

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

BADANIA SYMULACYJNE MASZYNY RELUKTACYJNEJ PRZEŁĄCZALNEJ PRZEZNACZONEJ DO NAPĘDU ROBOTA KUCHENNEGO

COMPUTER SIMULATION INVESTIGATION OF THE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR IN FOOD PROCESSOR DRIVE

Abstract: In the article we present case study of possible solution of food-processor drive, in particular the application of SRM. We projected for food-processor drive SRM with 6/4 construction. That motor, because of construction restrictions, is characterised by non-symmetrical magnetic circuit. Using simulation methods we determined motor properties. On the base of FE method we also determined characteristics of torque, flux linkage and inductance versus current and rotor angle for two different motor phases. We present calculations of waveforms current for each phase, supply current and electromagnetic torque for different motor speeds.

1. Wstęp

Jednym z obszarów, w którym istnieją potencjalnie duże możliwości oszczędzania energii elektrycznej jest sprzęt gospodarstwa domowego. W wielu urządzeniach AGD stosowane są technologie, które zaliczane są do nieefektywnych z punktu widzenia sprawności przetwarzania energii elektrycznej i niezawodności, np. urządzenia z silnikami z komutatorem mechanicznym. Wprawdzie układy napędowe tych urządzeń budowane są relatywnie na niewielkie moce od kilkunastu watów do kilku kilowatów, jednak biorąc pod uwagę liczbę zainstalowanych urządzeń, która jest szacowana w miliardach na całym świecie, potencjalne możliwości oszczędności energii elektrycznej są znaczące. Stosowanie nowoczesnych technologii w układach napędowych sprzętu AGD wiąże się z wieloma problemami technicznymi, ale główną barierą dla ich stosowania jest obawa przed znaczącym wzrostem cen produktów. Prowadząc prace zmierzające do zastosowania nowych technologii w sprzęcie AGD należy wybierać taki rodzaj napędu elektrycznego, który pozwoli zminimalizować koszty nowej technologii.

Najlepszym przykładem urządzenia AGD, w którym istnieje możliwość unowocześnienia napędu elektrycznego jest robot kuchenny. Jest to urządzenie od którego wymaga się dość specyficznych właściwości, w szczególności możliwości programowania pracy dla realizacji różnych zadań, jak miksowanie, mieszanie, odwirowywanie, itp., tj. pracy w szerokim zakresie regulacji prędkości obrotowej.

Nowoczesny układ napędowy takiego robota wymaga stosowania odpowiedniego energoelektronicznego układu zasilającego, układu detekcji położenia wirnika silnika oraz układu sterownika mikroprocesorowego nadzorującego pracę całego robota [4].

W artykule porównano różne rozwiązania napędu elektrycznego robota kuchennego oraz przedstawiono studium możliwości zastosowania nowoczesnego silnika reluktancyjnego przełączalnego (SRM). Autorzy wykorzystując własne doświadczenia oraz badania symulacyjne w zakresie obliczeń polowych i obwodowych zaprojektowali silnik SRM spełniający wymagania napędu robota kuchennego produkowanego przez firmę Zelmer w Rzeszowie [4]. Zaprojektowany silnik o konstrukcji 6/4 wybrano z wielu możliwych do zastosowania odmian konstrukcyjnych maszyn SRM. Na podstawie obliczeń polowych wyznaczono charakterystyki statyczne omawianego silnika. Przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych przebiegów czasowych prądów i momentu w różnych warunkach pracy silnika, zamieszczono wnioski.

2. Studium możliwych rozwiązań napędu robota kuchennego

Jako obiekt analizy wybrano seryjnie produkowany przez firmę ZELMER S.A robot kuchenny [4], którego wygląd zewnętrzny przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wygląd wieloczynnościowego robota kuchennego firmy Zelmer

Robot kuchenny jest urządzeniem wieloczynnościowym, przy czym wersja w pełni wyposażona pozwala na realizację zadań zazwyczaj pełnionych przez mikser, malakser, mieszacz ciasta czy też sokowirówkę. Różnorodność możliwych opcji pracy narzuca układowi napędowemu dość specyficzne wymagania.

Jako napęd przedstawionego na rysunku 1 robota stosowany jest klasyczny silnik z komutatorem mechanicznym. Taki napęd stosowany od wielu już lat jest tani w produkcji, co jest jego największym atutem. Inną zaletą silnika komutatorowego jest łatwa regulacja prędkości obrotowej, w związku z czym układ elektroniczny regulacji prędkości jest bardzo prosty. To wszystko determinuje cenę wypadkową układu napędowego, która jest stosunkowo niska i tym samym wpływa na cenę rynkową produktu. Do typowych wad silników komutatorowych zalicza się stosunkowo niską sprawność, małą trwałość zależną od warunków pracy oraz zakłócenia elektromagnetyczne spowodowane istnieniem styku szczotka-komutator.

Technologią alternatywną dla napędów z silnikami komutatorowymi o regulowanej prędkości obrotowej są silniki bezszczotkowe z komutacją elektroniczną. Do silników tych zalicza się:

- silniki z magnesami trwałymi,
- silniki ze zmienną reluktancją.

Silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi w zależności od sposobu zasilania klasyfikuje się na zasilane napięciem trapezoidalnym (BLDC) oraz sinusoidalnym (PMSM) [1]. Do sprzętu gospodarstwa domowego bardziej przydatne są silniki zasilane napięciem trapezoidalnym (BLDC). Niewątpliwą zaletą silni-

ków z magnesami trwałymi jest ich duża sprawność przetwarzania energii, którą można uzyskać przy odpowiednim zaprojektowaniu układu napędowego. Jest to jednak możliwe tylko w przypadku zastosowania magnesów wysokoenergetycznych, co znacząco zwiększa koszt zastosowania tej technologii. Dodatkowo każda technologia maszyn bezszczotkowych z komutacją elektroniczną wymaga zastosowania odpowiedniego układu energoelektronicznego, układu sterowania oraz rozwiązania problemu detekcji położenia wirnika. To dodatkowo podwyższa koszt końcowy układu napędowego. Zakres regulacji prędkości obrotowej jest stosunkowo szeroki.

Do technologii ze zmienną reluktancją zalicza się silniki reluktancyjne przełączalne (SRM) [2, 3] oraz silniki synchroniczne reluktancyjne (RM). Do sprzętu AGD bardziej odpowiednie są silniki reluktancyjne przełączalne (SRM). Silniki te są bardzo proste konstrukcyjnie, gdyż posiadają uzwojenia skupione umieszczone na stojanie, przy braku magnesów czy też komutatora mechanicznego na wirniku. Oznacza to, że koszty wykonania takiego silnika są niskie. Tak jak w przypadku silnika BLDC, układ napędowy wymaga zastosowania specjalizowanego układu energoelektronicznego, sterowania i detekcji położenia wirnika. To znacząco podnosi cenę układu napędowego. Jednak zakres regulacji prędkości obrotowej przy zastosowaniu odpowiednich algorytmów sterowania, jest większy niż w przypadku silnika BLDC, a nawet silnika z komutatorem mechanicznym. Sprawność układu napędowego z silnikiem SRM jest nieznacznie niższa niż napędu z silnikiem BLDC, ale przy niższych kosztach ogólnych wykonania układu napędowego.

Poszukując rozwiązania optymalnego z ekonomicznego i technicznego punktu widzenia autorzy proponują zastosowanie do napędu wieloczynnościowego robota kuchennego silnika reluktancyjnego przełączalnego.

3. Wyniki obliczeń polowych obwodu magnetycznego silnika SRM

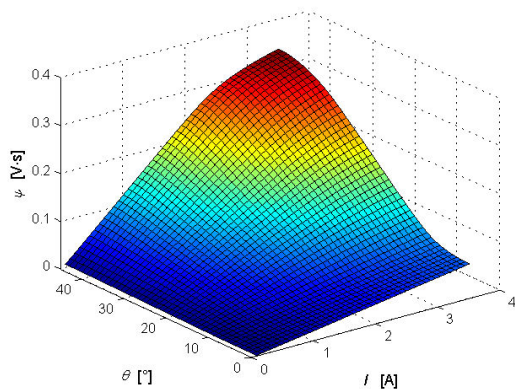
Specyficzne wymagania układu napędowego robota kuchennego wymusiły pewne rozwiązania konstrukcyjne proponowanego silnika SRM. Z uwagi na bardzo szeroki zakres regulacji prędkości obrotowej silnika i wymaganą stosunkowo dużą wartość momentu rozruchowego do napędu robota wybrano konstrukcję

6/4. Wymiary zewnętrzne silnika były ograniczone konstrukcją samego robota kuchennego oraz koniecznością dostosowania do istniejącego łożyskowania dotychczas produkowanego silnika. Biorąc pod uwagę wszystkie ograniczenia łącznie z ograniczeniem wagi silnika zaproponowano i utworzono w programie CAD nietypową niesymetryczną magnetycznie i elektrycznie konstrukcję silnika, którą przedstawiono na rysunku 2.

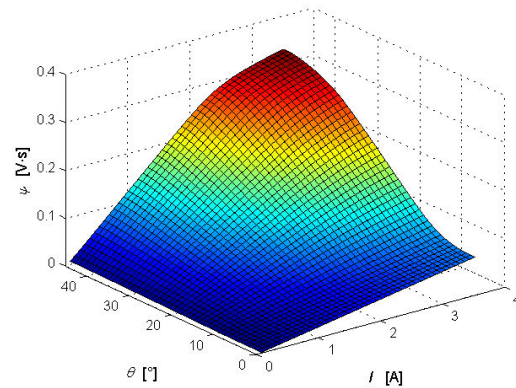


Rys. 2. Widok geometrii proponowanego silnika SRM

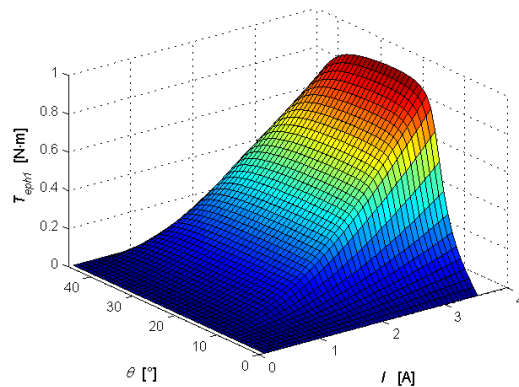
Do obliczeń polowych metodą elementów skończonych (FEM) zastosowano komercyjny pakiet ANSYS. Z uwagi na niesymetrię magnetyczną obliczenia przeprowadzono dla dwóch pasm, odpowiednio oznaczonych: Ph1 – posiadającego zmienione wymiary geometryczne oraz pasma Ph2. Na podstawie obliczeń polowych wyznaczono dla poszczególnych pasm Ph1 i Ph2 charakterystyki statyczne silnika, tj. charakterystyki strumieniowo - prądowo - kątowe (rys.3 i rys.4) oraz charakterystyki momentowo - prądowo - kątowe (rys.5 i rys.6).



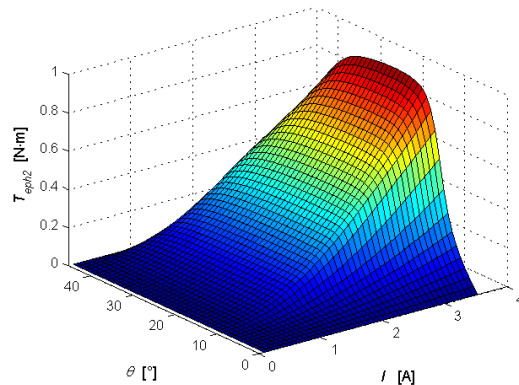
Rys. 3. Charakterystyka strumieniowo-prądowo-kątowa dla pasma Ph1



Rys. 4. Charakterystyka strumieniowo-prądowo-kątowa dla pasma Ph2

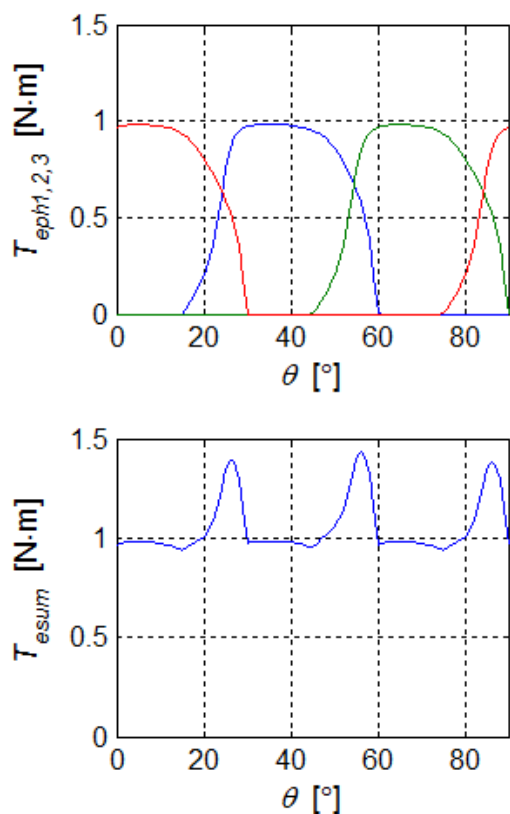


Rys. 5. Charakterystyka momentowo-prądowo-kątowa dla pasma Ph1



Rys. 6. Charakterystyka momentowo-prądowo-kątowa dla pasma Ph2

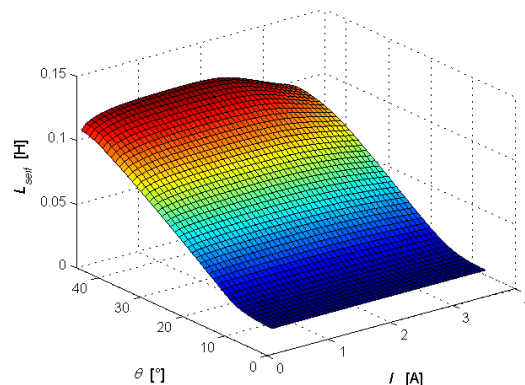
Porównując wyznaczone charakterystyki statyczne można zauważyć pewne różnice pomiędzy poszczególnymi pasmami spowodowane niesymetrią geometryczną obwodu magnetycznego, jednak różnice te nie są znaczące.



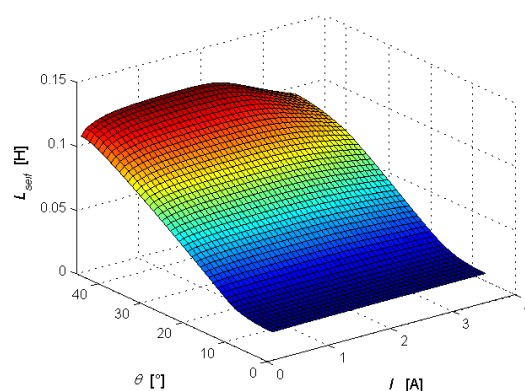
Rys. 7. Zależność momentów pasmowych oraz momentu wypadkowego w funkcji położenia wirnika dla prądu maksymalnego $I=3.5A$

Na rysunku 7 przedstawiono zależność momentów poszczególnych pasm T_{eph1} , T_{eph2} , T_{eph3} oraz momentu wypadkowego T_{esum} w funkcji położenia wirnika dla prądu maksymalnego $I=3.5A$. Na podstawie zależności momentu wypadkowego przedstawionego na rysunku 7 można określić minimalną wartość momentu rozruchowego silnika, która dla określonych założeń konstrukcyjnych silnika wynosi 0.93 Nm. Rysunek 7 pokazuje również, że niesymetria magnetyczna w niewielkim stopniu wpływa na zmianę kształtu momentu wypadkowego. Wartości minimalne i maksymalne momentu wypadkowego zmieniają się w bardzo niewielkim akceptowalnym zakresie.

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono zależność indukcyjności uzwojeń odpowiednio dla pasma Ph1 oraz Ph2 w funkcji prądu i kąta obrotu wirnika. Parametry te różnią się niewiele.



Rys. 8. Zależność indukcyjności uzwojenia pasma Ph1



Rys. 9. Zależność indukcyjności uzwojenia pasma Ph2

4. Przykładowe wyniki badań symulacyjnych

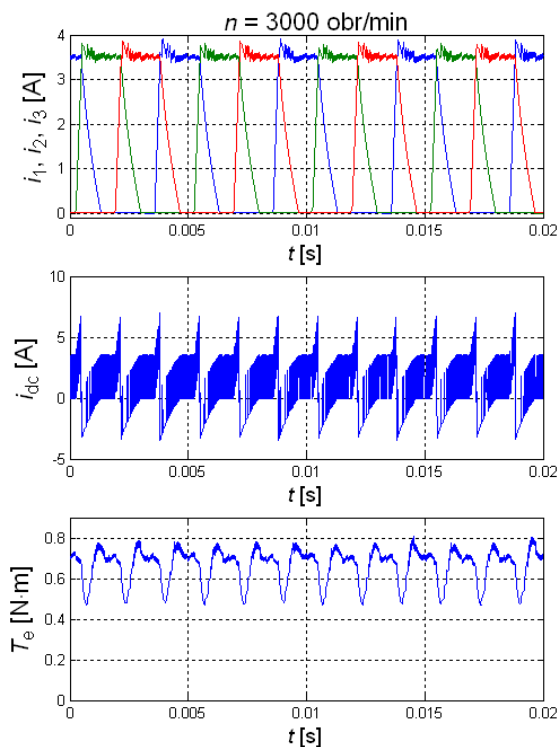
Wykorzystując obliczenia polowe autorzy w programie Matlab/Simulink zbudowali model symulacyjny omawianego silnika SRM. Na podstawie tego modelu wyznaczono przebiegi czasowe prądów pasmowych (i_1 , i_2 , i_3), prądu źródła (i_{dc}) oraz momentu elektromagnetycznego silnika (T_e) dla kilku trybów pracy robota. W badaniach symulacyjnych założono, że silnik jest zasilany napięciem stałym ($U_{dc}=320$ V).

W zależności od zainstalowanego pojemnika robota kuchennego, robot może pracować jako mieszacz ciasta, malakser lub mikser. Poszczególne tryby pracy układu napędowego umożliwiają regulację prędkości obrotowej w sposób skokowy. Zakres regulacji uzależniony jest od wybranego trybu pracy. Wartości parametrów sterujących, takie jak współczynnik wypełnienia PWM, kąt załączenia θ_{on} , kąt wyłączenia θ_{off} zostały uzależnione od wyboru

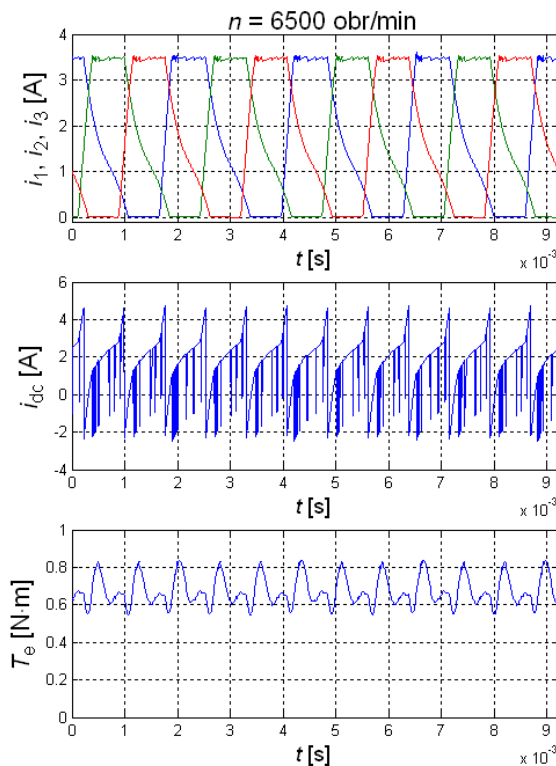
trybu pracy robota oraz numeru biegu (od 1 do 12).

Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi czasowe prądów pasmowych (i_1, i_2, i_3), prądu źródła (i_{dc}) oraz wypadkowego momentu elektromagnetycznego (T_e) dla prędkości silnika $n=3000 \text{ min}^{-1}$. Jest to minimalna wartość prędkości silnika pracującego w układzie napędowym. Większość czynności wykonywanych robotem odbywa się w zakresie zmian prędkości silnika od 5000 min^{-1} do 8000 min^{-1} . Na rysunku 11 przedstawiono przebiegi czasowe prądów oraz wypadkowego momentu elektromagnetycznego dla prędkości silnika $n=6500 \text{ min}^{-1}$.

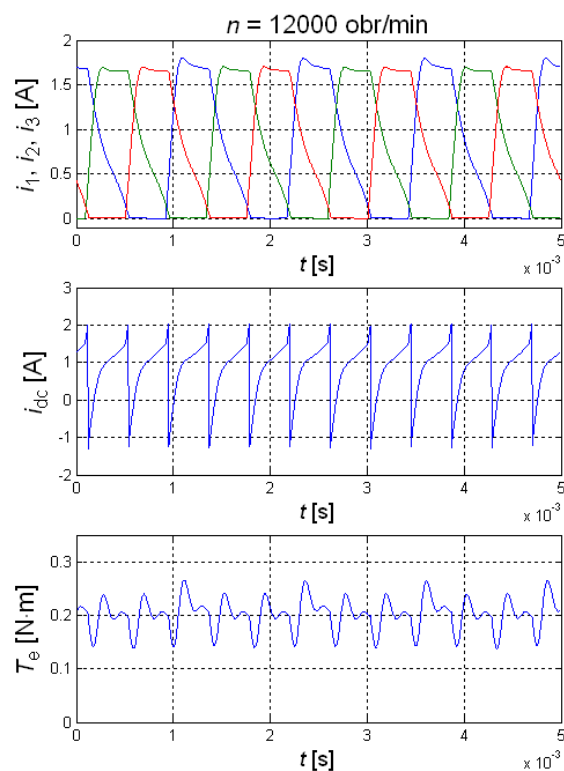
Przy prędkości $n=12000 \text{ min}^{-1}$ silnik pracuje z prędkością wynikającą z najwyższego biegu robota. Przebiegi czasowe uzyskane dla tej prędkości przedstawiono na rysunku 10. Od silnika zastosowanego do napędu robota wymaga się możliwości pracy z prędkością obrotową większą o około 20% prędkości najwyższego biegu. Jest to stan pracy krótkotrwałej. Na rysunku 13 przedstawiono przebiegi czasowe prądów i napięcia silnika pracującego z prędkością maksymalną $n=15000 \text{ min}^{-1}$ wynikającą z ustawień robota.



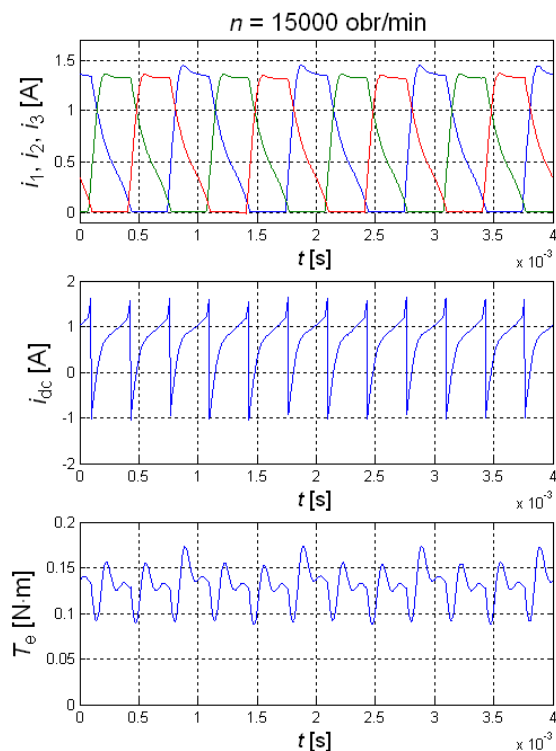
Rys. 10. Przebiegi czasowe prądów i momentu elektromagnetycznego dla $n=3000 \text{ min}^{-1}$



Rys. 11. Przebiegi czasowe prądów i momentu elektromagnetycznego dla $n=6500 \text{ min}^{-1}$



Rys. 12. Przebiegi czasowe prądów i momentu elektromagnetycznego dla $n=12000 \text{ min}^{-1}$



Rys. 13. Przebiegi czasowe prądów i momentu elektromagnetycznego dla $n=15000 \text{ min}^{-1}$

5. Wnioski

W artykule przedstawiono studium możliwości zastosowania silnika SRM do napędu robota kuchennego. Z uwagi na wymaganą dużą wartość momentu rozruchowego przewidziano zastosowanie konstrukcji silnika 6/4. Konieczność dopasowania silnika do produkowanego robota spowodowała, że przyjęto rozwiązanie obwodu magnetycznego silnika charakteryzujące się niesymetrią magnetyczną i elektryczną. Jak pokazują wyniki obliczeń polowych i uzyskane przebiegi czasowe prądów i momentu różnice pomiędzy poszczególnymi pasmami nie są znaczące. Zaproponowane więc rozwiązanie spełnia wymagania układu napędowego robota kuchennego. Uzyskany na bazie obliczeń symulacyjnych zakres regulacji prędkości obrotowej i wartości wytwarzanego momentu elektromagnetycznego jest zadawalający. Koszt wykonania samego silnika w produkcji masowej będzie niższy niż w przypadku silnika z komutatorem mechanicznym. Jednakże konieczność zastosowania bardziej rozbudowanego układu energoelektronicznego wraz z układem sterowania powoduje, że w chwili obecnej wypadkowa cena całego układu napędowego będzie wyższa niż z

obecnie produkowanym silnikiem komutatorowym.

6. Literatura

- [1]. Glinka T.: Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, ISBN: 83-7335-087-X, 2002
- [2]. Krishnan R.: *Switched reluctance motor drive: modeling, simulation, analysis, desing, and applications*, CRC Press LLC, 2001.
- [3]. Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Badanie wpływu grubości szczeliny powietrznej na właściwości silników reluktancyjnych przelączalnych w oparciu o badania polowe*, Maszyny elektryczne, BOBRME, KOMEL, Zeszyty problemowe, Nr 75, 2006, str. 195-200.
- [4]. http://www.zelmer.pl/sprzet_kuchenny/

Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz, pbogu@prz.edu.pl
 dr inż. Mariusz Korkosz, mkosz@prz.edu.pl
 dr inż. Jan Prokop, jprokop@prz.edu.pl
 Politechnika Rzeszowska
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki
 ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów