

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

ANALIZA WPLYWU GRUBOŚCI SZCELINY POWIETRZNEJ NA PRZEBIEGI CZASOWE PRĄDÓW I MOMENTU SILNIKA RELUKTANCYJNEGO PRZEŁĄCZALNEGO

ANALYSIS OF AIR-GAP THICKNESS INFLUENCE IN SWITCHED RELUCTANCE MOTOR ON CURRENTS AND TORQUE

Abstract: In the article we analyse the influence of air-gap thickness on motional propriety of switched reluctance motors with non-symmetrical construction. Static flux-current-angle and torque-current-angle characteristics has been determined for motors with different air-gap thickness. The simulation SRM model constructed in Matlab/Simulink system is presented. There is also showed stimulation results for different working points of given motors. Experimental research has been done for chosen motor models and it is showed analysis of obtain results.

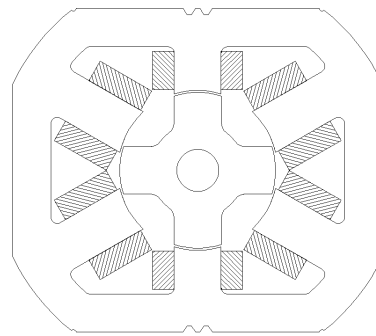
1. Wstęp

Silniki reluktancyjne przełączalne (SRM) zaliczane są do grupy maszyn synchronicznych. Z uwagi na swoje cechy przeznaczone są do napędów o regulowanej prędkości obrotowej. W maszynie SRM wytwarzany jest tylko moment reluktancyjny [1]. Jego wartość zależy między innymi od wymiarów geometrycznych maszyny oraz parametrów sterowania [2]. Zasadniczy wpływ na wartość wytwarzanego momentu ma grubość szczeliny powietrznej, która wpływa na kształt podstawowych charakterystyk statycznych silnika, a tym samym na parametry sterowania [3]. Charakterystyki te są niezbędne na etapie modelowania pracy maszyny. Ich znajomość umożliwia dobór parametrów sterowania silnika.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wpływu grubości szczeliny powietrznej na parametry ruchowe silnika reluktancyjnego przełączalnego o budowie niesymetrycznej.

2. Budowa silnika i model symulacyjny

W prezentowanej pracy rozpatrywany jest trójfazowy silnik reluktancyjny przełączalny o konfiguracji 6/4 i niesymetrycznej budowie obwodu magnetycznego oraz uzwojeń stojana. Wprowadzenie niesymetrii zostało podyktowane czynnikami technologicznymi. Przekrój poprzeczny rozpatrywanego silnika przedstawiono na rysunku 1.

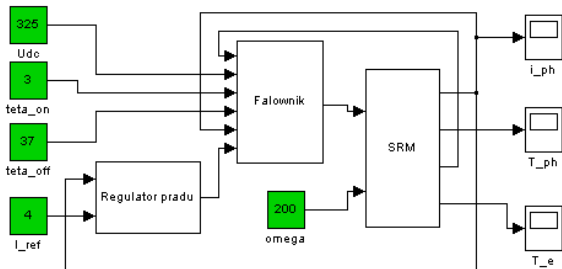


Rys. 1. Przekrój poprzeczny silnika SRM 6/4 o budowie niesymetrycznej

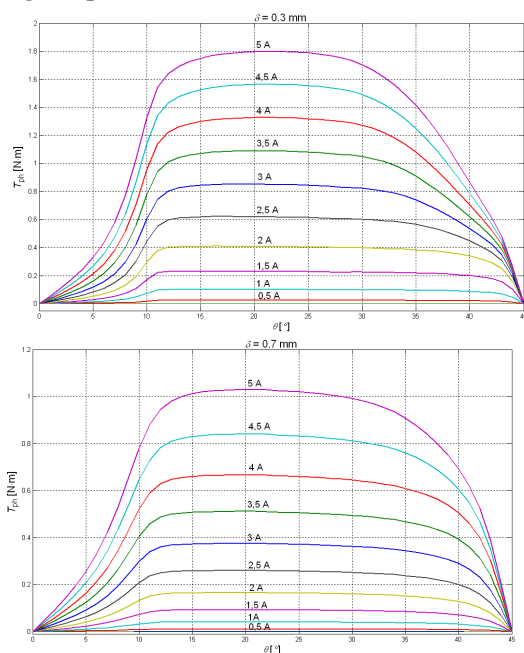
Wyznaczenie charakterystyk statycznych silnika (strumieniowo-prądowo-kątowych oraz momentowo-prądowo-kątowych) nie pozwala w pełni ocenić przydatności silnika dla danego rodzaju napędu.

W celu doboru optymalnej grubości szczeliny powietrznej rozpatrywanego silnika, zbudowano model symulacyjny SRM wraz z falownikiem w systemie Matlab/Simulink (rys.2) [7]. Model ten umożliwia między innymi analizę przebiegów czasowych prądów i momentów silnika oraz wyznaczenie jego charakterystyk mechanicznych. W modelu tym wykorzystano charakterystyki statyczne silnika obliczone często stosowaną metodą elementów skończonych [3, 4, 6] dla różnych grubości szczelin powietrznych za pomocą pakietu Ansys. Przykładowe charakterystyki momentowo-prądowo-kątowe dla rozpatrywanych modeli SRM o grubości szczeliny powietrznej $\delta=0,3$ mm

i $\delta=0,7$ mm przedstawiono na rysunku 3. W prezentowanym modelu uwzględniono niesymetrię silnika oraz nasycenie obwodu magnetycznego [5, 7].



Rys. 2. Schemat struktury modelu symulacyjnego napędu z SRM



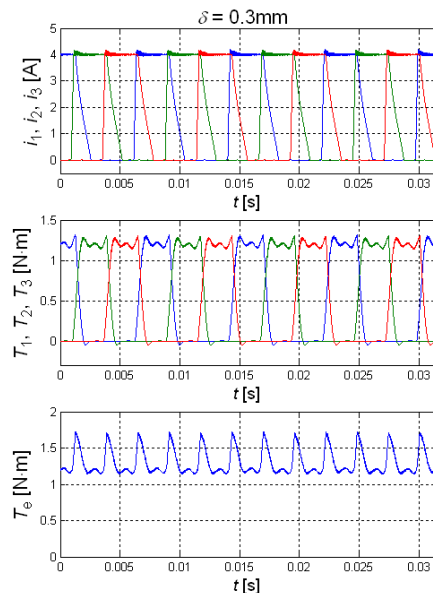
Rys. 3. Charakterystyki statyczne momentowo-prądowo-kątowe dla $\delta=0,3$ mm (górny), $\delta=0,7$ mm (dolny)

Z przedstawionych na rysunku 3 charakterystyk statycznych wynika, że moment wytwarzany przy prądzie $i_{ph}=5$ A jest około 70% większy w silniku ze szczeliną $\delta=0,3$ mm w porównaniu z silnikiem $\delta=0,7$ mm.

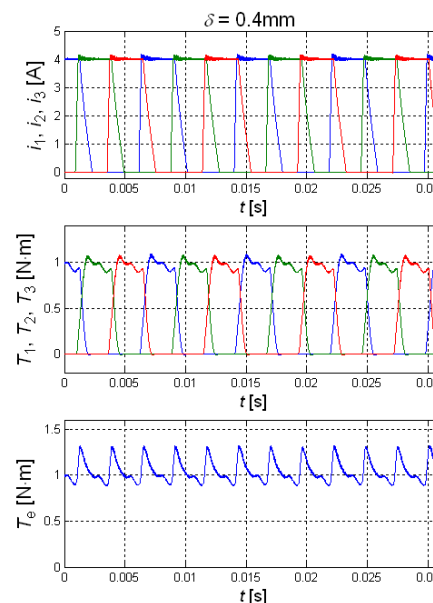
3. Wyniki obliczeń symulacyjnych

Do obliczeń symulacyjnych zaimplementowano silnik SRM o następujących danych: $U_N=325$ V, $R_{ph1}=4,6$ Ω , $R_{ph2}=4,2$ Ω , $N_S=6$, $N_R=4$. Obliczenia wykonano dla silników o czterech różnych szczelinach powietrznych, tj.: 0,3, 0,4, 0,5 i 0,7 mm. Przebiegi prądów i momentów pasmowych oraz momentu całkowitego zostały obliczone dla ustalonych punktów pracy silnika

przy prędkościach $\omega=200$ rad/s i $\omega=1000$ rad/s i różnych kątach sterujących (θ_{on} , θ_{off}). Na rysunkach 4 do 7 przedstawiono przebiegi czasowe obliczone dla następujących parametrów sterowania $I_{ref}=4$ A, $\theta_{on}=3^\circ$, $\theta_{off}=37^\circ$ przy prędkości $\omega=200$ rad/s.

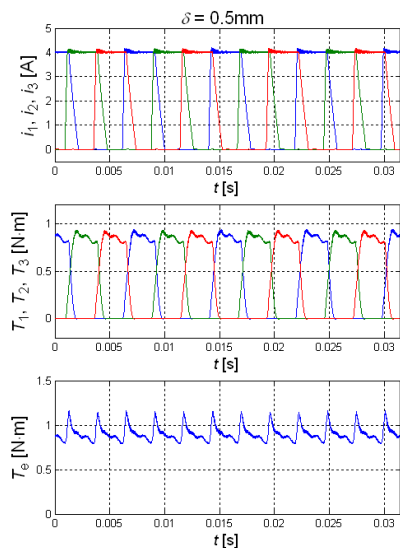


Rys. 4. Prądy pasmowe (górny), momenty pasmowe (środkowy) i moment całkowity (dolny), przy $\delta=0,3$ mm, $\omega=200$ rad/s

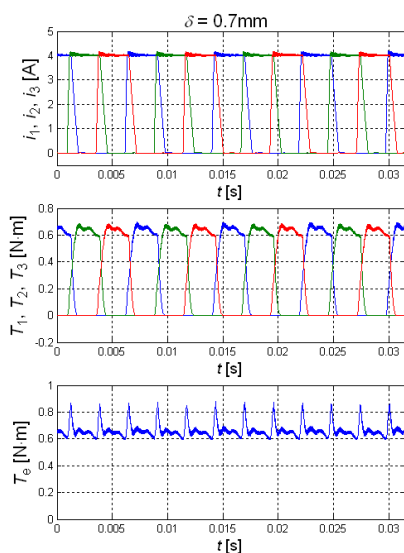


Rys. 5. Prądy pasmowe (górny), momenty pasmowe (środkowy) i moment całkowity (dolny), przy $\delta=0,4$ mm, $\omega=200$ rad/s

Jak wynika z rysunków 4-7 zmiana grubości szczeliny powietrznej znacząco wpływa na wartość średnią generowanego momentu, przy założeniu takich samych warunków sterowania.



Rys. 6. Prądy pasmowe (górny), momenty pasmowe (środkowy) i moment całkowity (dolny), przy $\delta=0,5\text{mm}$, $\omega=200\text{ rad/s}$

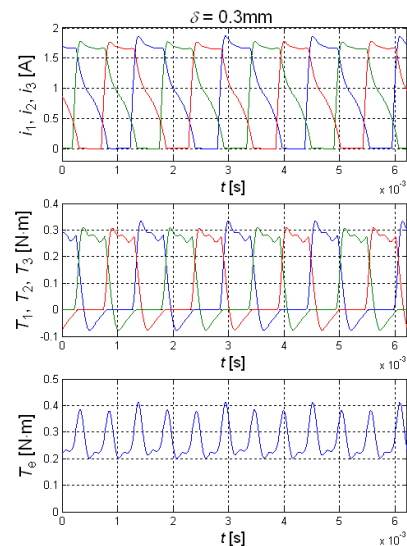


Rys. 7. Prądy pasmowe (górny), momenty pasmowe (środkowy) i moment całkowity (dolny), przy $\delta=0,7\text{mm}$, $\omega=200\text{ rad/s}$

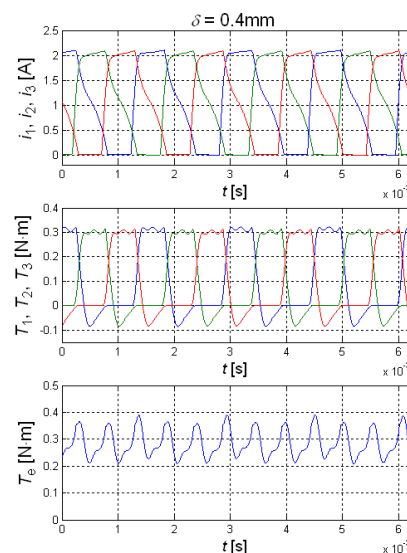
Wartość średnia momentu silnika (T_{eav}) dla szczeliny 0,3 mm jest blisko jedną czwartą większa niż w przypadku silnika ze szczeliną 0,4 mm i blisko dwukrotnie większa w przypadku silnika ze szczeliną 0,5 mm. Moment elektromagnetyczny jednego pasma SRM, przy założeniu liniowości obwodu magnetycznego i pominięciu sprzężeń międzypasmowych wyraża się zależnością:

$$T_{ph} = \frac{1}{2} i_{ph}^2 \frac{\partial L_{ph}}{\partial \theta} \quad (1)$$

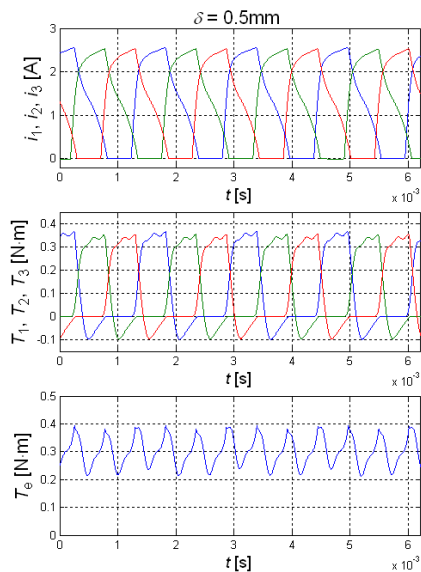
gdzie: i_{ph} - prąd pasmowy, $\partial L_{ph}/\partial \theta$ - pochodna indukcyjności własnej względem kąta obrotu wirnika. Wpływ niesymetrii silnika dla rozpatrywanego punktu pracy jest praktycznie niewidoczny w przebiegu momentu (rys.4-7), ponieważ prąd utrzymywany jest na stałym poziomie, a różnice w wartościach indukcyjności poszczególnych pasm są niewielkie.



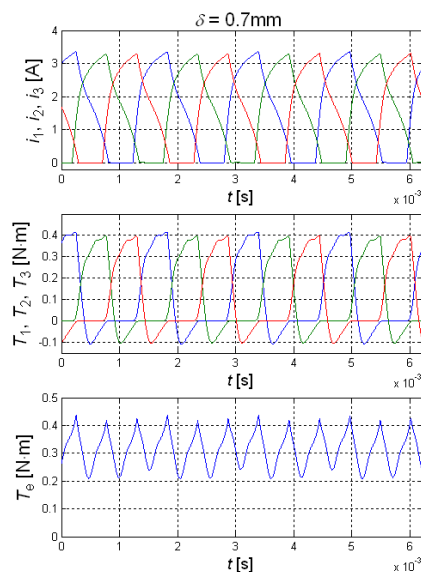
Rys. 8. Prądy pasmowe (górny), momenty pasmowe (środkowy) i moment całkowity (dolny), przy $\delta=0,3\text{mm}$, $\omega=1000\text{ rad/s}$



Rys. 9. Prądy pasmowe (górny), momenty pasmowe (środkowy) i moment całkowity (dolny), przy $\delta=0,4\text{mm}$, $\omega=1000\text{ rad/s}$



Rys. 10. Prądy pasmowe (górny), momenty (środkowy) pasmowe i moment całkowity (dolny), przy $\delta=0,5\text{mm}$, $\omega=1000\text{ rad/s}$



Rys. 11. Prądy pasmowe (górny), momenty (środkowy) pasmowe i moment całkowity (dolny), przy $\delta=0,7\text{mm}$, $\omega=1000\text{ rad/s}$

Na rysunkach 8 – 11 przedstawiono przebiegi czasowe prądów i momentów pasmowych oraz momentu całkowitego obliczonych dla $\omega=1000\text{ rad/s}$, $\theta_{\text{on}}=3^\circ$, $\theta_{\text{off}}=37^\circ$ przy sterowaniu jednopulsowym.

Jak można zauważyć zmiana grubości szczeliny powietrznej silnika wpływa istotnie na kształt przebiegu prądów pasmowych oraz ich amplitudy.

W tabeli 1 zestawiono wartości średnie momentu silnika (T_{eav}) osiągnięte dla różnych

szczelin powietrznych przy różnych kątach sterujących.

Tabela 1.

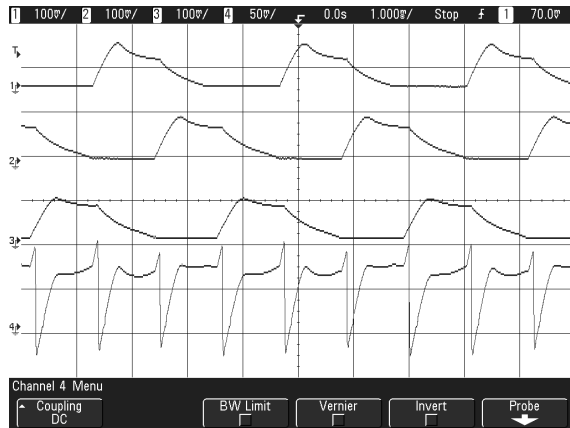
	T_{eav}			
$\theta_{\text{on}} / \theta_{\text{off}}$	3 / 37°	0 / 33°	-5 / 33°	-7 / 33°
ω [rad/s]	$\delta = 0,3\text{ mm}$			
200	1.3	-	-	-
1000	0.269	0.386	0.654	0.782
ω [rad/s]	$\delta = 0,4\text{ mm}$			
200	1.041	-	-	-
1000	0.284	0.387	0.634	0.749
ω [rad/s]	$\delta = 0,5\text{ mm}$			
200	0.904	-	-	-
1000	0.301	0.413	0.651	0.764
ω [rad/s]	$\delta = 0,7\text{ mm}$			
200	0.664	-	-	-
1000	0.314	0.422	0.646	0.725

Przy małym wyprzedzeniu załączenia uzwojeń ($\theta_{\text{on}}=3^\circ$ i $\theta_{\text{on}}=0^\circ$), zwiększenie szczeliny powietrznej powoduje zmniejszenie indukcyjności maksymalnych (L_{max}), a tym samym zwiększenie wartości maksymalnych prądów pasmowych (mniejsza stała czasowa obwodu). Zgodnie z zależnością (1) dominujący wpływ na wartość wytwarzanego momentu ma prąd pasmowy. W wyniku czego otrzymana wartość średnia momentu jest większa w przypadku silników o większej grubości szczeliny powietrznej.

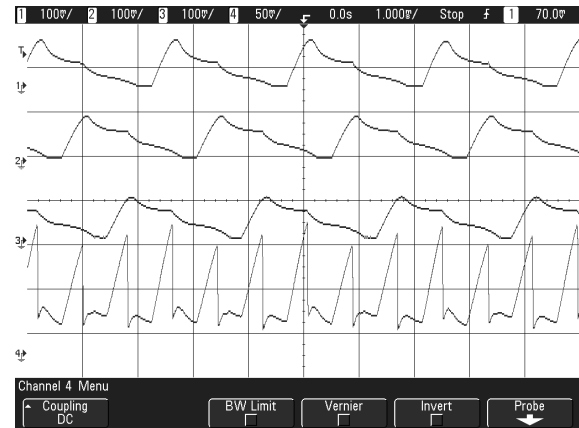
Duże wyprzedzenie kąta załączenia ($\theta_{\text{on}}=-5^\circ$ i $\theta_{\text{on}}=-7^\circ$) powoduje, że zmiana grubości szczeliny powietrznej silnika w badanym zakresie praktycznie nie wpływa na wartość średnią wytwarzanego momentu.

4. Wyniki eksperymentalne

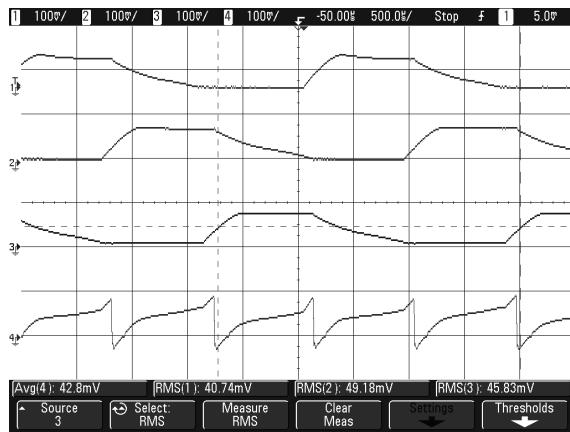
Badania eksperymentalne wykonano dla silników SRM o budowie 6/4, w których grubość szczeliny powietrznej wynosiła odpowiednio 0,3 mm, 0,4 mm i 0,5 mm. Przykładowe oscylogramy prądów pasmowych i prądu źródła przedstawiono na rysunkach 12-17. Badane silniki zasilano ze źródła o obniżonym napięciu $U_{\text{dc}}=60\text{V}$.



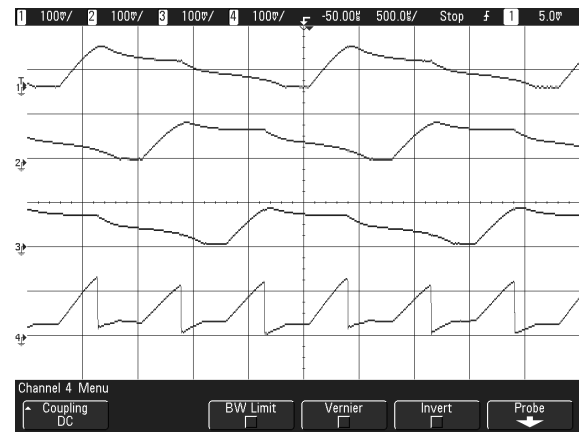
Rys. 12. Przebiegi prądów pasmowych (1-3) oraz prądu źródła (4) dla $\theta_{on}=-2.5^\circ$, $\theta_{off}=30^\circ$, $\delta=0.3mm$



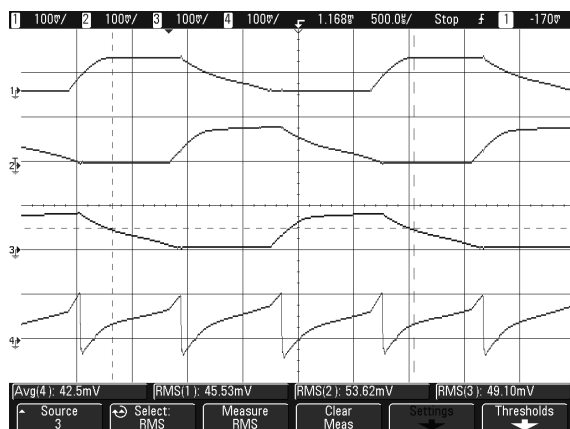
Rys. 15. Przebiegi prądów pasmowych (1-3) oraz prądu źródła (4) dla $\theta_{on}=-8^\circ$, $\theta_{off}=36^\circ$, $\delta=0.3mm$



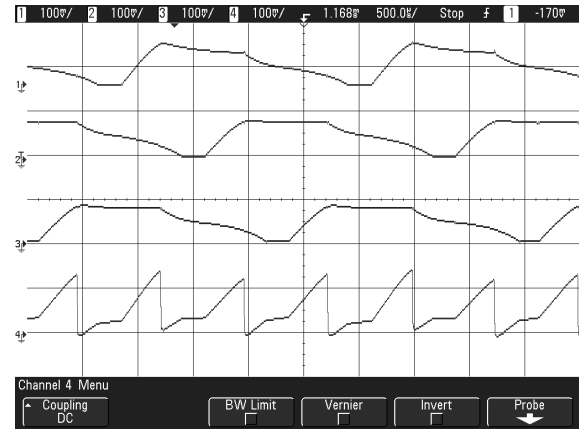
Rys. 13. Przebiegi prądów pasmowych (1-3) oraz prądu źródła (4) dla $\theta_{on}=-2.5^\circ$, $\theta_{off}=30^\circ$, $\delta=0.4mm$



Rys. 16. Przebiegi prądów pasmowych (1-3) oraz prądu źródła (4) dla $\theta_{on}=-8^\circ$, $\theta_{off}=36^\circ$, $\delta=0.4mm$



Rys. 14. Przebiegi prądów pasmowych (1-3) oraz prądu źródła (4) dla $\theta_{on}=-2.5^\circ$, $\theta_{off}=30^\circ$, $\delta=0.5mm$



Rys. 17. Przebiegi prądów pasmowych (1-3) oraz prądu źródła (4) dla $\theta_{on}=-8^\circ$, $\theta_{off}=36^\circ$, $\delta=0.5mm$

Na rysunkach 12-14 przedstawiono przebiegi prądów zarejestrowane dla kątów sterujących $\theta_{on}=-2.5^\circ$, $\theta_{off}=30^\circ$, natomiast na rysunkach 15-17 dla kątów $\theta_{on}=-8^\circ$, $\theta_{off}=36^\circ$.

Na podstawie rysunków 12 i 15 zarejestrowanych dla silnika ze szczeliną $\delta=0,3$ mm można zauważyć wyraźne maksimum prądów pasmowych silnika.

Przy czym maksimum występuje w paśmie 1, które ma inne parametry niż pozostałe (mniejsze L_{min} w stosunku do pozostałych pasm). Prąd pasmowy narasta od zera do wartości maksymalnej w obszarze minimalnej indukcyjności. Wraz z przyrostem kąta położenia wirnika θ , szybko wzrasta stała czasowa obwodu, a także napięcie rotacji (będące funkcją $\partial L/\partial \theta$), co skutkuje zmniejszaniem się prądu pasmowego. W przypadku większych szczelin powietrznych ($\delta=0,4$ mm i $\delta=0,5$ mm) i takich samych warunków zasilania przyrosty indukcyjności pasmowych względem kąta położenia wirnika są mniejsze i nie powodują tak silnego tłumienia prądu jak w przypadku silnika ze szczeliną $\delta=0,3$ mm. Dlatego kształt prądu jest bardziej płaski.

Wcześniejsze załączenie uzwojenia ($\theta_{on}=-8^\circ$) powoduje zwiększenie amplitudy prądów pasmowych (rys.15-17), a tym samym wzrost wytwarzanego momentu i prędkości wirnika. Ponadto w przypadku asymetrycznej budowy silnika powoduje większą asymetrię prądów pasmowych, a tym samym i momentów wytwarzanych przez poszczególne pasma.

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych i eksperymentalnych silników reluktancyjnych przełączalnych o niesymetrycznej budowie, zaprojektowanych przez autorów, można stwierdzić, że:

- Wprowadzona niesymetria magnetyczna i elektryczna silników nie wpływa w znaczący sposób na parametry ruchowe przy małych prędkościach obrotowych wirnika
- Duże wyprzedzenie kąta załączenia powoduje większą asymetrię prądów i momentów pasmowych
- Silniki z bardzo małą szczeliną powietrzną wytwarzają bardzo duży moment elektromagnetyczny, przy małych prędkościach wirowania wirnika, natomiast nie są one odpowiednie do pracy przy średnich i du-

żych prędkościach, ze względów technologicznych oraz na silne tłumienie prądu

- Moment elektromagnetyczny wytwarzany przez silnik silnie zależy od grubości szczeliny powietrznej, przy małych prędkościach wirowania wirnika
- Przy dużych prędkościach wirowania wirnika wytwarzany moment zależy w niewielkim stopniu od grubości szczeliny powietrznej, a znacząco od parametrów sterowania
- Połączenie metod obliczeniowych polowych z metodami obwodowymi pozwala na pełną analizę pracy napędu zarówno w stanach statycznych jak i dynamicznych

6. Literatura

- [1]. Krishnan R.: *Switched reluctance motor drive: modeling, simulation, analysis, desing, and applications*, CRC Press LLC, 2001.
- [2]. Miller T. J. E., *Electronic Control of switched reluctance machines*, Newnes, 2001
- [3]. Anawar M.N., Husain I., Radun A. V.: *A comprehensive desing methodology for switched reluctance machines*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, November/December 2001, pp. 1684-1692
- [4]. P. Bogusz, M. Korkosz, J. Prokop: *Badanie wpływu grubości szczeliny powietrznej na właściwości silników reluktancyjnych przełączalnych w oparciu o obliczenia polowe*, Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych, KOMEL, Zeszyty problemowe, Nr 75, 2006, str. 195-200
- [5]. Bogusz P.: *Silnik reluktancyjny przełączalny sterowany z procesora sygnałowego*, Rozprawa Doktorska, Instytut Elektrotechniki, Warszawa 2003
- [6]. *Ansys Documentation*, ANSYS, Inc.
- [7]. *Matlab/Simulink Documentation*, The Math-Works Inc.

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