

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

ANALIZA ZWARĆ ZWOJOWYCH SILNIKA RELUKTANCYJNEGO PRZEŁĄCZALNEGO

INTER-COIL SHORT CIRCUITS ANALYSIS 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. Results of numeric simulation and laboratory tests for the prototype SRM motor are enclosed. Conclusions are presented.

1. Wstęp

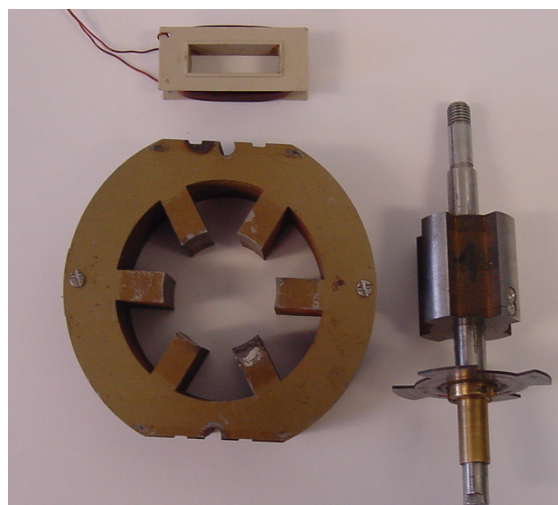
Maszyny reluktancyjne przełączalne (SRM), jako jedne z nielicznych maszyn elektrycznych są bardzo odporne na uszkodzenia. Jest to głównie spowodowane prostotą ich konstrukcji. Dodatkową ich zaletą jest znaczna tolerancja stanów awaryjnych powstałych zarówno w samej maszynie, jak i w układzie zasilającym. Do typowych stanów awaryjnych maszyn elektrycznych zalicza się zwarcie zwojowe w jednym z uzwojeń silnika. W większości typów maszyn elektrycznych taki stan stwarza sytuację bardzo niebezpieczną 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 magnetyczną poszczególnych uzwojeń, zjawisko zwarcia zwojowego nie przenosi się wprost na pozostałe pasma. Jest to duża zaleta maszyn SRM w porównaniu z innymi maszynami elektrycznymi. Nie oznacza to oczywiście, że zwarcia zwojowe nie mają żadnego wpływu na właściwości silnika. Wpływają one nie tylko na stan termiczny maszyny, ale także na zmianę kształtu charakterystyk statycznych silnika. Skutkiem jest zmiana charakteru przebiegów czasowych prądów silnika, a co za tym idzie zmiana właściwości eksploatacyjnych maszyny.

W niniejszej pracy zamodelowano przypadek częściowego zwarcia zwojowego jednego pasma silnika reluktancyjnego przełączalnego o konstrukcji 6/4. Model symulacyjny połowo-

obwodowy zbudowano na bazie programu służącego do obliczeń połowych metodą elementów skończonych. W ramach badań symulacyjnych analizowano wpływ liczby zwartych zwojów na podstawowe parametry eksploatacyjne silnika. Badano kształt przebiegów czasowych prądów i momentu silnika w wybranym punkcie pracy dla określonego sterowania. Autorzy zbudowali odpowiedni model fizyczny silnika pozwalający na weryfikację wyników obliczeń symulacyjnych na drodze pomiarów laboratoryjnych.

2. Model badanego silnika SRM

Obiektem badań, zarówno symulacyjnych, jak i laboratoryjnych, jest silnik reluktancyjny przełączalny o konstrukcji 6/4, którego obwód magnetyczny stojana i wirnika oraz jedno z uzwojeń bieguna stojana przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Widok elementów silnika SRM 6/4

Podstawowe wymiary geometryczne i parametry badanego silnika o konstrukcji 6/4 zamieszczono w tabeli 1.

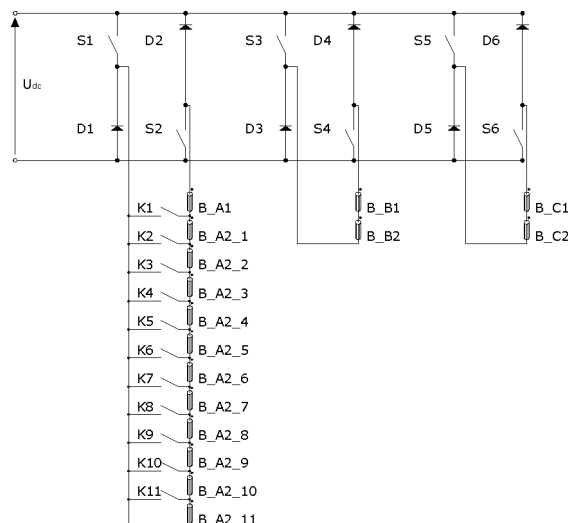
Tabela 1. Podstawowe wymiary i parametry badanego silnika SRM 6/4

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_{sc} [mm]	94
Średnica wałka wirnika d_{sh} [mm]	10
Liczba zwojów na pasmo N_{ph}	224
Rezystancja pasma R_{ph} [Ω]	1.2

Badany silnik został przystosowany do analizy różnych stanów pracy. Jednym z nich jest stan zwarcia zwojowego. Układ zasilający, w którym do zasilania każdego pasma silnika zastosowano półmostki typu H, został również nieznacznie zmodyfikowany. Pozwala on na podłączenie silnika z wyprowadzonymi oddzielnie uzwojeniami każdego bieguna pasma.

3. Model symulacyjny połowo-obwodowy silnika SRM

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 programu FEM. Jedno z uzwojeń biegunów umownej fazy Ph1 zostało specjalnie przygotowane pod kątem analizy częściowego zwarcia zwojowego. To uzwojenie posiadające 112 zwojów 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 przebiegów czasowych z uwzględnieniem częściowego zwarcia zwojowego koniecznym staje się zastosowanie w modelu symulacyjnym odpowiedniego obwodu zasilającego. Odpowiednia konfiguracja obwodu zewnętrznego pozwala na realizację zwierania poszczególnych sekcji uzwojenia. Na rysunku 2 przedstawiono schemat połączeń obwodu zewnętrznego, który umożliwia dokonywanie zwarć zwojowych w stanach ustalonych i przejściowych.



Rys.2. Schemat obwodu zewnętrznego modelu przeznaczony do analizy częściowych zwarć zwojowych

4. Obliczenia symulacyjne silnika SRM

Wszystkie obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla identycznych warunków sterowania, tj. przy zasilaniu jednopulsowym napięciem $U_{dc}=24V$, kącie załączenia $\theta_{on}=-5^\circ$, kącie wyłączenia $\theta_{off}=28^\circ$. Dodatkowo założono stałą prędkość obrotową w trakcie obliczeń. W modelu zostały pominięte straty w żelazie, mechaniczne oraz zastosowano uproszczoną metodę modelowania elementów energoelektrycznych. Dodatkowo założono, że rezystancja pojedynczego zwoju jest równa rezystancji całego uzwojenia podzielonej przez liczbę zwojów przypadającą na jedno pasmo.

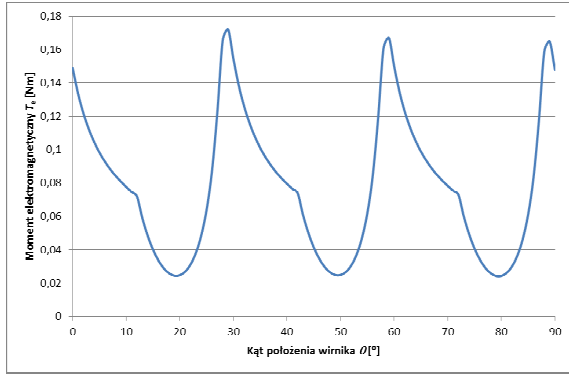
Rozpatrywano następujące przypadki zwarć zwojowych, które oznaczono następująco:

- N0 - brak zwarcia (pełne uzwojenie bieguna),
- N1 - zwarcie 1 zwoju,
- N2 - zwarcie 2 zwojów,
- N4 - zwarcie 4 zwojów,
- N7 - zwarcie 7 zwojów,
- N14 - zwarcie 14 zwojów,
- N28 - zwarcie 28 zwojów,
- N56 - zwarcie 56 zwojów (połowy uzwojenia bieguna),
- N112 - zwarcie 112 zwojów (całego uzwojenia jednego bieguna).

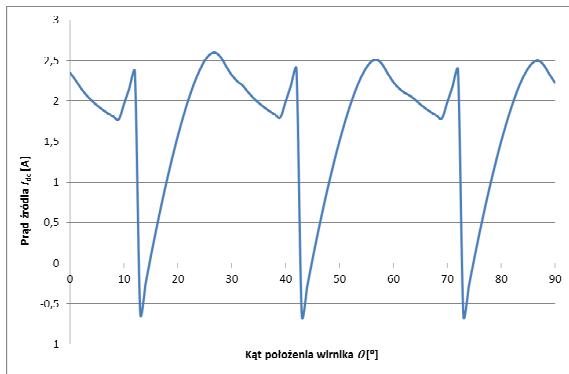
4.1. Wyniki symulacji dla stanu pełnej symetrii elektrycznej i magnetycznej (N0)

Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono zależności, odpowiednio momentu elektromagnetycznego

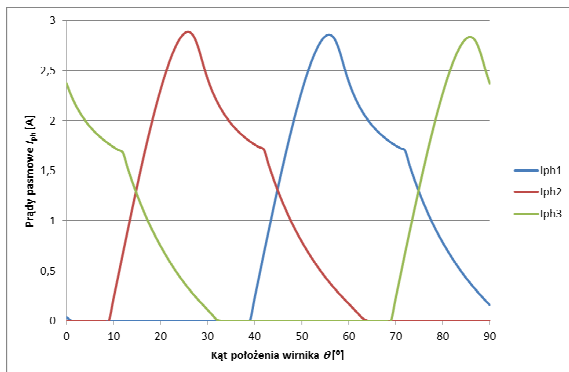
T_e (rys. 3), prądu źródła zasilającego I_{dc} (rys. 4) oraz prądów pasmowych I_{ph} (rys. 5) w funkcji położenia wirnika θ dla pracy symetrycznej (N0) przy prędkości $n=3000$ obr/min. Przedstawione zależności stanowią punkt odniesienia dla analizy wpływu wybranych zwarcć na właściwości silnika. Wybrane wyniki zwarcć przedstawiono w następujących punktach.



Rys.3. Zależność momentu T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ dla pracy bez zwarc (N0)



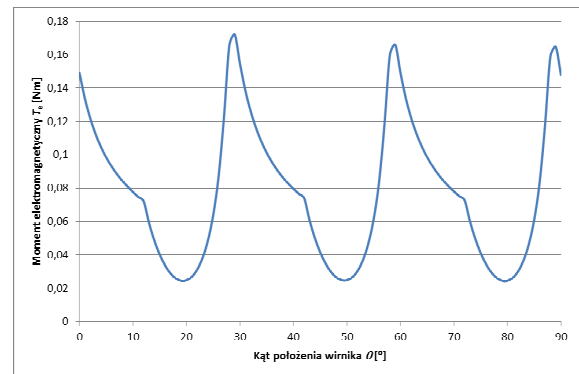
Rys. 4. Zależność prądu źródła I_{dc} w funkcji kąta położenia wirnika θ dla pracy bez zwarc (N0)



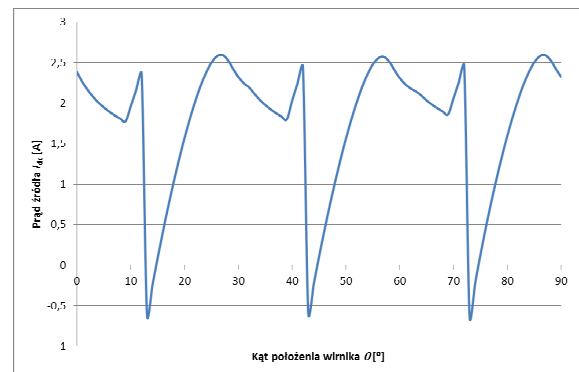
Rys.5. Zależność prądów pasmowych I_{ph} w funkcji kąta θ dla pracy bez zwarc (N0)

4.2. Wyniki symulacji dla stanu częściowego zwarcia (N1)

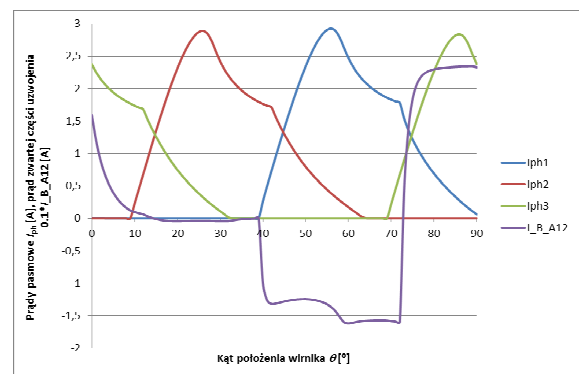
Po załączeniu klucza K12 pokazanego na rysunku 2 zostaje zwarta sekcja B_A12, której przypisany jest jeden zwoj uzwojenia bieguna pasma Ph1. Na rysunkach 6, 7 i 8 przedstawiono zależność momentu T_e (rys. 6), prądu źródła zasilającego I_{dc} (rys. 7) oraz prądów pasmowych I_{ph} , łącznie z prądem w zwartej części uzwojenia (rys. 8), w funkcji kąta położenia wirnika θ przy prędkości $n=3000$ obr/min.



Rys.6. Zależność momentu T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ dla stanu zwarcia (N1)



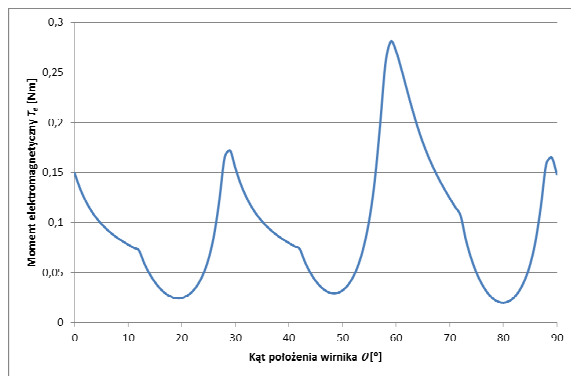
Rys. 7. Zależność prądu źródła I_{dc} w funkcji kąta położenia wirnika θ dla stanu zwarcia (N1)



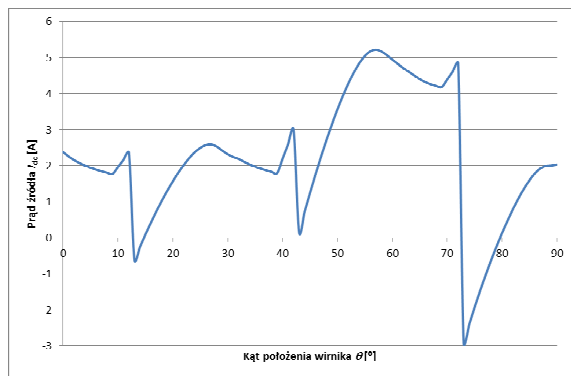
Rys.8. Zależność prądów pasmowych I_{ph} w funkcji kąta położenia θ dla stanu zwarcia (N1)

4.3. Wyniki symulacji dla stanu zwarcia uzwojenia jednego bieguna (N112)

Po założeniu klucza K1 z rysunku 2 następuje zwarcie całego uzwojenia jednego bieguna pisma Ph1. Na rysunkach 9, 10 i 11 przedstawiono zależności, odpowiednio momentu elektromagnetycznego T_e (rys. 9), prądu źródła zasilającego I_{dc} (rys. 10) oraz prądów pasmowych I_{ph} łącznie z prądem w zwartej części uzwojenia (rys. 11), w funkcji położenia wirnika θ . Obliczenia wykonano przy założeniu, że prędkość silnika $n=3000$ obr/min.

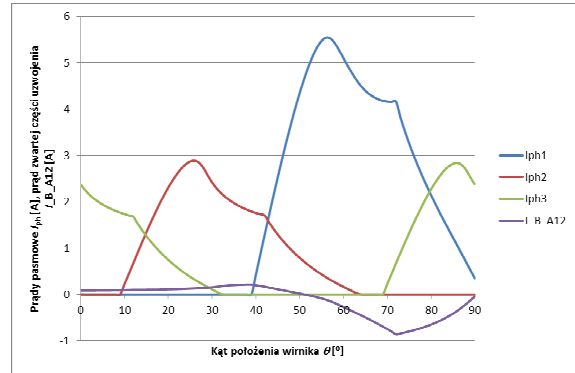


Rys.9. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji położenia wirnika θ dla stanu zwarcia (N112)



Rys.10. Zależność prądu źródła I_{dc} w funkcji położenia wirnika θ dla stanu zwarcia (N112)

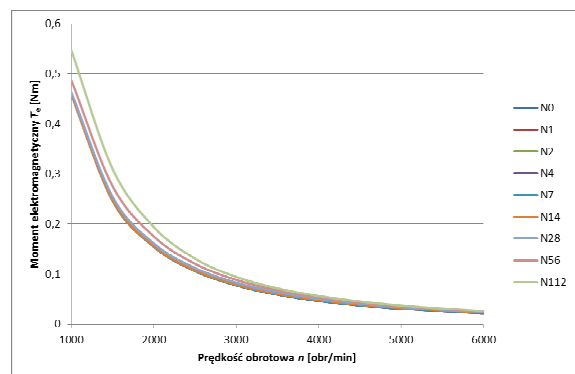
Porównując zależności momentu elektromagnetycznego oraz prądów dla tego przypadku zwarcia z zależnościami dla pracy bez zwarcia widać znaczne różnice wpływające na wypadkowe charakterystyki silnika.



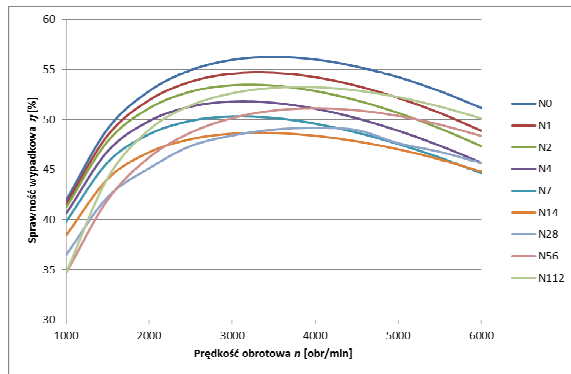
Rys.11. Zależność prądów pasmowych I_{ph} w funkcji położenia wirnika θ dla stanu zwarcia (N112)

4.4. Wyniki obliczeń charakterystyk statycznych dla różnych przypadków zwarcia

W celu wyznaczenia charakterystyk mechanicznych silnika przeprowadzono badania w zakresie zmiany prędkości obrotowej od 1000 obr/min do 6000 obr/min z krokiem 500 obr/min. Na rysunku 12 przedstawiono wyznaczone zależności momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji prędkości obrotowej n dla wszystkich analizowanych przypadków pracy silnika podanych w punkcie 4, tj. od pracy bez zwarcia oznaczonej jako N0 do pracy dla stanu zwarcia uzwojenia jednego bieguna oznaczonego jako N112. Zależności wypadkowej sprawności silnika η od prędkości obrotowej n dla analizowanych stanów pracy silnika przedstawiono na rysunku 13.



Rys.12. Zależność wypadkowego momentu elektromagnetycznego T_e w funkcji prędkości obrotowej n dla analizowanych stanów pracy silnika

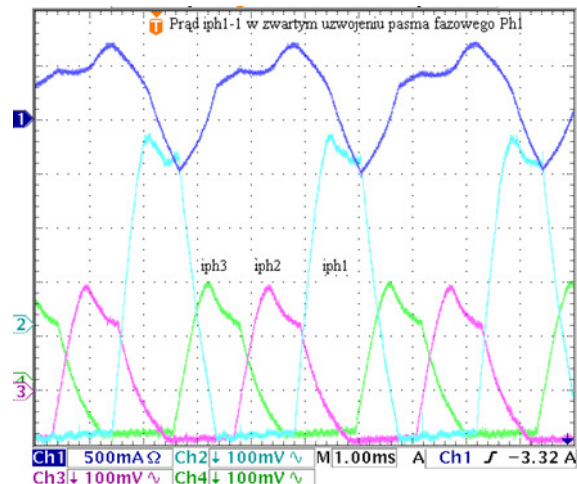


Rys. 13. Zależność wypadkowej sprawności η od prędkości obrotowej n dla analizowanych przypadków zwarcia

Należy zwrócić uwagę, że w przypadku maszyny z dużą liczbą zwojów przypadającą na jeden biegun zwarcie niewielkiej liczby zwojów ma praktycznie niezauważalny wpływ na wartość wytwarzanego momentu elektromagnetycznego. Pomijając aspekty termiczne zwarcie tylko jednego zwoju wpływa w sposób zauważalny na zmniejszenie sprawności maszyny. Nieco inaczej wygląda sytuacja w przypadku zwarcia całego uzwojenia bieguna. To powoduje znaczącą zmianę indukcyjności własnej uszkodzonego pasma [1,2]. Prowadzi to wprawdzie do znacznego pogorszenia charakterystyki momentowej uszkodzonego pasma, ale jednocześnie znaczny wzrost prądu w pozostałej części pasma kompensuje spadek momentu spowodowany uszkodzeniem uzwojenia. W konsekwencji wypadkowy moment elektromagnetyczny silnika ulega zwiększeniu, co widać na rysunkach 9 i 12. Sprawność maszyny w tym przypadku ulega zmniejszeniu.

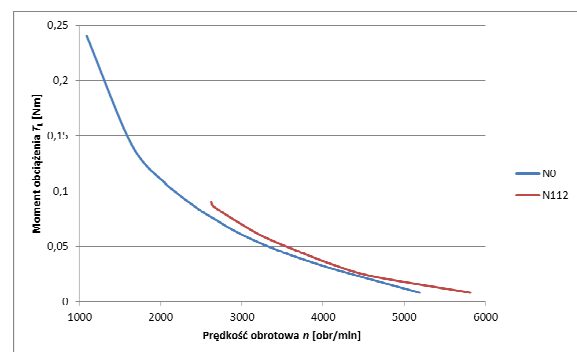
5. Wyniki badań laboratoryjnych

W warunkach laboratoryjnych dla zbudowanego modelu silnika SRM dokonano rejestracji przebiegów czasowych prądów pasmowych oraz prądów w zwartych zwojach. Dla następujących warunków pracy silnika, tj. napięcia zasilającego $U_{dc}=24V$, kąta załączenia $\theta_{on}=-5^\circ$, kąta wyłączenia $\theta_{off}=28^\circ$ zarejestrowano przypadek zwarcia zwojowego oznaczony, jako N112. Na rysunku 14 przedstawiono przebiegi czasowe prądów pasmowych oraz prądu w zwartej części uzwojenia bieguna stojana dla przypadku zwarcia oznaczonego, jako N112.



Rys. 14. Przebiegi czasowe prądów pasmowych oraz prądu w zwartej części uzwojenia bieguna (N112)

Porównując przebiegi z rysunku 14 uzyskane na drodze badań laboratoryjnych z wynikami obliczeń symulacyjnych z rysunku 11, widać dużą przydatność opracowanego modelu symulacyjnego w analizie częściowego zwarcia zwojowego silnika reluktancyjnego przełączalnego. W warunkach laboratoryjnych wyznaczono również charakterystykę mechaniczną silnika $T_L=f(n)$ dla stanu pracy normalnej (N0) oraz dla stanu zwarcia całego uzwojenia bieguna (N112).



Rys. 15. Zależność momentu obciążenia T_L w funkcji prędkości obrotowej n dla stanu N0 i N112

Otrzymane wyniki potwierdzają wzrost wartości średniej momentu na wale silnika po wystąpieniu zwarcia całego uzwojenia bieguna, co jest zgodne z wynikami otrzymanymi na drodze symulacji komputerowej (rys.12). Z uwagi na znaczny wzrost wartości skutecznej prądu w uszkodzonym paśmie nie było możliwe osiągnięcie identycznego zakresu zmian prędkości obrotowej, jak w przypadku pracy normalnej.

Ostatnim aspektem, który należy uwzględnić w trakcie analizy częściowych zwarc zwojowych są aspekty wibroakustyczne. Z przeprowadzonych badań laboratoryjnych można wywnioskować, że zwarcie niewielkiej liczby zwojów nie wpływa w sposób znaczący na pogorszenie parametrów eksploatacyjnych silnika czy też parametrów wibroakustycznych. Nieco inaczej wygląda sytuacja w przypadku zwarcia całego uzwojenia biegunów. W takim przypadku następuje znaczące pogorszenie parametrów silnika oraz znaczący wzrost drgań i generowanego hałasu. Jeżeli jednak pomimo znaczącego pogorszenia parametrów wibroakustycznych dalsza praca silnika jest konieczna, np. w, tzw. napędach krytycznych, to jest to czasowo możliwe. Właściwość taka jest zaletą maszyn reaktancyjnych przełączalnych. Należy jednak zauważyć, że w niniejszej pracy rozpatrywano przypadek konstrukcji maszyny o dwóch biegunach przypadających na jedno pasmo. Podwojenie lub potrojenie liczby biegunów przypadających na jedno pasmo prowadzi do jeszcze większej tolerancji stanów zwarcia zwojowego z punktu widzenia wibroakustycznego. Analiza konstrukcji o zwiększonej liczbie biegunów przypadających na jedno pasmo będzie tematem dalszych prac badawczych.

6. Wnioski

Z punktu widzenia samych charakterystyk ruchowych w przypadku maszyny o dużej liczbie zwojów przypadających na jeden biegun zwarcie niewielkiej liczby zwojów jest praktycznie niezauważalne. Następuje jednak zauważalny spadek sprawności wypadkowej maszyny. Przy zwarcu całego uzwojenia biegunów sytuacja ulega zmianie. Pomimo zwarcia, wartość średnia momentu elektromagnetycznego ulegnie zwiększeniu jednak pod warunkiem, że amplituda prądu w uszkodzonym pasmie nie będzie ograniczona. W zwartej części uzwojenia płynie prąd, którego wartość zależy od liczby zwartych zwojów. W przypadku zwarcia pojedynczych zwojów jego wartość skuteczna kilkakrotnie przekracza wartość prądu w pozostałej części uzwojenia. Z punktu widzenia termicznego jest to stan bardzo niebezpieczny, ponieważ może prowadzić do lokalnego bardzo intensywnego wydzielania ciepła. Wraz ze wzrostem liczby zwartych zwojów skutki termiczne stają się nieco mniej odczuwalne. W zwartej części płynie relatywnie niewielka wartość prądu w przeciwieństwie do pozostałej części

uzwojenia. W przypadku zwarcia całego uzwojenia biegunów następuje znaczący wzrost drgań silnika i generowanego hałasu.

7. 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., Mazurkiewicz A., Prokop J.: *Badania symulacyjne zwarc zwojowych w silniku reaktancyjnym przełączalnym*, Zeszyty Problemowe- Maszyny Elektryczne Nr 91 (3/2011), BOBRME KOMEL, str. 15-20.
- [3]. Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Analiza uszkodzeń elektrycznych silników reaktancyjnych przełączalnych*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 84 NR 12/2008, str. 24-27.
- [4]. 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.
- [5]. 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.
- [6]. 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.

Badania przeprowadzono z zastosowaniem aparatury zakupionej 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. Jan Prokop, jprokop@prz.edu.pl
 Politechnika Rzeszowska
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki
 ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów