

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

BADANIA SYMULACYJNE ZWARĆ ZWOJOWYCH W SILNIKU RELUKTANCYJNYM PRZEŁĄCZALNYM

SIMULATION RESEARCH OF THE INTER-COIL SHORT CIRCUITS OF THE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

Abstract: The paper presents a modeling method of fragment winding short circuit of phase coil of switched reluctance motor (SRM). In this method the simulation model parameters were calculated with the implementation of finite elements method (FEM). The processed numeric model of a switched reluctance motor allows to analyze different cases of inter coil short circuits for a different number of short circuit windings. Static characteristics of a switched reluctance motor (6/4 construction type) for normal conditions and emergency work with different winding short circuits were appointed using a numerical model. The characteristics received by solution of a simulation model were compared with the characteristics obtained in the laboratory.

1. Wstęp

Maszyny reluktancyjne przełączane (SRM), jako jedne z nielicznych maszyn elektrycznych są bardzo odporne na uszkodzenia. Jest to głównie spowodowane prostotą ich konstrukcji. Dodatkową ich zaletą jest znaczna tolerancja stanów awaryjnych powstałych zarówno w samej maszynie jak i układzie zasilającym. Do typowych stanów awaryjnych maszyn elektrycznych zalicza się zwarcie zwojowe w jednym z uzwojeń silnika. W większości typów maszyn elektrycznych jest to sytuacja bardzo niebezpieczna i zazwyczaj wymaga zatrzymania silnika z uwagi na duże niebezpieczeństwo uszkodzenia pozostałych uzwojeń. Stan zwarcia zwojowego jest szczególnie niebezpieczny w przypadku maszyn z magnesami trwałymi. Natomiast w maszynie reluktancyjnej przełączalnej, z uwagi na pełną separację elektryczną i dużą stałą magnetyczną poszczególnych uzwojeń, zjawisko zwarcia zwojowego nie przenosi się wprost na pozostałe pasma. Jest to duża zaleta w porównaniu do innych maszyn elektrycznych. Nie oznacza to oczywiście, że zwarcie zwojowe nie ma żadnego wpływu na parametry silnika. Zwarcie zwojowe wpływa na zmianę kształtu charakterystyk statycznych silnika, co skutkuje zmianą parametrów eksploatacyjnych maszyny.

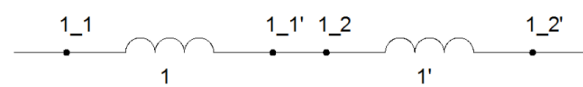
W artykule zamodelowano przypadek częściowego zwarcia zwojowego jednego pasma silnika reluktancyjnego o konstrukcji 6/4. Model symulacyjny połowo-obwodowy zbudowano na bazie programu służącego do obliczeń metodą elementów skończonych. Na podstawie

modelu symulacyjnego analizowano wpływ liczby zwartych zwojów na kształt wybranych charakterystyk statycznych silnika oraz podstawowe parametry eksploatacyjne. Dysponując odpowiednim modelem fizycznym dokonano weryfikacji laboratoryjnej jednego z przypadków zwarcia zwojowego.

2. Problematyka zwarcia zwojowych w silniku SRM

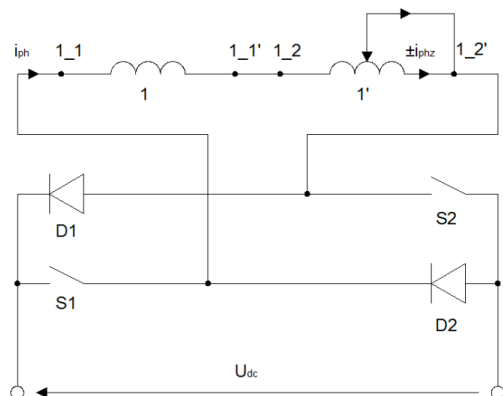
Stan zwarcia uzwojenia silnika jest jednym z wielu stanów awaryjnych, które mogą pojawić się w trakcie pracy maszyny. Ogólnie stany awaryjne można podzielić na uszkodzenia pochodzenia wewnętrznego oraz zewnętrznego [1-4]. Do uszkodzeń wewnętrznych zaliczyć można różnego rodzaju zwarcia, przerwy czy też uszkodzenia mechaniczne łożysk. Uszkodzenia zewnętrzne są to pozostałe awarie powstałe poza silnikiem, czyli w układzie energoelektronicznym oraz układzie sterowania.

Stan częściowego zwarcia uzwojenia fazowego jest zaliczany do uszkodzeń pochodzenia wewnętrznego. Na rysunku 1 przedstawiono typową konfigurację jednego pasma silnika reluktancyjnego przełączalnego o konstrukcji bazowej, czyli dwóch biegunach stojana przypadających na jedno pasmo.



Rys. 1. Typowy schemat połączenia jednego pasma silnika SRM o konfiguracji bazowej

Jest to typowa konfiguracja, w której oba uzwojenia biegunów oznaczone, jako 1 i 1' są połączone szeregowo, zgodnie. Napięcie zasilające U_{dc} pomniejszone o spadki napięcia na elementach energoelektronicznych jest dostarczane przez układ przekształtnikowy. Na rysunku 2 przedstawiono schemat obwodu uzwojeń jednego pasma z zaznaczonym miejscem zwarcia zwojowego. Pasma jest zasilane z klasycznego półmostka typu 2T/2D.

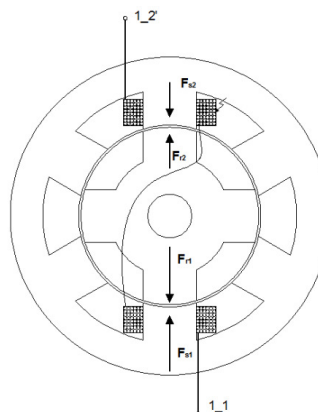


Rys. 2. Schemat układu zasilania jednego pasma silnika z zaznaczeniem częściowego zwarcia zwojowego

Skutki częściowego zwarcia zwojowego będą zależały od liczby zwartych zwojów. W najgorszym przypadku, gdy zwarcia ulegnie połowa pasma (1') całe napięcie zasilające zostanie przyłożone do pozostałej części uzwojenia, czyli (1). W takim przypadku będzie to oznaczało praktycznie dwukrotny wzrost napięcia na zaciskach pasma w stosunku do pozostałych nieuszkodzonych faz. Tak jak w każdej maszynie skutkuje to wzrostem wartości płynącego prądu. W przypadku braku ograniczenia prądowego w silniku może nastąpić wzrost wartości średniej wytwarzanego momentu elektromagnetycznego. To będzie skutkowało wzrostem prędkości obrotowej. W przypadku zwarcia mniejszej ilości zwojów skutki awarii powinny w nieco mniejszym stopniu wpływać na parametry eksploatacyjne maszyny.

Częściowe zwarcie zwojowe w jednej z faz silnika reluktancyjnego przełączalnego wpływa w znaczącym stopniu na parametry wibroakustyczne. Maszyna reluktancyjna jest niestety szczególnie wrażliwa na niesymetryczny naciąg magnetyczny. Ogólnie maszyny reluktancyjne przełączalne należy zaliczyć do stosunkowo głośniejszych. Szczególnie ten problem dotyczy maszyn o konstrukcji bazowej. Pojawienie się niesymetrycznego naciągu magnetycznego powo-

duje wzrost wibracji powstających w tym silniku [5]. Duża wartość niesymetrycznego naciągu magnetycznego, która okresowo będzie się pojawiała w przypadku częściowego zwarcia zwojowego, może stanowić znacznie większe zagrożenie dla maszyny niż skutki termiczne. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe kierunki oddziaływania sił pochodzenia magnetycznego w przypadku wystąpienia częściowego zwarcia zwojowego.



Rys. 3. Kierunki oddziaływania sił pochodzenia magnetycznego dla częściowego zwarcia zwojowego w jednym z pasm silnika

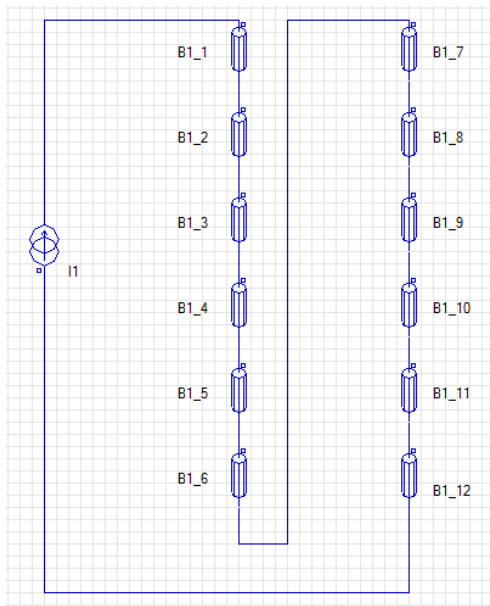
Zarówno na stojan jak i na wirnik po wystąpieniu częściowego zwarcia zwojowego będą oddziaływały nie zrównoważone siły pochodzenia magnetycznego, tj. $\Delta F_s = F_{s1} - F_{s2}$ oraz $\Delta F_r = F_{r1} - F_{r2}$. Te nie zrównoważone siły pochodzenia magnetycznego określa się jako tzw. nie zrównoważony naciąg magnetyczny. Wartość nie zrównoważenia będzie zależała od tego, jaka część uzwojenia ulegnie zwarcia. Należy jednak mieć na uwadze, że w maszynach reluktancyjnych przełączanych, nawet jeśli nie występuje żaden stan awaryjny, zawsze istnieje pewna wartość nie zrównoważonego naciągu magnetycznego wywołanego, np. tolerancją wykonania maszyny.

3. Badania symulacyjne

3.1. Model symulacyjny połowo-obwodowy

Metodykę obliczeń symulacyjnych projektowanego silnika SRM oparto o model połowo-obwodowy 2D pozwalający na rozwiązywanie jednocześnie równań pola elektromagnetycznego metodą elementów skończonych (FEM), równań obwodowych uzwojeń silnika wraz z zasilaniem oraz równań ruchu mechanicznego. Geometrię silnika utworzono w programie CAD, którą następnie zaimportowano do pro-

gramu FEM. Jedno z uzwojeń biegunów umownej fazy Ph1 zostało specjalnie przygotowane pod kątem analizy częściowego zwarcia zwojowego. To uzwojenie ma 112 zwojów i zostało podzielone na 11 sekcji. Każdej sekcji została przypisana odpowiednia liczba zwojów tj. 56, 28, 14, 7, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1. W celu wyznaczenia wybranych charakterystyk statycznych z uwzględnieniem częściowego zwarcia zwojowego koniecznym staje się zastosowanie w modelu symulacyjnym odpowiedniego obwodu zasilającego. Odpowiednia konfiguracja obwodu zewnętrznego pozwala realizować zwieranie poszczególnych sekcji uzwojenia. Na rysunku 5 przedstawiono schemat połączeń obwodu zewnętrznego.

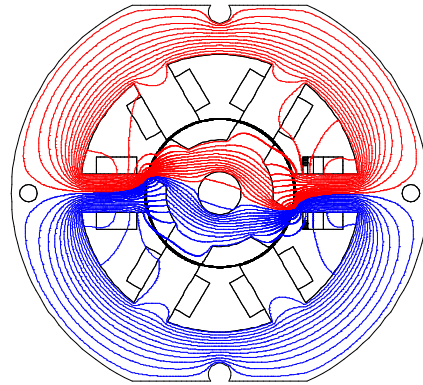


Rys. 4. Widok obwodu zewnętrznego dla modelu przeznaczonego do analizy częściowych zwarc zwojowych

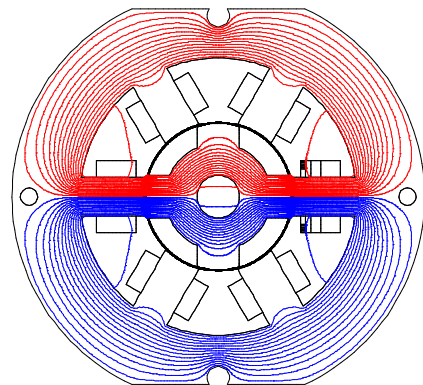
Dla zapewnienia stałej wartości prądu I w trakcie rozwiązywania zagadnienia zastosowano źródło prądowe.

3.2. Wyniki symulacji rozkładu pola magnetycznego dla różnych przypadków zwarc zwojowych

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono rozkład izolinii strumienia oraz gęstości strumienia magnetycznego w przypadku braku uszkodzenia dla dwóch różnych położenia wirnika.



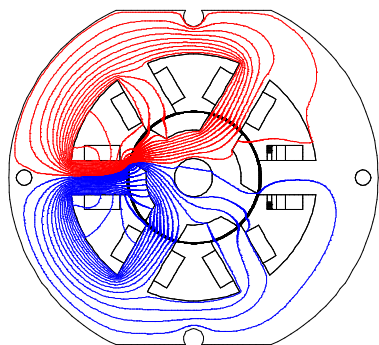
Rys. 5. Rozkład izolinii strumienia i gęstości strumienia dla położenia wirnika równego 15° przy braku uszkodzenia uzwojenia



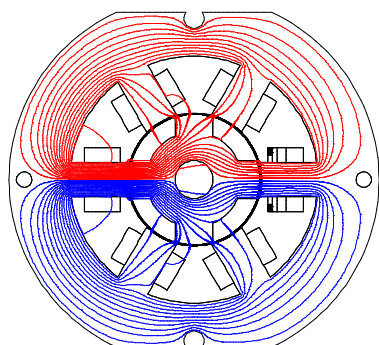
Rys. 6. Rozkład izolinii strumienia i gęstości strumienia dla położenia wirnika równego 45° przy braku uszkodzenia uzwojenia

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono rozkład izolinii strumienia magnetycznego oraz gęstości strumienia w przypadku zwarcia uzwojenia jednego bieguna dla położenia wirnika odpowiednio 15° i 45° .

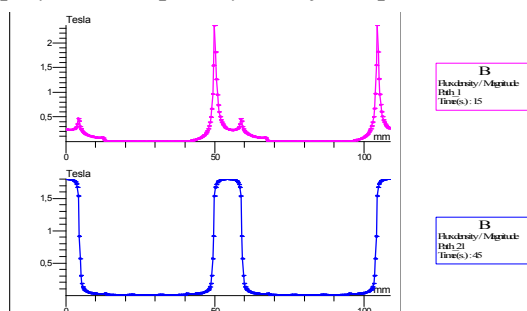
Częściowe zwarcie zwojowe powoduje zmianę wartości indukcji w szczelinie powietrznej w odniesieniu do stanu symetrii. Na rysunku 9 przedstawiono moduł gęstości strumienia B od drogi po obwodzie (w środku szczeliny powietrznej) w zakresie kąta od -180 do 180 stopni dla stanu symetrii i dwóch różnych położenia wirnika. Analogicznie na rysunku 10 przedstawiono przypadek, w którym wystąpiło zwarcie połowy uzwojenia fazowego.



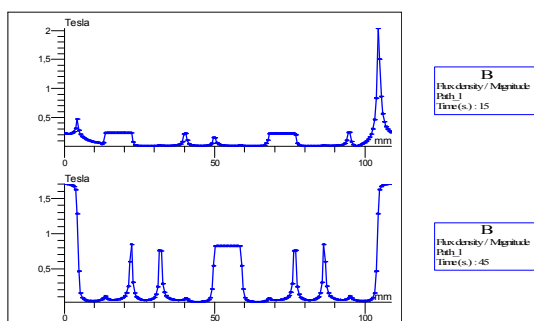
Rys. 7. Rozkład izolinii strumienia i gęstości strumienia dla położenia wirnika równego 15° przy zwarciu połowy uzwojenia pasma



Rys. 8. Rozkład izolinii strumienia i gęstości strumienia dla położenia wirnika równego 45° przy zwarciu połowy uzwojenia pasma



Rys. 9. Moduł gęstości strumienia B w środku szczeliny powietrznej w przypadku braku uszkodzenia dla dwóch położenia wirnika



Rys. 10. Moduł gęstości strumienia B w środku szczeliny powietrznej w przypadku zwarcia połowy uzwojenia pasma dla dwóch położenia wirnika

Porównując rysunki 9 i 10 można zauważyć, że w przypadku wystąpienia częściowego zwarcia zwojowego następuje znaczna zmiana rozkładu gęstości strumienia. Ma to wpływ na parametry eksploatacyjne maszyny, np. na wytwarzany moment elektromagnetyczny oraz co istotniejsze wpływa na znaczny wzrost wartości niezrównoważonego naciągu magnetycznego.

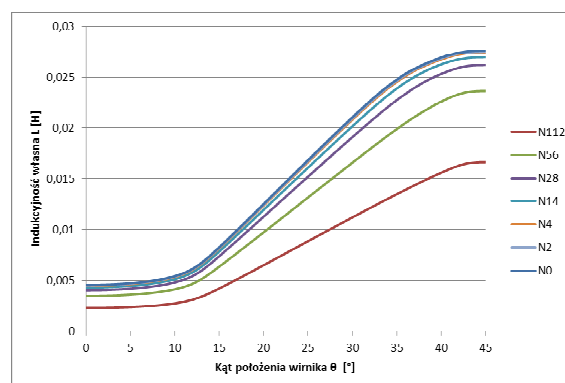
3.3. Wyniki obliczeń wybranych charakterystyk dla różnych przypadków zwarć zwojowych

Wpływ zwarć zwojowych analizowano dla siedmiu przypadków pracy maszyny, oznaczonych, jako:

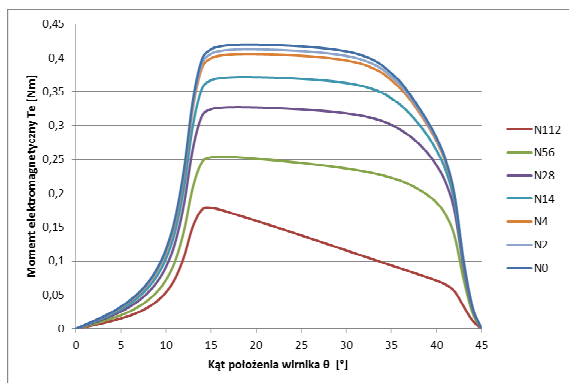
- N0 - brak zwarcia (pełne uzwojenie bieguny),
- N2 - zwarcie 2 zwojów,
- N4 - zwarcie 4 zwojów,
- N14 - zwarcie 14 zwojów,
- N28 - zwarcie 28 zwojów,
- N56 - zwarcie 56 zwojów (połowy uzwojenia bieguny),
- N112 - zwarcie 112 zwojów (całego uzwojenia jednego bieguny).

Obliczenia wykonywano przy zmianie wartości prądu źródła I od wartości $0.001A$ do $8A$ ze stałym krokiem, oraz przy zmianie położenia wirnika od położenia niewspółosiowego (0°) do położenia współosiowego (45°), co 1° .

Na rysunku 11 przedstawiono zależność indukcyjności własnej L od kąta położenia wirnika dla omawianych przypadków zwarć. Odpowiednio na rysunku 12 przedstawiono zależność momentu elektromagnetycznego w funkcji położenia wirnika dla wymuszenia prądowego $I=4A$.

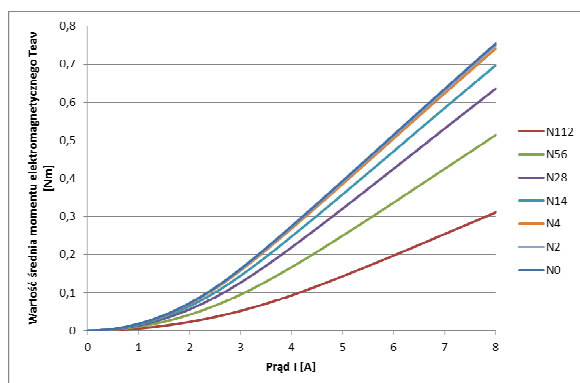


Rys. 11. Zależność indukcyjności własnej od kąta położenia wirnika dla różnych przypadków zwarć zwojowych



Rys. 12. Zależność momentu elektromagnetycznego od kąta położenia wirnika dla różnych przypadków zwarc zwojowych

Na rysunku 13 przedstawiono zależność wartości średniej wytwarzanego momentu elektromagnetycznego T_{eav} od prądu pasma I .



Rys. 13. Zależność wartości średniej momentu elektromagnetycznego od prądu pasma I

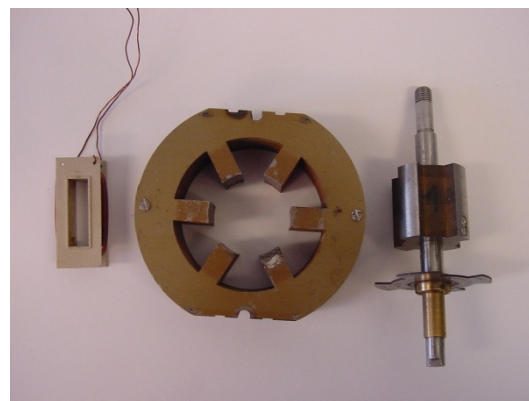
Wzrost liczby zwieranych zwojów powoduje zmniejszanie wartości średniej wytwarzanego momentu elektromagnetycznego przez uszkodzone pasmo. Zwarcie połowy liczby zwojów powoduje praktycznie trzykrotne zmniejszenie wartości średniej wytwarzanego momentu przy tym samym prądzie pasma I .

4. Wyniki badań laboratoryjnych

4.1. Obiekt badań laboratoryjnych

Jako obiekt badań wybrano silnik SRM o konstrukcji 6/4. Na rysunku 14 przedstawiono obwód magnetyczny stojana bez uzwojeń, kompletny wirnik oraz jedno z uzwojeń bieguna stojana.

Badany silnik SRM został zaprojektowany do zastosowania w sprzęcie AGD. W tabeli 1 podano podstawowe wymiary i dane badanego silnika.



Rys. 14. Widok obwodu magnetycznego stojana, wirnika oraz jednego z uzwojeń biegunów badanego silnika

Tabela 1. Podstawowe wymiary i parametry badanego silnika SRM 6/4

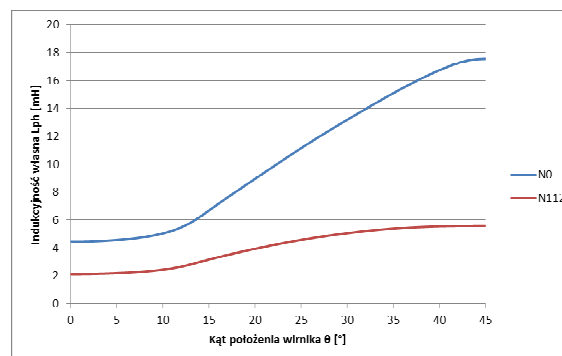
Liczba pasm m	3
Szerokość bieguna stojana β_s [°]	30
Szerokość zęba wirnika β_r [°]	35
Grubość szczeliny powietrznej δ [mm]	0.3
Długość pakietu żelaza L_{Fe} [mm]	32
Średnica zewnętrzna stojana d_{se} [mm]	94
Średnica wałka wirnika d_{sh} [mm]	10
Liczba zwojów na pasmo N_{ph}	224
Rezystancja pasma R_{ph} [Ω]	1.2

4.2. Wyniki pomiarów laboratoryjnych

W warunkach laboratoryjnych dokonano pomiaru indukcyjności własnej jednego pasma badanego silnika w funkcji kąta obrotu wirnika dla dwóch przypadków:

- N0 - brak zwarcia
- N112 - zwarcie 112 zwojów (całego uzwojenia jednego bieguna).

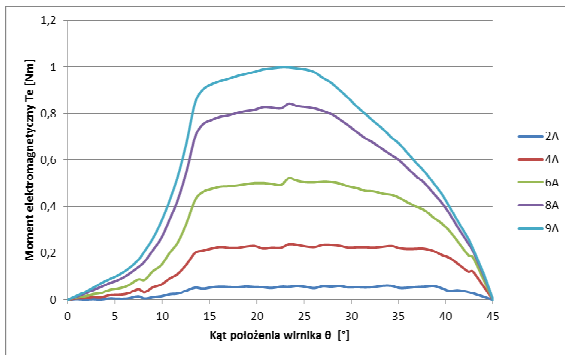
Na rysunku 15 przedstawiono wyniki pomiaru indukcyjności własnej dla w/w przypadków.



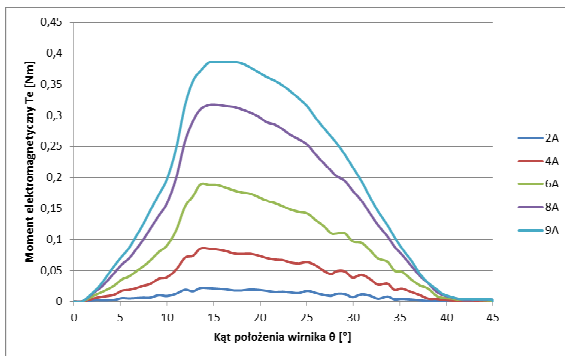
Rys. 15. Zależność indukcyjności własnej od kąta położenia wirnika dla stanu symetrii N0 i zwarcia N112

Otrzymane wyniki potwierdzają charakter zmian profilu indukcyjności uzyskanego na podstawie badań symulacyjnych.

W warunkach laboratoryjnych dokonano też pomiaru momentu elektromagnetycznego T_e metodą pośrednią bazującą na pomiarze prądu i napięcia. Na rysunkach 16 i 17 przedstawiono zależność momentu elektromagnetycznego od kąta położenia wirnika dla stanu symetrii (N0) i dla przypadku zwarcia połowy uzwojenia bieguny (N56).



Rys. 16. Zależność momentu elektromagnetycznego od kąta położenia wirnika dla stanu symetrii N0



Rys. 17. Zależność momentu elektromagnetycznego od kąta położenia wirnika dla przypadku zwarcia typu N56

5. Wnioski

Stan zwarcia zwojowego jest stanem awaryjnym maszyny reluktancyjnej przelączalnej, którego skutki zależą od liczby zwartych zwojów. Zwarcie niewielkiej liczby zwojów nie wpływa w sposób znaczący na pogorszenie parametrów eksploatacyjnych silnika czy też parametrów wibroakustycznych. Jednocześnie w zwartej części uzwojenia płynie duży prąd, który musi doprowadzić do termicznego uszkodzenia. Nieco inaczej wygląda sytuacja w przypadku zwarcia całego uzwojenia bieguny. W takim przypadku następuje znaczące pogorszenie pa-

rametrów silnika oraz znaczący wzrost drgań i generowanego hałasu. Z punktu widzenia termicznego ten przypadek nie jest zupełnie groźny, ponieważ w zwartej części uzwojenia płynie mały prąd zwarciovowy.

6. Literatura

- [1]. Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Current harmonics analysis as a method of electrical faults diagnostic in switched reluctance motors*, 6TH IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Proceedings, Cracow, Poland, 2007, IEEE Catalog Number: 07EX1706, ISBN: 1-4244-1061-4, Library of Congress: 2007921416, str. 426 – 431.
- [2]. Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Analiza uszkodzeń elektrycznych silników reluktancyjnych przelączalnych*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 84 NR 12/2008, str. 24-27.
- [3]. Stephens C. M.: *Fault detection and management system for fault-tolerant switched reluctance motor driver*, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 27., no. 6, pp. 1098-1102, Nov./Dec. 1991.
- [4]. Lequesne B., Gopalakrishnan S. and Omekanda A.: *Winding short-circuits in the switched reluctance driver*, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 5, pp. 1178-1184, Sept./Oct. 2005.
- [5]. Miller T. J. E.: *Faults and unbalance force in the switched reluctance machine*, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 2, pp. 319-328, Mar./Apr. 1995.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego NN511 312440

Badania przeprowadzono z zastosowaniem oprogramowania: AUTODESK INVENTOR, ANSYS oraz FLUX zakupionych w wyniku realizacji Projektu nr POPW.01.03.00-18-012/09 "Rozbudowa infrastruktury naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej" współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013, Priorytet I. Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3 Wspieranie innowacji.

Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz, pbogu@prz.edu.pl
 dr inż. Mariusz Korkosz, mkosz@prz.edu.pl
 dr inż. Adam Mazurkiewicz,
madam@prz.edu.pl
 dr inż. Jan Prokop, jprokop@prz.edu.pl
 Politechnika Rzeszowska
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki
 ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów