stan pracy maszyny może występować, np. w pralce w cyklu prania. Pulsacje momentu w tym przypadku nie przekraczają 15 %. W przypadku modelu 12/8 uzyskano nieco wyższe wartości pulsacji momentu elektromagnetycznego (rys.8). Dalsza redukcja pulsacji momentu silnika jest możliwa po zastosowaniu jednej z metod minimalizacji pulsacji związanej ze sterowaniem silnika [2].



Rys.7. Przykładowe przebiegi prądów pasm oraz wypadkowego momentu modelu 6/4



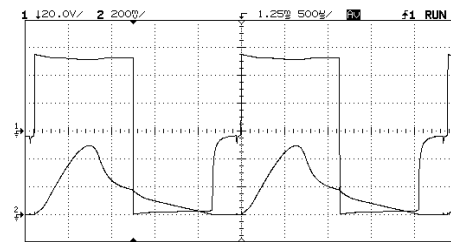
Rys.8. Przykładowe przebiegi prądów pasm oraz wypadkowego momentu modelu 12/8

Wszystkie opracowane modele funkcjonalne posiadają porównywalne osiągi, co widać na podstawie zamieszczonych charakterystyk statycznych czy też przykładowych wyników badań symulacyjnych. Model 12/8 z uwagi na podwojoną liczbę uzwojeń biegunów oferuje korzystniejszy sposób wzbudzenia. Tym samym poziom drgań i hałasu powinien być znacząco niższy niż w przypadku modeli 6/4 i 8/6 które są konstrukcjami bazowymi.

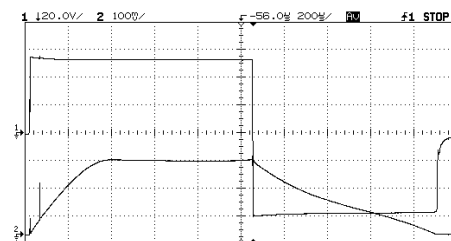
#### 4. Wyniki badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne przeprowadzono dla modeli 4/2 i 6/4. Jako układ zasilający zastosowano asymetryczny półmostek typu H. Napięcie zasilające ograniczono do wartości  $U_{dc} = 60$  V z uwagi na wytrzymałość mechaniczną zastosowanych przetworników obrotowoimpulsowych. Badania dla obu modeli przeprowadzono przy różnych wartościach kątów sterowania. Przykładowe przebiegi prądu i napięcia pasma dla obu modeli maszyn przedstawiono na rysunkach 9 i 10. W przypadku modelu 4/2 kąty sterowania zostały tak dobrane, aby uzyskać pracę z dużą prędkością obrotową. Dla modelu 6/4 przedstawiono przypadek pracy maszyny w którym prąd w sposób naturalny uzyskuje płaski kształt (ang. *flat topped*). Wówczas napięcie indukowane jest równe napięciu zasilającemu. Taki kształt prądu

jest pożądanym przy pracy ze zmniejszoną prędkością obrotową.

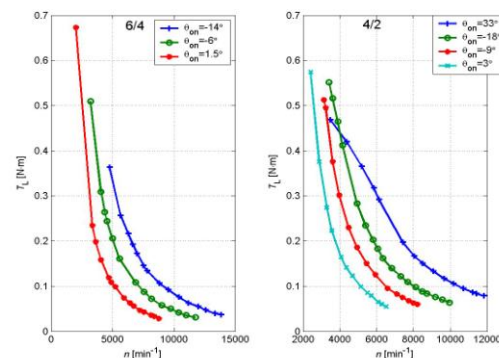


Rys.9. Przebiegi czasowe prądu i napięcia dla modelu 4/2



Rys.10. Przebiegi czasowe prądu i napięcia dla modelu 6/4

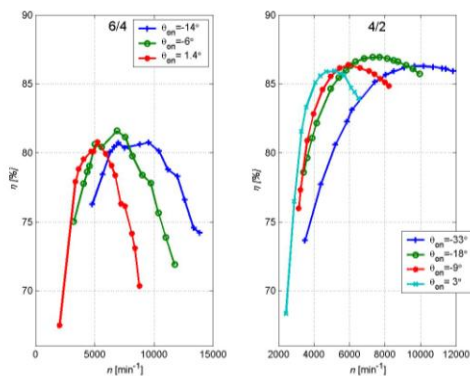
Na rysunku 11 przedstawiono charakterystyki mechaniczne maszyn. Są to charakterystyki typu szeregowego. Zmiana kątów sterowania umożliwia kształtowanie tych charakterystyk w bardzo szerokim zakresie. Wartości średnie momentu uzyskane w przypadku konstrukcji 4/2 były wyższe w porównaniu z maszyną 6/4.



Rys.11. Charakterystyki mechaniczne modeli maszyn 6/4 i 4/2

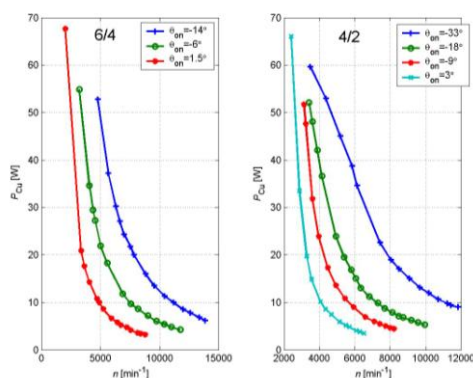
Sprawność maszyn w funkcji zmian prędkości obrotowej przedstawiono na rysunku 12. Sprawność modelu 4/2 jest wyższa, co w sposób naturalny przekłada się na sprawność wypadkową. W obu modelach widać konieczność zmiany kątów sterowania, tak aby zapewnić wysoką sprawność maszyny. Sprawności wypadkowe układów silnika są znacznie mniejsze z uwagi na duże straty w samym układzie zasilającym. Układ został zaprojektowany na na-

pięcie  $U_{dc}=300V$ . Sprawność układu zasilającego nie przekraczała 50%.



Rys. 12. Charakterystyki sprawności modeli maszyn 6/4 i 4/2

Wartości skuteczne prądu pasma uzyskiwane w modelu 4/2 są znacznie wyższe. Z uwagi na to, że model 4/2 posiada inne parametry drutu nawojowego, wypadkowe straty w miedzi są porównywalne z modelem 6/4, co przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Zależność strat w miedzi w funkcji prędkości obrotowej dla modeli 6/4 i 4/2

Ogólnie model 4/2 z uwagi na wyższą sprawność zarówno wypadkową jak i samej maszyny oraz co ważniejsze niższą cenę układu zasilającego wykazuje przewagę nad rozwiązaniem 6/4. Jediną wadą konstrukcji 4/2 jest zdecydowanie niższa wartość momentu rozruchowego. Nie jest to jednak żadnym przeciwskazaniem do zastosowań w agregatach ssących, gdzie wymagania co do wartości momentu rozruchowego są niewielkie.

## 5. Wnioski

Silniki reluktancyjne przełączalne mogą stać się alternatywą dla klasycznych rozwiązań stosowanych w sprzęcie gospodarstwa domowego.

Możliwość kształtowania charakterystyk mechanicznych silnika umożliwia dopasowywanie się do istniejących warunków pracy przy zachowaniu relatywnie wysokiej sprawności. Z uwagi na konieczność stosowania mikroprocesorów w układzie sterowania silnika, na dzień dzisiejszy maszyny te mogą znaleźć zastosowanie w pralkach czy też robotach kuchennych. Zastosowania w odkurzaczach domowych są w chwili obecnej ze względu na cenę silnika nie do zaakceptowania. Duża trwałość napędu może uzasadniać jedynie zastosowanie tego typu napędu w odkurzaczach przemysłowych lub ewentualnie w tak zwanych odkurzaczach centralnych.

## 6. Literatura

- [1]. Benedicic B., Miljavec D.: *Optimal turn-on and turn-off calculation of high-speed two-phase switched reluctance motor*, ISEF'99- 9<sup>th</sup> International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering, Pavia, Italy, September 23-25, 1999
- [2]. Bogusz P.: *Silnik reluktancyjny przełączalny sterowany z procesora sygnałowego*, Rozprawa doktorska, Instytut Elektrotechniki, Warszawa 2003
- [3]. Gotovac S.: *Desing of SRM drive for a single hand grinding machine*, PEMEC'98, Prague, pp.4 120-4 125
- [4]. Korkosz M.: *Praca silnikowo-generatorowa przełączalnej maszyny reluktancyjnej*, Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2003
- [5]. Korkosz M., Prokop J.: *Harmonic analysis of current and torque of high speed switched reluctance motor*, Archives of Electrical Engineering, No. 2, pp.163-188, 2002.
- [6]. Krishnan R.: *Switched reluctance motor drive: modeling, simulation, analysis, desing, and applications*, CRC Press LLC, 2001.
- [7]. Miller T.J.E.: *Electronic control of switched reluctance machines*, Newnes, 2001

## Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz, [pbogu@prz.rzeszow.pl](mailto:pbogu@prz.rzeszow.pl)

dr inż. Mariusz Korkosz, [mkosz@prz.rzeszow.pl](mailto:mkosz@prz.rzeszow.pl)

dr inż. Jan Prokop, [jprokop@prz.rzeszow.pl](mailto:jprokop@prz.rzeszow.pl)

Politechnika Rzeszowska

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów