

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

WPLYW DANYCH NAWOJOWYCH NA WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNE SILNIKA RELUKTANCYJNEGO PRZELĄCZALNEGO O BUDOWIE NIESYMETRYCZNEJ

NUMBER OF TURNS INFLUENCE ON PROPRIETIES OF THE ASYMMETRICAL SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Abstract: This paper concerns research of SRM motor with non-symmetrical stator construction. Number of turns influence on the discussed motor operational parameters is analyzed in this article. Basing on field calculations for different number of turns, torque-current-angle characteristics and self inductance coefficients are determined. Phase current waveforms for different number of turns are calculated. Results have also been verified by measurement in laboratory. Conclusions are presented.

1. Wstęp

Silniki reluktancyjne przelączalne (SRM) zaliczane są do grupy maszyn synchronicznych, w których wirnik wiruje synchronicznie z wytworzonym przez stojan polem magnetycznym [1-6]. W klasycznych maszynach synchronicznych, czy też maszynach PMSM, o prędkości wirowania pola magnetycznego decyduje częstotliwość napięcia zasilającego. W silnikach SRM prędkość z jaką wiruje wirnik maszyny zależy zarówno od parametrów zewnętrznych (układ zasilania, metoda sterowania), jak również od parametrów wewnętrznych (wymiały obwodu magnetycznego, dane nawojowe maszyny). Do parametrów sterujących, które mają wpływ na wartość prędkości biegu jałowego zalicza się wartość napięcia zasilającego U_{dc} , wartości kątów sterowania (załączenia θ_{on} i wyłączenia θ_{off}) oraz współczynnik wypełnienia PWM. Parametry sterujące pozwalają na kształtowanie charakterystyki mechanicznej silnika przez ograniczanie prędkości biegu jałowego ω_0 . Maksymalna prędkość biegu jałowego osiągana jest na tzw. charakterystyce naturalnej silnika, którą określają dopuszczalne parametry sterowania oraz parametry konstrukcyjne. Jednym z etapów projektowania silników SRM jest opracowanie kształtu i wymiarów obwodu magnetycznego oraz dobór danych nawojowych uzwojeń poszczególnych pasm. Autorzy podjęli próbę zaprojektowania silnika SRM przeznaczonego do zastosowań w sprzęcie gospodarstwa domowego. Ze względu na uwarunkowania ekonomiczne zaprojektowano silnik, którego stojan charakteryzuje się budo-

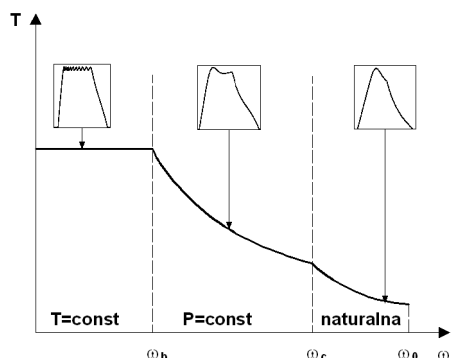
wą obwodu magnetycznego wykazującą cechy niesymetrii zarówno magnetycznej, jak i elektrycznej. Na etapie projektowania symulacyjnie badano wpływ danych nawojowych na wypadkowe charakterystyki silnika SRM.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań dotyczących wpływu liczby zwojów jednego pasma silnika SRM, o budowie niesymetrycznej, na jego wybrane parametry.

W pracy omówiono wpływ danych nawojowych na charakterystykę mechaniczną silnika SRM oraz przedstawiono wyniki obliczeń polowych wpływu liczby zwojów uzwojenia pasma na charakterystyki momentowo-prądowo-kątowe oraz strumieniowo-prądowo-kątowe. W oparciu o przeprowadzone obliczenia polowe autorzy zaprojektowali i wykonali funkcjonalny model silnika SRM o konstrukcji 6/4 charakteryzujący się niesymetryczną budową. W warunkach laboratoryjnych dokonano weryfikacji pomiarowej przeprowadzonych obliczeń polowych przez pomiar kształtu indukcyjności własnych w funkcji kąta obrotu wirnika oraz pomiar prądów dla czterech różnych wartości parametru N_{ph} określającego liczbę zwojów przypadających na jedno pasmo. Zamieszczono wnioski.

2. Analiza wpływu danych nawojowych na charakterystykę mechaniczną silnika SRM

Na rysunku 1 przedstawiono przykładową charakterystykę mechaniczną silnika SRM, na której można wyróżnić trzy zakresy pracy silnika.



Rys. 1. Wyidealizowana charakterystyka mechaniczna silnika SRM

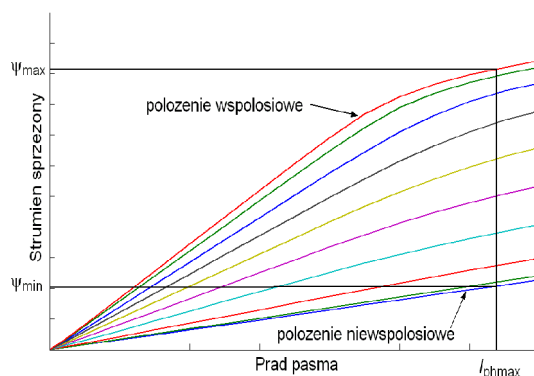
Pierwszym z nich jest zakres pracy ze stałym momentem ($T = const$), gdzie wartość płynącego prądu musi być ograniczana przez układ zasilający. Prędkość bazową ω_b , która określa moment przejścia silnika w zakres tzw. stałej mocy, oblicza się z zależności [3]:

$$\omega_b = \frac{(U_{dc} - I_{phmax} R_{ph}) \beta_s}{\psi_{max} - \psi_{min}} \quad (1)$$

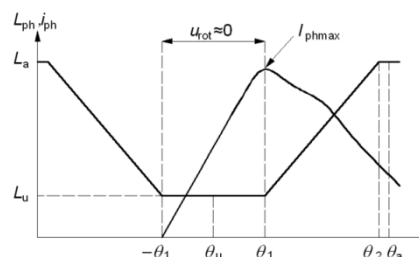
gdzie: U_{dc} – napięcie zasilające, I_{phmax} – maksymalna wartość prądu pasma, R_{ph} – rezystancja pasma, β_s – kąt bieguna stojana, ψ_{max} – strumień w położeniu współosiowym dla prądu I_{phmax} , ψ_{min} – strumień w położeniu niewspółosiowym dla prądu I_{phmax} . Dla określenia wartości prędkości bazowej ω_b na etapie projektowania silnika konieczna jest znajomość wartości strumieni ψ_{max} i ψ_{min} . Strumienie te można obliczać metodami analitycznymi [5] lub wykorzystując metody polowe. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe charakterystyki strumieniowo-prądowo-kątowe silnika SRM. Strumień sprzężony z danym pasmem ψ zależy od liczby zwojów N_{ph} przypadających na jedno pasmo. Tym samym dobierając odpowiednią wartość parametru N_{ph} istnieje możliwość ustalania określonej wartości prędkości bazowej ω_b silnika. Zwiększając liczbę zwojów N_{ph} zwiększają się wartości indukcyjności własnych, tzw. położen charakterystycznych silnika (L_a i L_u). Wartości indukcyjności zależą od kwadratu liczby zwojów.

Praca silnika ze stałą mocą ($P = const$) odbywa się w zakresie od prędkości bazowej ω_b do prędkości ω_c (rys. 1). W obszarze stałej mocy należy tak dobierać wartość kąta załączenia silnika, aby wartość maksymalna prądu I_{phmax} była utrzymywana na tym samym poziomie. Na rysunku 3 przedstawiono fragment wyidealizowanego kształtu zależności współczynnika in-

dukcyjności własnej pasma oraz prądu w funkcji kąta obrotu wirnika. Na rysunku zaznaczono charakterystyczne położenia przebiegu indukcyjności pasma L_{ph} oznaczone jako θ_1 i θ_2 . Z uwagi na charakter tego przebiegu, od położenia niewspółosiowego θ_u (umowne położenie zerowe) do pierwszego położenia brzegowego θ_1 , indukcyjność L_{ph} ma praktycznie wartość stałą i równą wartości L_u .



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki strumieniowo-prądowo-kątowe silnika SRM



Rys. 3. Fragment wyidealizowanego kształtu indukcyjności pasma z przebiegiem prądu w funkcji kąta obrotu wirnika

Wartości kątów położen brzegowych oblicza się z zależności [5]:

$$\theta_1 = \frac{\pi}{N_r} - \left(\frac{\beta_s + \beta_r}{2} \right) \quad (2)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{N_r} - \left(\frac{\beta_r - \beta_s}{2} \right) \quad (3)$$

gdzie: N_r – liczba zębów wirnika, β_s – kąt bieguna stojana, β_r – kąt zęba wirnika.

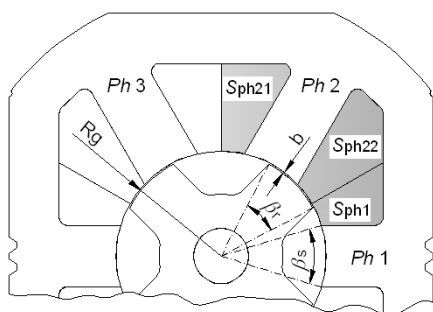
Wartość prędkości ω_c przy założeniu maksymalnej wartości prądu pasma I_{phmax} obliczana jest z zależności:

$$\omega_c = - \frac{2\theta_1}{\frac{L_u}{R_{ph}} \ln \left(1 - \frac{I_{phmax} R_{ph}}{U_{dc}} \right)} \quad (4)$$

Przy określonej wartości napięcia zasilającego U_{dc} i danych wymiarach geometrycznych maszyny wartość prędkości ω_c zależy od liczby zwojów przypadających na jedno pasmo N_{ph} . Zatem odpowiedni dobór parametru N_{ph} pozwala na kształtowanie charakterystyki mechanicznej silnika.

3. Wyniki obliczeń polowych

Wykonane obliczenia polowe stanowią fragment pracy badawczej autorów związanej z zastosowaniem silników reluktancyjnych przełączalnych w sprzęcie gospodarstwa domowego. Do obliczeń polowych metodą elementów skończonych (FEM) zastosowano komercyjny pakiet ANSYS. Obliczenia przeprowadzono dla zaprojektowanego przez autorów modelu silnika SRM 6/4 o budowie niesymetrycznej charakteryzującej się zarówno niesymetrią magnetyczną, jak i elektryczną. Widok geometrii zaprojektowanego silnika przedstawiono na rysunku 4.

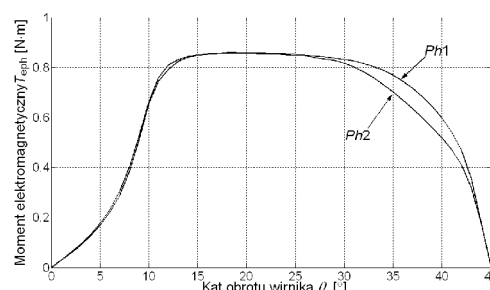


Rys. 4. Widok geometrii zaprojektowanego silnika SRM o konfiguracji 6/4

W analizowanym przypadku wyznaczono charakterystyki momentowo-prądowo-kątowe oraz strumieniowo-prądowo-kątowe dla kilku wartości parametru N_{ph} (224, 320, 400 i 470). Wszystkie obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że w każdym przypadku wzbudzony przepływ będzie identyczny $\Theta = N_{ph} \cdot I_{phmax} = \text{const}$. Dostępna przestrzeń dla uzwojeń (S_{ph1} , S_{ph21} i S_{ph22}) nie ulega zmianie z uwagi na stałe wymiary geometryczne obwodu magnetycznego. W analizowanym przypadku założono trzy współczynniki wypełnienia dostępnej przestrzeni dla uzwojeń k_{uph1} , k_{uph21} i k_{uph22} z uwagi na nietypową budowę obwodu stojana (rys. 4). Zmiana liczby zwojów N_{ph} pociągała za sobą zmianę przekroju przewodu nawojowego S_{Cu} . Jednocześnie współczynniki wypełnienia przestrzeni k_u utrzymywano na tym samym poziomie. Wpływ liczby zwojów na parametry silni-

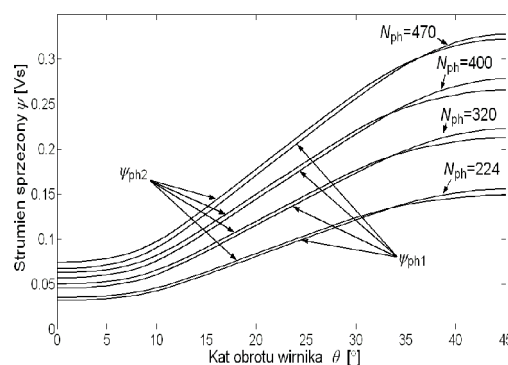
ka analizowano w pracy [6]. Jednak były to rozważania czysto hipotetyczne, z uwagi na pominięcie współczynnika wypełnienia przestrzeni oraz przy założeniu, że przekrój przewodu nawojowego S_{Cu} jest stały. Przy założeniu, że współczynniki wypełnienia przestrzeni dla uzwojeń k_{uph1} , k_{uph21} i k_{uph22} są praktycznie stałe dla wszystkich przypadków zmianę rezystancji uzwojenia można obliczyć poprzez określenie średniej długości zwoju przewodu nawojowego l_{Cuav} . Pasma $Ph1$ o zmienionych parametrach posiadało większą długość średnią zwoju l_{Cuav} .

Na rysunku 5 przedstawiono zależność momentu elektromagnetycznego T_{eph} wytwarzanego przez pasma $Ph1$ i $Ph2$ w funkcji kąta obrotu wirnika θ dla prądu I_{phmax} .



Rys. 5. Zależność momentu w funkcji kąta obrotu wirnika dla prądu maksymalnego

Strumień sprzężony ψ_{ph} dla pasm $Ph1$ i $Ph2$ w funkcji kąta obrotu wirnika θ dla prądu I_{phmax} przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Zależność strumienia sprzężonego w funkcji kąta obrotu wirnika dla prądu maksymalnego

W tabeli 1 zestawiono obliczone wartości rezystancji R_{ph} , strumieni sprzężonych ψ_{min} i ψ_{max} (wyznaczonych dla prądu maksymalnego I_{phmax}), indukcyjności L_u , odpowiednio wartości prędkości ω_b i ω_c , momentu rozruchowego T_{lmin} , momentu znamionowego T_N oraz mocy

P_N dla poszczególnych danych nawojowych ($N_{ph} = 224, 320, 400, 470$). W trakcie obliczeń założono, że wartość napięcia zasilającego wynosi $U_{dc} = 320$ V, silnik pracuje przy maksymalnym kącie załączenia $\theta_{on} = -\theta_l$ oraz wartościach kątów bieguna stojana $\beta_s = 35^\circ$, wirnika $\beta_r = 35^\circ$, promieniu wirnika $R_g = 0.0187$ m, grubości szczeliny powietrznej $b = 0.0005$ m.

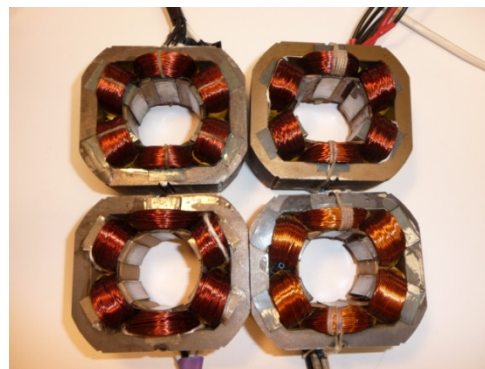
Tabela 1. Wpływ parametrów nawojowych N_{ph} na wybrane parametry silnika SRM

	$N_{ph} = 224$		$N_{ph} = 320$	
	$Ph1$	$Ph2$	$Ph1$	$Ph2$
R_{ph} [Ω]	1.54	1.41	2.58	2.37
ψ_{min} [Vs]	0.0317	0.035	0.0453	0.0501
ψ_{max} [Vs]	0.156	0.149	0.223	0.213
L_u [H]	0.00465	0.00514	0.00948	0.0105
ω_b [rad/s]	1503	1637	1032	1125
ω_c [rad/s]	3637	3295	2541	2298
T_{lmin} [Nm]	0.82		0.82	
T_N [Nm]	0.39		0.40	
P_N [W]	1336		956	
	$N_{ph} = 400$		$N_{ph} = 470$	
	$Ph1$	$Ph2$	$Ph1$	$Ph2$
R_{ph} [Ω]	4.64	4.26	6.73	6.18
ψ_{min} [Vs]	0.0566	0.0626	0.067	0.0741
ψ_{max} [Vs]	0.278	0.266	0.328	0.322
L_u [H]	0.0148	0.0164	0.0206	0.0228
ω_b [rad/s]	812	885	682	716
ω_c [rad/s]	2017	1822	1691	1532
T_{lmin} [Nm]	0.82		0.82	
T_N [Nm]	0.41		0.42	
P_N [W]	782		665	

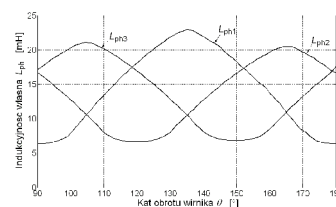
4. Wyniki badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne przeprowadzono dla czterech wersji silnika SRM, różniących się danymi nawojowymi uzwojenia stojana (rys. 7). W warunkach laboratoryjnych wykonano pomiary indukcyjności własnej poszczególnych pasm dla stojana silnika o różnych danych nawojowych N_{ph} . Na rysunkach 8-11 przedstawiono profile indukcyjności silników SRM ze szczeliną powietrzną równą 0.5 mm dla po-

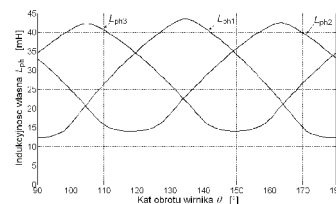
szczególnych danych nawojowych – odpowiednio: dla $N_{ph}=224$ - rys. 8, $N_{ph} = 320$ - rys. 9, $N_{ph} = 400$ - rys. 10 oraz $N_{ph} = 470$ - rys. 11.



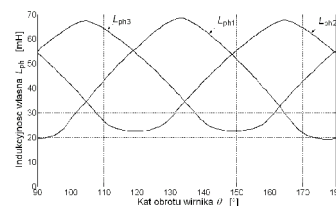
Rys. 7. Widok stojanów badanych silników SRM o różnych danych nawojowych



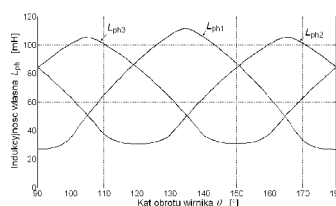
Rys. 8. Profile indukcyjności własnych dla stojana z $N_{ph} = 224$



Rys. 9. Profile indukcyjności własnych dla stojana z $N_{ph} = 320$



Rys. 10. Profile indukcyjności własnych dla stojana z $N_{ph} = 400$



Rys. 11. Profile indukcyjności własnych dla stojana z $N_{ph} = 470$

Badania laboratoryjne pomiaru indukcyjności własnych potwierdziły, że dane nawojowe w sposób istotny wpływają na parametry eksploatacyjne silnika. Zmiana wartości indukcyjności własnych wpływa w sposób istotny na zmianę prędkości bazowej silnika. Niesymetria obwodu magnetycznego powoduje dodatkowo, że pasmo o zmienionej geometrii posiada mniejszą wartość prędkości bazowej. Tabela 2 pokazuje wyznaczone wartości prędkości bazowych na podstawie pomiaru profili indukcyjności własnych, przy założeniu, że wartość napięcia zasilającego U_{dc} jest równa 320 V oraz przy prądzie $I_{phmax} = 1$ A. Przy wyznaczaniu prędkości uwzględniono rzeczywiste wartości poszczególnych rezystancji pasmowych R_{ph} .

Tabela 2. Zależność prędkości bazowej ω_b od N_{ph} dla wszystkich trzech pasm silnika

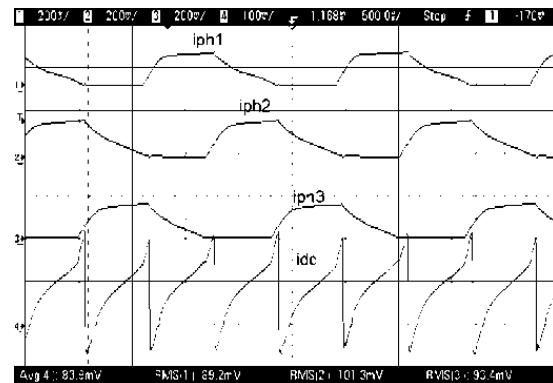
ω_b [rad/s]	$N_{ph}=224$	$N_{ph}=320$	$N_{ph}=400$	$N_{ph}=470$
Ph1	10137	5318	3398	2393
Ph2	11871	5923	3658	2691
Ph3	11771	5842	3689	2662

Tabela 3. Zależność współczynnika $k = L_a/L_u$ od N_{ph} dla wszystkich trzech pasm silnika

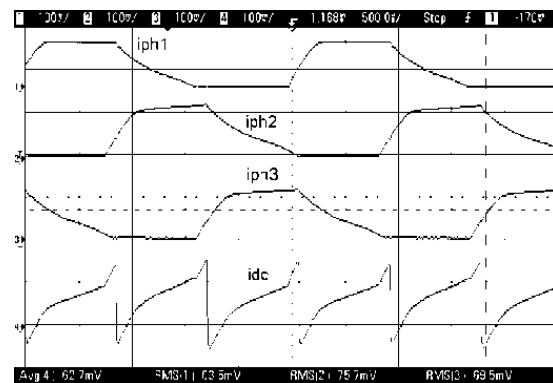
$k=L_a/L_u$	$N_{ph}=224$	$N_{ph}=320$	$N_{ph}=400$	$N_{ph}=470$
Ph1	3.57	3.55	3.54	3.56
Ph2	3.12	3.02	3.01	3.0
Ph3	3.08	3.02	3.02	3.0

Wyznaczone wartości prędkości bazowych ω_b zależą od wartości indukcyjności położeń charakterystycznych (L_a i L_u). Dobierając odpowiednią liczbę zwojów N_{ph} , można kształtować charakterystykę mechaniczną silnika ustalając wartość prędkości bazowej, co potwierdzają dane zawarte w Tabeli 3. W badanym przypadku niesymetria magnetyczna i elektryczna modelu powoduje, że pasmo o odmiennych wymiarach geometrycznych posiada zauważalnie mniejszą wartość prędkości bazowej, niezależnie od wartości liczby zwojów N_{ph} przypadających na jedno pasmo. Na rysunkach 12-15 przedstawiono przebiegi czasowe prądów pasmowych i_{ph} oraz prądu źródła i_{dc} zarejestrowane dla badanych silników. Wszystkie przebiegi uzyskano przy sterowaniu jednopulsowym, takiej samej wartości napięcia zasilającego $U_{dc} = 62$ V (obniżonym z uwagi na dopuszczalną prędkość maksymalną przetwornika obroto-

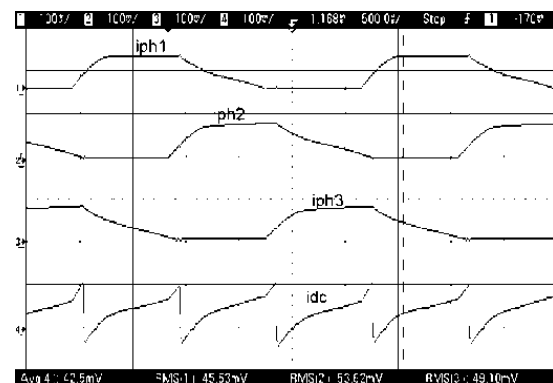
wo-impulsowego zastosowanego w badaniach laboratoryjnych) oraz kątach sterowania ($\theta_{on} = -2.5^\circ$, $\theta_{off} = 31^\circ$).



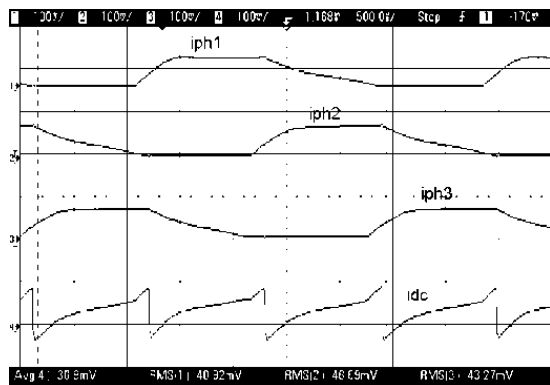
Rys. 12. Przebiegi czasowe prądów silnika dla stojana z $N_{ph} = 224$



Rys. 13. Przebiegi czasowe prądów silnika dla stojana z $N_{ph} = 320$



Rys. 14. Przebiegi czasowe prądów silnika dla stojana z $N_{ph} = 400$



Rys. 15. Przebiegi czasowe prądów silnika dla stojana z $N_{ph} = 470$

Analizując uzyskane kształty przebiegów czasowych prądów pasmowych można zauważyć, że niezależnie od danych nawojowych pasmo o zmienionej geometrii posiada nieco inny kształt prądu oraz mniejszą wartość prędkości bazowej ω_b . W tabeli 4 zestawiono prędkości biegu jałowego silnika ω_0 , uzyskane dla poszczególnych stojanów w przypadku przebiegów czasowych przedstawionych na rysunkach 8-11, z identycznymi parametrami sterującymi.

Tabela 4. Prędkość biegu jałowego silników z różnymi danymi nawojowymi dla określonych parametrów sterowania

N_{ph}	224	320	400	470
ω_0 [rad/s]	879	649	555	494

W przypadku stojana z najmniejszą liczbą zwojów ($N_{ph} = 224$) przypadającą na jedno pasmo uzyskano w danych warunkach prędkość biegu jałowego $\omega_0 = 879$ rad/s. Zwiększenie liczby zwojów do $N_{ph} = 470$ zmniejszyło prędkość biegu jałowego do wartości 494 rad/s.

5. Wnioski

Jednym z parametrów projektowych, który wpływa w znaczący sposób na kształt charakterystyki mechanicznej silnika SRM jest liczba zwojów przypadających na jedno pasmo N_{ph} . Zmiana liczby zwojów N_{ph} powoduje zmianę wartości prędkości charakterystycznych: bazowej ω_b , znamionowej ω_N oraz biegu jałowego ω_0 . Tym samym daje to możliwość zmiany kształtu charakterystyki mechanicznej silnika. W omawianym przypadku konstrukcja silnika charakteryzowała się niesymetrią magnetyczną i elektryczną. Tym samym jedno z pasm posiadało inne charakterystyki statyczne. W konsekwencji pasmo $Ph1$ posiadało, między innymi,

mniejszą wartość prędkości bazowej ω_b , i równocześnie większą wartość prędkości ω_c . Tym samym spowodowało to nieznaczne zwiększenie zakresu stałej mocy maszyny. Zachowując stałą wartość przepływu I^*N_{ph} , uzyskane kształty charakterystyk momentowych są identyczne, niezależnie od przyjętej wartości parametru N_{ph} . Wartość minimalnego momentu rozruchowego T_{lmin} jest identyczna w każdym przypadku. Wartość momentu znamionowego T_N wykazuje niewielką tendencją wzrostową przy zwiększaniu liczby zwojów N_{ph} . Z uwagi na inne wartości prędkości ω_c , zmianie ulegała moc znamionowa silnika P_N . Dla danych nawojowych $N_{ph} = 224$ uzyskano moc $P_N = 1336$ W przy prędkości $\omega_c = 3295$ rad/s. To rozwiązanie jest dedykowane do napędu agregatu ssącego. Zwiększenie liczby zwojów do wartości $N_{ph} = 470$ zredukowało moc znamionową $P_N = 665$ W przy prędkości $\omega_c = 1532$ rad/s. Rozwiązanie to zostało przewidziane jako alternatywny napęd robota kuchennego.

6. Literatura

- [1] Faiz J., Finch J.W.: *Aspects of design optimisation for switched reluctance motors*, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 8, Issue 4, pp. 704 - 713, Dec. 1993
- [2] Anwar M.N., Husain I., Radun A.V.: *A comprehensive design methodology for switched reluctance machines*, IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 37, Issue 6, pp. 1684 - 1692, Nov.-Dec. 2001
- [3] Miller T.J.E.: *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Newnes Power Engineering Series, 2001
- [4] Krishnan R.: *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*, CRC Press 2001
- [5] Torrey D.A., Niu X.M., Unkauf E.J.: *Analytical modelling of variable-reluctance machine magnetisation characteristics*, IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 142, No. 1, pp. 14-22, January 1995
- [6] Corda J.: *Search for optimum number of turns of switched reluctance*, Power Electronics Congress, Technical Proceedings. CIEP '96, V IEEE International, pp. 241-245, Nov. 1996

Autorzy

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