

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

## BADANIA LABORATORYJNE DWUPASMOWEGO SILNIKA RELUKTANCYJNEGO PRZELĄCZALNEGO PRZEZNACZONEGO DO NAPĘDU WYSOKOOBROTOWEGO

### LABORATORY STUDIES OF A TWO-PHASE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR DESIGNED TO HIGH SPEED DRIVE

**Streszczenie:** W pracy zamieszczono wybrane wyniki badań laboratoryjnych dwupasmowego silnika reluktancyjnego przelączalnego przeznaczonego do napędu agregatu ssącego. W ramach wcześniejszych badań opracowano różne warianty rozwiązań konstrukcyjnych wirników. Zostały wyznaczone charakterystyki momentowe badanego silnika przy zastosowaniu różnych wirników. Dokonano ich zestawienia i porównania. Wyznaczono również zależności indukcyjności własnych od położenia wirnika. Zarejestrowano przebiegi czasowe prądów silnika pracującego w różnych punktach pracy. Zamieszczono wnioski dotyczące badanego silnika.

**Abstract:** In the paper, the chosen laboratory test results of two-phase switched reluctance motor (SRM) designated for suction blower drive were placed. In past studies have been developed different variants of rotor design solutions. Torque characteristics of studied motor with different rotors were determined. They were summarized and compared. Dependencies between self-inductance and rotor position were also determined. Current waveforms of the motor at various working points were recorded. Conclusions concerning tested motor were placed.

**Słowa kluczowe:** silnik reluktancyjny przelączalny, dwupasmowy, napęd wysokoobrotowy  
**Keywords:** switched reluctance motor, two-phase, high-speed drive

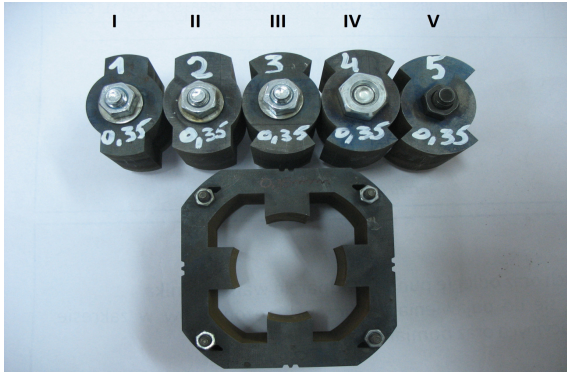
#### 1. Wstęp

Sprzęt gospodarstwa domowego (AGD) jest istotnym segmentem rynku aplikacji napędów elektrycznych. W chwili obecnej jest on zdominowany przez napędy elektryczne realizowane w oparciu o silniki komutatorowe prądu przemiennego. Pomimo prostoty sterowania silniki komutatorowe posiadają wady, które mogą być przeciwskazaniem do zastosowań profesjonalnych lub półprofesjonalnych. Jedną z tych wad jest relatywnie niska trwałość z uwagi na istnienie zestyku szczotka-komutator. Jeżeli jednym z wymogów zastosowanego napędu jest podwyższona trwałość to rozwiązania należy szukać wśród napędów elektrycznych z komutacją elektroniczną. Jednym z typów takich napędów są maszyny reluktancyjne przelączalne (SRM) [1-2]. Są to bardzo niezawodne maszyny o znacznej trwałości limitowanej żywotnością zastosowanych łożysk. Sprawność przetwarzania energii jest wyższa niż w tradycyjnych silnikach komutatorowych, chociaż niższa niż w napędach bezszczotkowych z magnesami trwałymi [3]. Brak magnesów w konstrukcji silnika jest wadą (niższa sprawność), ale też zaletą (niższe koszty produkcji). W arty-

kule zamieszczono wyniki badań laboratoryjnych zaprojektowanego przez autorów dwupasmowego silnika SRM przeznaczonego do napędu wysokoobrotowego, jakim jest agregat ssący odkurzacza. W pracy zostały wyznaczone statyczne charakterystyki momentowe dla różnych wariantów wirników przy  $I=var$ . Wyznaczono również indukcyjność własną poszczególnych pasm. Wyniki badań symulacyjnych dla rozpatrywanych wariantów wirników były prezentowane w [4-5]. Zostały również wyznaczone przebiegi czasowe prądów, napięć, charakterystyki mechaniczne oraz sprawności dla jednego z wariantów wirnika przy różnych wartościach napięcia zasilającego ( $U_{dc}=var$ ) oraz wybranego zestawu parametrów sterujących pracą silnika. Zamieszczono wnioski dotyczące wyznaczonych momentowych charakterystyk statycznych jak również wyznaczonych zależności indukcyjności własnej od kąta położenia wirnika poszczególnych pasm silnika w odniesieniu do uzyskanych wyników badań symulacyjnych. Dokonano oceny przydatności wykonanej konstrukcji dwupasmowego silnika reluktancyjnego przelączalnego do napędu agregatu ssącego.

## 2. Prototyp dwupasmowego silnika reluktancyjnego przelączalnego

Na podstawie przeprowadzonych wyników badań symulacyjnych [4-5] został wykonany prototyp dwupasmowego silnika reluktancyjnego przelączalnego wraz z kilkoma wariantami wirników. Stojan silnika oraz wykonane warianty wirników pokazano na rysunku 1.

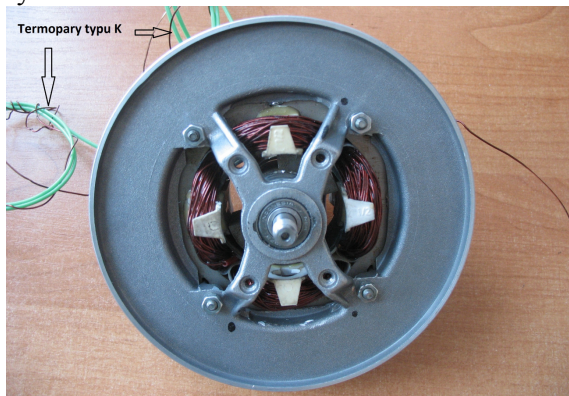


Rys. 1. Widok wykonanego stojana oraz pięciu wirników

Badane warianty silników zostały oznaczone jak na rysunku 1, gdzie:

- I oznacza wirnik symetryczny o kącie bieguny  $\beta_r=45^\circ$ ,
- II oznacza wirnik symetryczny o kącie bieguny  $\beta_r=60^\circ$ ,
- III oznacza wirnik symetryczny o skokowej szczelinie powietrznej oraz kątach bieguny  $\beta_{r1}=24^\circ$ ,  $\beta_{r2}=45^\circ$ ,  $\beta_r=\beta_{r1}+\beta_{r2}=69^\circ$ ,
- IV oznacza wirnik symetryczny o skokowej szczelinie powietrznej oraz kątach bieguny  $\beta_{r1}=32^\circ$ ,  $\beta_{r2}=45^\circ$ ,  $\beta_r=\beta_{r1}+\beta_{r2}=77^\circ$ ,
- V oznacza wirnik niesymetryczny o kącie bieguny  $\beta_r=90^\circ$ .

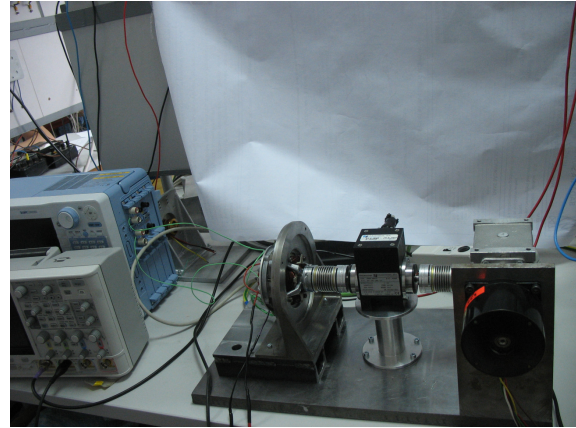
Widok złożonego silnika został pokazany na rysunku 2.



Rys. 2. Widok złożonego silnika reluktancyjnego przelączalnego

## 3. Charakterystyki statyczne

Wyznaczanie charakterystyk statycznych zrealizowano na stanowisku badawczym pokazanym na rysunku 3.

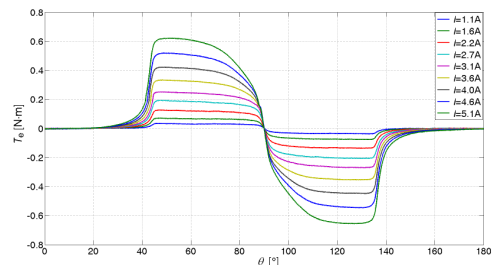


Rys. 3. Widok stanowiska do wyznaczania charakterystyk statycznych

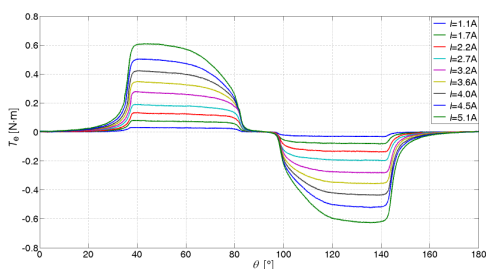
Stanowisko to składało się z silnika skokowego wraz ze sterownikiem, przekładni, momentomierza, układu do rejestracji i akwizycji danych pomiarowych oraz badanego silnika.

### 3.1. Charakterystyki momentowe

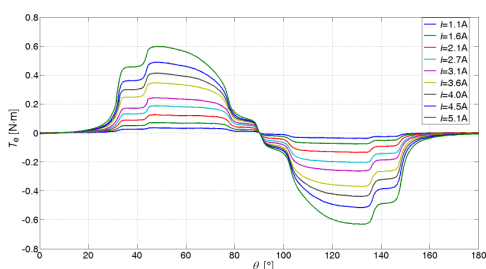
Moment elektromagnetyczny silnika wyznaczano dla jednego pełnego obrotu wirnika związanego z kątem położenia  $\theta$  przy stałej wartości prądu zasilającego  $I=const$  dla umownego pasma  $Ph1$ . Zamontowane w trakcie uzwojania stojana termopary typu K (rys.2) wykorzystywano do kontroli przyrostów temperatury. Na rysunkach 4-8 pokazano wyznaczone rodziny momentowych charakterystyk statycznych odpowiednio dla badanych wariantów wirników I (rys.4), II (rys.5), III (rys.6), IV (rys.7) oraz V (rys.8).



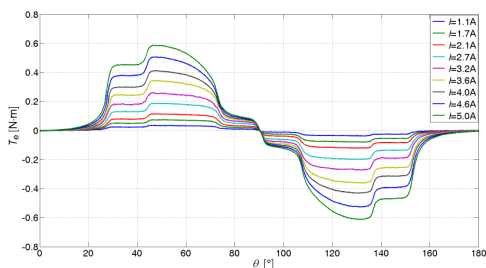
Rys. 4. Zależność momentu elektromagnetycznego  $T_e$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  przy  $I=var$  dla wariantu I



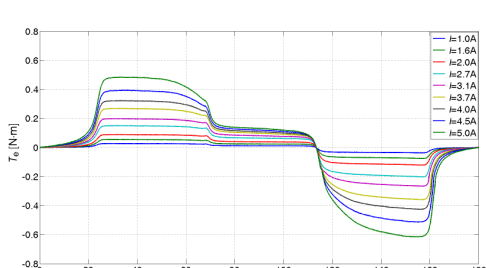
Rys. 5. Zależność momentu elektromagnetycznego  $T_e$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  przy  $I=var$  dla wariantu II



Rys. 6. Zależność momentu elektromagnetycznego  $T_e$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  przy  $I=var$  dla wariantu III



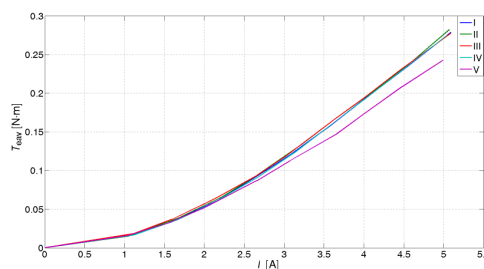
Rys. 7. Zależność momentu elektromagnetycznego  $T_e$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  przy  $I=var$  dla wariantu IV



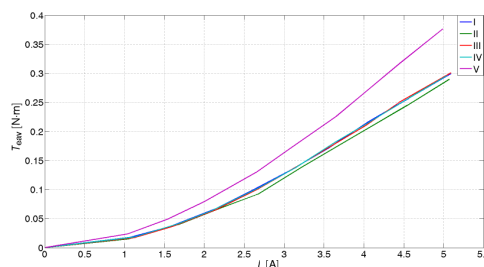
Rys. 8. Zależność momentu elektromagnetycznego  $T_e$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  przy  $I=var$  dla wariantu V

Na rysunkach 9-10 zamieszczono wyznaczone wartości średnie momentu elektromagnetycznego  $T_{eav}$  w funkcji prądu  $I$ . Wartość średnią dla dodatniej wartości momentu pokazano na ry-

sunku 9. Wyznaczoną wartość średnią momentu hamującego pokazano na rysunku 10.



Rys. 9. Zależność wartości średniej dodatniego momentu elektromagnetycznego  $T_{eav}$  w funkcji prądu  $I$  dla badanych wariantów wirników

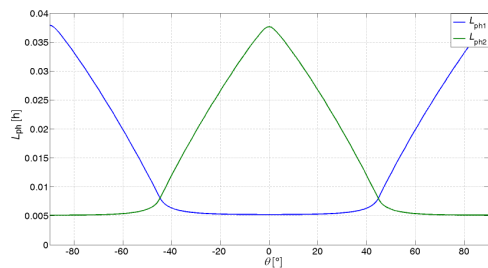


Rys. 10. Zależność wartości średniej dodatniego momentu elektromagnetycznego  $T_{eav}$  w funkcji prądu  $I$  dla badanych wariantów wirników

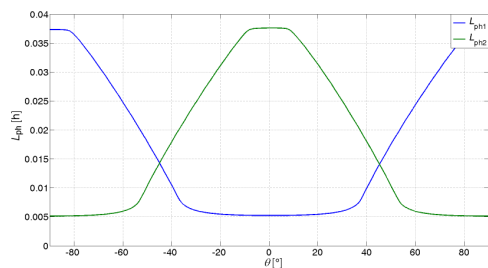
Wyznaczone wartości średnie momentu elektromagnetycznego dla wariantów I-IV w zasadzie się pokrywają pomimo ich różnego kształtu. Wariant V z uwagi na wprowadzenie rozwiązania niesymetrycznego w zakresie dodatniego momentu elektromagnetycznego wytwarza zauważalnie mniejszą wartość średnią. Szczególnie jest to widoczne przy większych wartościach płynącego prądu. Dla wartości ujemnych momentu elektromagnetycznego w przypadku wariantu V wytwarzana jest większa wartość średnia w odniesieniu do wariantów o budowie symetrycznej.

### 3.2. Wyznaczanie indukcyjności własnej

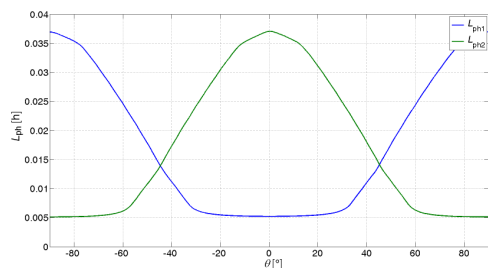
Indukcyjność własną  $L_{ph}$  obu uzwojeń silnika wyznaczano metodą mostkową przy częstotliwości  $f=20\text{Hz}$  (mostek RLC). Podobnie jak w przypadku wyznaczania statycznych charakterystyk momentowych pomiary dokonywano za pełny obrót wirnika. Na rysunkach 11-15 pokazano zależności indukcyjności własnej  $L_{ph}$  obu uzwojeń ( $Ph1$  i  $Ph2$ ) w funkcji położenia wirnika dla badanych wariantów wirników I (rys.11), II (rys.12), III (rys.13), IV (rys.14) oraz V (rys.15).



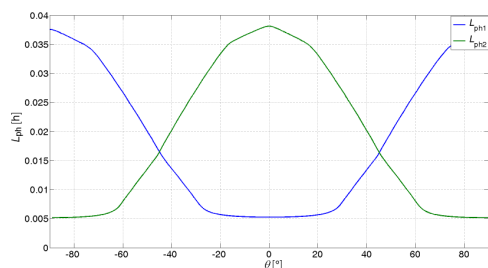
Rys. 11. Zależność indukcyjności własnej pasma  $L_{ph}$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  dla wariantu I



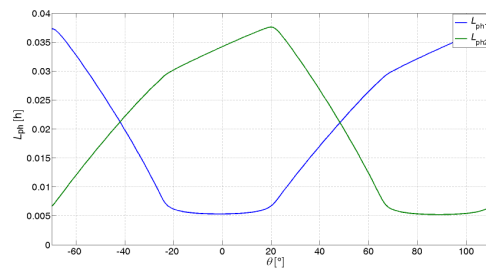
Rys. 12. Zależność indukcyjności własnej pasma  $L_{ph}$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  dla wariantu II



Rys. 13. Zależność indukcyjności własnej pasma  $L_{ph}$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  dla wariantu III



Rys. 14. Zależność indukcyjności własnej pasma  $L_{ph}$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  dla wariantu IV

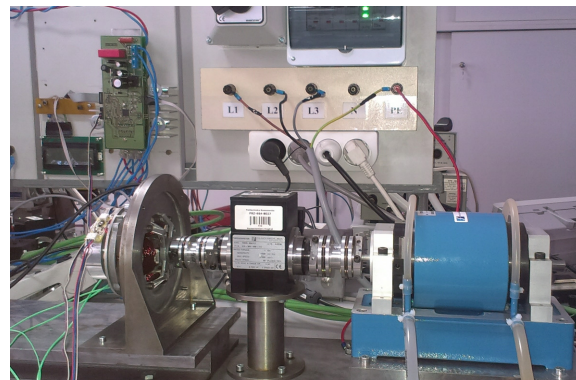


Rys. 15. Zależność indukcyjności własnej pasma  $L_{ph}$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  dla wariantu V

Analizując wyznaczone zależności indukcyjności własnych dla poszczególnych wariantów można zauważyć dobrą zgodność wartości minimalnych i maksymalnych obu uzwojeń  $Ph1$  i  $Ph2$ .

#### 4. Charakterystyki ruchowe

Charakterystyki ruchowe badanego silnika wyznaczano na stanowisku wyposażonym w wysokonapięciowy stabilizowany zasilacz prądu stałego, hamownicę wiroprądową, momentomierz, analizator mocy oraz komputer PC do zadawania momentu obciążenia. Komputer PC jednocześnie pełnił rolę układu jednoczesnej akwizycji danych pomiarowych. Dokonywano rejestracji wszystkich dostępnych napięć, prądów, momentu obciążenia, prędkości obrotowej, temperatury rdzenia stojana i uzwojeń silnika. Widok stanowiska badawczego pokazano na rysunku 16.

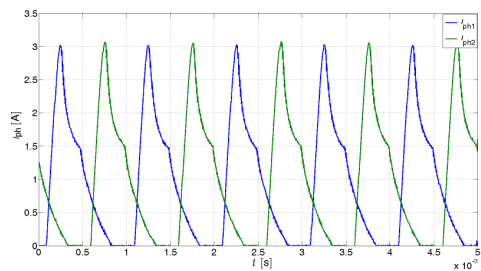


Rys. 16. Widok stanowiska do wyznaczania charakterystyk ruchowych badanego silnika

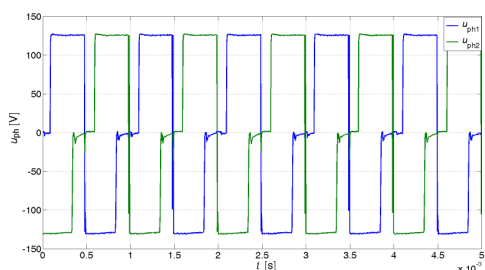
##### 4.1. Przebiegi prądów i napięć

Przebiegi czasowe prądów i napięć rejestrowano analizatorem mocy. Na rysunkach 17-18 pokazano przebiegi czasowe prądów (rys.17) i napięć pasmowych (rys.18) wyznaczone dla  $U_{dc}=130$  V,  $n=30000$  obr/min, kąt załączenia

$\theta_{on}=-10^\circ$ , kąt przewodzenia  $\Delta\theta=70^\circ$  silnika pracującego na biegu jałowym z wirnikiem V.

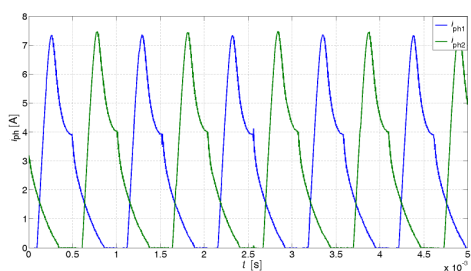


Rys.17. Przebiegi czasowe prądów pasmowych silnika przy napięciu zasilającym  $U_{dc}=130\text{ V}$ ,  $n=30000\text{ obr/min}$ , kącie załączenia  $\theta_{on}=-10^\circ$ , kącie przewodzenia  $\Delta\theta=70^\circ$  silnika pracującego na biegu jałowym

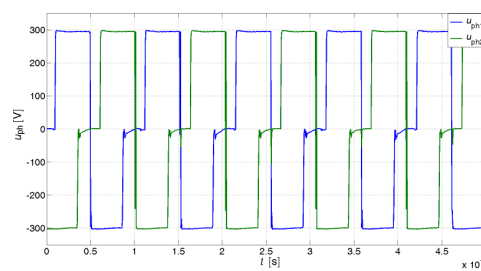


Rys. 18. Przebiegi czasowe napięć pasmowych silnika przy napięciu zasilającym  $U_{dc}=130\text{ V}$ ,  $n=30000\text{ obr/min}$ , kącie załączenia  $\theta_{on}=-10^\circ$ , kącie przewodzenia  $\Delta\theta=70^\circ$  silnika pracującego na biegu jałowym

Na rysunkach 19-20 pokazano przebiegi czasowe prądów (rys.19) i napięć pasmowych (rys.20) wyznaczone  $U_{dc}=300\text{ V}$ ,  $n=29000\text{ obr/min}$ , kącie załączenia  $\theta_{on}=-10^\circ$ , kącie przewodzenia  $\Delta\theta=70^\circ$  silnika obciążonego momentem  $T_L=0.16\text{Nm}$ .



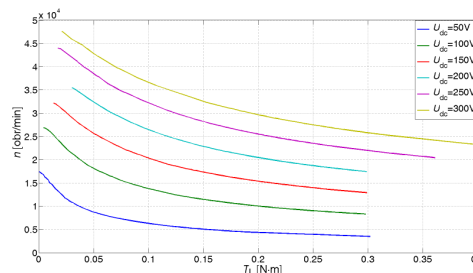
Rys. 19. Przebiegi czasowe prądów pasmowych silnika przy napięciu zasilającym  $U_{dc}=300\text{ V}$ ,  $n=29000\text{ obr/min}$ , kącie załączenia  $\theta_{on}=-10^\circ$ , kącie przewodzenia  $\Delta\theta=70^\circ$  silnika obciążonego momentem  $T_L=0.16\text{Nm}$



Rys. 20. Przebiegi czasowe prądów pasmowych silnika przy napięciu zasilającym  $U_{dc}=300\text{ V}$ ,  $n=29000\text{ obr/min}$ , kącie załączenia  $\theta_{on}=-10^\circ$ , kącie przewodzenia  $\Delta\theta=70^\circ$  silnika obciążonego momentem  $T_L=0.16\text{ Nm}$

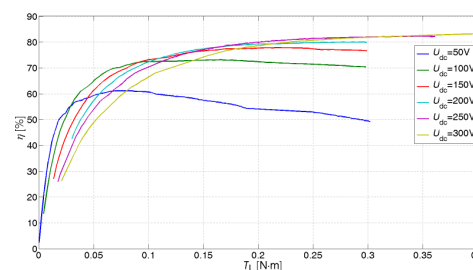
#### 4.2. Charakterystyka mechaniczna oraz sprawności

Przykładowe charakterystyki mechaniczne silnika, z wirnikiem według wariantu V, pokazano na rysunku 21. Wyznaczone zostały dla różnych wartości napięć zasilających  $U_{dc}=var$ , kącie załączenia  $\theta_{on}=-10^\circ$  oraz kącie przewodzenia  $\Delta\theta=70^\circ$ .



Rys. 21. Zależność prędkości obrotowej  $n$  w funkcji momentu obciążenia  $T_L$  badanego wariantu V przy  $U_{dc}=var$

Wyznaczoną sprawność ogólną  $\eta$  badanego silnika w funkcji momentu obciążenia pokazano na rysunku 22.



Rys. 22. Zależność sprawności ogólnej  $\eta$  w funkcji momentu obciążenia  $T_L$  badanego wariantu V przy  $U_{dc}=var$

Silnik wykazuje dużą wrażliwość na zmianę wartości napięcia zasilającego (rys.21). Przy napięciu zasilającym  $U_{dc}=300\text{V}$  (napięcie znamionowe) uzyskana charakterystyka mechaniczna silnika jest zbliżona do charakterystyki

komercyjnego silnika komutatorowego stosowanego w napędzie agregatu ssącego. Jednocześnie sprawność prototypowego dwupasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego jest znacznie wyższa (ponad 20%). Tym samym wykazano, że zaprojektowana konstrukcja może zostać zastosowana w napędzie agregatu ssącego charakteryzując się znacznie wyższą sprawnością ogólną, co jest istotne z uwagi na wprowadzane ograniczenia, co do wartości mocy pobieranej z sieci zasilającej.

## 5. Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych dwupasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego przeznaczonego do napędu wysokoobrotowego. W warunkach laboratoryjnych zostały wyznaczone statyczne charakterystyki momentowe dla zaprojektowanych pięciu wariantów wirnika. Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych są zbieżne z wynikami obliczeń symulacyjnych. Zostały również wyznaczone zależności indukcyjności własnych w funkcji położenia wirnika. Analiza otrzymanych wyników pozwala stwierdzić, że różnice pomiędzy wartościami charakterystycznymi profilu indukcyjności własnej obu uzwojeń jest nieznaczna, co świadczy o poprawności nawinięcia obu uzwojeń oraz braku istotnych niesymetrii montażowych. Zaprezentowane wybrane wyniki badań laboratoryjnych dotyczące charakterystyk mechanicznych pozwalają stwierdzić, że wykonany prototyp silnika osiągnie wymagany punkt pracy ( $P_{out}=700W$  przy prędkości obrotowej  $n=45000$  obr/min). Pokazane na rys. 21 charakterystyki mechaniczne ze względów bezpieczeństwa zastosowanej hamownicy wiroprowadowej ( $n_{max}=50000$  obr/min) zostały wyznaczone przy wartościach parametrów sterujących ograniczających prędkość biegu jałowego silnika. Uzyskane wartości sprawności ogólnej (silnik wraz z układem energoelektronicznym) są ponad 20% wyższe niż w przypadku klasycznego silnika komutatorowego o porównywanej mocy przeznaczonego na napędu agregatu ssącego. W warunkach symulacyjnych dla wariantu V wirnika uzyskiwano najmniejszą sprawność ogólną. Tym samym przy zastosowaniu pozostałych wariantów wirników możliwe będzie uzyskanie jeszcze wyższej sprawności ogólnej badanego prototypu dwupasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego.

## 6. Literatura

- [1]. Miller T.J.E.: *Switched reluctance motor and their control*. Magna Physics Publishing, Hillsboro, OH, and Oxford, 1993.
- [2]. Krishnan R.: *Switched reluctance motor drives. Modeling, simulation, analysis, desing, and applications*, CRC Press LLC, 2003.
- [3]. Gieras J. F., Wing M.: *Permanent Magnet Motor Technology - Design and Applications, Second Edition*, ISBN 0-8247-0739-7, 2002.
- [4]. Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Analiza rozwiązań konstrukcyjnych silników reluktancyjnych przełączalnych przeznaczonych do napędów wysokoobrotowych*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe –, Nr 94, str. 25-31, 2012.
- [5]. Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Badania symulacyjne silników reluktancyjnych przełączalnych przeznaczonych do napędów wysokoobrotowych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 66, Studia i Materiały Nr 32, str. 221-226, 2012.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego NN511 312 440.

## Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz, pbogu@prz.edu.pl  
dr hab. inż. Mariusz Korkosz  
mkosz@prz.edu.pl  
dr hab. inż. Jan Prokop, jprokop@prz.edu.pl  
Politechnika Rzeszowska  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
ul. Al. Powstańców Warszawy12, 35-959  
Rzeszów