

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

DWUPASMOWY SILNIK RELUKTANCYJNY PRZEŁĄCZALNY PRZEZNACZONY DO NAPĘDU ROBOTA KUCHENNEGO

A TWO-PHASE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR DESIGNED TO DRIVE FOOT PROCESSOR

Streszczenie: W robotach kuchennych zazwyczaj są stosowane silniki komutatorowe. Alternatywą dla nich są silniki z komutacją elektroniczną. Jedną z takich maszyn jest silnik reluktancyjny przełączalny. Autorzy proponują zastosowanie dwupasmowej konstrukcji silnika reluktancyjnego przełączalnego 4/2 do napędu robota kuchennego. Konstrukcja została opracowana z uwzględnieniem ograniczeń technologicznych napędu robota kuchennego. W pracy wyznaczono charakterystyki statyczne na bazie modelu polowego badanego silnika. Zostały wyznaczone przebiegi czasowe prądów i momentu elektromagnetycznego dla wybranych punktów pracy silnika. Zamieszczono wnioski dotyczące analizowanej konstrukcji.

Abstract: The commutator motors are usually used in food processors. Motors with electronic commutation can be a substitute for them, for example Switched Reluctance Machine (SRM). The authors propose the use of two-phase Switched Reluctance Machine 4/2 to drive a food processor. The motor construction was developed taking into account the technological limitations of a food processor drive. In the paper, the static characteristics based on the field model of tested motor were determined. The current waveforms and electromagnetic torque for the selected motor working points were determined. Conclusions concerning the analyzed construction were placed.

Słowa kluczowe: silnik reluktancyjny przełączalny, dwupasmowy, napęd robota kuchennego

Keywords: switched reluctance motor, two-phase, food processor drive

1. Wstęp

W dotychczasowych układach napędowych sprzętu gospodarstwa domowego (AGD) stosowane są głównie silniki komutatorowe prądu przemiennego [1-3]. Są one stosowane z uwagi na bardzo dobrze opanowaną technologię produkcji oraz co jest czynnikiem najistotniejszym z uwagi na relatywnie niskie koszty ogólnego układu napędowego. Do niedawna podstawową wadą silnika komutatorowego jaką jest mała sprawność nie była przeszkodą w stosowaniu tych silników na masową skalę w sprzęcie gospodarstwa domowego (AGD). Wprowadzane w UE ograniczenia w poborze dopuszczalnej mocy z sieci zasilającej są jednym z czynników, który może znacząco ograniczyć stosowanie silników komutatorowych w sprzęcie AGD wymagającym mocy na wale powyżej 700 W. Robot kuchenny przeznaczony do zastosowań nieprofesjonalnych nie wymaga tak dużej wartości mocy na wale, ale jest jednocześnie urządzeniem, w którym można wykorzystać możliwości nowoczesnych silników z komutacją elektroniczną, których zaletą jest szeroki zakres regulacji prędkości obrotowej oraz znacznie wyższa sprawność przetwarzania

energii elektrycznej. Jedną z maszyn, którą z powodzeniem można zastosować w tego typu napędzie jest niewątpliwie silnik reluktancyjny przełączalny [4-6]. W pracy [6] zamieszczono wyniki badań konstrukcji trójpasmowego silnika reluktancyjnego 6/4 przeznaczonego do napędu robota kuchennego. Konstrukcja trójpasmowa spełniała postawione wymagania, ale koszt wykonania praktycznego układu mocy okazał się zbyt wysoki. Dlatego autorzy podjęli próbę ograniczenia kosztów ogólnych wykonania układu napędowego bazującego na silniku reluktancyjnym przełączalnym, poszukując rozwiązania opartego o konstrukcję dwupasmową tego silnika.

W artykule zamieszczono wyniki badań prototypowej konstrukcji dwupasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 4/2 przeznaczonego do napędu robota kuchennego. Zamieszczono wyniki obliczeń numerycznych ukierunkowanych na odpowiednie ukształtowanie charakterystyki momentowej silnika pozwalającej na uzyskanie wymaganej wartości momentu rozruchowego w dowolnym położeniu

niu wirnika. Dokonano oceny zaprojektowanej konstrukcji dwupasmowej.

2. Wymagania stawiane układowi napędowemu robota kuchennego

Typowy silnik komutatorowy prądu przemiennego stosowany w analizowanym napędzie wieloczynnościowego robota kuchennego posiada następujące parametry i wymiary geometryczne:

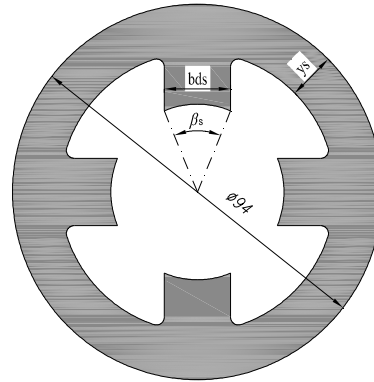
- napięcie zasilające – ~ 230 V,
- prędkość znamionowa – 10000 obr/min,
- moc znamionowa – 330 W,
- średnica zewnętrzna stojana d_{se} – 94mm,
- długość pakietu żelaza L_{Fe} – 35mm.

Wieloczynnościowy robot kuchenny wymaga od zastosowanego silnika pracy w bardzo szerokim zakresie zmiany prędkości obrotowej. W zależności od rodzaju urządzenia oraz ustalonego tzw. biegu, wybierany jest punkt pracy silnika. Komercyjny silnik, w którym do przeniesienia napędu stosuje się dwie przekładnie pasowe pracuje w trybie turbo z maksymalną prędkością 15000 obr/min. Minimalna prędkość, z którą musi pracować wynosi 3000 obr/min. Wartość minimalnej prędkości, z którą musi pracować silnik nie może być niższa z uwagi na bardzo duże tętnienia wytwarzanego momentu elektromagnetycznego, momentu o krotności częstotliwości napięcia zasilającego.

3. Projektowany dwupasmowy silnik reluktancyjny przelączalny

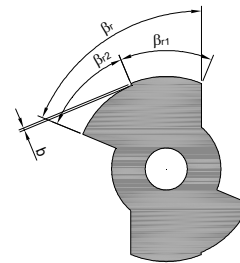
W napędzie robota kuchennego przewidziano zastosowanie dwupasmowego silnika reluktancyjnego przelączalnego 4/2 z niesymetrycznym obwodem magnetycznym wirnika oraz skośną szczeliną powietrzną.

Przy projektowaniu obwodu magnetycznego stojana przyjęto ograniczenie dotyczące zewnętrznej średnicy ($d_{se}=94$ mm). Dodatkowo założono, że długość pakietu żelaza będzie identyczna jak w przypadku silnika komercyjnego ($L_{FE}=35$ mm). Widok obwodu magnetycznego stojana z zaznaczonymi parametrami projektowymi pokazano na rysunku 1. Do parametrów projektowych wykroju blachy stojana zalicza się: rozpiętość kątową bieguną stojana β_s oraz grubość jarzma stojana y_s .



Rys. 1. Widok projektowanego wykroju blachy stojana

Na rysunku 2 pokazano przekrój geometrii obwodu wirnika z zaznaczeniem parametrów projektowych.



Rys. 2. Widok projektowanego wykroju blachy wirnika

Do danych projektowych związanych z wykresem blachy wirnika zalicza się: rozpiętość kątową β_{r1} przy minimalnej szczelinie powietrznej, rozpiętość kątową β_{r2} przy dodatkowej szczelinie powietrznej b , dodatkową szczelinę powietrzną b .

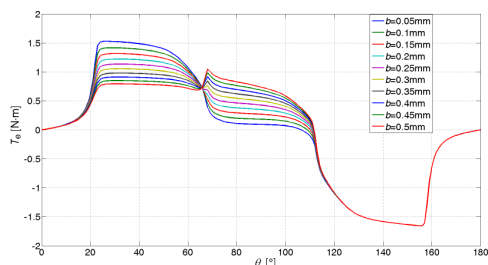
4. Obliczenia numeryczne

W programie do obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych zbudowano sparametryzowaną geometrię projektowanego dwupasmowego silnika reluktancyjnego przelączalnego. W trakcie obliczeń numerycznych przyjęto następujące założenia pomiędzy poszczególnymi parametrami projektowymi stojana i wirnika:

- $y_s = 0.8b_{ds}$,
- $\beta_{r1} = \beta_{r2}$,
- $\beta_{r1} = \beta_s$.

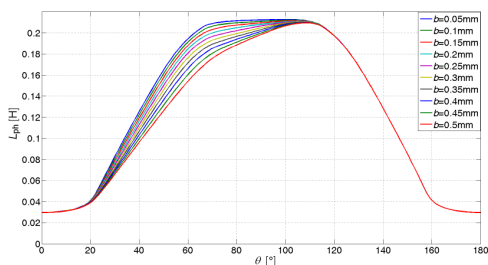
Dla uzyskania momentu rozruchowego z dowolnego położenia wirnika wymagane jest założenie, że rozpiętość kątową β_s bieguną stojana nie może być mniejsza niż 45° . Uzyskanie wymaganej mocy na wale $P_{out}=330$ W, przy prędkości znamionowej 10000 obr/min oraz napięciu zasilającym $U_{dc}=300$ V, wymaga zastosowa-

nia w każdym uzwojeniu $N_{ph}=600$ zwojów. Z uwagi na przewidywaną średnicę drutu nawojowego $\phi=0.5\text{mm}$ oraz dopuszczalną gęstość prądu, wartość maksymalna prądu pasma, z którą silnik może pracować w zakresie stałego momentu, powinna wynosić $I_{phmax}=3\text{A}$. Jednocześnie jest to dopuszczalna wartość prądu podczas rozruchu silnika. Zmiana wartości dodatkowej szczeliny powietrznej pozwala kształtować zależność wytwarzanego momentu elektromagnetycznego T_e od położenia wirnika θ . Na rysunku 3 pokazano zależność wytwarzanego momentu elektromagnetycznego T_e od kąta położenia wirnika θ dla różnych wartości dodatkowej szczeliny powietrznej b (rys. 1).



Rys. 3. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ dla $b=var$

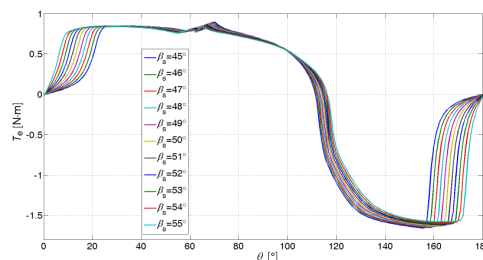
Zależność indukcyjności własnej L_{ph} jednego z pasm w funkcji kąta położenia wirnika pokazano na rysunku 4.



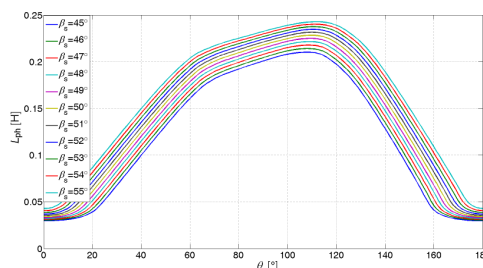
Rys. 4. Zależność indukcyjności własnej L_{ph} w funkcji kąta położenia wirnika θ dla $b=var$

Z uwagi na przeznaczenie silnika wymagane jest uzyskanie momentu rozruchowego nie mniejszego niż 0.5 Nm . Dla uzyskania takiej wartości momentu przy prądzie $I=3\text{A}$ wymagane jest zastosowanie dodatkowej wartości szczeliny powietrznej równej $b=0.45\text{mm}$. Obliczenia pokazane na rysunkach 3-4 wykonano przy założeniu, że parametry projektowe: $\beta_{r2}=\beta_{r1}=\beta_s=45^\circ$. Dla podniesienia wartości minimalnego momentu rozruchowego wymagane jest określenie wpływu zwiększenia rozpiętości kątowej bieguna stojana powyżej $\beta_s>45^\circ$. Moment elektromagnetyczny silnika wyznaczano

dla jednego pełnego obrotu wirnika θ przy stałej wartości prądu zasilającego umowne pasmo $I=const$. Na rysunkach 5-6 pokazano wyznaczone momentowe charakterystyki statyczne (rys.5) oraz indukcyjność własną (rys.6) w funkcji położenia wirnika przy zmianie rozpiętości kątowej bieguna stojana $\beta_s=var$. Rozpiętość kątową zmieniano w zakresie od 45° do 55° ze skokiem co 0.5° .

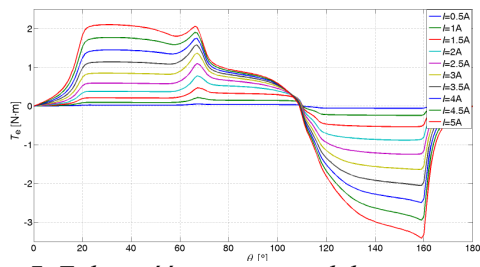


Rys. 5. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ dla $\beta_s=var$

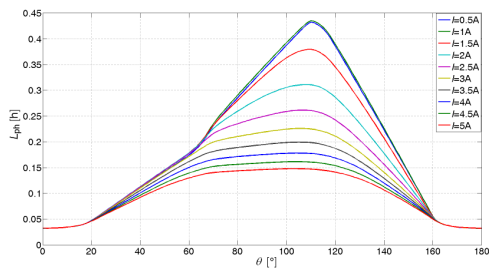


Rys. 6. Zależność indukcyjności własnej L_{ph} w funkcji kąta położenia wirnika θ dla $\beta_s=var$

Zwiększanie rozpiętości kątowej β_s przy założeniu, że: $\beta_{r2}=\beta_{r1}=\beta_s$ poszerza zakres wytwarzanego momentu, co jest korzystne w przypadku konieczności uzyskania wymaganego momentu rozruchowego z dowolnego położenia wirnika. Jednocześnie ulega zwiększeniu indukcyjność w położeniu niewspółosiowym, co ma istotny wpływ na uzyskanie wymaganej wartości maksymalnej prądu w uzwojeniach przy zastosowaniu sterowania jednopulsowego. Dla uzyskania wartości momentu rozruchowego nie mniejszego niż 0.5 Nm przy położeniu wirnika $\theta=100^\circ$ oraz możliwości ograniczenia tętnień momentu przy pracy silnika ze stałym momentem wybrano rozpiętość kątową stojana $\beta_s=50.5^\circ$ (oraz $\beta_{r2}=\beta_{r1}=50.5^\circ$). Dla w/w przyjętych rozpiętości kątowych zostały wyznaczone charakterystyki momentowe (rys. 7) oraz indukcyjności własnej (rys.8) przy zmianie wartości prądu zasilającego uzwojenie ($I=var$).



Rys. 7. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ dla $I=var$

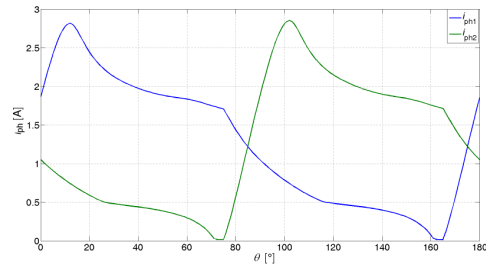


Rys. 8. Zależność indukcyjności własnej L_{ph} w funkcji kąta położenia wirnika θ dla $I=var$

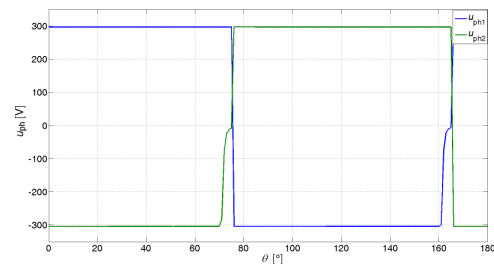
Należy zwrócić uwagę, że wartość dodatkowej szczeliny powietrznej b dobiera się dla uzyskania wymaganej charakterystyki przy wymaganej wartości prądu. Zwiększanie wartości prądu ponad wartość wymaganą skutkuje stosunkowo niewielkim wzrostem wytwarzanego momentu po osiągnięciu przez wirnik drugiego położenia charakterystycznego wynikającego z zastosowania dodatkowej szczeliny powietrznej.

5. Wyznaczanie prądów, napięć oraz momentu elektromagnetycznego

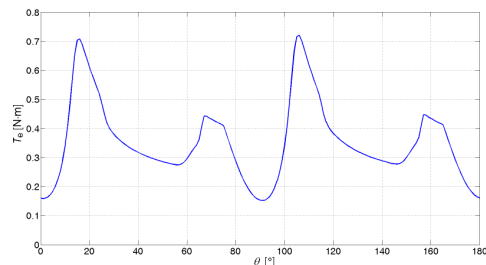
Stosując model połowo-obwodowy zostały wyznaczone zależności prądów, napięć oraz momentu elektromagnetycznego dla granicznych warunków pracy silnika oraz w punkcie pracy znamionowej. Wymagany punkt pracy silnika według karty katalogowej komercyjnego silnika narzuca pracę z prędkością $n=10000$ obr/min przy mocy na wale $P_{out}=330W$. Dla tego punktu pracy moment na wale silnika powinien wynosić $T_L=0.315$ Nm. Dla uzyskania tego punktu pracy został dobrany zestaw parametrów sterujących. Na rysunkach 9-11 pokazano odpowiednio zależności prądów pasmowych i_{ph} (rys.9), napięć pasmowych u_{ph} (rys.10) oraz momentu elektromagnetycznego T_e (rys.11) w funkcji położenia wirnika wyznaczone przy prędkości $n=10000$ obr/min, napięciu zasilającym $U_{dc}=300V$, kącie załączenia $\theta_{on}=-14^\circ$ oraz kącie przewodzenia $\theta_{przew}=90^\circ$.



Rys. 9. Zależność prądów pasmowych i_{ph} w funkcji położenia wirnika θ silnika przy napięciu zasilającym $U_{dc}=300$ V, $n=10000$ obr/min, kącie załączenia $\theta_{on}=-14^\circ$, kącie przewodzenia $\theta_{przew}=90^\circ$



Rys. 10. Zależność napięć pasmowych u_{ph} w funkcji położenia wirnika θ przy napięciu zasilającym $U_{dc}=300$ V, $n=10000$ obr/min, kącie załączenia $\theta_{on}=-14^\circ$, kącie przewodzenia $\theta_{przew}=90^\circ$

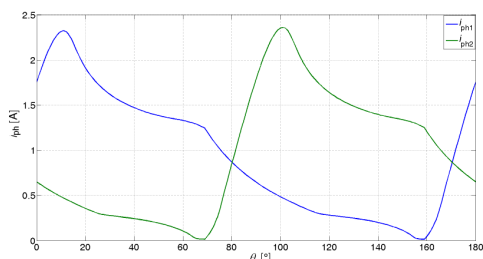


Rys. 11. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji położenia wirnika θ silnika przy napięciu zasilającym $U_{dc}=300$ V, $n=10000$ obr/min, kącie załączenia $\theta_{on}=-14^\circ$, kącie przewodzenia $\theta_{przew}=90^\circ$

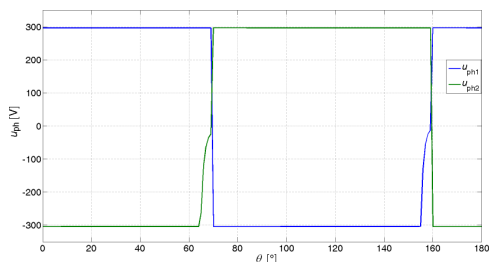
Wartość średnia wytwarzanego momentu elektromagnetycznego $T_{eav}=0.36Nm$ jest wystarczająca dla uzyskania mocy wyjściowej $P_{out}=330W$. Obliczona sprawność ogólna w tym punkcie pracy wynosi $\eta=81\%$.

Od projektowanego silnika wymaga się chwilowego podniesienia prędkości obrotowej do $n=15000$ obr/min. Jest to możliwe poprzez zmianę kąta załączenia. Wprowadzając odpowiednie wyprzedzenie możliwa będzie praca

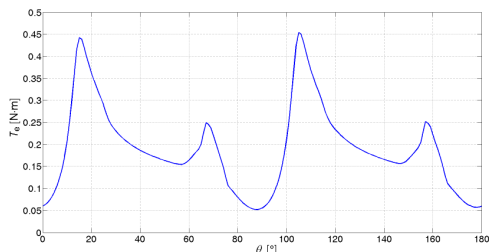
silnika z tą prędkością obrotową. Na rysunkach 12-14 pokazano odpowiednio zależności prądów pasmowych i_{ph} (rys.12), napięć pasmowych u_{ph} (rys.13) oraz momentu elektromagnetycznego T_e (rys.14) w funkcji położenia wirnika θ wyznaczone przy prędkości $n=15000$ obr/min, napięciu zasilającym $U_{dc}=300V$, kącie załączenia $\theta_{on}=-20^\circ$ oraz kącie przewodzenia $\theta_{przew}=90^\circ$.



Rys. 12. Zależność prądów pasmowych i_{ph} w funkcji położenia wirnika θ silnika przy napięciu zasilającym $U_{dc}=300 V$, $n=15000$ obr/min, kącie załączenia $\theta_{on}=-20^\circ$, kącie przewodzenia $\Delta\theta=90^\circ$



Rys. 13. Zależność napięć pasmowych u_{ph} w funkcji położenia wirnika θ silnika przy napięciu zasilającym $U_{dc}=300 V$, $n=15000$ obr/min, kącie załączenia $\theta_{on}=-20^\circ$, kącie przewodzenia $\Delta\theta=90^\circ$

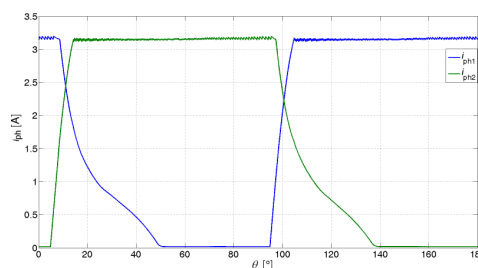


Rys. 14. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji położenia wirnika θ silnika przy napięciu zasilającym $U_{dc}=300 V$, $n=15000$ obr/min, kącie załączenia $\theta_{on}=-20^\circ$, kącie przewodzenia $\theta_{przew}=90^\circ$

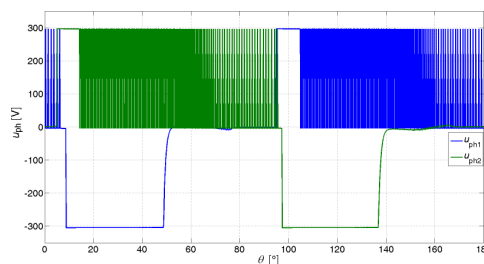
Przy pracy z prędkością maksymalną $n=15000$ obr/min wartość średnia wytwarzanego mo-

mentu elektromagnetycznego wynosi $T_{eav}=0.19Nm$. Po uwzględnieniu strat silnika otrzymuje się moc wyjściową $P_{out}=240W$. Obliczona sprawność ogólna w tym punkcie pracy wynosi $\eta=77\%$.

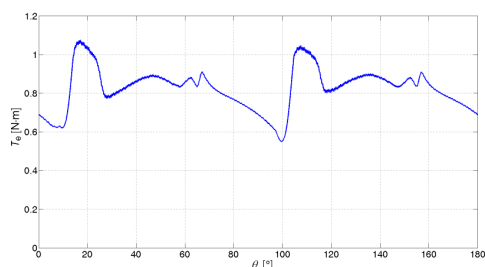
Prędkość minimalna z jaką musi pracować projektowany silnik nie może być mniejsza niż $n=3000$ obr/min. Przy tej prędkości wymagane jest już zastosowanie sterowania prądowego z uwagi na pracę w zakresie stałego momentu. Parametry sterowania dobrano pod kątem uzyskania możliwie małych tętnień momentu elektromagnetycznego. Jednocześnie są to parametry sterowania stosowane podczas rozruchu silnika. Na rysunkach 15-17 pokazano odpowiednio zależności prądów pasmowych i_{ph} (rys.15), napięć pasmowych u_{ph} (rys.16) oraz momentu elektromagnetycznego T_e (rys.17) w funkcji położenia wirnika θ wyznaczone przy prędkości $n=3000$ obr/min, napięciu zasilającym $U_{dc}=300V$, $I_{phmax}=3.1A$, kącie załączenia $\theta_{on}=5^\circ$ oraz kącie przewodzenia $\theta_{przew}=92^\circ$.



Rys. 15. Zależność prądów pasmowych i_{ph} w funkcji położenia wirnika θ silnika przy napięciu zasilającym $U_{dc}=300 V$, $n=3000$ obr/min, kącie załączenia $\theta_{on}=5^\circ$, kącie przewodzenia $\theta_{przew}=92^\circ$



Rys. 16. Zależność napięć pasmowych u_{ph} w funkcji położenia wirnika θ silnika przy napięciu zasilającym $U_{dc}=300 V$, $n=3000$ obr/min, kącie załączenia $\theta_{on}=5^\circ$, kącie przewodzenia $\Delta\theta_{przew}=92^\circ$



Rys. 17. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji położenia wirnika θ silnika przy napięciu zasilającym $U_{dc}=300$ V, $n=3000$ obr/min, kącie załączenia $\theta_{on}=5^\circ$, kącie przewodzenia $\theta_{przew}=92^\circ$

W zakresie sterowania prądowego uzyskano wartość średnią momentu elektromagnetycznego $T_{eav}=0.84$ Nm przy czym wartość minimalna momentu elektromagnetycznego wynosi $T_{emin}=0.55$ Nm. Z uwagi na zastosowane sterowanie prądowe minimalną prędkość roboczą silnika można obniżyć.

6. Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań związanych z opracowaniem koncepcji dwupasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego przeznaczonego do napędu robota kuchennego. Jak wykazano w publikacji pomimo zastosowania konstrukcji dwupasmowej spełniono wszystkie postawione wymagania projektowe. Rozruch silnika z dowolnego położenia zapewniło zastosowanie asymetrycznego wykroju blachy wirnika. Ograniczenie liczby pasm do dwóch pozwala w układzie praktycznym na zastosowanie gotowych modułów mocy, które są dostępne w handlu. Takie rozwiązanie nie tylko ogranicza koszty wykonania układu mocy, ale również pozwala na znaczne zminiaturyzowanie go przy jednoczesnym ograniczeniu zakłóceń elektromagnetycznych (EMC).

7. Literatura

- [1]. www.ametekfsm.com.
- [2]. www.domel.com.
- [3]. www.zelmotor.pl.
- [4]. Ekram S., Ravi N., Rajagopal K.R., Mahajan D.: *Design and development of a high efficiency switched reluctance motor for a mixed-grinder application*, 33rd Annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2007), pp. 193-197, 2007.
- [5]. <http://www.srdrives.com/appliance-consumer.shtml>.
- [6]. Korkosz M.: *Analiza wpływu wybranych parametrów na właściwości wysokoobrotowych silników*

reluktancyjnych przełączalnych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, ISBN 978-83-7199-869-4, Rzeszów, 2013.

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 Warszawy 12
 35-959 Rzeszów