

Analiza przełączalnego silnika reluktancyjnego z uzwojeniem rozłożonym

Streszczenie. W artykule przedstawiano analizę przełączalnego silnika reluktancyjnego typu 3/2, wykorzystującego stojan silnika indukcyjnego. Przy pomocy metody elementów skończonych opracowano model obwodowy stojana silnika indukcyjnego. Przeprowadzono analizę zależności indukcyjności w funkcji kąta obrotu wirnika. Zbudowano stanowisko pomiarowe i wykonano pomiary parametrów przełączalnego silnika reluktancyjnego, zasilając uzwojenia napięciem przemiennym 50Hz. Symulacje wykonano dla różnych szerokości biegunów wirnika w celu określenia charakterystyki indukcyjności w funkcji kąta obrotu. Uzyskane parametry porównano z wynikami analizy metodą elementów skończonych. Porównano proponowany przełączalny silnik reluktancyjny 3/2 z najczęściej stosowanym przełączalnym silnikiem reluktancyjnym 6/4.

Abstract. The paper deals with an analysis of switched reluctance motor 3/2, with stator of the induction motor. Using the finite element method, model of the stator motor was developed. Analysis of the inductance as a function of rotor rotation angle was carried out. The test bench was built and parameters of a switched reluctance motor were measured using alternating current 50Hz source. Simulation were made at different rotor poles angles in order to determine the characteristics of the inductance as a function of angle of rotation. The obtained parameters are compared with the results of finite element analysis. The switched reluctance motor 3/2 and switched reluctance motor 6/4 were compared. (Analysis of switched reluctance motor with windings distributed).

Słowa kluczowe: stojan silnika indukcyjnego, przełączalny silnik reluktancyjny, identyfikacja.

Keywords: induction motor stator, switched reluctance motor, identity.

doi:10.12915/pe.2014.11.28

Wstęp

Przełączalne silniki reluktancyjne (ang. - Switched Reluctance Motor – SRM) charakteryzują się wytrzymałą konstrukcją nie zawierającą magnesów trwałych. Nadają się one do pracy w trudnych warunkach środowiskowych oraz w aplikacjach, gdzie wymagana jest duża prędkość obrotowa. Dzięki strukturze bezszczotkowej nie wymagają częstej konserwacji. Szeroki zakres mocy w przystępnej cenie przekłada się na obszar zastosowań zarówno w przemyśle jak i w urządzeniach domowych. Mając na uwadze odnawialne źródła energii i zaawansowane napędy samochodowe oczekuje się, że silniki SRM w najbliższych latach będą miały coraz szersze zastosowanie w motoryzacji [1].

Najczęściej spotykanymi przełączalnymi silnikami reluktancyjnymi są silniki o tradycyjnej konfiguracji i regularnej strukturze, w której liczba biegunów stojana jest większa od liczby biegunów wirnika. W celu polepszenia sprawności SRM w ostatnich latach pojawiło się wiele nowych konstrukcji tych silników o niesymetrycznej budowie i zębatej szczelinie powietrznej. Można je znaleźć w [2-6]. Konstrukcje przedstawionych tam SRM cechuje zwiększony moment obrotowy oraz ograniczone straty.

Spotykane w literaturze przełączalne silniki reluktancyjne mają bieguny wydạtne stojana oraz wykorzystują tylko jedno z n uzwojeń. Jest to wada tych silników, ponieważ w danym momencie załączania fazy pracuje tylko $1/n$ część uzwojeń stojana silnika. Duża liczba biegunów wirnika powoduje zwiększenie ilości załączeń poszczególnych faz i zmniejszenie wyjściowej prędkości obrotowej. Aby uzyskać większą prędkość obrotową ilość biegunów wirnika powinna być możliwie mała. Dlatego podjęto analizę przełączalnego silnika reluktancyjnego 3/2, w którym mogą pracować dwie lub trzy fazy jednocześnie.

Konstrukcja SRM z wykorzystaniem stojana silnika indukcyjnego

Projektowanie silników elektrycznych rozpoczyna się od równania ujmującego relację między wymiarami wirnika, średnicy D i długości l , oraz parametrami zadanymi, mocą znamionową P i prędkością kątową ω silnika, w postaci [7]:

$$(1) \quad \frac{P}{\omega} = T_{obc} = CD^2 l$$

gdzie: C – przyjmuje wartość z przedziału od 2.5 do 5.

Na podstawie parametrów zadanych określony jest rozmiar silnika oraz wielkość momentu obrotowego T_{obc} . Z momentu obciążenia wynika wymagany elektromagnetyczny moment obrotowy T_e uzyskany na wale silnika określony jest zależnością [7]:

$$(2) \quad T_e = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \frac{\partial \mathbf{L}(\varphi)}{\partial \varphi} \mathbf{i}$$

gdzie: \mathbf{i} – wektor kolumnowy prądów fazowych, $\mathbf{L}(\varphi)$ – macierz indukcyjności własnych i wzajemnych.

Istotnym współczynnikiem określającym wielkość momentu obrotowego jest wartość pochodnej indukcyjności w funkcji kąta obrotu. Im większa pochodna indukcyjności względem kąta, tym większy moment obrotowy. Pochodna indukcyjności względem kąta może być określana na podstawie zmierzonej lub obliczonej np. metodą MES, charakterystyki indukcyjności w funkcji kąta obrotu. Pochodna ta może też być oszacowana na bazie maksymalnej i minimalnej indukcyjności wirnika oraz zakresu kąta wzrostu tych indukcyjności. Maksymalna wartość indukcyjności określana jest dla położenia współosiowego wirnika i stojana [8], wynosi:

$$(3) \quad L_{\max} = \frac{z \cdot B_s \cdot A_s}{i}$$

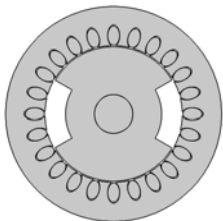
gdzie: A_s – powierzchnia bieguna stojana, z – liczba zwojów B_s – indukcja magnetyczna stojana.

Wartość indukcji magnetycznej zależy od szczeliny powietrznej między stojanem i rdzeniem wirnika oraz własności magnetycznych materiału z którego wykonany jest silnik. Z zależności (3) dla $i, z = const$ wynika, że o wartości indukcyjności będzie decydować wielkość powierzchni bieguna stojana A_s . Im większa powierzchnia bieguna stojana tym większa indukcyjność. Powierzchnia bieguna stojana jest równa [8]:

$$(4) \quad A_s = 0.5 l D \beta_s$$

gdzie: β_s – kąt bieguna stojana.

Dla silnika o określonej mocy i prędkości obrotowej wymiary $D, l = const$. Zatem o powierzchni bieguna stojana, a tym samym o indukcyjności będzie decydować wielkość kąta łuku bieguna stojana. Wobec tego konstrukcja SRM powinna charakteryzować się możliwie dużym kątem łuku bieguna stojana, a tym samym dużym kątem łuku bieguna wirnika. W tradycyjnej konstrukcji SRM największy kąt łuku bieguna stojana i wirnika można uzyskać przy konfiguracji 2/2 i wynosi około 90 stopni. W celu zwiększenia kąta łuku stojana oraz sprawdzenia możliwości załączenia kilku faz jednocześnie wykorzystano uzwojeny stojan silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 0.18kW i prędkości obrotowej 2800obr/min. Trójfazowy przełączalny silnik reluktancyjny 3/2 ma trzy utajone bieguny stojana i dwa wydane bieguny wirnika o kącie 120 stopni – rysunek 1.



Rys.1. Przekrój poprzeczny silnika reluktancyjnego 3/2

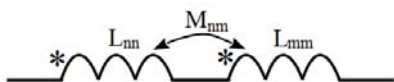
Model matematyczny obwodów elektrycznych stojana silnika trójfazowego, przedstawionego na rysunku 1, w stanie statycznym ($\omega = 0$) przyjęto w postaci:

$$(5) \quad \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & L_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & L_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 \\ 0 & 0 & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

Dla połączenia dwóch faz silnika połączonych szeregowo i sprzężonych magnetycznie jak na rysunku 2, każde połączenie dwóch uzwojeń można zapisać w postaci:

$$(6) \quad \begin{bmatrix} L_{nn} & M_{nm} \\ M_{mn} & L_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_n \\ \dot{I}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{nn} & 0 \\ 0 & R_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_n \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_n \\ U_m \end{bmatrix}$$

gdzie: $n, m = 1, 2, 3, n \neq m$.



Rys.2. Połączenie dwóch faz sprzężonych magnetycznie

Dla połączenia szeregowego $I_n = I_m = I$ oraz $U = U_n + U_m$ otrzymujemy:

$$(7) \quad (L_{nn} + L_{mm} + M_{nm} + M_{mn}) \dot{I}_n + (R_{nn} + R_{mm}) I = U$$

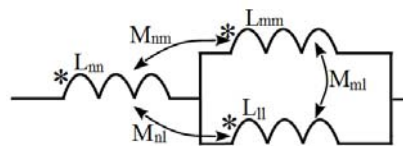
Stąd zastępcza indukcyjność będzie w postaci:

$$(8) \quad L_{2nm} = L_{nn} + L_{mm} + M_{nm} + M_{mn}$$

Dla połączenia trzech faz silnika połączonych szeregowo – równolegle i sprzężonych magnetycznie jak na rysunku 3, można wykorzystać ogólną postać modelu:

$$(9) \quad \begin{bmatrix} L_{nn} & M_{nm} & M_{nl} \\ M_{mn} & L_{mm} & M_{ml} \\ M_{ln} & M_{lm} & L_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_n \\ \dot{I}_m \\ \dot{I}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & R_{mm} & 0 \\ 0 & 0 & R_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_n \\ I_m \\ I_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_n \\ U_m \\ U_l \end{bmatrix}$$

gdzie: $n, m, l = 1, 2, 3, n \neq m \neq l$.



Rys.3. Połączenie trzech faz sprzężonych magnetycznie

Dla połączenia trzech uzwojeń jak na rysunku 3, $I_n = I_m + I_l$, $U_m = U_l$ oraz $U = U_n + U_m$, obowiązują relacje:

$$(10) \quad L_{nn} \dot{I}_n + \begin{bmatrix} M_{nm} & M_{nl} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ \dot{I}_l \end{bmatrix} + R_{nn} I_n = U_n$$

$$(11) \quad \begin{bmatrix} M_{mn} \\ M_{ln} \end{bmatrix} \dot{I}_n + [s\mathbf{mL}_2 + \mathbf{mR}_2] \cdot \begin{bmatrix} I_m \\ I_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m \\ U_l \end{bmatrix}$$

$$\text{gdzie: } s\mathbf{mL}_2 = \begin{bmatrix} L_{mn} & M_{nl} \\ M_{lm} & L_{ll} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{mR}_2 = \begin{bmatrix} R_{mm} & 0 \\ 0 & R_{ll} \end{bmatrix}$$

Prąd I_n płynący przez obwód wynosi:

$$(12) \quad I_n = \left(1 + s \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} [s\mathbf{mL}_2 + \mathbf{mR}_2]^{-1} \begin{bmatrix} M_{21} \\ M_{31} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} [s\mathbf{mL}_2 + \mathbf{mR}_2]^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} U_m$$

Napięcie na uzwojeniach jest równe:

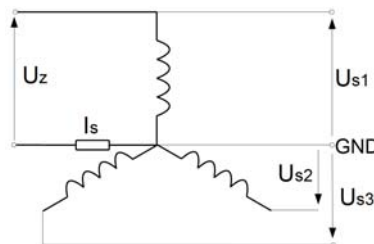
$$(13) \quad \left(sL_n - s^2 \cdot \begin{bmatrix} M_{nm} & M_{nl} \end{bmatrix} [s\mathbf{mL}_2 + \mathbf{mR}_2]^{-1} \begin{bmatrix} M_{mn} \\ M_{ln} \end{bmatrix} + R_n \right) I_n + \left(s \begin{bmatrix} M_{nm} & M_{nl} \end{bmatrix} [s\mathbf{mL}_2 + \mathbf{mR}_2]^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + 1 \right) U_m = U$$

Impedancja zastępcza układu jest ilorazem równań (13) przez (12). Stąd indukcyjność zastępcza układu wynosi:

$$(14) \quad L_{nml} = \frac{(L_{mm} + M_{mn} + M_{ml} + M_{lm})(L_{ll} + M_{ln} + M_{ml} + M_{mn})}{L_{nn} + L_{mm} + 2M_{ml} + L_{nn} + M_{mn} + M_{lm} + M_{ml}}$$

Identyfikacja parametrów

Do identyfikacji parametrów zbudowano stanowisko badawcze zawierające wspomniany silnik. Dla sprawdzenia, jak zmienia się indukcyjność stojana w zależności od kąta obrotu wirnika przeprowadzono identyfikację tych parametrów zasilając uzwojenia napięciem przemiennym 50Hz. Wstępnie zasilano każde z uzwojeń fazowych stojana oddzielnie – rysunek 4.



Rys.4. Schemat połączeń silnika podczas pomiaru parametrów pojedynczego uzwojenia

Pomiary powtórzone dla dwóch faz stojana połączonych szeregowo i trzech faz, gdzie dwie fazy połączone są równolegle a jedna szeregowo. Napięcie zasilania było dobierane tak, aby prąd dla każdego z pomiarów był taki sam.

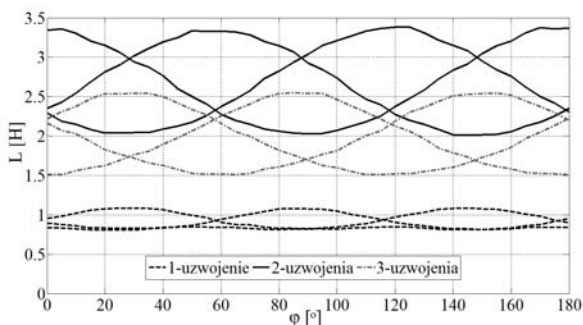
W celu wyznaczenia poszczególnych parametrów silnika wykorzystano wartości chwilowe napięcia zasilającego układ pomiarowy U_{s1} oraz prądu płynącego w zasilanym uzwojeniu I_s . Wielkości te były przetwarzane na postać cyfrową za pomocą karty pomiarowej NI 9225. W celu określenia kąta obrotu wirnika wykorzystano kartę pomiarową NI 6216. Karty obsługiwane były przez program LabView zainstalowany na komputerze. Dane zapisywane były w pliku tekstowym. Zmierzone wartości przetwarzano stosując system MATLAB. W celu zmniejszenia wpływu zakłóceń oraz wyznaczenia pochodnych, zastosowano filtr Golaya - Savitzky'ego. Dla uzwojenia zasilanego napięciem U_{s1} , przez które płynie prąd I_s z równania:

$$(15) \quad L \dot{I}_s + R I_s = U_{s1}$$

wyznaczono wartości indukcyjności oraz rezystancji wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów. Mierząc także wartości chwilowe napięć na pozostałych fazach U_{s2} i U_{s3} z zależności:

$$(16) \quad M_2 \dot{I}_s = U_{s2} \quad M_3 \dot{I}_s = U_{s3}$$

obliczono indukcyjności wzajemne. Pomiary na uzwojeniach silnika prowadzono dla nastawionego kąta obrotu z krokiem co 5 stopni. Powyższy eksperyment przeprowadzono dla każdego z uzwojeń zasilanego oddzielnie. Następnie przeprowadzono pomiary dla każdej pary uzwojeń połączonych szeregowo według rysunku 2 oraz dla każdej konfiguracji połączenia trzech uzwojeń – rysunek 3. Otrzymane charakterystyki indukcyjności w funkcji kąta obrotu dla różnych konfiguracji połączeń przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Indukcyjność $L(\varphi)$ dla uzwojenia jednej fazy, dwóch uzwojeń fazowych połączonych szeregowo i trzech faz połączonych równoległe – szeregowo

Dla otrzymanych charakterystyk dla pojedynczego uzwojenia fazowego wyznaczono aproksymację zależności indukcyjności własnej cewki w postaci:

$$(17) \quad L = 0.907 + 0.12 \cos\left(2\left(\varphi - \frac{n\pi}{3}\right)\right) + 0.058 \cos\left(4\left(\varphi - \frac{n\pi}{3}\right)\right) H$$

gdzie: $n=2, 1, 0$ odpowiednio dla uzwojenia fazy pierwszej, drugiej i trzeciej.

W podobny sposób wyznaczono aproksymację indukcyjności wzajemnej uzwojeń. Aproksymacja ta ma postać:

$$(18) \quad M = 0.381 + 0.26 \cos\left(2\left(\varphi - \frac{m\pi}{6}\right)\right) + 0.038 \cos\left(4\left(\varphi - \frac{m\pi}{6}\right)\right) H$$

gdzie: $m=3, 5, 1$ odpowiednio dla pierwszego, drugiego i trzeciego zasilanego uzwojenia.

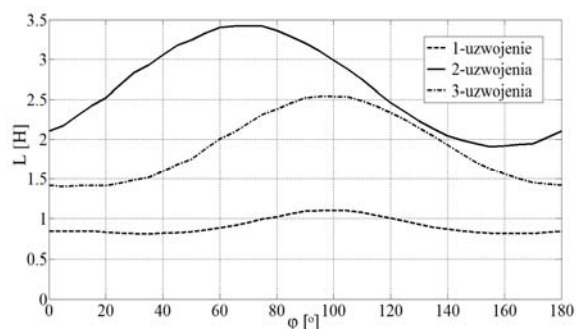
Wykorzystując zależności (17) i (18) oraz (8) i (14) można oszacować indukcyjność zastępczą połączonych dwóch i trzech faz, a tym samym pochodną indukcyjności w funkcji kąta obrotu. Wartość pochodnej dla dwóch faz połączonych szeregowo wynosi:

$$(19) \quad \frac{\partial L}{\partial \varphi} = 2(0.64 - 0.072 \cos(2\varphi)) \sin(2\varphi) \frac{H}{rad}$$

W proponowanym przełączalnym silniku reluktancyjnym 3/2 wartość pochodnej indukcyjności w funkcji kąta obrotu zależy od dwóch lub trzech faz silnika. Jak można zauważyć na podstawie rysunku 5 pochodna indukcyjności w funkcji kąta obrotu jest większa dla połączenia dwóch i trzech uzwojeń silnika niż dla pojedynczego uzwojenia. Wynika z tego, że najlepszym rozwiązaniem aby osiągnąć największy moment elektryczny jest połączenie dwóch faz szeregowo. Połączenie trzech faz równoległe – szeregowo jest mniej korzystnym rozwiązaniem.

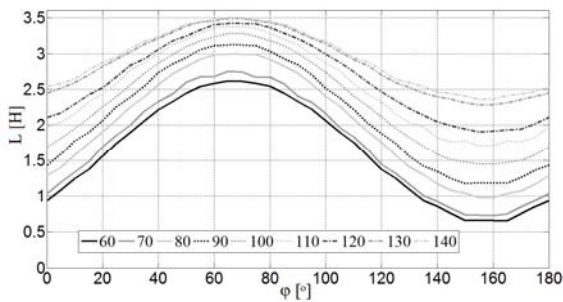
Model silnika reluktancyjnego z wykorzystaniem stojana silnika indukcyjnego

W celu weryfikacji otrzymanych wyników na podstawie parametrów geometrycznych i materiałowych silnika indukcyjnego klatkowego opracowano model przełączalnego silnika reluktancyjnego 3/2 – rysunek 1. Do opracowania modelu zastosowano program Comsol wykorzystujący metodę elementów skończonych. Dla takich samych parametrów zasilania jak podczas identyfikacji parametrów przeprowadzono analizę zależności indukcyjności w funkcji kąta obrotu wirnika dla różnych połączeń uzwojeń stojana. Zależność indukcyjności w funkcji kąta obrotu dla jednej fazy, dwóch faz połączonych szeregowo i trzech faz połączonych równoległe – szeregowo przedstawia rysunek 6.



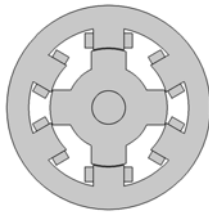
Rys.6. Indukcyjności $L(\varphi)$ dla uzwojenia jednej fazy, uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo i uzwojeń trzech faz połączonych równoległe – szeregowo wyznaczone metodą elementów skończonych

Uzyskane charakterystyki indukcyjności dla przełączalnego silnika reluktancyjnego na rysunku 6 odpowiadają charakterystyką otrzymanych z pomiarów – rysunek 5. Aby określić dla jakiego kąta łuku bieguna wirnika przełączalnego silnika reluktancyjnego 3/2 charakterystyka indukcyjności będzie najkorzystniejsza wykonano symulację dla różnych jego kątów. Kąt zęba wirnika zmieniano co 10 stopni w zakresie 60-140 stopni. Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyki indukcyjności w funkcji kąta obrotu dla dwóch faz połączonych szeregowo.



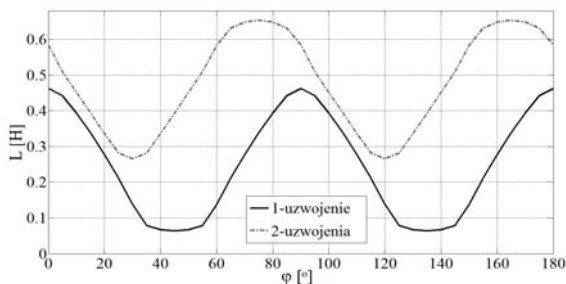
Rys.7. Zależność indukcyjności w funkcji kąta obrotu dla dwóch faz wyznaczonych metodą elementów skończonych dla różnych kątów łuku bieguna wirnika

Z rysunku 7 wynika, że najlepszym rozwiązaniem konstrukcyjnym dla przełączalnego silnika reluktancyjnego 3/2 jest wirnik, którego kąt zęba wynosi około 80 stopni. Zmiany indukcyjności w funkcji kąta obrotu dla takiego bieguna wirnika mają największą amplitudę a tym samym uzyskuje się największą pochodną indukcyjności po kącie obrotu. Dla porównania przeprowadzono symulację przełączalnego silnika reluktancyjnego 6/4 – rysunek 8. Średnica wewnętrzna i zewnętrzna stojana oraz średnica wirnika były takie same jak dla przełączalnego silnika reluktancyjnego 3/2. Zachowano proporcje w uzwojeniach – ilość zwoi i średnica drutu były identyczne. Szerokość bieguna wirnika i stojana zaprojektowano zgodnie z [7-8].



Rys.8. Przełączalny silnik reluktancyjny 6/4

Wykorzystując metodę elementów skończonych uzyskano następujące charakterystyki indukcyjności w funkcji kąta obrotu wirnika dla jednego uzwojenia oraz dwóch uzwojeń połączonych szeregowo – rysunek 9.



Rys.9. Zależność indukcyjności w funkcji kąta obrotu przełączalnego silnika reluktancyjnego 6/4 wyznaczona metodą elementów skończonych

Indukcyjność własna cewki dla pojedynczego uzwojenia wynosi:

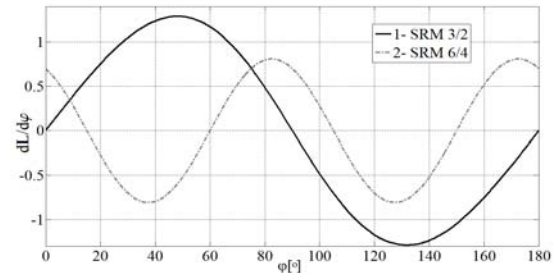
$$(20) \quad L = 0.2459 + 0.2018 \cos\left(4\left(\varphi - \frac{n\pi}{6}\right)\right) H$$

gdzie: $n= 0, 1, 2$ odpowiednio dla pierwszego, drugiego i trzeciego zasilonego uzwojenia.

Wartość pochodnej dla dwóch faz połączonych szeregowo SRM 6/4 wynosi:

$$(21) \quad \frac{\partial L}{\partial \varphi} = -0.8072 \left(\sin(4\varphi) + \sin\left(4\left(\varphi - \frac{\pi}{6}\right)\right) \right) \frac{H}{rad}$$

Na rysunku 10 przedstawiono charakterystyki pochodnych indukcyjności w funkcji kąta obrotu dla SRM 3/2 i SRM 6/4 przy dwóch fazach połączonych szeregowo. Jak można zauważyć wartość pochodnej dla SRM 3/2 jest znacznie większa niż dla SRM 6/4. Większy jest także kąt dla dodatniej części pochodnej indukcyjności co zmniejsza częstotliwość załączania, a tym samym uzyskanie większych prędkości.



Rys.10. Pochodne indukcyjności w funkcji kąta obrotu dla SRM 3/2 i SRM 6/4 dla dwóch uzwojeń fazowych połączonych szeregowo

Wnioski

W konstrukcji przełączalnego silnika reluktancyjnego wykorzystanie stojana silnika indukcyjnego pozwala na uzyskanie dużych kątów łuku bieguna stojana i wirnika. Taka struktura silnika pozwala na łączenie faz szeregowo lub równoległe – szeregowo i uzyskanie zwiększonego momentu elektrycznego. Nie jest to możliwe w tradycyjnych silnikach reluktancyjnych, ponieważ wartość pochodnej jest praktycznie niezależna od połączenia uzwojeń. Łącząc fazy w przedstawiony sposób uzyskuje się większą pochodną indukcyjności przy tych samych wymiarach silnika. Zwiększenie zakresu kąta w którym występuje dodatnia pochodna indukcyjności zapewnia bardziej stały moment w trakcie obrotu. Duży moment elektromagnetyczny umożliwia uzyskanie dużych prędkości.

LITERATURA

- [1] Wilamowski B. M., Irwin J., Power electronics and motor drivers, *CRC Press LLC*, (2011)
- [2] Bilgin, B., A novel switched reluctance motor based propulsion driver for electric and plug-in hybrid vehicles, *Department of Electrical and Computer Engineering, Chicago, Illinois* (2011)
- [3] Tanujaya M., Lee D. H., An Y. J., Ahn J. W., A Novel 6/5 Switched Reluctance Motor with Short Flux Path: Concept, Design and Analysis, *JICEMS*, (2012), No.1, pp.47-53
- [4] Afjei E. S., Toliyat H. A, A Novel Multilayer Switched Reluctance Motor, *IEEE Trans. On Energy Conversion*, (2002)
- [5] Siadatan A., Afjei E., Toulabi M.S., A New Hybrid Two Phase Switched Reluctance Motor/Generator, *Power Electronics and Applications, EPE*, (2009)
- [6] Tataru A.-M., Shark -new motor design concept for energy saving- applied to Switched Reluctance Motor, *Institute of Energy Technology, Aalborg University*, (2004)
- [7] Torsten W., Design and Construction Modifications of Switched Reluctance Machines, *Warszawa* (2008)
- [8] Lenin N.C., Arumugam R., A unified design procedure for switched reluctance motor, *ICTES*, (2007)

Autorzy: prof. dr hab. inż. Mirosław Wciślik, mgr inż. Karol Suchenia, *Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Al. 1000-lecia PP 7, 25-314 Kielce, e-mail: mwcislik@tu.kielce.pl; ksuchenia@tu.kielce.pl.*