

*napędy wysokoobrotowe, silniki reluktancyjne przełączalne  
silniki dwupasmowe, silniki trójpasmowe, sprzęt AGD*

Piotr BOGUSZ\*, Mariusz KORKOSZ\*,  
Jan PROKOP\*

## **BADANIA SYMULACYJNE SILNIKÓW RELUKTANCYJNYCH PRZEŁĄCZALNYCH PRZEZNACZONYCH DO NAPĘDU WYSOKOOBROTOWEGO**

W pracy analizowano właściwości silników reluktancyjnych przełączalnych pod kątem ich zastosowania w napędzie wysokoobrotowym sprzętu AGD. Porównywano właściwości silników dwupasmowych typu 4/2 i trójpasmowych typu 6/2 z różnymi konstrukcjami wirników. Rozważano silniki z symetrycznym i niesymetrycznym wirnikiem odpowiednio z równomierną i zmieniającą się skokowo szczeliną powietrzną. Omówiono wpływ wybranych parametrów na wytwarzany moment oraz na wypadkowe charakterystyki mechaniczne projektowanych silników. Zamieszczono wnioski dotyczące poszczególnych konstrukcji.

### **1. WSTĘP**

Sprzęt AGD stanowi jeden z istotniejszych obszarów zastosowania napędów wysokoobrotowych. Powszechnie stosowane napędy z silnikami komutatorowymi prądu przemiennego, posiadają stosunkowo niską trwałość, co w przypadku zastosowań profesjonalnych jest znaczną wadą. Alternatywą dla maszyn z komutatorem mechanicznym są napędy oparte o silniki z komutacją elektroniczną. Jednym z możliwych rozwiązań jest zastosowanie silnika reluktancyjnego przełączalnego (SRM), którego zaletą jest prosta budowa i niższa cena niż, np. maszyny z magnesami trwałymi [1–3].

W pracy przedstawiono wyniki analizy różnych konstrukcji wysokoobrotowego silnika reluktancyjnego przełączalnego przeznaczonego do zastosowania w sprzęcie AGD. Na podstawie modelu polowo-obwodowego badano wpływ wybranych parametrów na właściwości silników oraz wyznaczono charakterystyki mechaniczne oraz sprawności wypadkowej dla analizowanych konstrukcji. Zamieszczono wnioski dotyczące zaprojektowanych konstrukcji.

---

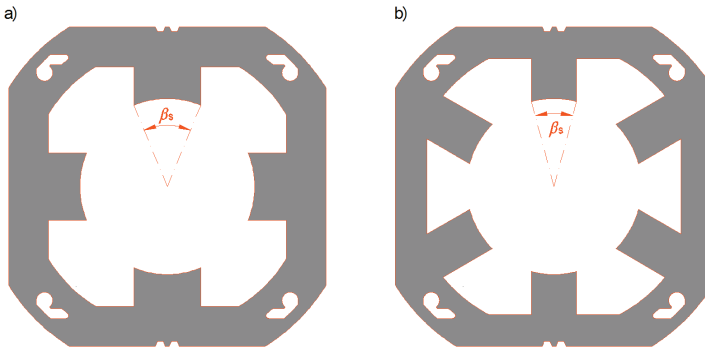
\* Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów.

## 2. ANALIZA KONSTRUKCJI PROJEKTOWANYCH SILNIKÓW SRM

Projektowany silnik z komutacją elektroniczną przeznaczony jest do napędu agregatu ssącego odkurzacza. W założeniach od napędu agregatu ssącego wymaga się podwyższonej trwałości wynoszącej minimum 1000 godzin bezawaryjnej pracy. Moc na wale silnika zgodnie z założeniami powinna być nie mniejsza niż 700 W przy prędkości 45 000 obr/min. Sprawność wypadkowa silnika nie jest głównym kryterium projektowym, ale wymaga się, aby była ona możliwie jak największa. Wartość momentu rozruchowego powinna być większa niż 0,1 Nm. Dla przyjętych założeń autorzy zaproponowali zastosowanie do projektowanego napędu agregatu ssącego odkurzacza silnika reluktancyjnego przełączalnego. Z uwagi na wymagany punkt pracy silnika wskazane jest ograniczenie do niezbędnego minimum częstotliwości przełączeń prądów uzwojeń  $f_p$ , którą oblicza się z zależności:

$$f_p = \frac{N_r \cdot n}{60} \quad (1)$$

gdzie:  $N_r$  – liczba biegunów wirnika,  $n$  – prędkość obrotowa [obr/min]. Z zależności 1 widać, że jedyną możliwością zmniejszenia częstotliwości przełączeń  $f_p$  jest ograniczenie liczby biegunów wirnika do niezbędnego minimum, która nie może być mniejsza niż 2. Duży wpływ na koszt wykonania układu napędowego ma liczba zastosowanych pasm silnika. Wzrost liczby pasm podnosi koszt wykonania układu energoelektronicznego. Konstrukcje jednopasmowe potencjalnie najatrakcyjniejsze wymagają zastosowania magnesów lub elektromagnesów do wytworzenia momentu rozruchowego. W przypadku konstrukcji dwupasmowych rozruch silnika jest możliwy przez zastosowanie odpowiedniej procedury startowej, czy też odpowiedniej budowy wirnika. Podobna sytuacja występuje w przypadku konstrukcji trójpasmowej o minimalnej liczbie biegunów wirnika, tj. konstrukcji 6/2.



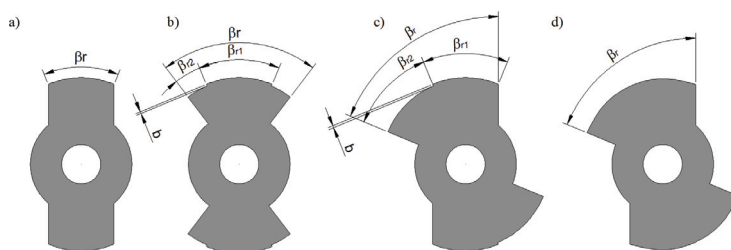
Rys. 1. Zaprojektowane konstrukcje stojanów: a) maszyna dwupasmowa, b) trójpasmowa  
 Fig. 1. Designed stator constructions: a) 2-phase, b) 3-phase

Uwzględniając wszystkie ograniczenia technologiczne zaprojektowano dwa stojany silników SRM, dla maszyny dwupasmowej i trójpasmowej, odpowiednio przedstawione na rysunkach 1a i 1b.

W przypadku konstrukcji dwupasmowej przyjęto wartość kąta bieguny stojana  $\beta_s = 45^\circ$ , natomiast dla konstrukcji trójpasmowej  $\beta_s = 30^\circ$ .

W literaturze zarówno w przypadku konstrukcji dwupasmowej 4/2, jak i trójpasmowej 6/2 znane są cztery konstrukcje wirników przedstawione na rysunku 2:

- symetryczna (rys. 2a),
- symetryczna ze skokową szczeliną powietrzną (rys. 2b),
- niesymetryczna ze skokową szczeliną powietrzną (rys. 2c),
- niesymetryczna z profilowanym wirnikiem (rys. 2d).



Rys. 2. Konstrukcje wirników silników SRM  
Fig. 2. Rotor constructions for SRM

Konstrukcja wirnika przedstawiona na rysunku 2d jest wykorzystywana głównie w przypadku konieczności ograniczania tętnień momentu elektromagnetycznego. Ponieważ projektowany napęd tego nie wymaga nie będzie ona brana pod uwagę.

W badaniach projektowych rozpatrywano pięć wariantów konstrukcji zarówno w przypadku silnika dwu, jak i trójpasmowego, mianowicie:

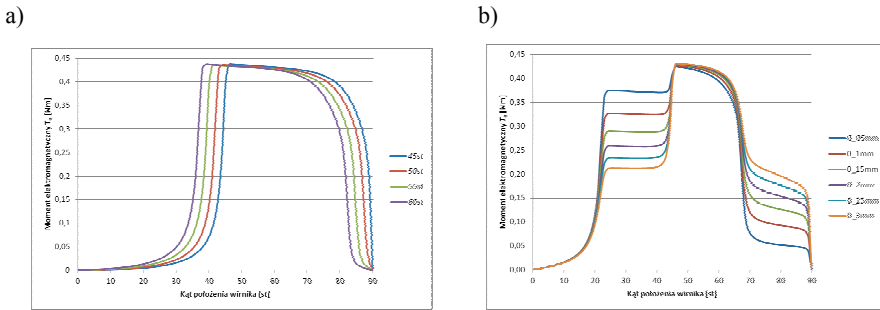
- z wirnikiem symetrycznym gdzie  $\beta_r = \beta_s$ , oznaczony jako I,
- z wirnikiem symetrycznym gdzie  $\beta_r > \beta_s$ , oznaczony jako II,
- z wirnikiem symetrycznym i skokową szczeliną powietrzną, przy czym  $\beta_{r2} = \beta_{r2}^*$ , oznaczony jako III,
- z wirnikiem symetrycznym i skokową szczeliną powietrzną, przy czym  $\beta_{r2} = \beta_{r2}^*$ , oznaczony jako IV,
- z wirnikiem niesymetrycznym i skokową szczeliną powietrzną, oznaczony jako V.

W modelu symulacyjnym założono, że każde pasmo silnika zasilane będzie z klasycznego półmostka typu H. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu stałej prędkości obrotowej. Prędkość obrotową silnika  $n$  zmieniano w zakresie od 35000 do 50000 obr/min ze skokiem, co 1000 obr/min. Parametry sterowania w każdym analizowanym

przypadku dobierano dla uzyskania założonej mocy wyjściowej ( $P_{\text{out}} = 700 \text{ W}$ ) przy prędkości obrotowej  $n = 45000 \text{ obr/min}$ .

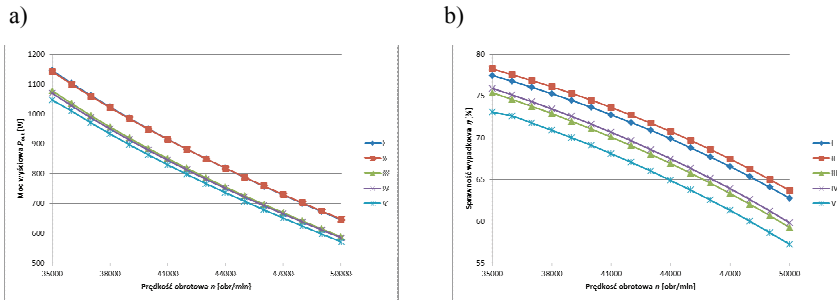
### 3. WYNIKI BADAŃ KONSTRUKCJI DWUPASMOWYCH

Na drodze badań symulacyjnych analizowano różne warianty konstrukcji silników dwupasmowych zbudowanych w oparciu o stojan z rysunku 1a oraz wirniki przedstawione na rysunku 2. Przykładowo, dla konstrukcji dwupasmowej 4/2 z wirnikiem symetrycznym, na rysunku 3a przedstawiono zależności momentu elektromagnetycznego  $T_e$  od kąta położenia wirnika  $\theta$  przy wymuszeniu  $I = 4 \text{ A}$  dla czterech wartości kąta szerokości wirnika  $\beta_r = 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ$ . Dla konstrukcji dwupasmowej z wirnikiem symetrycznym ze skokową szczeliną powietrzną badano wpływ parametru  $b$  na kształt charakterystyk momentu przy założeniu stałej wartości prądu pasma  $I = 4 \text{ A}$ , co przedstawiono na rysunku 3b.



Rys. 3. Charakterystyki  $T_e = f(\theta)$  dla silnika dwupasmowego z: (a) wirnikiem symetrycznym, (b) wirnikiem symetrycznym ze skokową szczeliną

Fig. 3.  $T_e = f(\theta)$  for 2-phase motor: (a) symmetric rotor, (b) symmetric rotor with discrete air gap



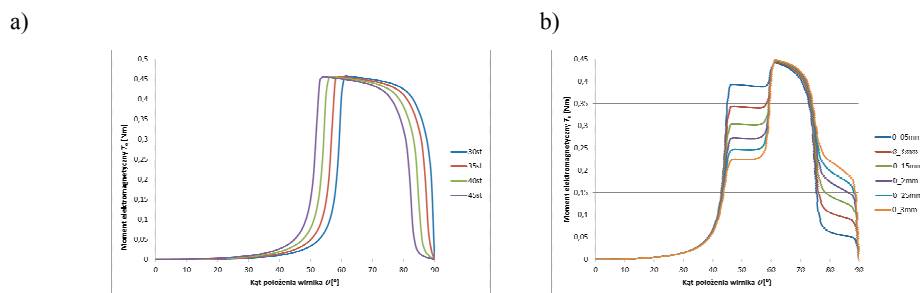
Rys. 4. Zależność mocy wyjściowej  $P_{\text{out}}$  (a) oraz sprawności wypadkowej  $\eta$  (b) w funkcji prędkości obrotowej  $n$  silnika dwupasmowego SRM

Fig. 4. Output power (a) and output efficiency (b) vs. speed  $n$  for 2-phase SRM motor

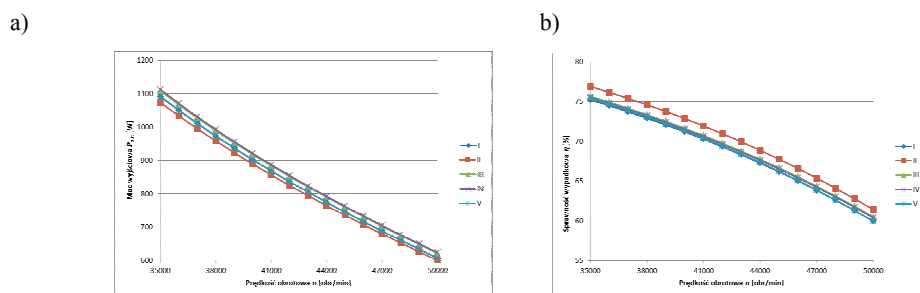
Na rysunku 4 przedstawiono zależności mocy wyjściowej  $P_{out}$  (rys. 4a) oraz sprawności wypadkowej  $\eta$  (rys. 4b) w funkcji prędkości obrotowej  $n$  dla pięciu analizowanych przypadków.

#### 4. WYNIKI BADAŃ KONSTRUKCJI TRÓJPASMOWYCH

Podobne obliczenia jak dla konstrukcji dwupasmowych wykonano dla konstrukcji trójpasmowych 6/2 przy założeniu stałej wartości prądu pasma  $I = 4$  A. Na rysunku 5a, dla konstrukcji trójpasmowej z wirnikiem symetrycznym, przedstawiono zależności momentu elektromagnetycznego  $T_e$  od kąta położenia wirnika  $\theta$ , dla czterech wartości kąta szerokości wirnika  $\beta_r = 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ . Wpływ parametru  $b$  na kształt charakterystyk momentu dla konstrukcji trójpasmowej z wirnikiem symetrycznym ze skokową szczelinę powietrzną przedstawiono na rysunku 5b.



Rys. 5. Charakterystyki  $T_e = f(\theta)$  dla silnika trójpasmowego: (a) wirnik symetryczny, różne wartości kąta  $\beta_r$ , (b) wirnik symetryczny ze skokową szczeliną, różne wartości parametru  $b$   
 Fig. 5.  $T_e = f(\theta)$  characteristics for 3-phase motor: (a) symmetric rotor, (b) symmetric rotor with discrete air gap



Rys. 6. Zależność mocy wyjściowej  $P_{out}$  (a) oraz sprawności wypadkowej  $\eta$  (b) w funkcji prędkości obrotowej  $n$  silnika trójpasmowego  
 Fig. 6. Output power (a) and output efficiency (b) vs. speed for 3-phase SRM motor

Na rysunku 6 przedstawiono zależność mocy wyjściowej  $P_{\text{out}}$  (rys. 6a) oraz sprawności wypadkowej  $\eta$  (rys. 6b) w funkcji prędkości obrotowej  $n$  dla analizowanych przypadków konstrukcji silnika trójfazowego.

## 5. WNIOSKI

Wszystkie zaprojektowane silniki do napędu wysokoobrotowego spełniają postawione wymagania, co do mocy i prędkości obrotowej. Zarówno w przypadku konstrukcji dwufazowej, jak i trójfazowej najwyższą sprawność uzyskano w przypadku zastosowania wirnika symetrycznego, w którym kąt bieguna wirnika jest większy niż kąt bieguna stojana (wariant II). W przypadku silnika dwufazowego najgorszą sprawność uzyskano dla wariantu V, czyli wirnika o budowie niesymetrycznej. Jednocześnie jest to wariant, w którym najłatwiej wytworzyć wymagany moment rozruchowy. Ogólnie w przypadku konstrukcji dwufazowej uzyskano nieznacznie wyższą sprawność (około 2%). Dla pełnego porównania badanych konstrukcji należy dodatkowo przeprowadzić analizę wibroakustyczną, co będzie dalszym etapem prac projektowych.

*Praca wykonana w ramach projektu badawczego NN511 312 440.*

*Badania przeprowadzono z zastosowaniem 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.*

## LITERATURA

- [1] KRISHNAN R., *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*, CRC Press, 2001.
- [2] HAMDY R., FLETCHER J., WILLIAMS B.W., *Bidirectional starting of a symmetrical two-phase switched reluctance machine*, IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2000, Vol. 15, No. 2, 211–217.
- [3] MILLER T.J.E., *Electronic Control of Switched reluctance Machines*, Newnes Power Engineering Series, 2001.

## SIMULATION RESEARCH OF THE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR FOR HIGH SPEED DRIVE

The article discusses the use of switched reluctance motors (SRM) for high speed drives home appliances. A comparison of two-phase 4/2 and three-phase 6/2 design motors, based on field calculations. Three machines was taken into consideration with: symmetric rotor, symmetric rotor with discrete air gap and asymmetric rotor with discrete air gap. For the two analyzed cases, the structure 4/2 and 6/2 static characteristics was calculated.