

# Badania trójfazowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 6/4

Grzegorz Podskarbi, Mariusz Korkosz

## 1. Wstęp

Aktualne tendencje światowe do ograniczenia zużycia energii elektrycznej powoli wymuszają stosowanie napędów elektrycznych o podwyższonej sprawności [1]. Jednak nie w przypadku każdej branży zmiany te są zauważalne. W przypadku sprzętu AGD zastępowanie np. sprawdzonych silników komutatorowych bezszczotkowymi silnikami z komutacją elektroniczną napotyka na poważny problem. Jest nim istotny wzrost ceny urządzenia po zastąpieniu klasycznego rozwiązania bardziej nowoczesnym napędem. Istnieją jednak w pewnych przypadkach aplikacje, w których zastosowanie silnika bezszczotkowego może uprościć konstrukcję oraz zwiększyć funkcjonalność urządzenia. Jednym z takich sprzętów AGD jest np. robot kuchenny.

W pracy zaprezentowano wybrane wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych trójfazowego silnika reluktancyjnego przełączalnego, zaprojektowanego do napędu robota kuchennego. Na bazie modelu numerycznego wyznaczono charakterystyki statyczne i ruchowe badanego silnika. Zestawiono uzyskane parametry z oryginalnym silnikiem komutatorowym stosowanym w napędzie robota kuchennego.

## 2. Model fizyczny oraz symulacyjny badanego silnika reluktancyjnego przełączalnego 6/4

### 2.1. Badany silnik

Badany trójfazowy silnik reluktancyjny przełączalny 6/4 został zaprojektowany do napędu robota kuchennego. Widok modelu fizycznego silnika pokazano na rysunku 1. Przyjęte wstępnie założenia o zastosowaniu tarcz łożyskowych silnika komutatorowego wprowadziły niesymetrię obwodu magnetycznego. Wpływ niesymetrii obwodu magnetycznego stojana analizowano w pracach [2–6].



Rys. 1. Widok modelu fizycznego badanego silnika

**Streszczenie:** W pracy zamieszczono wybrane wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych trójfazowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 6/4. Silnik został zaprojektowany do napędu sprzętu AGD (robota kuchennego). Na bazie obliczeń numerycznych wyznaczono charakterystyki statyczne silnika oraz jego przebiegi czasowe (prądów pasmowych, momentu elektromagnetycznego) w wybranych punktach pracy. W warunkach laboratoryjnych dokonano weryfikacji badań numerycznych. Zostały również wyznaczone charakterystyki mechaniczne oraz sprawności badanego silnika na bazie obliczeń numerycznych i laboratoryjnych. Wyniki badań laboratoryjnych odniesiono do klasycznego silnika komutatorowego stosowanego w tego typu napędach.

Słowa kluczowe: silnik reluktancyjny przełączalny, badania numeryczne, badania laboratoryjne, napęd AGD

### RESEARCH OF THREE-PHASE SWITCHED RELUCTANCE MOTORS 6/4

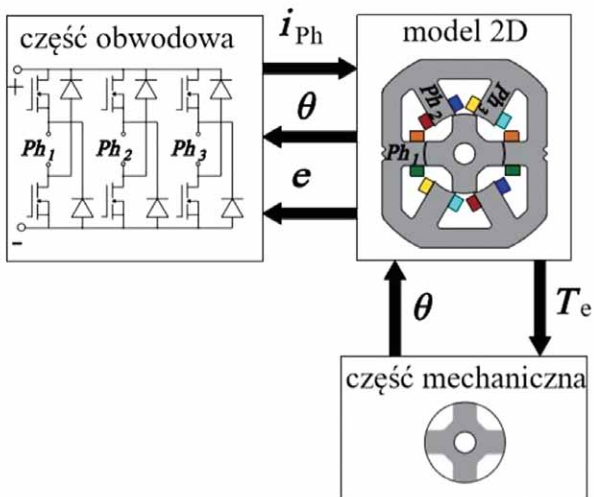
**Abstract:** In the paper selected results of simulation and laboratory tests of a 6/4 three-phase switched reluctance motor are presented. The motor is designed to drive domestic appliances (kitchen robot). On the basis of numerical calculations, the static characteristics of the motor and its waveforms (phase currents, electromagnetic torque) were determined at selected working points. In laboratory conditions, numerical calculations were verified. The torque-speed characteristics and efficiency of the motor were also determined on the basis of numerical calculations and laboratory tests. The results of laboratory tests were compared with the classical universal motor used in this type of drives.

Keywords: switched reluctance motor, numerical calculations, laboratory test, domestic appliances drive

Silnik został zaprojektowany na uzyskanie wymaganej mocy wyjściowej 335 W przy prędkości obrotowej 10000 obr./min oraz napięciu zasilającym 300 V DC.

### 2.2. Model symulacyjny

Model symulacyjny został zbudowany w środowisku programu Ansys Electronics EM [7]. Jest to model polowo-obwodowy (rys. 2).

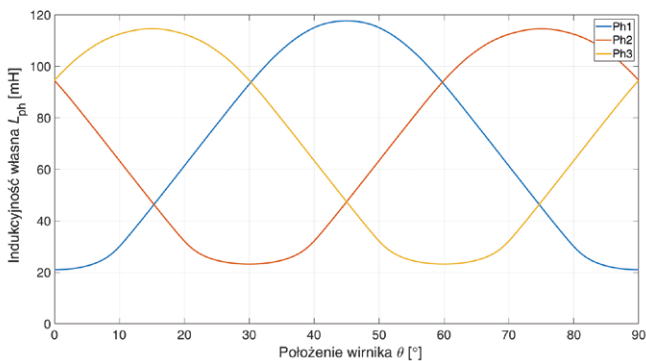


Rys. 2. Model połowo-obwodowy silnika reluktancyjnego przełączalnego 6/4

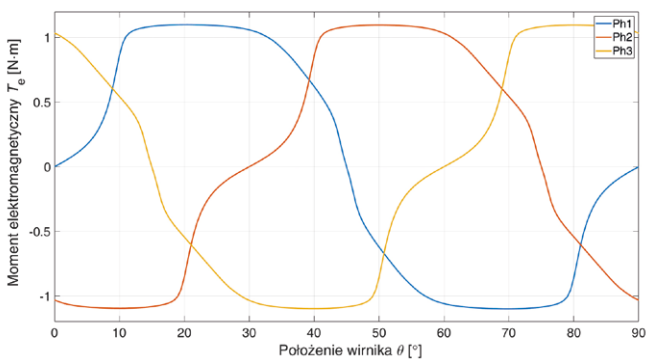
### 3. Obliczenia numeryczne

#### 3.1. Charakterystyki statyczne

Na bazie modelu numerycznego zostały wyznaczone charakterystyki indukcyjności własnej (rys. 3) oraz statyczne charakterystyki momentu elektromagnetycznego (rys. 4) w funkcji położenia wirnika  $\theta$ . Dla porównania wpływu wprowadzonej niesymetrii obwodu magnetycznego zostały pokazane wyniki obliczeń dla wszystkich pasm, tj.  $Ph_1$ ,  $Ph_2$  i  $Ph_3$ . Obliczenia przeprowadzono przy stałej wartości prądu  $I = 3$  A.



Rys. 3. Zależność indukcyjności własnej  $L_{ph}$  w funkcji położenia wirnika  $\theta$  umownych pasm  $Ph_1$ ,  $Ph_2$  oraz  $Ph_3$

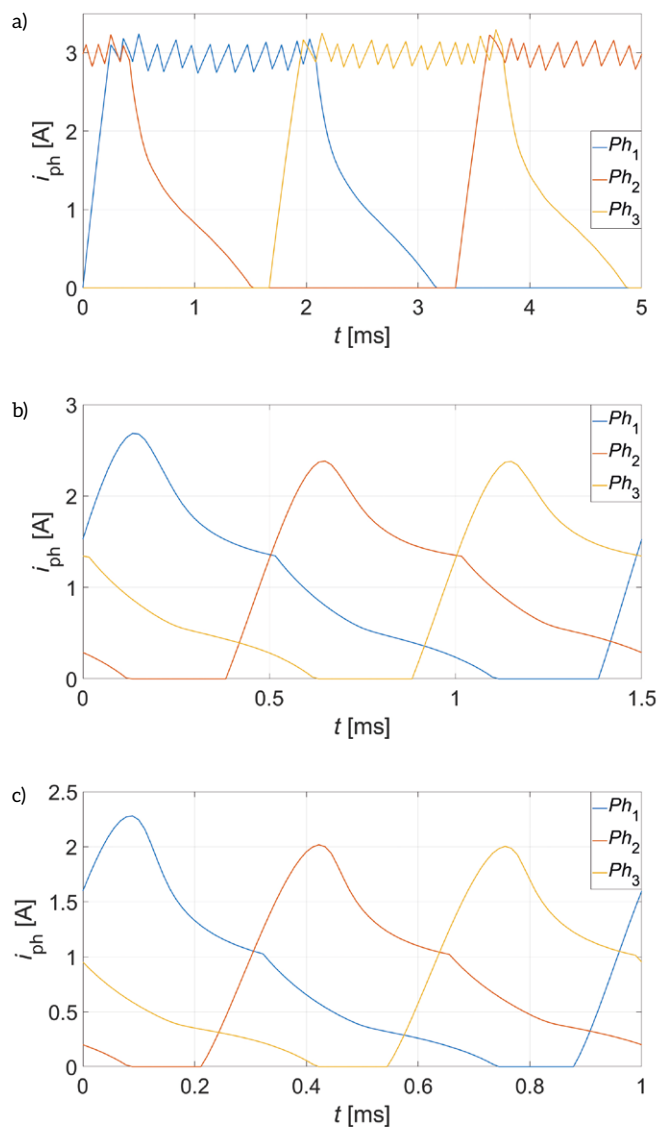


Rys. 4. Zależność statycznego momentu elektromagnetycznego  $T_e$  w funkcji położenia wirnika  $\theta$  umownych pasm  $Ph_1$ ,  $Ph_2$  oraz  $Ph_3$

Wyniki badań statycznych wskazują, że niesymetria obwodu magnetycznego w pewnym stopniu wpływa na zmianę kształtu charakterystyk statycznych. Istotna jest szczególnie różnica w wartości minimalnej indukcyjności własnej obu pasm. Znacznie mniejsze znaczenie ma różnica w wartości maksymalnej indukcyjności własnej.

#### 3.2. Przebiegi czasowe

Dla trzech charakterystycznych punktów pracy zostały wyznaczone przebiegi czasowe prądów pasmowych (rys. 5) oraz momentu elektromagnetycznego (rys. 6). W pierwszym przypadku ( $n = 3000$  obr./min) analizowano przypadek pracy ze stałym momentem. Jest to przypadek pracy, kiedy wymagane są małe tętnienia momentu elektromagnetycznego. Jest to jednocześnie minimalna prędkość silnika komutatorowego. Drugi punkt pracy wynika z danych znamionowych silnika komutatorowego. Moc znamionową określono przy prędkości 10 000 obr./min. Trzeci przypadek ( $n = 15000$  obr./min) określa



Rys. 5. Przebiegi czasowe prądów pasmowych  $i_{ph}$  przy:

a)  $n = 3000$  obr./min; b)  $n = 10000$  obr./min; c)  $n = 15000$  obr./min

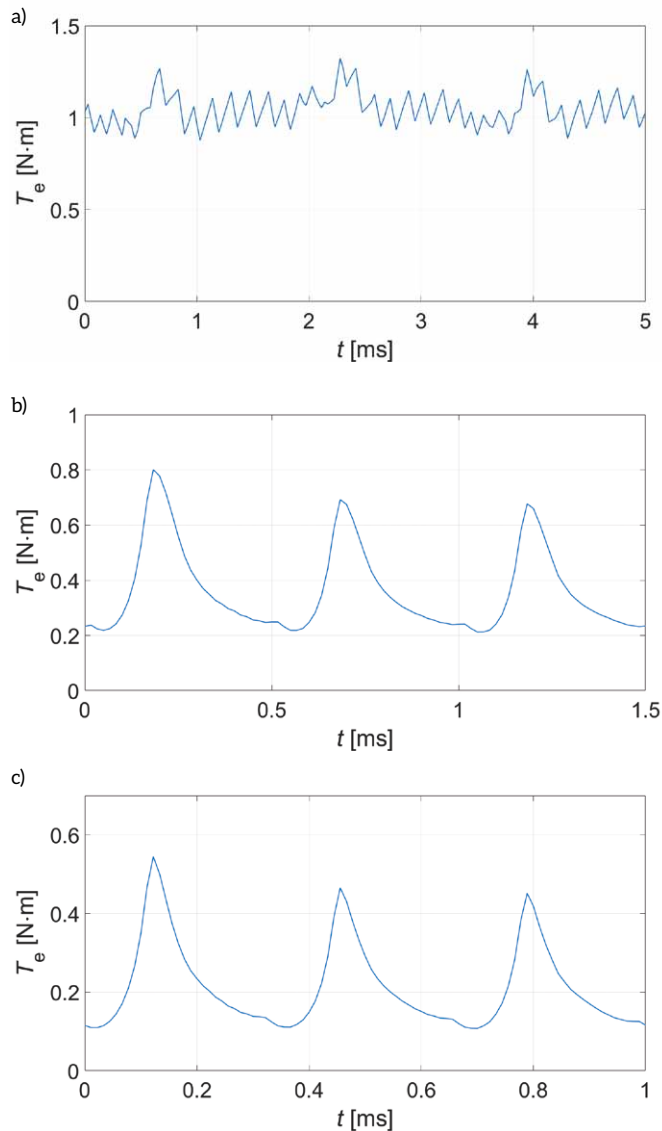
tryb pracy turbo robota. Oznacza to podniesienie prędkości obrotowej do 15 000 obr./min. Jest to jednocześnie maksymalna prędkość obrotowa silnika. Parametry sterowania dobrano według kryterium maksymalnego stosunku  $T_e/I_{phrms}$ .

Dla pracy silnika ze stałym momentem (rys. 4 a, 5 a) niesymetria obwodu magnetycznego stojana praktycznie nie wpływa na parametry wyjściowe silnika. Spowodowane jest to pracą regulatora prądu. W pozostałych analizowanych przypadkach (rys. 4 b–c, 5 b–c) wyniki badań symulacyjnych pokazują, że w umownym paśmie  $Ph1$  występuje większa amplituda prądu. Przekłada się to na wzrost tętnień momentu elektromagnetycznego.

#### 4. Badania laboratoryjne

##### 4.1. Charakterystyki statyczne

W warunkach laboratoryjnych zostały wyznaczone indukcyjności własne w funkcji położenia wirnika. Stanowisko do badań laboratoryjnych pokazano na rysunku 7 a. W przypadku



Rys. 6. Przebieg czasowy momentu elektromagnetycznego  $T_e$  dla:

- a) pracy z regulatorem prądu; b) wymaganego punktu pracy; c) maksymalnej prędkości

wyznaczania statycznych charakterystyk momentowych wykorzystywano stanowisko pokazane na rysunku 7 b.

Na rysunku 8 pokazano wyznaczone indukcyjności własne wszystkich pasm silnika dla pełnego obrotu wirnika.

Na rysunku 9 pokazano statyczne charakterystyki momentowe pasm w funkcji położenia wirnika przy  $I = 3$  A. Charakterystyki z rysunku 9 wyznaczano niezależnie (przy braku zasilania dwóch pozostałych pasm).

Różnica w statycznych charakterystykach momentowych dla jednego pełnego okresu elektrycznego jest zauważalna. Znacznie większe różnice zaobserwowano pomiędzy indukcyjnościami własnymi.

##### 4.2. Przebiegi czasowe prądów

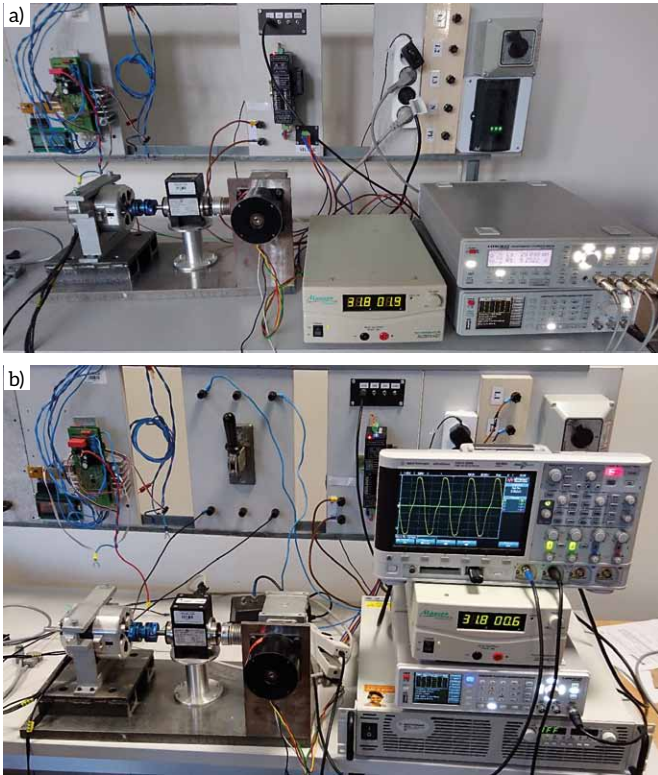
W warunkach laboratoryjnych zostały zarejestrowane przebiegi czasowe prądów w stanie ustalonym. Przykładowe przebiegi czasowe prądów, uzyskane przy sterowaniu jednopulsowym, pokazano na rysunku 10.

Uzyskane przebiegi czasowe prądów w warunkach laboratoryjnych potwierdzają, że niesymetria obwodu magnetycznego wpływa na ich kształt. Potwierdzają one jednocześnie wyniki badań numerycznych.

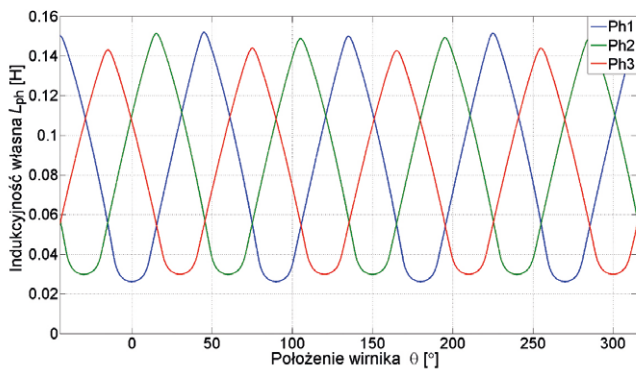
##### 4.3. Charakterystyki mechaniczne

Zostały wyznaczone charakterystyki mechaniczne (rys. 11) oraz sprawności (rys. 12) badanego silnika. Dodatkowo

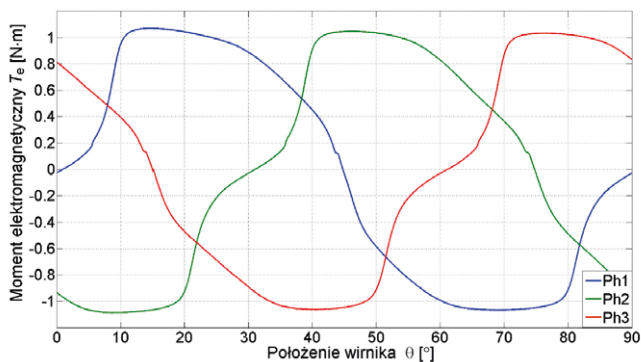




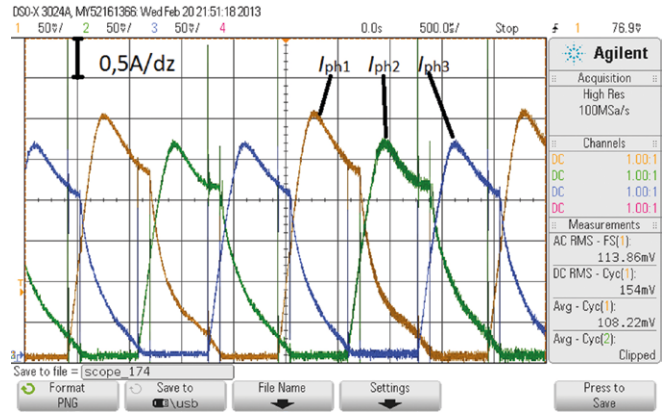
**Rys. 7.** Stanowisko do wyznaczania charakterystyk statycznych  
a) indukcyjności własnej; b) statycznego momentu elektromagnetycznego



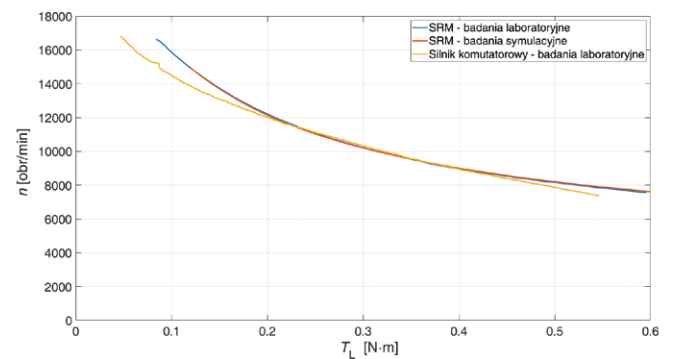
**Rys. 8.** Zależność indukcyjności własnych pasm w funkcji położenia wirnika



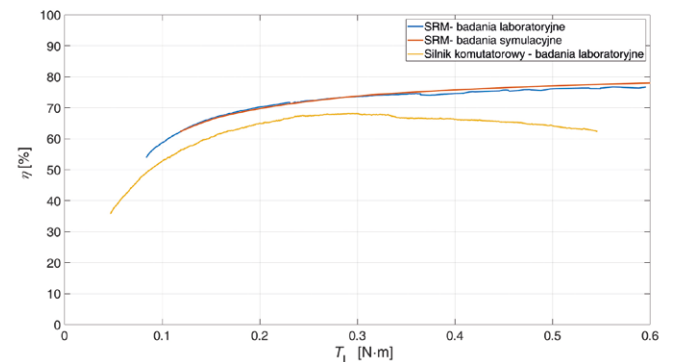
**Rys. 9.** Zależność statycznego momentu elektromagnetycznego w funkcji położenia wirnika przy  $I = var$



**Rys. 10.** Przykładowe przebiegi czasowe prądów pasmowych



**Rys. 11.** Charakterystyki mechaniczne badanych silników



**Rys. 12.** Sprawność badanych silników

zamieszczono wyniki badań silnika komutatorowego stosowanego w napędzie robota kuchennego.

W przypadku silnika reluktancyjnego przełączalnego uzyskano znacznie większą sprawność ogólną układu napędowego (około 10% w wymaganym punkcie pracy). Przy obciążeniu przekraczającym 0,3 Nm sprawność silnika komutatorowego, z uwagi na spadek intensywności chłodzenia, ulega istotnemu zmniejszeniu. W przypadku silnika reluktancyjnego przełączalnego tej tendencji nie stwierdzono.

## 5. Wnioski


Zaproponowane rozwiązanie do robota kuchennego, oparte o trójfazowy silnik reluktancyjny przełączalny 6/4, spełnia wymagania stawiane temu napędowi. Charakteryzuje się ono większą sprawnością układu napędowego. Szeroki zakres regulacji prędkości obrotowej oraz możliwość pracy ze stałym momentem umożliwiają uproszczenie układu przeniesienia napędu. W trybie pracy stałomomentowej możliwe jest zmniejszenie prędkości obrotowej do kilkudziesięciu obrotów na minutę. Nie jest to możliwe w przypadku silnika komutatorowego z uwagi na tętnienia momentu elektromagnetycznego. Zastosowanie silnika reluktancyjnego przełączalnego jednak istotnie podwyższa koszt wykonania takiego układu napędowego.

Niesymetria obwodu magnetycznego stojana badanej konstrukcji wpływa na kształt prądów pasmowych, a w konsekwencji na wzrost tętnień momentu elektromagnetycznego.

## Literatura

- [1] SZCZĘSNY D., DRABIK G.: *Silniki wysokosprawne z klatką miedzianą*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 78/2007.
- [2] BOGUSZ P., KORKOSZ M., PROKOP J.: *Analiza wpływu grubości szczeliny powietrznej na charakterystyki statyczne silnika reluktancyjnego przełączalnego*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 82/2009.
- [3] BOGUSZ P., KORKOSZ M., PROKOP J.: *Analiza konstrukcji trójfazowej silnika reluktancyjnego przełączalnego 6/4 o niesymetrycznym obwodzie stojana – wyznaczenie charakterystyk statycznych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 100/2013.
- [4] SHETH N., RAJAGOPAL K.: *Torque profiles of a switched reluctance motor having special pole face shapes and asymmetric stator poles*. „IEEE Transactions on Magnetics”, vol. 40, July 2004.
- [5] BOGUSZ P., KORKOSZ M., PROKOP J.: *Badania drgań napędu z silnikiem reluktancyjnym przełączalnym z zastosowaniem analizy modalnej*. „Przegląd Elektrotechniczny” 9(86)/2010.
- [6] VUJICIC V., VUKOSAVIC S., JOVANOVIC M.: *Asymmetrical switched reluctance motor for a wide constant power range*. „IEEE Transactions on Energy Conversion”, vol. 21, March 2006.
- [7] Ansys Documentation, ANSYS, Inc.

Artykuł był publikowany w czasopiśmie „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2(122)/2019.

 mgr inż. Grzegorz Podskarbi, e-mail: g.podskarbi@prz.edu.pl  
dr hab. inż. Mariusz Korkosz, e-mail: mkosz@prz.edu.pl  
Politechnika Rzeszowska  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki

artykuł recenzowany

reklama

# Wybierz swoją prenumeratę na [www.nis.com.pl](http://www.nis.com.pl)



**Prenumerata drukowana**



**Prenumerata elektroniczna**



**Pakiet**