

Mirosław Wciślik, Karol Suchenia
Politechnika Świętokrzyska, Kielce

STRATY MOCY PRZEŁĄCZALNEGO SILNIKA RELUKTANCYJNEGO

POWER LOSSES OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Streszczenie: W pracy przeprowadzono analizę modelu strat mocy w przełączalnym silniku reluktancyjnym (SR). W tym celu zbudowano stanowisko wykorzystujące system do badania zgodności CTS Proflin 2100. Pomiary przeprowadzono dla silnika jednofazowego z jedną parą biegunów stojana i wirnika oraz dla silnika trójfazowego wykorzystującego stojan silnika indukcyjnego i wirnika z jedną parą biegunów. Na podstawie pomiarów przeprowadzono analizę modelu strat w żelazie jako funkcji kąta obrotu wirnika. Przyjęto, że straty w żelazie modelowane są jako straty w dodatkowym uzwojeniu. Przeprowadzono analizę relacji między indukcyjnością i rezystancją zastępczą silnika, zmierzoną dla przyjętego modelu. Badania jednofazowego SR przeprowadzono dla wirników wykonanych z blach oraz z litej stali. Badania trójfazowego SR przeprowadzono dla wirników wykonanych z kompozytów, blach elektrotechnicznych, ferrytu i litej stali miękkiej. Przedstawiono i porównano otrzymane charakterystyki indukcyjności i strat w funkcji kąta obrotu dla danych materiałów. Zależność rezystancji i indukcyjności silnika wyznaczano eksperymentalnie zasilając uzwojenia napięciem przemiennym 50Hz.

Abstract: The paper deals with the analysis of the power losses in the switched reluctance motor (SR). To identify the parameters the test bench containing the compliance testing system CTS Proflin 2100 was used. For a single-phase motor with one pair of stator and rotor poles, as well as for three-phase motor using the stator of the induction motor and the rotor with one pair of poles of the measurements were carried out. Based on measurements, analysis of the iron losses was performed. These losses depend on the rotation angle of the rotor. Model of iron losses taken as losses in the additional winding. Analysis of the relationship between the equivalent inductance and resistance of the motor measured and specified for the model was carried out. The study of single-phase SR for rotors made of magnetic steel sheets and solid steel was carried out. The three-phase SR was studied for rotors made of composites, magnetic steel sheets, solid steel and ferrite. The dependence of inductance and losses in function of the rotation angle for these materials are presented and compared. The identification of the motor electric parameters as a function of the rotation angle of the rotor was carried out using AC 50 Hz voltage source.

Słowa kluczowe: *przełączalny silnik reluktancyjny, straty w żelazie, identyfikacja*
Keywords: *switched reluctance motor, iron losses, identification*

1. Wstęp

Silniki elektryczne wykorzystują 70% energii elektrycznej zużywanej przez przemysł [1]. W całej gospodarce zużywają one prawie połowę energii elektrycznej wytworzonej przez elektrownie. Czynnikiem decydującym o zużyciu energii przez silnik są m.in. straty, które rzutują na wysokość rachunków płaconych przez użytkowników.

Straty energii w silniku dzielą się na straty mocy: w miedzi, w rdzeniu oraz mechaniczne. W [2-3] wprowadzono również straty dodatkowe, które związane są ze zjawiskiem naskórkowości oraz wysoką częstotliwością. Mają one jednak małe znaczenie podczas eksploatacji silnika elektrycznego, a ich oszacowanie jest trudne na podstawie bezpośrednich pomiarów lub obliczeń.

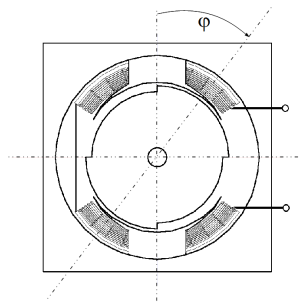
W większości przypadków straty w miedzi są najczęściej dominującym czynnikiem spadku sprawności silnika elektrycznego. Straty w miedzi opisuje moc tracona przy przepływie prądu przez uzwojenie silnika. Straty magnetyczne interpretowane są jako suma strat prądów wirowych (straty wiropądowe) i strat histerezy. Dla silników wysokoobrotowych, straty wiropądowe są dominujące.

Pierwsze próby opisu strat magnetycznych koncentrowały się na formułowaniu opisu matematycznego strat mocy w rdzeniu. Metodę obliczania tych strat zaproponował Steinmetz już w 1891 roku [4]. W celu dokładniejszego określenia strat magnetycznych na przestrzeni lat powstawały zależności opisujące straty w rdzeniu, które były modyfikacją równań

Steinmetza [5-6]. Równania te pozwalały na obliczenie strat mocy w silniku, jako zależnych od indukcji magnetycznej. Inne metody skupiały się na rozwoju nowych procedur testowania materiałów, które ułatwiały dokładny opis właściwości materiału magnetycznego do wyrażenia strat rdzenia w równaniach ruchu [6]. Jednak dokładne wyznaczanie strat w rdzeniu pozostaje trudne z wielu powodów np. przez wpływ odkształceń i naprężeń mechanicznych zarówno wewnątrz materiału i na jego powierzchni [6]. Dlatego przeprowadzono analizę eksperymentalną strat mocy w przełączalnym silniku reluktancyjnym jednofazowym i trójfazowym.

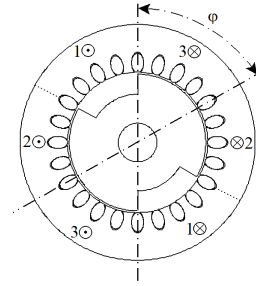
2. Identyfikacja parametrów elektrycznych silnika reluktancyjnego

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. Do identyfikacji parametrów zbudowano stanowisko badawcze zawierające jednofazowy SR o jednej parze biegunów stojana i wirnika - rysunek 1 oraz trójfazowy SR wykorzystujący stojan silnika indukcyjnego o trzech utajonych biegunach stojana i dwóch wydających biegunach wirnika - rysunek 2.



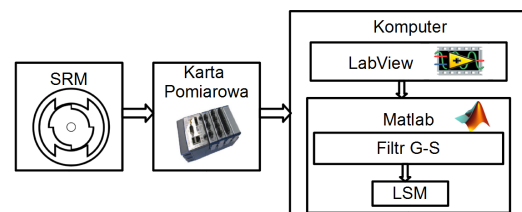
Rys. 1. Schemat poglądowy analizowanego silnika reluktancyjnego 2/2

Dla sprawdzenia, jak zmienia się indukcyjność i rezystancja stojana w zależności od kąta obrotu wirnika jednofazowego silnika reluktancyjnego przeprowadzono identyfikację tych parametrów w funkcji kąta obrotu wirnika zasilając uzwojenia napięciem przemiennym o częstotliwości 50Hz. Schemat blokowy układu do wyznaczenia parametrów silnika przedstawiono na rysunku 3.



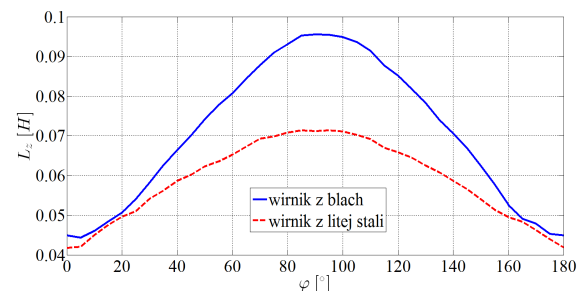
Rys. 2. Schemat poglądowy analizowanego silnika reluktancyjnego 3/2

Wartości napięcia, prądu i kąta obrotu przełączalnego silnika reluktancyjnego odczytywano jednocześnie korzystając z kart pomiarowych NI 9225 i NI 6216 firmy National Instruments. Karty obsługiwane były przez aplikacje programu LabView. Wyniki pomiarów zapisywano w pliku tekstowym. Następnie, pliki z danymi wczytywano do programu Matlab i przetwarzano za pomocą filtru Golaya - Savitzky'ego w celu wyznaczenia pochodnych prądu i wyeliminowania zakłóceń [7].

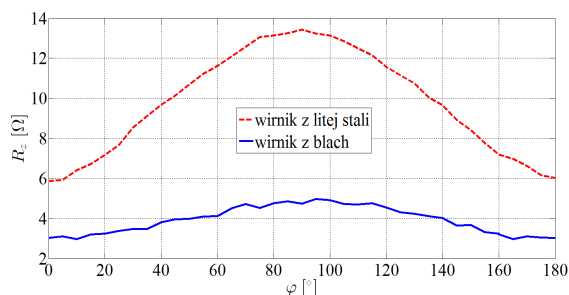


Rys. 3. Schemat blokowy układu pomiaru parametrów silnika reluktancyjnego

Wykorzystując metodą najmniejszych kwadratów obliczono parametry schematu zastępczego silnika reluktancyjnego. Mierząc, co 5 stopni prąd i napięcie na uzwojeniu silnika oraz określając pochodną prądu po czasie, wyznaczono charakterystyki indukcyjności w funkcji kąta obrotu – rysunek 4 oraz charakterystyki rezystancji w funkcji kąta obrotu – rysunek 5 dla jednofazowego SR.



Rys. 4. Zależność indukcyjności w funkcji kąta obrotu dla prądu stojana dla wirnika wykonanego z blach i z litej stali



Rys. 5. Zależność rezystancji w funkcji kąta obrotu dla prądu stojana dla wirnika wykonanego z blach i z litej stali

Na rysunku 3 i rysunku 4 linią ciągłą przedstawiono charakterystykę indukcyjności i rezystancji dla wirnika wykonanego z blach, a linią przerywaną charakterystykę indukcyjności i rezystancji dla wirnika wykonanego z litej stali.

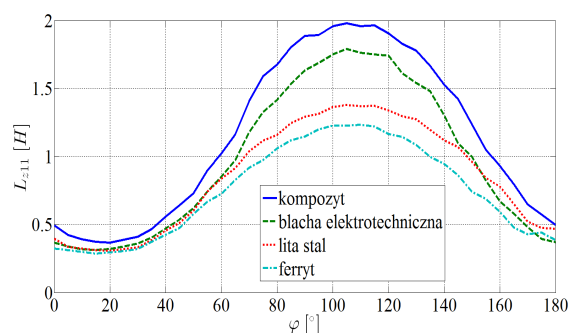
Zmiana indukcyjności względem kąta obrotu wynika ze zmieniającej się reluktancji. Dominujący wpływ na reluktancję ma szerokość nachodzenia biegunów stojana i wirnika. Im większa jest szerokość nachodzenia między biegunem stojana i biegunem wirnika tym większa jest indukcyjność. Wpływ na indukcyjność ma także materiał i wykonanie silnika. Amplituda indukcyjności silnika jest około dwukrotnie większa dla silnika z wykorzystaniem wirnika z blach od silnika z użyciem wirnika z litej stali – rysunek 4.

Na podstawie rysunku 5 można stwierdzić, że rezystancja stojana zmienia swoją wartość wraz z kątem obrotu, podobnie jak indukcyjność. Związane jest to z kątem nachodzenia biegunów stojana i wirnika. Przyjmowanie, że rezystancja jest stała stanowi zbyt uproszczenie. Rezystancja uzwojenia silnika dla prądu stałego wynosi 2,4 Ω. Natomiast przy zasilaniu napięciem przemiennym 50 Hz na zaciskach uzwojenia widziana jest wartość około dwukrotnie większa dla wirnika wykonanego z blach. Dla silnika z wirnikiem z litej stali rezystancja ta jest ponad pięciokrotnie większa. Tak duża zmiana rezystancji może być spowodowana przez wzrost prądów wirowych płynących w wirniku.

Wykorzystując procedurę pomiarową dla SR trójfazowego jak dla jednofazowego wykonano pomiary dla wirników wykonanych z: blachy elektrotechnicznej o grubości 0.2 mm, kompozytu magnetycznie miękkiego typu somaloy 500 klejonego szkłem, rdzenia ferrytowego typu sendust oraz litej stali miękkiej. Dla każ-

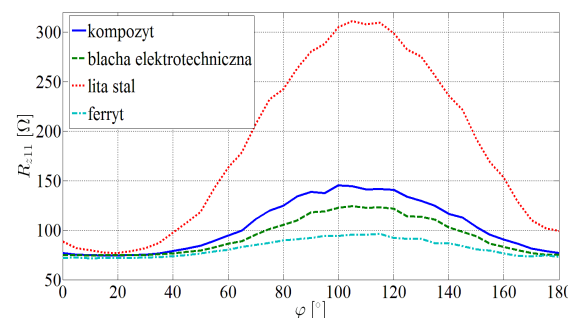
dego rodzaju wirnika pomiary były wykonane dla tego samego napięcia zasilającego. Każdy wirnik posiadał takie same parametry konstrukcyjne o szerokości biegunów 140 stopni.

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono odpowiednio charakterystyki indukcyjności zastępczej w funkcji kąta obrotu i charakterystyki rezystancji zastępczej w funkcji kąta obrotu dla zasilanego jednego uzwojenia.



Rys. 6. Indukcyjność zastępcza L_{z11} jednej fazy

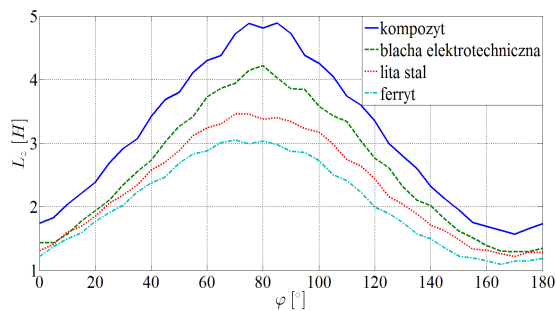
Na podstawie rysunku 6 można stwierdzić, że najkorzystniejszy przebieg indukcyjności występuje dla wirnika wykonanego z kompozytu magnetycznie miękkiego. Niewiele się on różni od przebiegu dla wirnika wykonanego z blach elektrotechnicznych. Różnica indukcyjności między tymi wirnikami wynosi około 10%. Największą różnicę przebiegu indukcyjności wynoszącą około 50% można zaobserwować pomiędzy wirnikiem wykonanym z kompozytu magnetycznie miękkiego i wirnikiem wykonanym z ferrytu.



Rys. 7. Rezystancja zastępcza R_{z11} jednej fazy

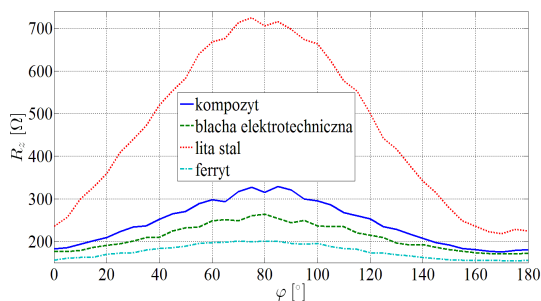
Z rysunku 7 wynika, że największą rezystancję strat ma wirnik wykonany z litej stali. Straty te mają związek z występowaniem dużych prądów wirowych w rdzeniu. Najmniejszymi stratami charakteryzuje się wirnik wykonany z ferrytu. Niestety dość duże straty posiada wirnik wykonany z kompozytu magnetycznie miękkiego. Są one większe od strat w wirniku wykonanym z blach elektrotechnicznych nawet o 15%. Dla-

tego też ze względu na sprawność silnika należałoby wykonać wirnik z bardzo cienkich blach elektrotechnicznych. Następnie połączono dwa uzwojenia szeregowo i wykonano pomiary i obliczenia w identyczny sposób jak dla zasilanego pojedynczego uzwojenia. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono odpowiednio charakterystyki indukcyjności zastępczej w funkcji kąta obrotu i charakterystyki rezystancji zastępczej w funkcji kąta obrotu dla zasilonych dwóch uzwojeń.



Rys. 8. Indukcyjność zastępcza L_z dwóch uzwojeń połączonych szeregowo

Podobnie jak dla wyznaczonej indukcyjności zastępczej dla jednego uzwojenia z rysunku 6 tak i dla dwóch uzwojeń połączonych szeregowo z rysunku 8 najlepsze właściwości magnetyczne ma wirnik wykonany z kompozytu magnetycznie miękkiego. Jednak różnica amplitudy między wirnikiem wykonanym z blach elektrotechnicznych wynosi tylko 8%. Natomiast różnica między rezystancją zastępczą dla tych wirników z rysunku 9 wynosi około 20%. Wynika z tego, że wraz ze wzrostem indukcyjności korzystniejsze jest wykorzystywanie bardzo cienkich blach elektrotechnicznych nie tylko ze względu na mniejsze straty, ale także ze względu na koszty produkcji.



Rys. 9. Rezystancja zastępcza R_z dwóch uzwojeń połączonych szeregowo

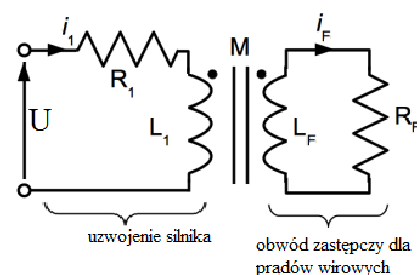
Na podstawie przedstawionych charakterystyk indukcyjności i rezystancji na rysunkach od 4 do 9 można stwierdzić, że rezystancja zastępcza

jest proporcjonalna do indukcyjności zastępczej.

3. Modelowanie strat przełączalnego silnika reluktancyjnego

Stalowy rdzeń magnetyczny silnika reluktancyjnego cechuje przewodzenie prądu w przekroju prostopadłym do wektora indukcji. Dlatego wraz ze zmianą czasową strumienia magnetycznego powstają w rdzeniu prądy wirowe. Rdzeń magnetyczny silnika elektrycznego zbudowany z litego żelaza zachowuje się jak zwarty zwój i płyną duże prądy wirowe. Gdy indukcja jest stała w całym przekroju prądy te płyną przy powierzchni bocznej rdzenia. Zamiana litego rdzenia na rdzeń składający się z izolowanych blach powoduje zwiększenie drogi przepływu prądów, czyli zwiększenie rezystancji. W efekcie następuje zmniejszenie prądów oraz strat w rdzeniu.

Dla równomiernego rozkładu strumienia po powierzchni rdzenia prądy wirowe występujące w rdzeniu złożonym z izolowanych blach będą występować tylko na krawędziach blach pakietu. W wyniku wzrasta rezystancja i następuje redukcja wpływu prądów na brzegach blach rdzenia. Modele matematyczne silników elektrycznych składają się z równań opisujących obwody elektryczne oraz układ mechaniczny. Równania spotykane w literaturze, opisujące przełączalny silnik reluktancyjny nie uwzględniają jawnie strat w modelu matematycznym. Są one ukryte w rezystancji obwodu. W [8] można spotkać obwód zastępczy uwzględniający straty prądów wirowych – rysunek 10.



Rys. 10. Model analityczny strat prądów wirowych [8]

Model przedstawiony na rysunku przedstawia uzwojenie silnika reluktancyjnego o rezystancji R_{11} i indukcyjności L_{11} o z liczbie zwojów po stronie pierwotnej, a po stronie wtórnej występuje uzwojenie reprezentujące straty w żelazie, posiadający rezystancję R_F i indukcyjność L_F .

Przyjęto, że uzwojenie reprezentujące prądy wirowe jest pojedynczym zwojem. Uzwojenie strat w żelazie jest sprzężone magnetycznie z indukcyjnością uzwojenia silnika. Uzwojenie strat w żelazie obciążone jest rezystancją R_F zależną od budowy rdzenia i własności materiału, z którego jest on wykonany. Równania opisujące model jednofazowego silnika reluktancyjnego są w postaci:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & M_{1F} \\ M_{F1} & L_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{11} & 0 \\ 0 & R_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie: L_{11} – indukcyjność własna silnika, M_{1F} , M_{F1} – indukcyjność wzajemna uzwojenia reprezentującego straty mocy w wirniku, R_F – rezystancja odwzorowująca straty mocy w wirniku, U – napięcie zasilające uzwojenia silnika

Dla trójfazowego silnika reluktancyjnego o rezystancjach uzwojenia R_{nn} i indukcyjnościach L_{nn} o z liczbie zwojów po stronie pierwotnej, gdzie uzwojenie strat w żelazie jest sprzężone magnetycznie z indukcyjnościami trzech faz stojana, postać macierzowa opisująca model przedstawiony na rysunku 9 jest w postaci:

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

gdzie: L_{nn} – indukcyjności własne uzwojeń silnika w funkcji kąta obrotu, M_{nm} – indukcyjności wzajemne stojana w funkcji kąta obrotu, M_{Fn} – indukcyjności wzajemne strat w funkcji kąta obrotu, R_{nn} – rezystancja uzwojeń silnika w funkcji kąta obrotu, $n, m = 1, 2, 3$.

Prądy I_1 , I_2 , I_3 płynące przez uzwojenia silnika są prądami, które w łatwy sposób można zmierzyć. Niemożliwy jest natomiast pomiar prądu I_F płynącego w rdzeniu silnika. Dla tak przyjętego modelu matematycznego prąd ten będzie występował w równaniach opisujących każdą fazę silnika. Dla zasilonej jedynie pierwszej fazy silnika równania są w postaci:

$$\begin{aligned} L_{11}\dot{I}_1 + M_{F1}\dot{I}_F + R_{11}I_1 &= U_1 \\ M_{21}\dot{I}_1 + M_{F2}\dot{I}_F &= U_{12} \\ M_{31}\dot{I}_1 + M_{F3}\dot{I}_F &= U_{13} \\ M_{1F}\dot{I}_1 + L_F\dot{I}_F + R_F I_F &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Korzystając z transformaty Fouriera oraz eliminując z równań opisujących uzwojenie stojana prąd rdzenia I_F , wyznaczono zastępcze równania opisujące silnik:

$$\left(j\omega \left(L_{11} - \frac{L_F M_{1F}^2 \omega^2}{R_F^2 + \omega^2 L_F^2} \right) + R_{11} + \frac{R_F M_{1F}^2 \omega^2}{R_F^2 + \omega^2 L_F^2} \right) I_1 = U_1 \quad (4)$$

$$\left(j\omega \left(M_{21} - \frac{L_F \omega^2 M_{F2} M_{1F}}{R_F^2 + \omega^2 L_F^2} \right) + \frac{R_F \omega^2 M_{F2} M_{1F}}{R_F^2 + \omega^2 L_F^2} \right) I_1 = U_{12} \quad (5)$$

$$\left(j\omega \left(M_{31} - \frac{L_F \omega^2 M_{F3} M_{1F}}{R_F^2 + \omega^2 L_F^2} \right) + \frac{R_F \omega^2 M_{F3} M_{1F}}{R_F^2 + \omega^2 L_F^2} \right) I_1 = U_{13} \quad (6)$$

gdzie U_1 jest napięciem na zasilanym uzwojeniu, U_{12} i U_{13} napięciem indukowanym na uzwojeniach niezasilonych. Na podstawie równania (4) wyznaczono zastępczą indukcyjność własną L_{z11} i zastępczą rezystancję R_{z11} zasilanego obwodu w postaci:

$$R_{z11} = R_{11} + \frac{R_F M_{1F}^2 \omega^2}{R_F^2 + \omega^2 L_F^2} \quad (7)$$

$$L_{z11} = L_{11} - \frac{L_F M_{1F}^2 \omega^2}{R_F^2 + \omega^2 L_F^2} \quad (8)$$

Z powyższych zależności wynika, że indukcyjność zastępcza w odniesieniu do uzwojenia silnika jest pomniejszona o straty w rdzeniu, natomiast rezystancja zastępcza wyznaczona na podstawie pomiarów jest zwiększona o straty w rdzeniu. Indukcyjności zastępcze wzajemne M_{z21} i M_{z31} oraz rezystancje dodatkowe R_{z21} i R_{z31} mierzone na zaciskach uzwojeń niezasilonych są w postaci:

$$M_{z21} = M_{21} - \frac{L_F \omega^2 M_{F2} M_{1F}}{R_F^2 + \omega^2 L_F^2} \quad (9)$$

$$M_{z31} = M_{31} - \frac{L_F \omega^2 M_{F3} M_{1F}}{R_F^2 + \omega^2 L_F^2}$$

$$R_{z21} = \frac{R_F \omega^2 M_{F2} M_{1F}}{R_F^2 + \omega^2 L_F^2} \quad (10)$$

$$R_{z31} = \frac{R_F \omega^2 M_{F3} M_{1F}}{R_F^2 + \omega^2 L_F^2}$$

Należy zauważyć, że na zaciskach uzwojeń niezasilonych widoczna jest rezystancja, powstała na skutek przepływającego prądu w rdzeniu silnika. Przedstawiony model strat w SR, w którym mierzone parametry zastępcze silnika są funkcją kąta obrotu wirnika. Na podstawie równań 7-10 parametrem decydującym o stratach w żelazie dla $\omega=const.$ jest rezystancja żelaza R_F . Im jest ona większa tym mniejsze są straty w rdzeniu. Podczas pomiarów mierzona rezystancja zastępcza R_{z11} jest sumą strat w miedzi i strat w żelazie.

4. Wnioski

W przełączalnym silniku reluktancyjnym na sprawność największy wpływ mają straty w rdzeniu. Dopiero na drugim miejscu są straty miedzi. Na straty w rdzeniu decydujący wpływ ma rezystancja materiału, z którego wykonany jest wirnik silnika. Z przeprowadzonych badań wynika, że najmniejsze straty posiada wirnik wykonany z ferrytu, jednak charakteryzuje się on najmniejszą indukcyjnością. Na podstawie porównania amplitudy indukcyjności zastępczych oraz rezystancji zastępczych dla mierzonych wirników, najlepszym rozwiązaniem jest użycie wirnika wykonanego z cienkich blach elektrotechnicznych. Jest to rozwiązanie lepsze oaz tańsze.

Straty magnetyczne w rdzeniu widoczne są w przebiegach napięć indukowanych na niezasilonych uzwojeniach.

5. Literatura

[1]. Brzoza-Brzezina K.: Elektryczne silniki energooszczędne – aspekty ekonomiczne stosowania, Krajowa Agencja Poszanowania Energii S.A, 2008.

[2]. Raulin V., Radun A., Husain E.: Modeling of Losses in Switched Reluctance Machines, IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 40, NO. 6, 2004.

[3]. Jianing Lin: External – rotor 6/10 switched reluctance motor for an electric bicycle, Hamilton, Ontario, Canada, 2013.

[4]. Wichert T.: Design and Construction Modifications of Switched Reluctance Machines, Warsaw, 2008.

[5]. Dziewoński E.: Poradnik materiałoznawstwa elektrycznego, rozdział XII, Pomiar magnetyczne, J. Kuryłowicz, Warszawa 1959.

[6]. Hanselman D. Brushless Permanent Magnet Motor Design, Magma Physics Publishing, USA, 2006.

[7]. M. Wciślik, K. Suchenia, Core losses model of switched reluctance motor, Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), 2015.

[8]. Ishikawa H., Uraji M., Naitoh H., A New Current Control for Eddy Current Loss Reduction of Switched Reluctance Motors, COMPEL 2013.

Autorzy

Mirosław Wciślik, Karol Suchenia
Politechnika Świętokrzyska
Zakład Urządzeń i Systemów Automatyki
al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
25-314 Kielce
mwcislik@tu.kielce.pl
ksuchenia@tu.kielce.pl

Informacje dodatkowe

Autorzy składają wyrazy podziękowania Pani Profesor Barbarze Ślusarek za umożliwienie przeprowadzenia badań dla wirników wykonanych z kompozytowych materiałów magnetycznych.