

Mariusz Korkosz, Jan Mróz
Politechnika Rzeszowska

WPLYW PARAMETRÓW MATERIAŁU MAGNETYCZNEGO NA WŁAŚCIWOŚCI SILNIKA RELUKTANCYJNEGO PRZEŁĄCZALNEGO

THE INFLUENCE OF MAGNETIC MATERIAL PARAMETERS ON PROPERTIES OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Streszczenie: W przypadku wysokoobrotowego silnika reluktancyjnego przełączalnego należy zwracać uwagę na straty w rdzeniu. Z uwagi na duże wartości częstotliwości komutacji prądów powstające straty w obwodzie magnetycznym silnika mogą stać się stratami dominującymi. Powodują one nie tylko zmniejszanie mocy na wale silnika, pogarszanie sprawności, ale również w sposób istotny podnoszą temperaturę rdzenia stojana i narażają izolację uzwojeń. Na etapie projektowania silnika należy zatem zwracać szczególną uwagę na ograniczanie strat w rdzeniu stojana. Są możliwe dwa sposoby ich ograniczania. Pierwszym z nich jest zastosowanie konstrukcji o jednej parze biegunów wirnika. Drugim jest stosowanie materiału magnetycznego o ograniczonych stratach w żelazie. W pracy dokonano porównania wpływu różnych blach magnetycznych na charakterystyki statyczne dwupasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego wyznaczone na bazie modelu polowego oraz na temperaturę jego głównych elementów obliczoną za pomocą modelu obwodowego. Zostały wyznaczone straty silnika w projektowanym punkcie pracy. Dokonano weryfikacji laboratoryjnej prototypowych rozwiązań.

Abstract: Core losses have a significant meaning in high-speed switched reluctance motor. Core losses can be dominant due to high frequency of currents commutation and they can cause not only decrease of mechanical power and decrease of efficiency but also can significantly increase temperature of stator core and can damage windings insulation. In the stage of motor design a special attention should be paid to reduce losses in stator core. The first way is to use a construction of motor with one pair of rotor poles, the second way is to use magnetic material with limited core losses. In the paper comparison of various magnetic sheets influence on static characteristics of two-phase switched reluctance motor was done based on field model and comparison of various magnetic sheets influence on temperature of main elements of motor was done based on circuit model. Core losses were determined in designed working point. Laboratory tests were conducted.

Słowa kluczowe: silnik reluktancyjny przełączalny, materiał magnetyczny, charakterystyki statyczne, temperatura

Keywords: switched reluctance motor, magnetic material, static characteristic, temperature

1. Wstęp

Silniki reluktancyjne przełączalne zaliczane są do grupy maszyn z komutacją elektroniczną w których układ energoelektroniczny pełni jednocześnie rolę komutatora elektronicznego [1]. Częstotliwość komutacji prądów pasmowych silnika powiązana jest z liczbą biegunów wirnika oraz prędkością obrotową. Oznacza to, że w przypadku napędów wysokoobrotowych częstotliwość komutacji prądów jest wielokrotnie większa niż częstotliwość napięcia sieciowego. Duża częstotliwość komutacji prądów pasmowych powoduje, że straty w żelazie mogą osiągać znaczne wartości. W niektórych przypadkach straty w rdzeniu mogą stać się stratami dominującymi. Istnieje tylko kilka metod które prowadzą do ograniczenia strat w żelazie. Zaliczyć do nich możemy sto-

sowanie minimalnej liczby biegunów wirnika ($2p=2$) [2], materiału magnetycznego o mniejszej stratności [3], obu sposobów jednocześnie [4] lub stosowanie podziału rdzenia stojana (E-Core) [5].

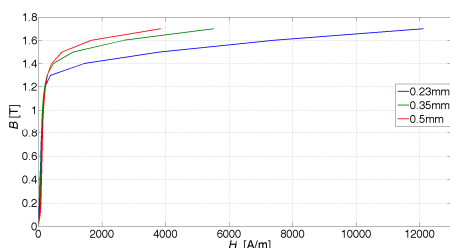
W pracy zamieszczono wyniki badań wysokoobrotowego silnika reluktancyjnego przełączalnego 4/2 w którym analizowano wpływ parametrów materiału magnetycznego na jego charakterystyki statyczne, parametry ruchowe oraz temperaturę jego głównych elementów uzyskane na bazie modelu symulacyjnego. W warunkach laboratoryjnych zostały wyznaczone momentowe charakterystyki statyczne oraz indukcyjność własna uzwojeń w funkcji położenia wirnika, dla silnika wykonanego z różnych materiałów magnetycznych. Dokonano również przykładowej rejestracji temperatury

głównych elementów silnika obciążonego momentem znamionowym pracującego przy stałych parametrach sterowania. Zamieszczono wnioski wpływu parametrów materiału magnetycznego na właściwości wysokoobrotowego silnika reluktancyjnego przełączalnego.

2. Blachy magnetyczne

Standardowo w maszynach elektrycznych zazwyczaj stosuje się typoszereg blach magnetycznych prądnicowych o grubości 0.5 mm których parametry magnetyczne nie różnią się w sposób istotny od siebie. W przypadku konieczności ograniczania strat w żelazie można stosować blachy prądnicowe o grubości 0.35 mm. W rdzeniach transformatorów czy też dławikach są stosowane blachy transformatorowe np. o grubości 0.23 mm. Są to jednak blachy anizotropowe które posiadają dominujący kierunek magnetyczny. Z tego też powodu nie są one zazwyczaj stosowane w budowie obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych. W pracach [6-7] zaprezentowano wyniki badań w których przedstawiono możliwość zastosowania blach anizotropowych w budowie obwodów magnetycznych maszyny. Zastosowanie blachy transformatorowej i jej odpowiednie ułożenie pozwala uzyskać obwód magnetyczny który praktycznie nie wykazuje zjawiska anizotropowości co wykazano w pracy [7].

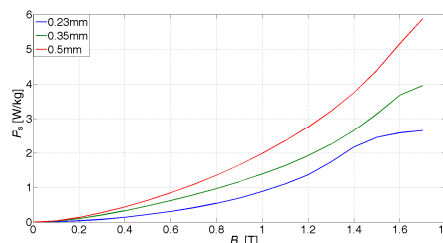
Na rysunku 1 pokazano przykładowe charakterystyki $B=f(H)$ typowych blach o grubościach 0.23 mm, 0.35 mm i 0.5 mm.



Rys.1. Zależność $B=f(H)$ typowych blach o grubościach 0.23 mm, 0.35 mm i 0.5 mm

W przypadku blachy o grubości 0.23 mm zamieszczona charakterystyka magnesowania jest wyznaczona na podstawie charakterystyk $B=f(H)$ kierunku dominującego oraz o najmniejkorzystniejszych właściwościach magnetycznych. Stosowanie coraz grubszej blachy wymaga coraz to mniejszego natężenia pola do uzyskania określonej wartości indukcji. Z

punktu widzenia uzyskania określonej wartości indukcji stosowanie grubszej blachy jest korzystniejsze. Drugim parametrem który charakteryzuje materiał stosowany w budowie obwodów magnetycznych jest stratność blachy. Na rysunku 2 pokazano zależność stratności blachy P_s w funkcji indukcji magnetycznej B typowych blach o grubościach 0.23 mm, 0.35 mm i 0.5 mm uzyskane przy częstotliwości 50Hz.

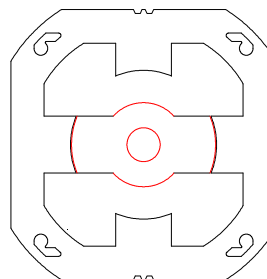


Rys.2. Zależność $P_s=f(B)$ typowych blach o grubościach 0.23 mm, 0.35 mm i 0.5 mm

Dla blachy o grubości 0.23 mm pokazana na rysunku 2 stratność jest obliczona na podstawie stratności kierunku dominującego oraz o najmniejkorzystniejszych właściwościach magnetycznych. Stosowanie cieńszej blachy w sposób istotny zmniejsza jej stratność. Różnice będą się jeszcze powiększały wraz ze wzrostem częstotliwości jej przemagnesowywania.

3. Badany silnik reluktancyjny przełączalny

Obiektem badań jest dwupasmowy silnik reluktancyjny przełączalny 4/2 przeznaczony do napędu wysokoobrotowego. Wymagany punkt pracy silnika został określony przy prędkości $n_N=45000$ obr/min i mocy na wale nie mniejszej niż 700 W. Na rysunku 3 pokazano geometrię badanego silnika.



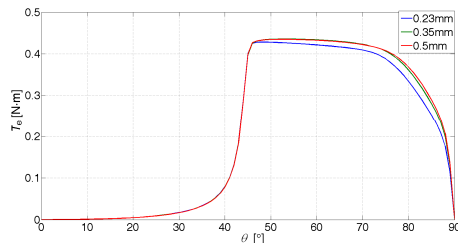
Rys.3. Geometria badanego dwupasmowego silnika reluktancyjnego przełączalnego

4. Obliczenia elektromagnetyczne

Wymagane parametry silnika zostały osiągnięte przy założeniu, że w obwodzie magnetycznym stojana i wirnika zostanie zastosowana

blacha o grubości 0.5 mm. Na bazie modelu polowego oraz polowo-obwodowego dokonano obliczeń numerycznych porównawczych w których zostały zaimplementowane charakterystyki magnesowania blach oraz stratności o grubościach 0.23 mm i 0.35 mm.

Na rysunku 4 pokazano zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji położenia wirnika θ wyznaczoną przy założeniu, że prąd wzbudzenia jednego z pasm wynosi $I=4$ A.

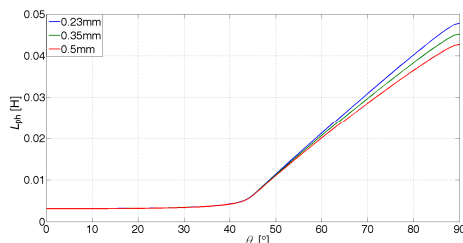


Rys. 4. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ

W przypadku zastosowania blachy magnetycznej o grubości 0.23 mm należy liczyć się z nieznacznym pogorszeniem charakterystyki momentowej. Natomiast różnice pomiędzy charakterystykami uzyskanymi dla blachy o grubości 0.35 mm i 0.5 mm są praktycznie nieznaczne.

Została również wyznaczona zależność indukcyjności własnej L_{ph} w funkcji położenia wirnika θ przy założeniu, że prąd wzbudzenia zasilanego pasma wynosi $I=0.1$ A (rys.5).

Przy stosunkowo małych wartościach natężenia pola magnetycznego (przy małym prądzie wzbudzenia) dla blachy o grubości 0.23 mm uzyskano większą wartość indukcyjności w położeniu współosiowym. Jednak przy większych wartościach natężenia pola magnetycznego sytuacja ulegnie zmianie i wówczas dla blachy o grubości 0.23 mm uzyskamy najmniejszą wartość indukcyjności własnej z uwagi na inną charakterystykę $B=f(H)$ (rys.1).



Rys. 5. Zależność indukcyjności własnej L_{ph} w funkcji kąta położenia wirnika θ

W tabeli 1 dokonano zestawienia wybranych parametrów silnika wyznaczonych w punkcie pracy znamionowej tj. przy prędkości znamionowej $n_N=45000$ obr/min, napięciu zasilającym $U_{dc}=300$ V i parametrach sterujących zapewniających uzyskanie wymaganej mocy znamionowej. Obliczenia przeprowadzono dla każdego rozpatrywanego materiału magnetycznego przy czym materiałem bazowym była blacha o grubości 0.5 mm oraz przy założeniu, że temperatura uzwojenia wynosi 20° .

Tabela 1. Zestawienie wybranych parametrów silnika w analizowanym punkcie pracy

	0.23 mm	0.35 mm	0.5 mm
T_{eav} [Nm]	0.21	0.21	0.21
I_{dcav} [A]	3.47	3.47	3.45
I_{phrms} [A]	3.8	3.8	3.8
P_{Cu} [W]	47	47	47
P_{Fe} [W]	67	96	150
P_{mech} [W]	109	109	109
P_{out} [W]	836	801	740
η [%]	76.8	74.4	69.2

Wpływ grubości zastosowanej blachy na wytwarzany średni moment elektro-magnetyczny T_{eav} , wartość prądu źródła I_{dcav} czy też wartość skuteczną prądu pasma I_{phrms} jest praktycznie niezauważalny. Jednak straty w żelazie przy stosowaniu cieńszych blach ulegają istotnemu zmniejszeniu. Ma to wpływ na wzrost mocy na wale a w konsekwencji na istotną poprawę sprawności ogólnej układu napędowego. Przy analizowanej prędkości obrotowej dla każdej rozważanej grubości blachy straty w żelazie silnika są stratami dominującymi. Jednak w przypadku zastosowania blachy o grubości 0.23 mm są one tylko nieznacznie większe od strat w miedzi.

5. Obliczenia termiczne

W obszarze, dla którego obowiązuje równanie przewodzenia ciepła można wydzielić pewien dowolny element o objętości V_c zwanej objętością kontrolną (*Control Volume*). Można teraz scałkować to równanie po objętości. Dla wydzielonego elementu kontrolnego otrzymuje się zależność [8]:

$$\int_{V_c} c\rho \frac{\partial \vartheta}{\partial t} dV = - \int_{V_c} \operatorname{div} \dot{q} dV + \int_{V_c} \dot{q}_v dV \quad (1)$$

Jeżeli przyjmie się, że wydzielony element kontrolny jest na tyle mały, że temperatura w całym jego obszarze jest jednakowa i ma wartość $\vartheta_{(i)}$ oraz że wewnętrzne źródło ciepła o wydajności $\dot{q}_{v(i)}$ jest skupione w środku ciężkości elementu, wtedy poszczególne człony równania (1) mogą być wyrażone w postaci:

$$\int_{V_c} c\rho \frac{\partial \vartheta}{\partial t} dV \approx V_{c(i)} c_{(i)} \rho_{(i)} \frac{d\vartheta_{(i)}}{dt} - \int_{V_c} \operatorname{div} \dot{q} dV \approx \sum_j \dot{Q}_{(i,j)} + \sum_k \dot{Q}_{A(i,k)} \quad (2)$$

$$\int_{V_c} \dot{q}_{v(i)} dV \approx V_{c(i)} \dot{q}_{v(i)}$$

W zależności (2) $\dot{Q}_{(i,j)}$ jest strumieniem ciepła dopływającego do węzła i z elementu sąsiedniego j , natomiast $\dot{Q}_{A(i,k)}$ - strumieniem ciepła dopływającego z k -tej powierzchni zewnętrznej do węzła i . Uwzględniając że na brzegu analizowanego obszaru występuje warunek brzegowy trzeciego rodzaju, z zależności (2) otrzymuje się:

$$\sum_j \Lambda_{(i,j)} \vartheta_{(j)} - \left(\sum_m \Lambda_{a(i,m)} + \sum_j \Lambda_{(i,j)} \right) \vartheta_{(i)} + \sum_l \Lambda_{(i,l)} \dot{q}_{A(i,l)} + \sum_m \Lambda_{a(i,m)} \vartheta_{a(i)} + V_{c(i)} \dot{q}_{v(i)} = V_{c(i)} c_{(i)} \rho_{(i)} \frac{d\vartheta_{(i)}}{dt} \quad (3)$$

przy czym $i = 1, 2, \dots, z_n$, gdzie z_n jest liczbą elementów na które podzielono rozpatrywany obszar. Zapisując równanie (3) dla wszystkich elementów otrzymuje się układ z_n równań różniczkowych zwyczajnych, opisujących nieustalone pole temperatury w obszarze analizowanym z użyciem sieci cieplnej utworzonej metodą bilansów elementarnych. Dla obszarów cienkiej warstwy bez wewnętrznych źródeł ciepła można przyjąć, że kierunek przepływu przewodzonego ciepła na drodze l jest prostopadły do przekroju warstwy A . Wtedy przewodności cieplne w wyrażeniu (3) można określić jako:

$$\Lambda = \frac{\lambda A}{l} \quad (4)$$

gdzie: λ – współczynnik przewodności cieplnej warstwy. Gdy obszar wymienia ciepło z otoczeniem na drodze przejmowania ciepła,

gdzie praktyczne znaczenie ma konwekcja wymuszona, przewodności cieplne Λ_a związane z przejmowaniem ciepła na brzegu elementu mogą być obliczone [9] z zależności:

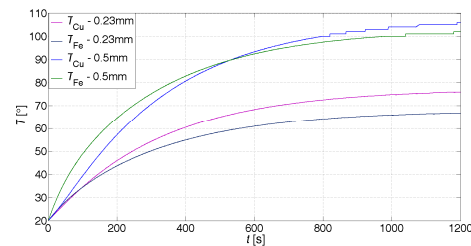
$$\Lambda_a = \alpha_A A \quad (5)$$

Według [9] przy konwekcji wymuszonej zależność współczynnika wnikania ciepła α_A od temperatury jest niewielka i w dalszej części została pominięta. Występujący w tej zależności współczynnik przejmowania ciepła α_A na powierzchni A w odniesieniu do maszyn elektrycznych, praktycznie nie zależy od kierunku przepływu ciepła. Przyjęto:

$$\alpha_A = \alpha_{A0} (1 + k\sqrt{v}) \quad (6)$$

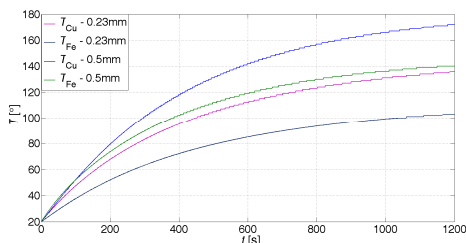
gdzie: A – powierzchnia oddawania ciepła, α_{A0} – współczynnik przejmowania ciepła przy nieruchomym wirniku, k – współczynnik uwzględniający sposób omywania powierzchni A , v – prędkość omywania powierzchni przez powietrze chłodzące (uwzględniono ruch powietrza spowodowany wentylacyjnym działaniem wirnika i ewentualnym chłodzeniem obcym), c – ciepło właściwe materiału elementu, ρ – gęstość.

Na rysunku 6 pokazano zmianę średniej temperatury uzwojenia oraz rdzenia stojana w czasie pracy ze stałą prędkością obrotową 50000 obr/min, dla rdzenia wykonanego z blachy o grubości 0.23 mm i 0.5 mm.



Rys.6. Zależność średniej temperatury jednego z uzwojeń stojana T oraz rdzenia stojana T w funkcji czasu przy prędkości $n=50000$ obr/min

Na rysunku 7 pokazano zmianę średniej temperatury uzwojenia oraz rdzenia stojana w czasie pracy ze stałą prędkością obrotową 35000 obr/min, dla rdzenia wykonanego z blachy o grubości 0.23 mm i 0.5 mm.



Rys.7. Zależność średniej temperatury jednego z uzwojeń stojana T oraz rdzenia stojana T w funkcji czasu przy prędkości $n=35000$ obr/min

Wpływ grubości blachy rdzenia silnika na temperaturę rdzenia jest bardzo wyraźny i oczywisty. Cieńsza blacha to mniejsze straty i mniejsza temperatura rdzenia. Jednakże grubość blachy wpływa także na temperaturę uzwojenia. Przy zastosowaniu grubszej blachy rdzeń nagrzewa się do wyższej temperatury przez co utrudnione jest oddawanie ciepła z uzwojenia do blach rdzenia i temperatura uzwojenia jest w tym przypadku wyższa niż dla blachy cienkiej, mimo podobnych strat w uzwojeniu. Dla dużych prędkości obrotowych z uwagi na znaczne straty w rdzeniu jego temperatura bardzo zbliża się do temperatury uzwojenia (rys.6), a stała czasowa nagrzewania rdzenia jest mniejsza niż dla uzwojenia. Decyduje o tym silny wzrost wraz z prędkością współczynnika przejmowania ciepła z rdzenia do czynnika chłodzącego – zależność (6).

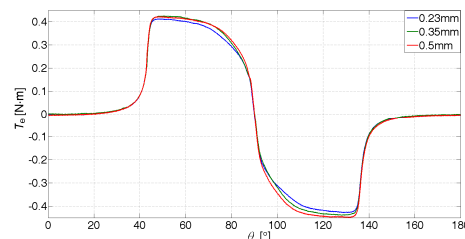
6. Wybrane wyniki badań laboratoryjnych

W warunkach laboratoryjnych została wyznaczona zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji położenia wirnika θ przy zasilaniu uzwojenia prądem $I=4$ A dla prototypów wykonanych z blach o grubościach 0.23 mm, 0.35 mm i 0.5 mm (rys.8).

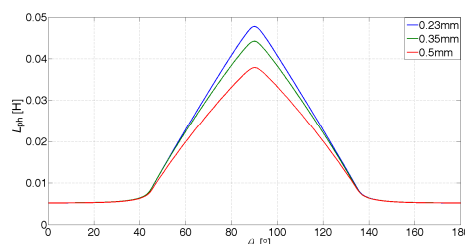
Charakterystyki momentowe uzyskane w warunkach laboratoryjnych potwierdzają wyniki badań symulacyjnych. Zależność indukcyjności własnej pasma L_{ph} w funkcji położenia wirnika θ wyznaczoną metodą mostkową pokazano na rysunku 9.

Charakter zmian indukcyjności własnej pasma związany ze zmianą grubości blachy magnetycznej odpowiada wynikom badań symulacyjnych pokazanych na rysunku 5. W obliczeniach uzyskano dla położenia współosiowego większe wartości indukcyjności, ale w warunkach laboratoryjnych pomiar indukcyjności

uzwojenia wykonywany był metodą mostkową przy częstotliwości $f=20$ Hz. Z tego też względu bardziej zauważalny jest wpływ grubości zastosowanej blachy magnetycznej na wartość maksymalną indukcyjności pasma.



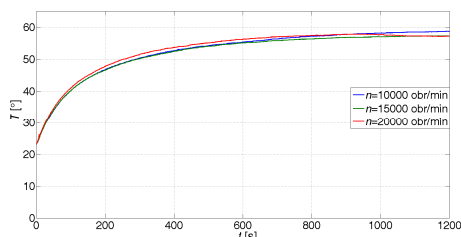
Rys.8. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ wyznaczona w warunkach laboratoryjnych



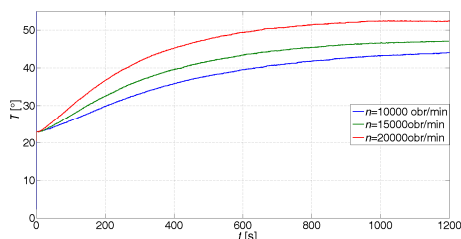
Rys.9. Zależność indukcyjności własnej L_{ph} w funkcji kąta położenia wirnika θ wyznaczona w warunkach laboratoryjnych

Prototyp wykonany z blachy magnetycznej o grubości 0.23 mm został poddany próbie nagrzewania. Badania przeprowadzono dla trzech różnych prędkości obrotowych tj. 10000 obr/min, 15000 obr/min i 20000 obr/min i wartości momentu obciążenia równego $T_L=0.16$ Nm (moment znamionowy). W każdym przypadku rejestrowano temperaturę jednego z uzwojeń silnika oraz rdzenia stojana zamontowanymi termoparami typu K. Na rysunkach 10-11 pokazano temperaturę uzwojenia silnika (rys.10) oraz temperaturę jego rdzenia (rys.11) w funkcji czasu pomiaru. Dla badanego prototypu wykonanego z blachy o grubości 0.23 mm temperatura rdzenia w sposób istotny zależy od prędkości obrotowej. Wzrost prędkości obrotowej powoduje podwyższanie temperatury rdzenia co świadczy o wrastających stratach w rdzeniu stojana silnika. W przypadku strat w miedzi powinny być one w każdym przypadku identyczne. Jednak w praktyce utrzymanie tej samej wartości momentu obciążenia wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wiąże się z koniecznością pokrycia dodatkowych strat mechanicznych oraz

większych strat w żelazie. Pomimo, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wzrastała wartość skuteczna prądu to jednak temperatura uzwojenia ulegała zmniejszeniu (rys. 10). Przyczyną tego jest wzrost intensywności chłodzenia uzwojeń wymuszony ruchem obrotowym wirnika.



Rys.10. Zależność temperatury jednego z uzwojeń stojana T w funkcji czasu przy obciążeniu momentem znamionowym



Rys.11. Zależność temperatury rdzenia stojana T w funkcji czasu przy obciążeniu momentem znamionowym

7. Wnioski

Przedstawione rezultaty wskazują, że wpływ parametrów materiału magnetycznego (a w szczególności grubość blach) na jego charakterystyki statyczne jest stosunkowo niewielki. Zastosowanie cieńszej blachy zmniejsza wartość średnią wytwarzanego momentu elektromagnetycznego. Natomiast grubość zastosowanej blachy w sposób istotny zmienia parametry ruchowe z uwagi na straty w rdzeniu silnika. Stosowanie cieńszej blachy powoduje istotne zmniejszenie tych strat co w konsekwencji zwiększa moc wyjściową maszyny. To powoduje wzrost sprawności układu napędowego. Grubość zastosowanej blachy ma również wpływ na uzyskiwane przyrosty temperatury. Potwierdzają to szacunkowe obliczenia. Zastosowanie cieńszej blachy zmniejsza temperaturę rdzenia i uzwojeń pomimo

porównywalnych strat w uzwojeniach dla różnych grubości analizowanych blach.

8. Literatura

- [1]. Miller T.J.E: Switched reluctance motor and their control. Magna Physics Publishing, Hillsboro, OH, and Oxford, 1993.
- [2]. Krishnan R: Switched reluctance motor drives. Modeling, simulation, analysis, design, and applications, CRC Press LLC, 2003.
- [3]. Kozuku S., Tanabe N., Asama J., Chiba A.: Basic characteristics of 150,000r/min Switched Reluctance Motor Drive, Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE , pp.: 1 – 4, 2008.
- [4]. Genda T., Dohmeki H.: Characteristics of 4/2 Switched Reluctance Motor for a High Speed Drive by the Excitation Angle, International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2009, pp.1-6, 2009.
- [5]. Lee Ch., Krishnan R.: New Designs of a Two-phase E-core Switched Reluctance Machine by Optimizing the Magnetic Structure for a Specific Application: Concept, Design, and Analysis, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS '08, pp.: 1 – 8, 2008.
- [6]. Choi J., Park J., Lee K., Kim S., Lee J., Kim Y.: The effectiveness of anisotropic iron-core material on a switched reluctance motor, IEEE Transactions on Magnetics, Volume: 39, Issue: 5 , Part: 2, pp. 3352-3354, 2003.
- [7]. Korkosz M.: Wpływ materiału magnetycznego na parametry wysokoobrotowych maszyn elektrycznych z komutacją elektroniczną, Wydawnictwo PAK - Agenda SIMP, Pomiar Automatyka Kontrola, z.10, s.1101-1104, 2013.
- [8] Taler J., Duda P.: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła, WNT, Warszawa, 2003
- [9] Gdula S. i in.: Przewodzenie ciepła. PWN, Warszawa 1984

Praca wykonana w ramach projektu badawczego NN511 312 440

Autorzy

dr hab. inż. Mariusz Korkosz, mkosz@prz.edu.pl

dr hab. inż. Jan Mróz, janmroz@prz.edu.pl

Politechnika Rzeszowska

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów