

Analiza wpływu parametrów konstrukcyjnych wirnika na moment elektryczny przełączalnego silnika reluktancyjnego

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ wymiarów wirnika w trójfazowym przełączalnym silniku reluktancyjnym. Wykorzystano stojan silnika indukcyjnego klatkowego. Przeprowadzono analizę ze względu na wysokość oraz szerokość bieguna wirnika. Zmieniając szerokość bieguna wirnika w zakresie od 60 do 160 stopni z krokiem 10 stopni wyznaczono optymalną jego szerokość. Wyznaczono charakterystyki indukcyjności i pochodne indukcyjności w funkcji kąta obrotu. Na tej podstawie zdeterminowano wymiary wirnika. Analizę przeprowadzono przy użyciu metody elementów skończonych. Przeprowadzono pomiary dla różnych szerokości biegunów wirnika i porównano je z wynikami symulacji.

Abstract. In the article the effect of dimensions of rotor in a three-phase switched reluctance motor was presented. The stator of squirrel cage induction motor was used. Analysis of the height and width of the rotor pole was carried out. By changing the rotor pole width in the range from 60 to 160 degrees with 10 degrees the optimal width was determined. Inductance and derivatives inductances characteristics as a function of the rotation angle were determined. On this basis, the dimensions of the rotor were determined. The analysis using the finite element method was carried out. Measurements for different widths of the poles of the rotor were carried out and with of the simulation results were compared. (Analysis of the effect of design parameters of the rotor on the electric moment of the switched reluctance motor).

Słowa kluczowe: przełączalny silnik reluktancyjny, szerokość bieguna wirnika, metoda elementów skończonych, identyfikacja.

Keywords: switched reluctance motor, width of the rotor pole, finite element method, identification.

Wstęp

Przełączalne silniki reluktancyjne (SRM) charakteryzują się wytrzymałą konstrukcją. Nie zawierają one 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. 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 jawnych stojana jest większa od liczby biegunów wirnika i zasilane jest tylko jedno z n uzwojeń. W celu polepszenia sprawności SRM w ostatnich latach pojawiło się wiele nowych konstrukcji tych silników o niesymetrycznej budowie i zębatej szczelinie powietrznej [2-3].

Chociaż SRM są proste w budowie, są one trudne w projektowaniu i analizie. Trudności te wynikają głównie z nieliniowości magnetycznych i przestrzennych parametrów konstrukcyjnych niesymetrii magnetowodów oraz parametrów sterowania [4]. Metody projektowania SRM można znaleźć w [5-6]. Szerokość kąta łuku bieguna wirnika β_r dobierana jest na podstawie ilości biegunów wirnika i stojana. Wysokość bieguna wirnika h_r zależy natomiast od pozostałych parametrów silnika. Brak jest analizy, w jaki sposób te parametry wpływają na właściwości SRM. Poniżej przedstawiono analizę wpływu parametrów β_r i h_r na indukcyjność jednego i dwóch połączonych uzwojeń metodą elementów skończonych i dokonano weryfikacji pomiarowej.

Projektowanie SRM

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

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

gdzie: D – średnica wewnętrzna wirnika, l – długość rdzenia, C – współczynnik z przedziału od 2.5 do 5.

Z [8] wynika, że każdemu rodzajowi maszyny odpowiada specyficzna wielkość ilorazu długości podziałki biegunowej τ do długości rdzenia l , dla której koszt maszyny utrzymuje się w pobliżu minimum. W tych rozważaniach przyjęto, że ekonomicznie optymalny iloraz $\lambda = \tau/l$ jest stały, niezależny od liczby biegunów. Przy tym założeniu stosunek średnicy wirnika do jego długości powinien wynosić:

$$(2) \quad \frac{D}{l} = \frac{2 \cdot p \cdot \tau_s}{\pi \cdot l} = \frac{2}{\pi} \cdot \lambda \cdot p = 120 \cdot \frac{f}{\pi} \cdot \frac{\lambda}{n}$$

gdzie: τ_s – podziałka biegunowa stojana, p – liczba par biegunów, n – prędkość obrotowa.

Na ogół stosunek l/D jest pomiędzy 0.4 - 3.0. Na podstawie zadanych parametrów określana jest wielkość momentu obrotowego T_{obc} oraz rozmiar silnika. Z momentu obciążenia wynika wymagany elektromagnetyczny moment obrotowy T_e uzyskiwany na wale silnika określony dla SRM zależnością [9]:

$$(3) \quad T_e = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \frac{d\mathbf{L}(\varphi)}{d\varphi} \mathbf{i}$$

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

Istotną wielkością decydującą o wartości momentu obrotowego jest pochodna indukcyjności w funkcji kąta obrotu. 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 w postaci:

$$(4) \quad \frac{dL}{d\varphi} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\Delta\varphi}$$

gdzie maksymalna wartość indukcyjności L_{\max} oznacza:

$$(5) \quad L_{\max} = \frac{z \cdot B_s \cdot A_s}{i}$$

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

Wartość indukcji magnetycznej zależy od szczeliny powietrznej między stojanem i rdzeniem wirnika oraz własności magnetycznych materiału, z jakiego wykonany jest silnik. Z zależności (5) dla $i, z = \text{const.}$ wynika, że o wartości indukcyjności będzie decydować wielkość powierzchni bieguna stojana A_s . Im większa jest powierzchnia bieguna stojana tym większa jest indukcyjność. Powierzchnia bieguna stojana jest równa [5]:

$$(6) \quad A_s = 0.5lD\beta_s$$

gdzie: β_s – szerokość kąta łuku bieguna stojana.

Zatem powierzchnia bieguna stojana A_s jest proporcjonalna do kąta łuku bieguna stojana β_s . Wartości minimalnego kąta łuku bieguna stojana i wirnika, dla którego wirnik będzie poruszał się dla wzbudzanego pojedynczego uzwojenia oraz w celu uzyskania dostatecznego momentu początkowego w dowolnym położeniu wirnika powinny być wyznaczone w oparciu o zależności:

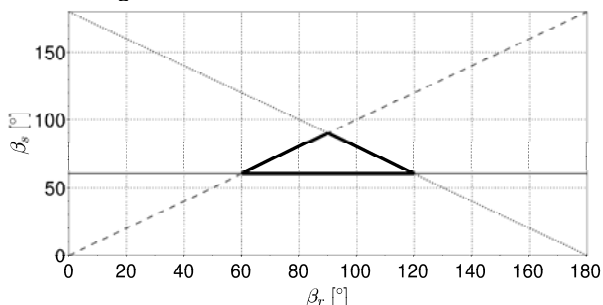
$$(7) \quad \beta_{\min} = \frac{4\pi}{N_s N_r}$$

$$(8) \quad \beta_s + \beta_r < \tau_r$$

gdzie: τ_r – podziałka biegunowa wirnika, N_r – liczba biegunów wirnika, N_s – liczba biegunów stojana.

Wartości szerokości kąta łuku bieguna stojana β_s i kąta łuku bieguna wirnika β_r są ściśle ze sobą związane. W celu określenia szerokości kąta łuku bieguna stojana i wirnika sporządzany jest wykres tzw. trójkąt relacji [5]. Wykres trójkąta relacji wykorzystywany jest w przelączalnych silnikach reluktancyjnych z jawnymi biegunami stojana oraz z uzwojeniem skupionym. W tradycyjnych przelączalnych silnikach reluktancyjnych szerokość kąta łuku bieguna stojana nie jest większa niż 45 stopni. W celu zwiększenia szerokości kąta łuku bieguna stojana wykorzystano uzwojony stojan silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 0.18 kW i prędkości obrotowej 2800obr/min. Zastosowano trójfazowy przelączalny silnik reluktancyjny z trzema utajonymi biegunami stojana i dwoma wydatnymi biegunami wirnika. Dla trzech biegunów stojana szerokość kąta łuku bieguna stojana β_s wynosi około 60 stopni.

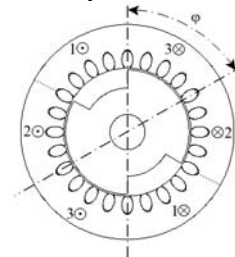
Na podstawie równań (7) i (8) zaprezentowano na rysunku 1 wykres przedstawiający kąty łuków bieguna wirnika i stojana dla silnika z trzema biegunami stojana i dwoma biegunami wirnika.



Rys.1. Trójkąt relacji szerokości kąta łuku bieguna stojana i wirnika

Z rysunku 1 wynika, że minimalne szerokości kątów łuku bieguna stojana i wirnika powinny wynosić 60 stopni. Maksymalny kąt łuku bieguna stojana powinien być nie większy niż 90 stopni, a kąt łuku bieguna wirnika nie

wiekszy niż 120 stopni. Przekrój poprzeczny analizowanego silnika przedstawiono na rysunku 2.

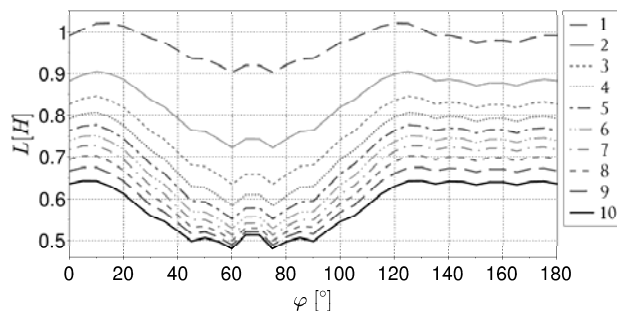


Rys.2. Schemat poglądowy analizowanego silnika reluktancyjnego

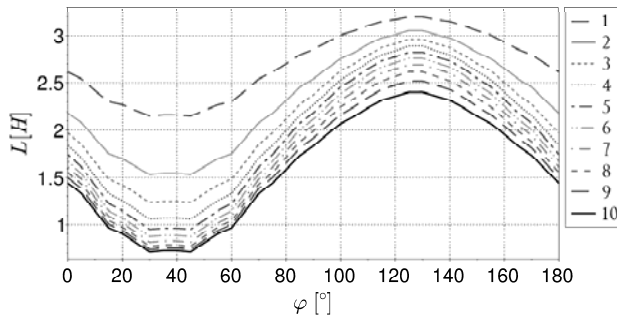
Analiza wymiarów wirnika metodą MES

W celu określenia wpływu szerokości kąta łuku bieguna wirnika oraz wysokości bieguna wirnika przeprowadzono symulację wykorzystując metodę elementów skończonych. Symulację przeprowadzono dla modelu uwzględniającego straty.

Analizę wpływu wysokości bieguna wirnika h_r przeprowadzono dla średnicy wału wynoszącej 26 mm oraz szerokości kąta łuku bieguna wirnika β_r równego 90 stopni. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wpływ wysokości bieguna wirnika odpowiednio dla uzwojenia jednej fazy i uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo. Wysokość bieguna wirnika zmieniano co 1 mm w zakresie od 1 mm do 10 mm.

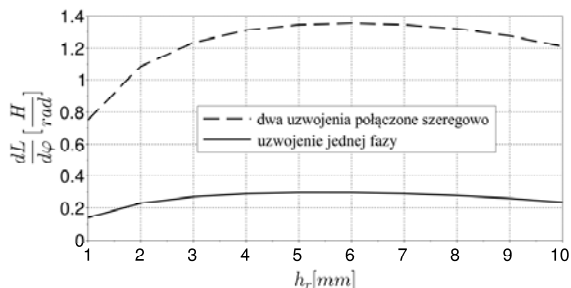


Rys.3. Wpływ wysokości bieguna wirnika dla uzwojenia jednej fazy



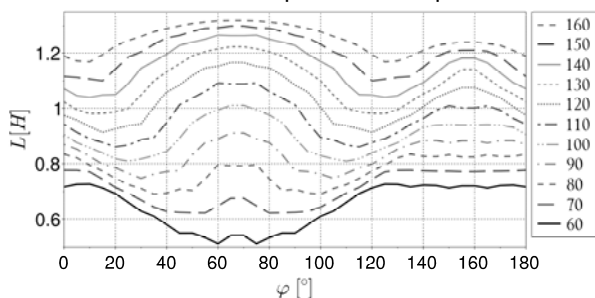
Rys.4. Wpływ wysokości bieguna wirnika dla uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo

Na podstawie analizy rysunków 3 i 4 najmniejsza różnica pomiędzy wartością maksymalną i minimalną indukcyjności występuje dla małej wysokości bieguna wirnika. Wraz ze zwiększeniem wysokości bieguna wirnika, zwiększa się różnica pomiędzy wartością maksymalną i minimalną indukcyjności. Dla uzwojenia jednej fazy na rysunku 3 między kątem obrotu 60 a 75 stopni występuje "wybrzuszenie" krzywej indukcyjności. Związane jest to ze skupianiem się strumienia magnetycznego, gdy biegun stojana i biegun wirnika są w linii prostej (współosiowo). Wyznaczając pochodną indukcyjności w funkcji kąta obrotu dla kolejnych wysokości bieguna wirnika na rysunku 5 przedstawiono wpływ wysokości h_r na pochodną indukcyjności odpowiednio dla uzwojenia jednej fazy - linia ciągła i dwóch uzwojeń faz połączonych szeregowo - linia kreskowana.

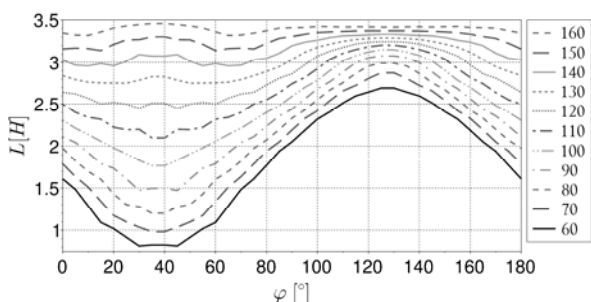


Rys.5. Pochodna indukcyjności w funkcji wysokości bieguna wirnika

Na podstawie rysunku 5 można stwierdzić, że optymalna wysokość h_r dla uzwojenia jednej fazy wynosi 5 mm natomiast dla uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo wynosi 6 mm. Należy także zauważyć, że pochodna indukcyjności w funkcji kąta obrotu jest około 4 razy większa dla połączonych uzwojeń dwóch faz szeregowo w porównaniu z uzwojeniem jednej fazy. Z tego powodu do określenia szerokości kąta łuku bieguna wirnika, wysokość h_r przyjęto 6 mm. Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono charakterystyki indukcyjności w funkcji kąta obrotu odpowiednio dla uzwojenia jednej fazy i uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo dla kąta łuku bieguna wirnika w zakresie od 60 stopni do 160 stopni.



Rys.6. Charakterystyka indukcyjności w funkcji kąta obrotu uzwojenia jednej fazy

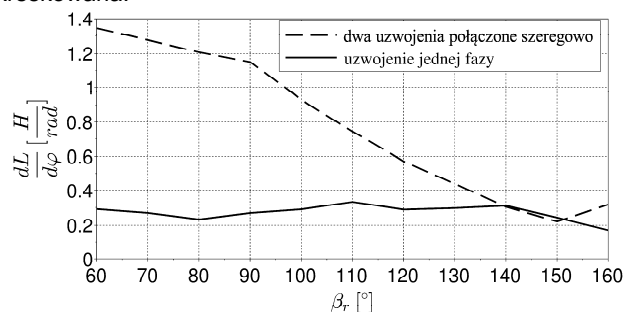


Rys.7. Charakterystyka indukcyjności w funkcji kąta obrotu uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo

Na rysunku 6 można rozróżnić dwie charakterystyczne części. Pierwsza część w zakresie kąta obrotu od 20 do 80 stopni, dla której pochodna indukcyjności w funkcji kąta obrotu wzrasta wraz ze zwiększeniem szerokości kąta łuku bieguna wirnika. Druga część w zakresie kąta obrotu od 80 do 160 stopni gdzie pochodna indukcyjności w funkcji kąta obrotu maleje wraz ze zwiększeniem szerokości kąta łuku bieguna wirnika. Związane jest to ze skupianiem się strumienia magnetycznego, gdy biegun stojana i biegun wirnika są w linii prostej (współosiowo).

Największą wartość amplitudy zarówno dla jednej fazy jak i dwóch faz połączonych szeregowo uzyskano dla kąta łuku bieguna stojana 160 stopni. Na rysunku 8 przedstawiono wpływ kąta łuku bieguna wirnika na pochodną indukcyjności w funkcji kąta obrotu wirnika odpowiednio dla uzwojenia jednej fazy - linia ciągła

i uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo - linia kreskowana.



Rys.8. Pochodna indukcyjności w funkcji szerokości kąta łuku bieguna wirnika

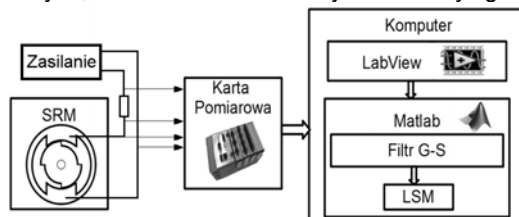
Optymalny kąt łuku bieguna wirnika dla uzwojenia jednej fazy na podstawie rysunku 8 wynosi 110 stopni. Dla uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo wynosi on 60 stopni. Zgodnie z rysunkiem 1 zarówno optymalna szerokość kąta łuku bieguna wirnika dla uzwojenia jednej fazy jak i dla uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo znajduje się w wymaganym przedziale.

Analiza wymiarów wirnika metodą pomiarową

Dla sprawdzenia, jak zmienia się indukcyjność stojana w zależności od kąta obrotu wirnika trójfazowego silnika reluktancyjnego dla różnych kątów łuku bieguna wirnika przeprowadzono identyfikację parametrów w funkcji kąta obrotu wirnika zasilając uzwojenia napięciem przemiennym o częstotliwościach 50Hz. W celu określenia parametrów elektrycznych modelu przełączalnego silnika reluktancyjnego w zależności od kąta obrotu przeprowadzono pomiary w stanie statycznym ($\omega=0$). Badania przeprowadzono wykorzystując karty pomiarowe National Instruments oraz programy LabView i Matlab – Simulink. Mierzono prąd i napięcie uzwojenia silnika w funkcji kąta obrotu. Pomiary przeprowadzono dla modelu uwzględniającego straty, w postaci [10]:

$$(9) \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{F1} \\ M_{21} & L_{22} & M_{23} & M_{F2} \\ M_{31} & M_{32} & L_{33} & M_{F3} \\ M_{1F} & M_{2F} & M_{3F} & L_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{I}_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Schemat blokowy układu wyznaczenia parametrów silnika przedstawiono na rysunku 9. W celu wyznaczenia poszczególnych parametrów silnika wykorzystano wartości chwilowe napięcia zasilającego układ pomiarowy U_i oraz prądu I_i płynącego w zasilanym uzwojeniu. 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 [10].

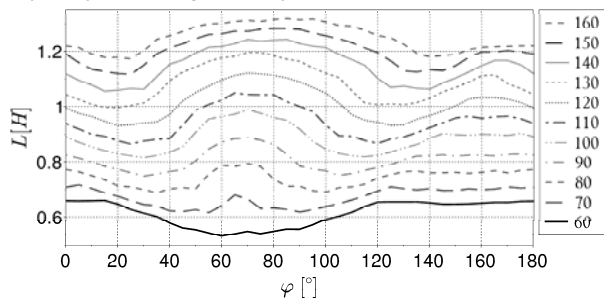


Rys.9. Schemat blokowy układu pomiaru parametrów silnika reluktancyjnego

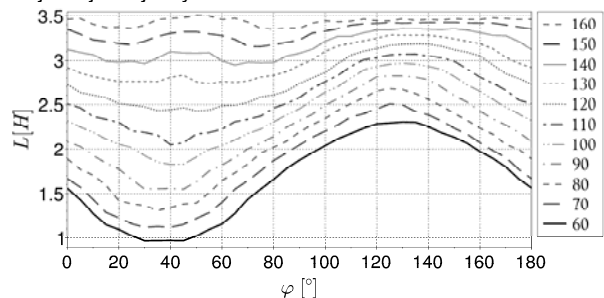
Dla uzwojenia zasilanego napięciem U_1 , przez które płynie prąd I_1 z równania:

$$(7) \quad L\dot{I}_1 + R_{z1}I_1 = U_1$$

wyznaczono wartości indukcyjności oraz rezystancji zastępczej wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów. Mierząc, co 5 stopni prąd i napięcia na uzwojeniach silnika oraz określając pochodną prądu po czasie, wyznaczono charakterystyki indukcyjności zastępczej w funkcji kąta obrotu dla zasilanego uzwojenia jednej fazy – rysunek 10 i dla uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo – rysunek 11.

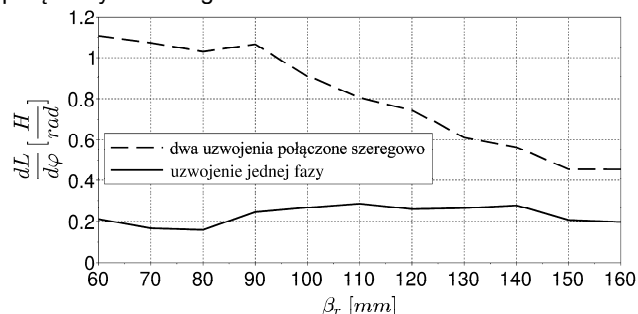


Rys.10. Charakterystyka indukcyjności w funkcji kąta obrotu uzwojenia jednej fazy



Rys.11. Charakterystyka indukcyjności w funkcji kąta obrotu uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo

Otrzymane charakterystyki indukcyjności w funkcji kąta obrotu zarówno dla uzwojenia jednej fazy jak i dla uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo na rysunkach 10 i 11 są bardzo podobne do charakterystyk uzyskanych metodą elementów skończonych na rysunkach 6 i 7. Różnica między wartościami mierzonymi a uzyskanymi w symulacji wynosi do 10%. Na rysunku 12 przedstawiono wpływ szerokości kąta łuku bieguna wirnika na pochodną indukcyjności w funkcji kąta obrotu wirnika odpowiednio dla uzwojenia jednej fazy - linia ciągła i uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo - linia kreskowana.



Rys.12. Pochodna indukcyjności w funkcji szerokości kąta łuku bieguna wirnika

Optymalny kąt łuku bieguna wirnika dla uzwojenia jednej fazy na rysunku 12 tak jak na rysunku 8 wynosi 110 stopni. Dla uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo wynosi on

60 stopni. Pochodna indukcyjności w funkcji kąta obrotu dla uzwojenia jednej fazy w przedziale szerokości bieguna wirnika od 100 do 140 stopni zmienia się niewiele. Decydujący wpływ na szerokość bieguna wirnika ma pochodna indukcyjności dla uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo. Dlatego szerokość kąta łuku bieguna wirnika należy przyjąć 60-70 stopni.

Podczas pomiaru parametrów identyfikowano także rezystancję w funkcji kąta obrotu wirnika. Na rysunku 13 i 14 przedstawiono zmierzoną rezystancję dla uzwojenia jednej fazy i dla uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo.

Wnioski

Szerokość bieguna wirnika ma istotny wpływ na pochodną indukcyjności w funkcji kąta obrotu wirnika. W zależności od połączenia uzwojeń stojana wartość szerokości bieguna wirnika powinna wynosić 110 stopni dla uzwojenia jednej fazy i 60-70 stopni dla uzwojeń dwóch faz połączonych szeregowo. Znaczący wpływ na te wartości mają straty magnetyczne w silniku. Dlatego w celu ograniczenia strat, szerokość kąta łuku bieguna wirnika powinna być możliwie mała. Duży wpływ na pochodną indukcyjności ma także wysokość bieguna wirnika. Wysokość ta powinna być na tyle duża, aby zapewnić swobodny przepływ pola magnetycznego przez rdzeń, a z drugiej strony na tyle mała, aby niepotrzebnie rozpraszać pole magnetyczne

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

LITERATURA

- [1] Wilamowski B. M., Irwin J., Power electronics and motor drivers, CRC Press LLC, 2011
- [2] Tataru A.-M., Shark -new motor design concept for energy saving- applied to Switched Reluctance Motor, Institute of Energy Technology, Aalborg University, 2004
- [3] Siadatan A., Afjei E., Toulabi M.S., A New Hybrid Two Phase Switched Reluctance Motor/Generator, Power Electronics and Applications, EPE, 2009
- [4] Amged El-Wakeel, Said A. Gawish, M. A. L. Badr, Systematic design procedure of Switched Reluctance motors, ICEENG 1999
- [5] Sakthivel P., Chandrasekar V., Arumugam R., Design Of A 250w, Low Speed Switched Reluctance Hub Motor For Two Wheelers, IEEE 2011
- [6] Rafajdus P., Zrak I, Hrabovcova V. Analysis of the switched reluctance motor (srm) parameters, journal of electrical engineering, Vol. 55, NO. 7-8, 2004
- [7] 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
- [8] Dąbrowski M., Konstrukcja maszyn elektrycznych, WNT, Warszawa 1965
- [9] Torsten Wichert, Design and Construction Modifications of Switched Reluctance Machines, Warszawa 2008
- [10] Wciślik M., Suchenia K., Core losses model of switched reluctance motor, 2015 Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), 2015