

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

BADANIE WPŁYWU GRUBOŚCI SZCZELINY POWIETRZNEJ NA WŁAŚCIWOŚCI SILNIKÓW RELUKTANCYJNYCH PRZEŁĄCZALNYCH W OPARCIU O OBLICZENIA POŁOWE

THE INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE THICKNESS OF THE AIR-GAP ON THE PROPRIETY OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS BASING ON FIELD CALCULATIONS

Abstract: The paper presents the influence of the thickness of the air gap on basic proprieties of switched reluctance motors. Based on field calculations using finite elements method for selecting structure of SRM there are described characteristics of electromagnetic torque, flux linkage and self inductance depends on flowing current and angle of rotor. There is described the influence of thickness of the air gap on average electromagnetic torque generated by motor and ratio between aligned inductance and unaligned inductance (L_a/L_u). There are show selected waveforms of current and electromagnetic torque for selected thickness of air gap of SRM model. There are presented the conclusions.

1. Wstęp

Silniki reluktancyjne przełączalne (ang. *Switched Reluctance Motors - SRM*) zaliczane są do grupy maszyn synchronicznych. Z uwagi na swoje cechy przeznaczone są głównie do napędów o regulowanej prędkości obrotowej. W silnikach SRM wartość wytwarzanego momentu reluktancyjnego zależy między innymi od wymiarów geometrycznych maszyny. Duży wpływ na wartość momentu ma grubość szczeliny powietrznej. Co za tym idzie wraz ze zmianą wartości grubości szczeliny powietrznej zmienia się kształt podstawowych charakterystyk statycznych silnika. Charakterystyki te są niezbędne na etapie modelowania pracy maszyny, a ich znajomość umożliwia dobór parametrów sterowania silnika.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wpływu grubości szczeliny powietrznej na kształt podstawowych charakterystyk statycznych wybranej konstrukcji maszyny reluktancyjnej przełączalnej na drodze obliczeń symulacyjnych. Do badań symulacyjnych wybrano silnik o liczbie biegunów stojana N_s do zębów wirnika N_r równej 6/4.

Na etapie projektowania maszyny zastosowano metodę połową obliczania rozkładu pola magnetycznego, pozwalającą na badanie wpływu wymiarów geometrycznych obwodu magnetycznego na wypadkowe charakterystyki silnika. Na bazie wyznaczonych charakterystyk statycznych zbadano wpływ zmiany ich

kształtu na przebiegi czasowe prądów i wytwarzanego momentu elektromagnetycznego.

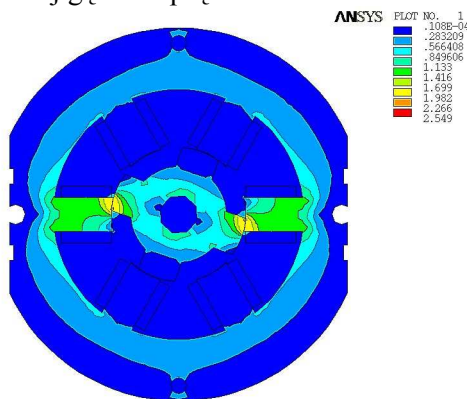
2. Wyznaczanie charakterystyk SRM w oparciu o obliczenia połowe

Do analizy pola magnetycznego maszyn SRM autorzy zastosowali program ANSYS [2], umożliwiającą profesjonalne obliczenia połowe oparte na metodzie elementów skończonych (MES). Do obliczania charakterystyk statycznych maszyn SRM zastosowano analizę stałoprądową w przestrzeni 2D. Z uwagi na konieczność zbadania wpływu zmiany wartości niektórych wymiarów geometrycznych, model maszyny zbudowano w środowisku programu ANSYS. Korzystając z wewnętrznego języka programowania parametrycznego (APDL) napisano program realizujący obliczenia w pętli dla zmienianej jako parametr wartości grubości szczeliny powietrznej. Wymiary obwodu magnetycznego stojana silnika pozostawały stałe. Zmianie uległa tylko średnica zewnętrzna wirnika d_r . Pozostałe wymiary obwodu wirnika nie były zmieniane. Do obliczania strumienia i współczynników indukcyjności zastosowano makro o nazwie *LMATRIX*, natomiast do obliczania momentu makro *TORQSUM*.

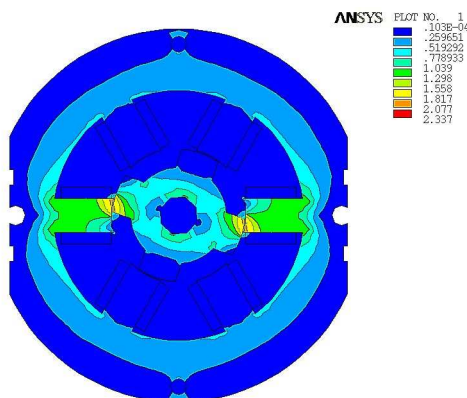
Podstawowe wymiary geometryczne dobierano korzystając z wartości bazowych tzw. współczynników projektowych [1] oraz wykorzystując wyniki wstępnych obliczeń połowych. Dodatkowo uwzględniono ograniczenia kon-

strukcyjne związane ze sposobem mocowania stojana do obudowy.

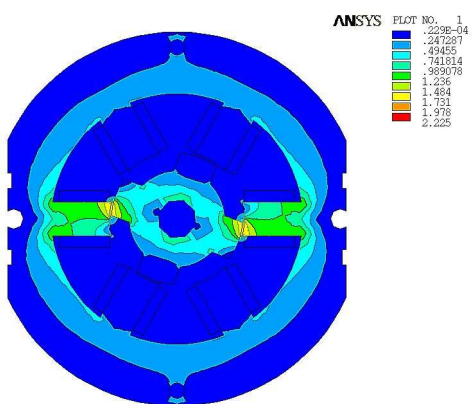
Przykładowe rozkłady gęstości strumienia dla różnych grubości szczeliny powietrznej (0.1, 0.3 i 0.5 mm) przedstawiono na rysunkach 1 - 3 przy założeniu tego samego położenia wirnika i tej samej gęstości prądu.



Rys.1. Rozkład gęstości strumienia dla szczeliny $\delta = 0.1$ mm

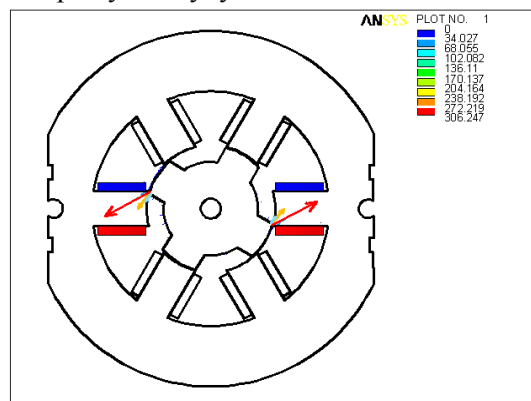


Rys.2. Rozkład gęstości strumienia dla szczeliny $\delta = 0.3$ mm

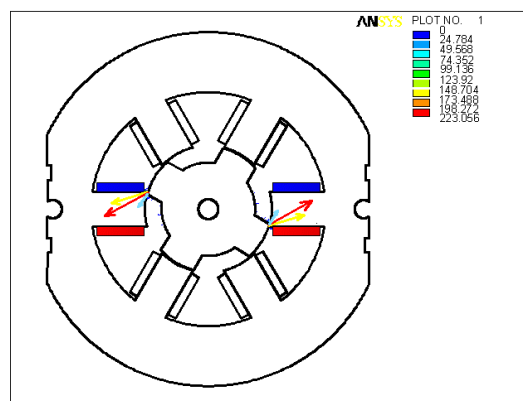


Rys.3. Rozkład gęstości strumienia dla szczeliny $\delta = 0.5$ mm

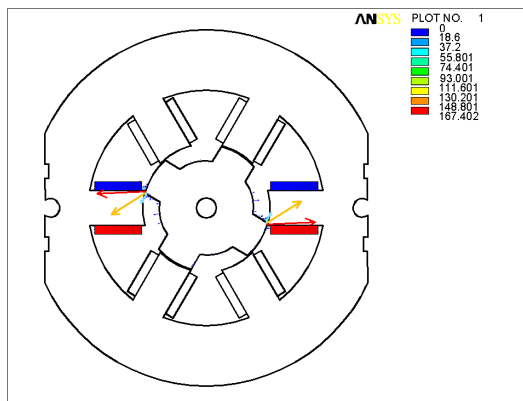
Analizując wyniki symulacji przedstawione na rysunkach 1 - 3 można stwierdzić, że wraz ze zmniejszaniem się grubości szczeliny powietrznej wzrasta gęstość strumienia, tym samym maszyna jest bardziej podatna na nasycenie się obwodu magnetycznego. Na rysunkach 4 - 6 przedstawiono wektory wypadkowych sił działających na wirnik dla analogicznych warunków pracy maszyny.



Rys.4. Wypadkowa siła działająca na wirnik dla szczeliny $\delta = 0.1$ mm



Rys.5. Wypadkowa siła działająca na wirnik dla szczeliny $\delta = 0.3$ mm

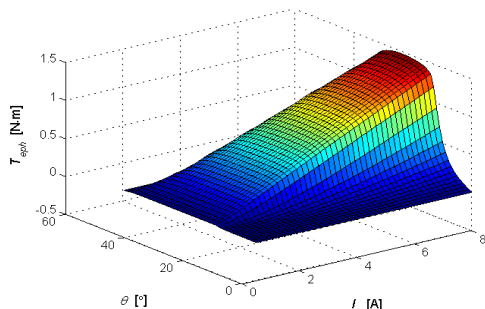


Rys.6. Wypadkowa siła działająca na wirnik dla szczeliny $\delta = 0.5$ mm

Wartość wypadkowej siły F działającej na wirnik maszyny maleje wraz ze wzrostem grubości szczeliny powietrznej, konsekwencją czego jest zmniejszanie się wartości wytwarzanego momentu.

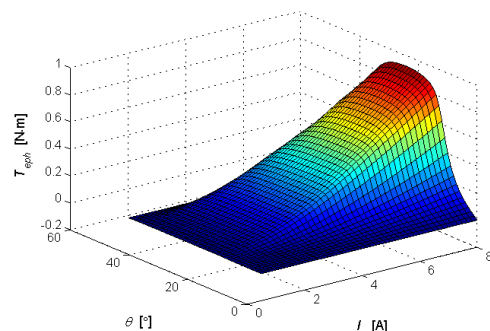
3. Analiza wpływu grubości szczeliny powietrznej na charakterystyki SRM

Korzystając z wyników obliczeń polowych wyznaczono następujące charakterystyki statyczne dla silnika o konstrukcji 6/4: momentowo - prądowo - kątowne ($T_e - i - \theta$), strumieniowo - prądowo - kątowne ($\psi - i - \theta$). Ponadto wyznaczono współczynniki indukcyjności własnej statycznej $L_{self}(i, \theta)$. Z uwagi na symetrię budowy maszyny obliczenia zostały wykonane tylko w zakresie zmian położenia wirnika od położenia niewspółosiowego ($\theta = 0^\circ$) do położenia współosiowego $\theta = 45^\circ$. Grubość szczeliny powietrznej δ zmieniano w zakresie od 0.1 mm do 0.5 mm co 0.05 mm. Wartość prądu zmieniano od wartości 0.5 A do 8A.

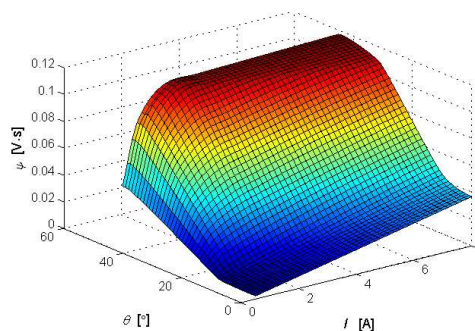


Rys.7. Charakterystyka momentowo-prądowo-kątowna dla szczeliny $\delta = 0.1$ mm

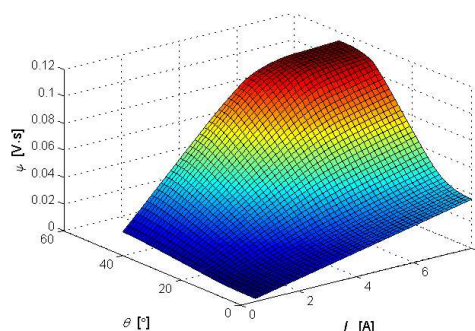
Na rysunkach 7 - 12 przedstawiono wyniki obliczeń polowych charakterystyk: momentowo - prądowo - kątownych ($T_e - i - \theta$) (rys. 7 - 8), strumieniowo - prądowo - kątownych ($\psi - i - \theta$) (rys. 9 - 10) oraz współczynników indukcyjności własnej $L_{self}(i, \theta)$ (rys. 11 - 12) dla granicznych grubości szczelin δ .



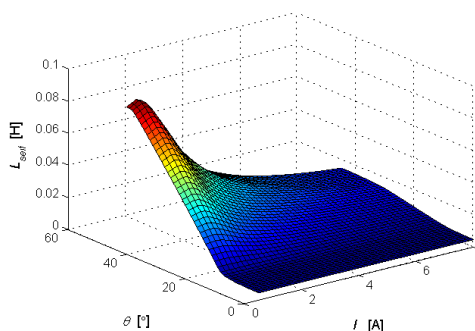
Rys.8. Charakterystyka momentowo-prądowo-kątowna dla szczeliny $\delta = 0.5$ mm



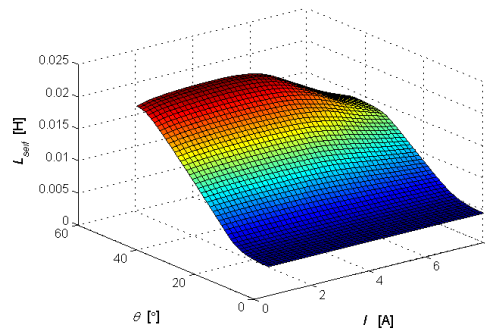
Rys.9. Charakterystyka strumieniowo-prądowo - kątowna dla szczeliny $\delta = 0.1$ mm



Rys.10. Charakterystyka strumieniowo-prądowo - kątowna dla szczeliny $\delta = 0.5$ mm



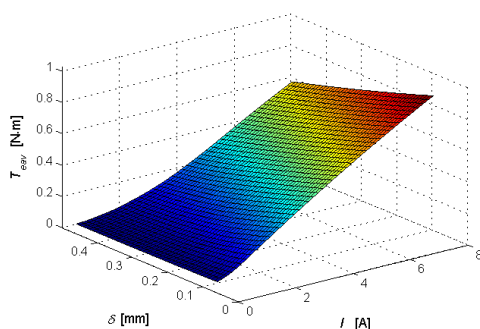
Rys.11. Zależność indukcyjności własnej L_{self} w funkcji prądu i kąta dla szczeliny $\delta = 0.1$ mm



Rys.12. Zależność indukcyjności własnej L_{self} w funkcji prądu i kąta dla szczeliny $\delta = 0.5$ mm

Jak można zauważyć wpływ grubości szczeliny powietrznej δ na kształt podstawowych charakterystyk statycznych jest duży, szczególnie w zakresie małych wartości prądów wzbudzenia I , gdy maszyna pracuje na liniowej części charakterystyki magnesowania. W przypadku dużego nasycenia obwodu magnetycznego wpływ ten nie jest już tak znaczący.

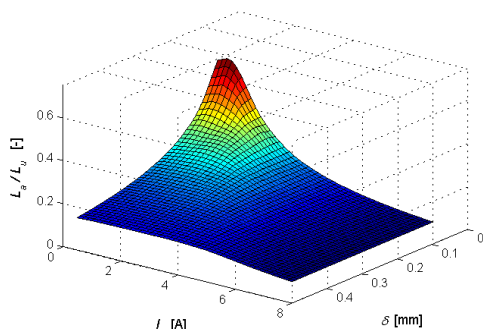
Na rysunku 13 przedstawiono zależność wartości średniej momentu T_{eav} w funkcji wartości płynącego prądu I oraz grubości szczeliny powietrznej δ .



Rys.13. Zależność wartości średniej momentu od prądu i grubości szczeliny δ

Wartość średnia momentu silnika T_{eav} wzrasta przy zmniejszaniu się grubości szczeliny powietrznej, przy czym nie jest to zależność liniowa. Wartość momentu znacząco wzrasta przy małych wartościach grubości szczeliny powietrznej δ .

Na rysunku 14 przedstawiono zależność współczynnika $\lambda_L = L_a/L_u$ w funkcji wartości płynącego prądu oraz grubości szczeliny powietrznej δ .



Rys.14. Zależność współczynnika λ_L od prądu i grubości szczeliny δ

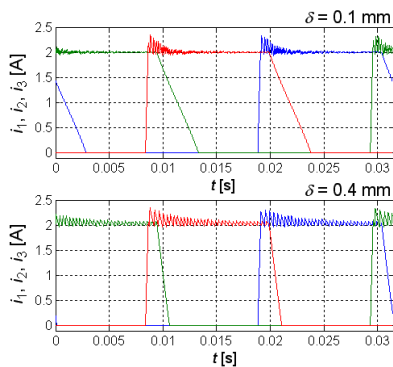
Znaczne zmiany współczynnika λ_L są spowodowane zmianami wartości indukcyjności własnej dla położenia współosiowego L_a . Induk-

cyjność pasma w tym położeniu szczególnie jest wrażliwa na wpływ grubości szczeliny powietrznej. Można zauważyć, że największe zmiany zachodzą w zakresie małych wartości grubości szczelin. Wartością grubości szczeliny powyżej której zachodzące zmiany nie są już tak duże jest wartość $\delta = 0.3$ mm.

Z punktu widzenia wartości wytwarzanego momentu należałoby dążyć do tego, aby szczelina powietrzna miała wartość jak najmniejszą. Uzyskuje się wówczas dużą wartość wytwarzanego momentu elektromagnetycznego z jednoczesnym bardzo dużym współczynnikiem λ_L . W praktyce grubość szczeliny powietrznej powinna być jak najmniejsza, ale trzeba brać pod uwagę także koszty wykonania maszyny i tolerancję wykonania. Mała wartość szczeliny powietrznej może być nie do przyjęcia ze względu na rozrzut parametrów maszyny. Zmieniając wymiary silnika można na drodze symulacyjnej kształtować charakterystyki omawianych modeli SRM.

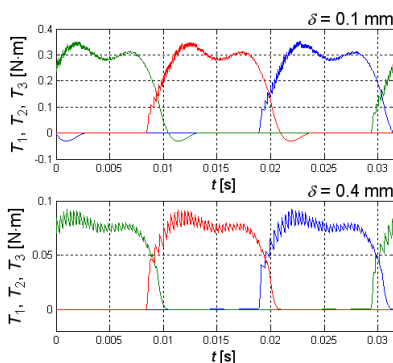
4. Przykładowe obliczenia przebiegów czasowych prądów i momentów dla wybranych grubości szczeliny powietrznej SRM

Obliczone parametry maszyn SRM o różnych grubościach szczelin powietrznych zaimplementowano w modelach symulacyjnych zbudowanych w systemie Matlab/Simulink. Modele te umożliwiały wykonanie badań silników dla różnych metod sterowania. W niniejszej pracy ograniczono się do sterowania prądowego i jednopulsowego. Przykładowo na rysunkach 15, 16 i 17 przedstawiono odpowiednio przebiegi prądów (i_1, i_2, i_3), momentów pasmowych (T_1, T_2, T_3) oraz momentu całkowitego (T_e), w ustalonym stanie pracy maszyny, przy prędkości $\omega = 50$ rad/s, prądzie odniesienia $I_{\text{ref}} = 2$ A oraz kątach: załączenia $\theta_{\text{on}} = 9^\circ$ i wyłączenia $\theta_{\text{off}} = 42^\circ$, dla maszyn o grubościach szczelin powietrznych $\delta = 0.1$ i 0.4 mm. Do regulacji prądu zastosowano cyfrowe regulatory prądu typu delta o częstotliwości próbkowania 20kHz. Na podstawie zamieszczonych wyników można zauważyć, że wzrost szczeliny powietrznej z 0.1 na 0.4 mm powoduje blisko czterokrotny spadek momentu, przy takich samych wartościach prądów płynących w uzwojeniach pasmowych. Można również zauważyć, że w przypadku silnika ze szczeliną 0.4 mm występują większe pulsacje prądu.

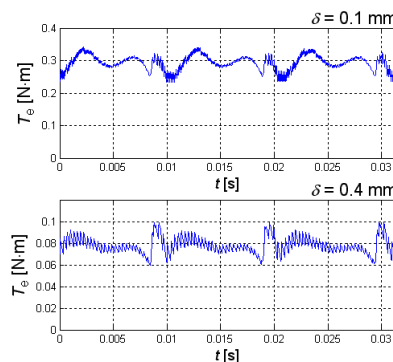


Rys.15. Przebiegi prądów pasmowych dla szczeliny powietrznej o grubości $\delta=0.1$ mm (górny) i $\delta=0.4$ mm (dolny) przy sterowaniu prądowym

Dla sterowania jednopulsowego, podobnie jak dla sterowania prądowego wykonano badania symulacyjne w ustalonym stanie pracy, przy prędkości $\omega=200$ rad/s, i kątach: załączenia $\theta_{on}=9^\circ$ i wyłączenia $\theta_{off}=35^\circ$, dla maszyn o grubościach szczelin powietrznych $\delta=0.1$ i 0.4 mm.

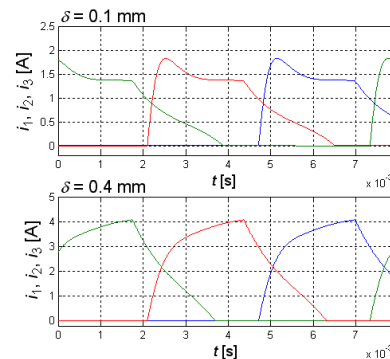


Rys.16. Przebiegi momentów pasmowych dla szczeliny powietrznej o grubości $\delta=0.1$ mm (górny) i $\delta=0.4$ mm (dolny) przy sterowaniu prądowym

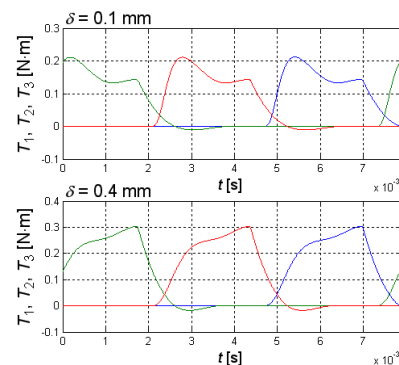


Rys.17. Przebiegi momentu całkowitego silnika dla szczeliny powietrznej o grubości $\delta=0.1$ mm (górny) i $\delta=0.4$ mm (dolny) przy sterowaniu prądowym

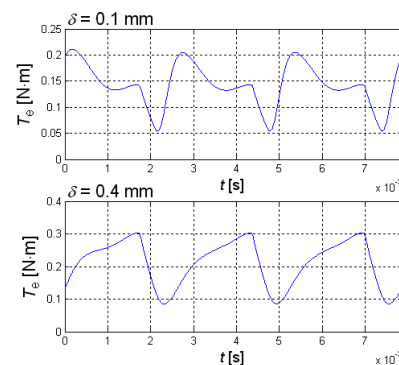
Na rysunkach 18, 19 i 20 przedstawiono odpowiednio przebiegi prądów (i_1, i_2, i_3), momentów pasmowych (T_1, T_2, T_3) oraz momentu całkowitego (T_e).



Rys.18. Przebiegi prądów pasmowych dla szczeliny powietrznej o grubości $\delta=0.1$ mm (górny) i $\delta=0.4$ mm (dolny) przy sterowaniu jednopulsowym



Rys.19. Przebiegi momentów pasmowych dla szczeliny powietrznej o grubości $\delta=0.1$ mm i $\delta=0.4$ mm przy sterowaniu jednopulsowym



Rys.20. Przebiegi momentów pasmowych dla szczeliny powietrznej o grubości $\delta=0.1$ mm i $\delta=0.4$ mm przy sterowaniu jednopulsowym

Na rysunku 18 można zauważyć, że kształty prądów pasmowych dla silników o różnych grubościach szczeliny znacznie się różnią. Prądy silnika ze szczeliną powietrzną o grubo-

ści 0.1 mm posiadają ponad dwukrotnie mniejszą amplitudę niż prądy dla silnika ze szczeliną o grubości 0.4 mm. Natomiast wartość średnia momentu wytwarzanego przez silnik ze szczeliną 0.1 mm wynosi $T_{\text{eav}0.1} = 0.143 \text{ N}\cdot\text{m}$, a dla silnika ze szczeliną 0.4 mm wynosi $T_{\text{eav}0.4} = 0.212 \text{ N}\cdot\text{m}$. W silniku ze szczeliną powietrzną 0.1 mm w porównaniu z silnikiem ze szczeliną 0.4 mm występuje znacząca różnica pomiędzy przyrostami indukcyjności własnych uzwojeń. Duży przyrost indukcyjności w przypadku silnika ze szczeliną 0.1 mm powoduje ograniczenie wartości prądu płynącego w uzwojeniu przy danym napięciu zasilającym, powodując tym samym zmniejszenie wytwarzanego momentu.

5. Wnioski

Wpływ grubości szczeliny powietrznej na kształt charakterystyk statycznych silnika reluktancyjnego przełączalnego jest bardzo duży. Przy zmniejszaniu się grubości szczeliny powietrznej δ wzrasta wartość średnia momentu elektromagnetycznego T_{eav} . Nie jest to jednak zależność liniowa. Wzrasta również wartość indukcyjności własnej pasma L_a w położeniu współosiowym tym samym powodując wzrost współczynnika λ_L . Ze względów technologicznych minimalną wartość szczeliny powietrznej można przyjąć na poziomie około $0.2 \div 0.3 \text{ mm}$ dla małych maszyn. Rozrzut parametrów maszyny wzrasta przy zmniejszaniu się wartości minimalnej szczeliny powietrznej. Mała wartość szczeliny powietrznej może powodować, że pojawią się problemy z osiągnięciem wymaganej wartości prądu fazowego. Oznacza to wzrost wymagań stawianych układowi zasilającemu silnik.

6. Literatura

- [1]. 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
- [2]. Ansys *Documentation*, ANSYS, Inc.
- [3]. Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Stanowisko do badań silników reluktancyjnych przełączalnych z zastosowaniem procesora sygnałowego*, Maszyny elektryczne, Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych, KOMEL, Zeszyty problemowe, Nr 69, 2004, str. 7-12
- [4]. Korkosz M.: *Praca silnikowo-generatorowa przełączalnej maszyny reluktancyjnej*, Rozprawa doktorska, Gliwice 2003.

[5]. Krishnan R.: *Switched reluctance motor drive: modeling, simulation, analysis, desing, and applications*, CRC Press LLC, 2001.

[6]. Risse S., Henneberger G.: *Desing and optimization of a switched reluctance motor for electric vehicle propulsion*, Proceedings of ICEM 2000, August 2000, Vol. 3, pp 1525-1530.

[7]. Wu W. Dunlop J. B., Collocoott S. J. Kalan B.: *Desing optimization of a switched reluctance motor by electromagnetic and thermal finite-element analysis*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, No. 5, September 2003, pp.3334- 3336

Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz, pbogu@prz.rzeszow.pl

dr inż. Mariusz Korkosz, mkosz@prz.rzeszow.pl

dr inż. Jan Prokop, jprokop@prz.rzeszow.pl

Politechnika Rzeszowska

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów