

Analiza wpływu sprzężeń magnetycznych na właściwości maszyny reluktancyjnej przełączalnej

Streszczenie. W pracy omówiono wpływ sprzężeń magnetycznych międzypasmowych na wybrane właściwości czteropasmowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej pracującej jako generator. Na podstawie modelu numerycznego został wyznaczony główny strumień magnetyczny dla jednego z wybranych uzwojeń. Dla pozostałych niezasilanych uzwojeń określono strumienie sprzężone. Na podstawie modelu obwodowo-polowego wyznaczono przebiegi czasowe prądów, napięć, momentu elektromagnetycznego przy uwzględnieniu wszystkich istniejących sprzężeń magnetycznych oraz przy założeniu niezależności magnetycznej pomiędzy poszczególnymi pasmami generatora. W warunkach laboratoryjnych przeprowadzono praktyczną weryfikację wpływu sprzężeń magnetycznych na przebiegi czasowe prądów i napięć. Zamieszczono wnioski odnośnie możliwości pomijania sprzężeń magnetycznych międzypasmowych w modelu obwodowym generatora reluktancyjnego przełączalnego.

Abstract. In paper was discussed an influence of mutual magnetic couplings on chosen properties of the four-phase Switched Reluctance Generator. A main magnetic flux of chosen winding was calculated based on a numerical model of the generator. Flux linkages were determined for remaining unpowered windings. Current, voltage and electromagnetic torque waveforms were determined based on a field-circuit model of the generator taking into account all existed magnetic couplings and by assumption that all phases are magnetically independent. A practical verification of influence of magnetic couplings on current and voltage waveforms were conducted in laboratory conditions. Conclusions of possibility of mutual magnetic couplings omitting in a circuit model of the Switched Reluctance Generator were placed. (Analysis of mutual couplings influence on properties of the switched reluctance machine)

Słowa kluczowe: maszyna reluktancyjna przełączalna, praca generatorowa, sprzężenia magnetyczne.

Keywords: switched reluctance machine, generator mode, magnetic coupling.

Wstęp

Do cech charakterystycznych maszyn reluktancyjnych przełączalnych oprócz prostej budowy należy zaliczyć bardzo szeroki zakres prędkości pracy. Maszyny tego typu mogą pracować zarówno jako silnik jak i generator [1-6]. Z uwagi na szeroki zakres regulacji prędkości obrotowej umożliwiają dopasowanie punktu pracy do wymagań stawianych co do wydawanej mocy [4, 6].

W maszynach reluktancyjnych przełączalnych pomimo niezależnego zasilania uzwojeń pomiędzy poszczególnymi pasmami występują sprzężenia magnetyczne, a ich stopień zależy od trybu i punktu pracy maszyny. W dotychczasowych publikacjach dotyczących zarówno pracy silnikowej jak i generatorowej w modelach symulacyjnych zazwyczaj pomija się wpływ wzajemnych sprzężeń magnetycznych międzypasmowych. W modelach symulacyjnych strumienie magnetyczne pochodzące od poszczególnych pasm maszyny przyjmuje się jako wzajemnie niezależne co niewątpliwie znacznie upraszcza proces modelowania pracy maszyny. W przypadku pracy silnikowej wzajemne sprzężenia magnetyczne mają wpływ np. na dokładność metod ograniczania tętnień momentu elektromagnetycznego czy też metod estymacji położenia wirnika [7]. W przypadku autonomicznej pracy generatorowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej ich znaczenie ujawnia się w np. postaci wzrostu tętnień napięcia wyjściowego U_{dc} [8].

Celem niniejszej pracy jest analiza przebiegów prądów pasmowych w zależności od sposobu zasilania uzwojeń maszyny reluktancyjnej przełączalnej pracującej jako generator. Zmiana kierunku przepływu prądu w sąsiadujących ze sobą pasmach wpływa na rozptył strumienia magnetycznego w maszynie, a tym samym na stopień sprzężenia magnetycznego pomiędzy poszczególnymi pasmami. W pracy wykazano, że pominięcie sprzężeń magnetycznych międzypasmowych wpływa na przebiegi czasowe prądów, napięć, momentu elektromagnetycznego maszyny reluktancyjnej przełączalnej pracującej jako generator. Na podstawie modelu polowego wyznaczono strumień sprzężony z jednym uzwojeniem oraz wyznaczono strumienie sprzężone z pozostałymi pasmami maszyny reluktancyjnej

przełączalnej. Przy zastosowaniu modelu polowo-obwodowego [9] wyznaczono przykładowe przebiegi czasowe prądów, napięć, oraz momentu elektromagnetycznego dla modelu pełnego oraz przy pominięciu sprzężeń magnetycznych międzypasmowych. W warunkach laboratoryjnych dokonano praktycznej weryfikacji wpływu sprzężeń magnetycznych międzypasmowych na przebiegi czasowe prądów i napięć maszyny reluktancyjnej przełączalnej pracującej jako generator. Zamieszczono wnioski dotyczące wpływu sprzężeń magnetycznych międzypasmowych na parametry generatora reluktancyjnego przełączalnego.

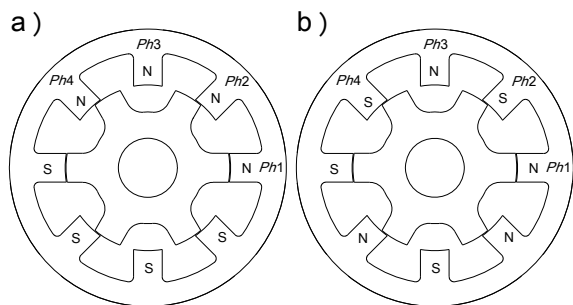
Obiekt badań

Obiektem badań była czteropasmowa maszyna reluktancyjna przełączalna o konfiguracji 8/6 i parametrach zestawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie wybranych parametrów elektrycznych i geometrycznych badanej maszyny

Parametr	Wartość
Liczba pasm maszyny m	4
Liczba biegunów stojana N_s	8
Liczba biegunów wirnika N_r	6
Napięcie znamionowe U_N [V]	24
Moc znamionowa P_N [W]	750
Prędkość znamionowa n_N [obr/min]	3000
Rozpiętość kątowa bieguna stojana β_s [°]	19
Rozpiętość kątowa zęba wirnika β_r [°]	22
Szczelina powietrzna δ [mm]	0,4
Długość pakietu żelaza L_{Fe} [mm]	70
Rezystancja stojana R_{20° [Ω]	0,02
Indukcyjność w położeniu niewspółosiowym L_u [mH]	0,55
Indukcyjność w położeniu niewspółosiowym L_a [mH] przy $I=10A$	2,9

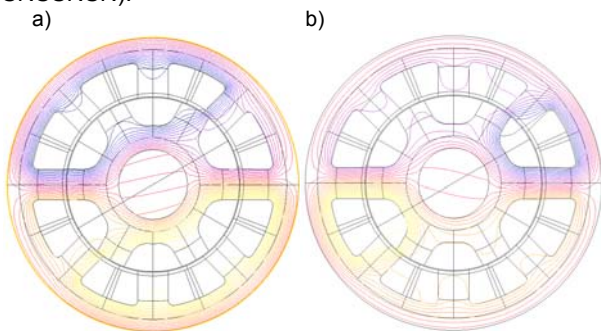
Maszyna reluktancyjna przełączalna czteropasmowa 8/6, w której uzwojenia przeciwległych biegunów połączone są szeregowo może być zasilana tak, że kierunek pola na poszczególnych biegunach może być różny, tj. NNNNSSSS oraz NSNSSNSN, co przedstawiono na rysunku.1.



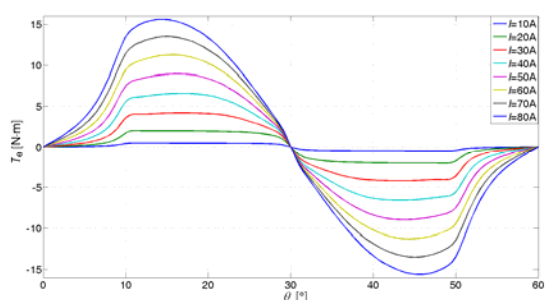
Rys.1. Dostępne konfiguracje zasilania uzwojeń biegunów dla konstrukcji czteropasmowej 8/6 a) NNNNSSSS, b) NSNSSNSN

Badania symulacyjne - wyznaczenie charakterystyk statycznych

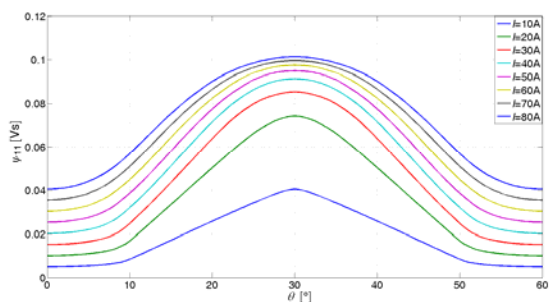
Charakterystyki statyczne badanej maszyny zostały wyznaczone za pomocą modelu polowego 2D zbudowanego w programie komercyjnym. Przykładowe rozkłady izolinii strumienia magnetycznego dla umownych pasm $Ph1$ oraz $Ph2$ przy założeniu, że w obu uzwojeniach płynie ta sama wartość prądu I pokazano na rysunku 2 (rys.2a – konfiguracja NNNNSSSS, rys.2b – konfiguracja NSNSSNSN).



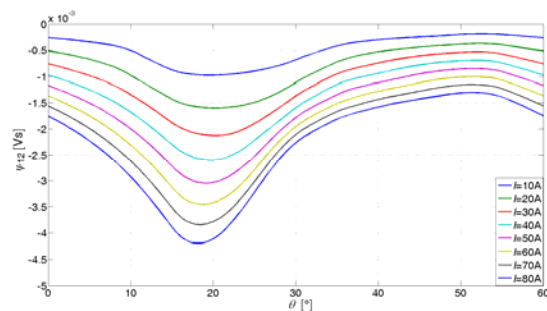
Rys.2. Przykładowy rozkład strumienia magnetycznego ψ dla wybranego położenia wirnika θ oraz zasileniu pasm $Ph1$ oraz $Ph2$ prądem I . a) konfiguracja NNNNSSSS, b) konfiguracja NSNSSNSN



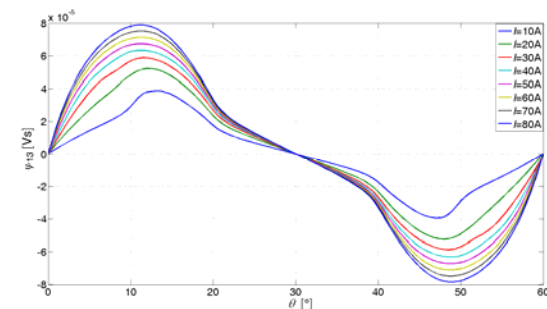
Rys.3. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e od kąta położenia wirnika θ dla różnych wartości prądu I w umownym paśmie pierwszym $Ph1$



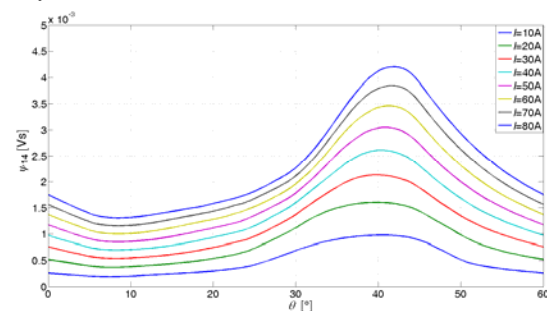
Rys.4. Zależność strumienia głównego ψ_{11} od kąta położenia wirnika θ dla różnych wartości prądu I w umownym paśmie pierwszym $Ph1$



Rys.5. Zależność strumienia sprzężonego ψ_{12} od kąta położenia wirnika θ dla różnych wartości prądu I w umownym paśmie pierwszym $Ph1$



Rys.6. Zależność strumienia sprzężonego ψ_{13} od kąta położenia wirnika θ dla różnych wartości prądu I w umownym paśmie pierwszym $Ph1$



Rys.7. Zależność strumienia sprzężonego ψ_{14} od kąta położenia wirnika θ dla różnych wartości prądu I w umownym paśmie pierwszym $Ph1$

Obliczenia wykonywano dla całego cyklu elektrycznego tj. w zakresie zmiany położenia wirnika o kąt 60° ze skokiem co $0,5^\circ$, przy stałej wartości prądu. W celu wyznaczenia rodziny charakterystyk momentowych i strumieniowych, wartość prądu zmieniano w zakresie (5÷80)A ze skokiem co 5A. Na rysunku 3 pokazano wyznaczone charakterystyki momentowo-kątowo-prądowe.

Strumień główny ψ_{11} pasma $Ph1$ pokazano na rysunku 4, natomiast strumienie sprzężone z pozostałymi pasmami tj. pasma $Ph2$ - ψ_{12} (rys.5), $Ph3$ - ψ_{13} (rys.6) oraz $Ph4$ - ψ_{14} (rys.7).

Strumienie sprzężone ψ_{12} oraz ψ_{14} osiągają maksymalne procentowe sprzężenie na poziomie (5-6.5)% strumienia głównego ψ_{11} w zależności od wartości prądu I .

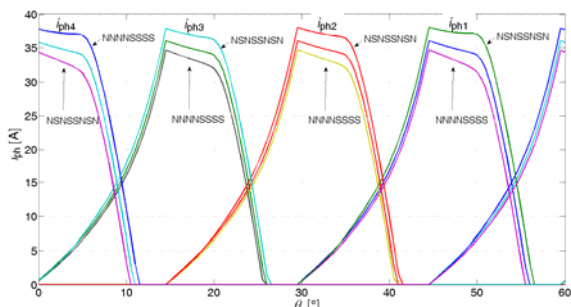
Badania symulacyjne - wyznaczenie przebiegów prądów oraz momentu elektromagnetycznego

Przebiegi czasowe prądów, napięć, mocy wyjściowej oraz momentu elektromagnetycznego wyznaczano na bazie modelu polowo-obwodowego. Badania przeprowadzono przy założeniu stałej prędkości obrotowej $n=const$, stałej wartości napięcia stałego ($U_{dc}=24V$) oraz założeniu sterowania jednopulsowego w trzech przypadkach:

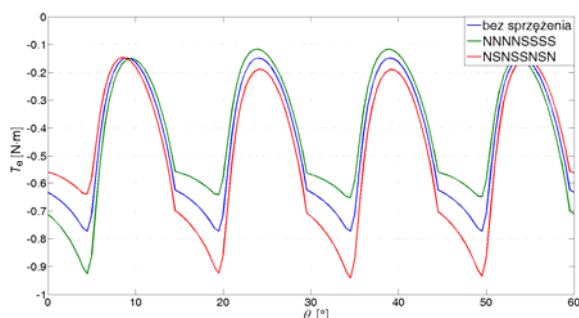
- zasilanie tylko jednego pasma tj. umownego $Ph1$,
- zasilanie typu NNNNSSSS (rys.1a),
- zasilanie typu NSNSSNSN (rys.1b).

Uzyskane wyniki w przypadku zasilania tylko jednego pasma (przypadek a) i ich powieleniu pozwalają uzyskać przebiegi czasowe prądów, napięć oraz momentu elektromagnetycznego z całkowitym pominięciem sprzężeń magnetycznych międzypasmowych. Pozwala to uzyskać odniesienie do dwóch pozostałych analizowanych przypadków.

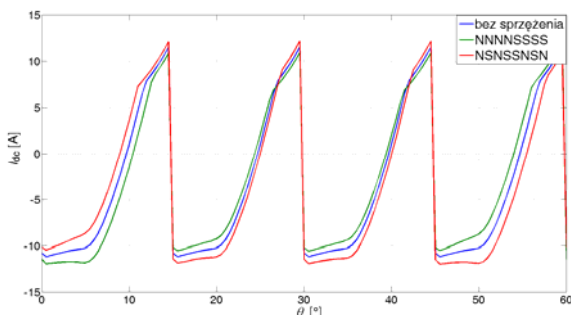
Na rysunku 8 pokazano zależność prądów i_{ph} poszczególnych pasm od kąta położenia wirnika θ uzyskane przy prędkości $n=3000$ obr/min, kącie załączenia $\theta_{on}=29^\circ$, $\theta_{off}=44^\circ$ (dla pasma $Ph1$). Zależność momentu elektromagnetycznego T_e oraz prądu źródła I_{dc} od położenia wirnika θ pokazano odpowiednio na rysunkach 9-10.



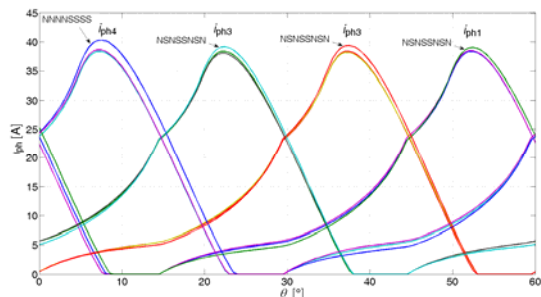
Rys. 8. Zależność prądów pasmowych i_{ph} od położenia wirnika θ dla $\theta_{on}=29^\circ$, $\theta_{off}=44^\circ$



Rys. 9. Zależność momentu elektromagnetycznego T_e od położenia wirnika θ dla $\theta_{on}=29^\circ$, $\theta_{off}=44^\circ$



Rys. 10. Zależność prądu źródła I_{dc} od położenia wirnika θ dla $\theta_{on}=29^\circ$, $\theta_{off}=44^\circ$



Rys. 11. Zależność prądów pasmowych i_{ph} od położenia wirnika θ dla $\theta_{on}=14^\circ$, $\theta_{off}=44^\circ$

Dla pokazania wpływu kąta załączenia i przewodzenia zostały wyznaczone zależności prądów i momentu elektromagnetycznego przy $\theta_{on}=14^\circ$ i $\theta_{off}=44^\circ$ (dla pasma $Ph1$) dla tej samej prędkości tj. $n=3000$ obr/min. Na rysunku 11 pokazano zależność prądów i_{ph} poszczególnych pasm od kąta położenia wirnika θ wyznaczone w w/w warunkach sterowania.

Wpływ sprzężeń magnetycznych jest szczególnie zauważalny przy załączaniu uzwojeń w pobliżu położenia współosiowego. W takim przypadku rodzaj zasilania odgrywa istotne znaczenie. Przy zasilaniu typu NNNNSSSS uzyskuje się jeden prąd pasma o wyraźnie zwiększonej wartości. W przypadku zasilania typu NSNSSNSN jest dokładnie odwrotnie. Jeden z prądów pasma jest wyraźnie mniejszy (rys.8 i 11). To przekłada się na wytworzony moment elektromagnetyczny T_e (rys.9) czy też prąd źródła I_{dc} (rys.10). Przesunięcie kąta załączenia w kierunku położenia niewspółosiowego przy jednoczesnym pozostawieniu kąta wyłączenia bez zmiany powoduje, że wpływ sprzężeń magnetycznych na przebiegi prądów poszczególnych pasm (rys.11), prąd źródła (nie pokazano) czy też moment elektromagnetyczny (nie pokazano) jest mniej istotny. W przypadku zasilania typu NSNSSNSN jest on bardziej zauważalny niż dla zasilania typu NNNNSSSS.

Badania laboratoryjne

Do przeprowadzenia badań w warunkach laboratoryjnych zaprojektowano i wykonano stanowisko pomiarowe (rys.12). W skład stanowiska wchodzi silnik prądu stałego wraz z układem stabilizacji prędkości obrotowej, momentomierz, maszyna reluktancyjna przełączalna 8/6 wraz z układem energoelektronicznym. Do sterowania maszyną reluktancyjną przełączalną zastosowano kartę dSpace DS1104, a do rejestracji wyników - analizator mocy z możliwością akwizycji danych. Jako odbiornik energii zastosowano akumulator kwasowy o napięciu znamionowym 12V.



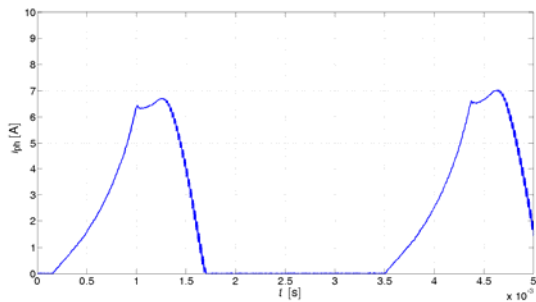
Rys. 12. Stanowisko do badania maszyny reluktancyjnej przełączalnej 8/6

W warunkach laboratoryjnych przeprowadzono weryfikację badań symulacyjnych. Badania miały na celu potwierdzenie wpływu sprzężeń magnetycznych na przebiegi czasowe prądów poszczególnych pasm maszyny reluktancyjnej przełączalnej. Badania przeprowadzono przy obniżonej wartości napięcia obciążenia tj. 12,7V dla analogicznych przypadków jak rozważanych w badaniach symulacyjnych. Przebiegi wyznaczano w trzech przypadkach:

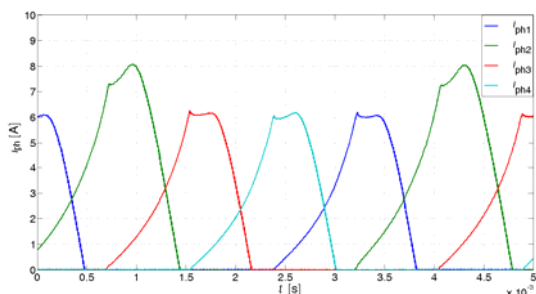
- zasilanie tylko jednego pasma tj. umownego $Ph1$,
- zasilanie typu NNNNSSSS (rys.1a),
- zasilanie typu NSNSSNSN (rys.1b).

Dla parametrów sterowania tj. kącie załączenia $\theta_{on}=29^\circ$ oraz kącie wyłączenia $\theta_{off}=44^\circ$ (dla pasma $Ph1$) oraz prędkości $n=3000$ obr/min zarejestrowano przebiegi czasowe prądów w poszczególnych pasmach. Przebieg prądu w paśmie $Ph1$

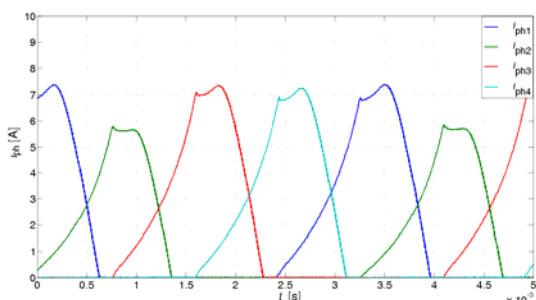
oraz braku zasilania pozostałych pasm pokazano na rysunku 13. W przypadku zasilania uzwojeń typu NNNNSSSS przebiegi prądów pokazano na rysunku 14 natomiast na rysunku 15 pokazano przebiegi prądów uzyskane przy zasilaniu typu NSNSSNSN.



Rys. 13. Przebieg prądu pasma i_{ph} przy prędkości $n=3000\text{obr/min}$ oraz braku zasilania pozostałych pasm



Rys. 14. Przebiegi prądów pasm i_{ph} przy prędkości $n=3000\text{obr/min}$ oraz zasilania typu NNNNSSSS



Rys. 15. Przebiegi prądów pasm i_{ph} przy prędkości $n=3000\text{obr/min}$ oraz zasilania typu NSNSSNSN

Wyniki badań laboratoryjnych uzyskano w innym punkcie pracy maszyny (przy napięciu $U_{dc}=12,7V$). Z tego też powodu w warunkach laboratoryjnych zaobserwowano znacznie większy wpływ sprzężeń magnetycznych niż w przypadku badań symulacyjnych. Badania laboratoryjne jednak potwierdzają zaobserwowane zjawisko zmiany amplitud prądów pasmowych w zależności od sposobu zasilania uzwojeń maszyny. Wpływ sprzężeń magnetycznych jest dla określonych parametrów sterowania już dość istotny.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych i laboratoryjnych można stwierdzić, że sprzężenia międzypasmowe mają wpływ na parametry maszyny reluktancyjnej przelączalnej pracującej w zakresie pracy generatorowej. Wpływ ten jest większy niż w przypadku pracy silnikowej. Klasyczna konstrukcja czteropasmowa umożliwia zastosowanie dwóch sposobów zasilania uzwojeń tj. NNNNSSSS oraz NSNSSNSN. Większą wrażliwość na sprzężenia magnetyczne międzypasmowe wykazuje sposób zasilania typu NSNSSNSN który jednocześnie generuje większą moc wyjściową maszyny.

Większy wpływ sprzężeń magnetycznych obserwuje się przy przepływie prądów na opadającym profilu indukcyjności pasma oraz stosunkowo krótkim okresem wzbudzenia. W takim przypadku wpływ sprzężeń międzypasmowych można uznać za istotny. Sytuacja ulega zmianie przy przesunięciu kąta załączenia w zakres narastającego profilu indukcyjności i jednocześnie wydłużeniu czasu wzbudzenia poszczególnych uzwojeń. Wpływ sprzężeń międzypasmowych ulega znacznemu zmniejszeniu niezależnie od sposobu zasilania uzwojeń. Nie mniej jednak zasilanie typu NSNSSNSN generuje większą moc wyjściową w każdym przypadku. Pominięcie sprzężeń międzypasmowych w modelu symulacyjnym wprowadza niepewność w oszacowaniu przewidywanej mocy wyjściowej maszyny na poziomie około ($3\pm 10\%$) przy konfiguracji NSNSSNSN. Konfiguracja NNNNSSSS jest nieco bardziej złożona ponieważ niepewność przewidywania mocy wyjściowej generatora kształtuje się na poziomie ($-7\pm 0\%$).

LITERATURA

- [1] Miller T. J. E., Electronic Control of Switched Reluctance Machines, *Newnes*, 2001,
- [2] Fahimi B., Emadi A, Sepe R. B., A Switched Reluctance Machine-Based Starter/Alternator for More Electric Cars, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 1, 2004, pp.116-124,
- [3] Da-Woon Choi, Sang-In Byun, Yun-Hyun Cho, A Study on the Maximum Power Control Method of Switched Reluctance Generator for Wind Turbine, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 1, 2014,
- [4] Kioskeridis I., Mademlis Ch., Optimal Efficiency Control of Switched Reluctance Generators, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 4, 2006, pp.1062-1072,
- [5] Silveira A. W. F. V., Andrade D. A., Fleury A. V. S, Gomes L. C., Bissochi C. A., Control of the SRM operating as a motor/generator, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2009*, pp.1558-1563,
- [6] Urase K., Kiyota K., Sugimoto H., Chiba A., Design of a Switched Reluctance Generator Competitive with the IPMG Generator in Hybrid Electrical Vehicles, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2012, pp. 1-6,
- [7] Panda D., Ramanarayanan V., Mutual Coupling and Its Effect on Steady-State Performance and Position Estimation of Even and Odd Number Phase Switched Reluctance Motor Drive, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, Issue 8, 2007, 3445-3456
- [8] De Paula P.P., Da Silva W. M., Cardoso J. R. and Nabeta S.L., Assessment of the Influences of the Mutual Inductances on Switched Reluctance Machines Performance, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03*, vol.3, 2003, pp.1732-1738,
- [9] Bogusz P., Korkosz M., Powrózek A., Prokop J., Modelowanie pracy silnikowo-prądnicowej napędu z maszyną reluktancyjną przelączalną, *Przegląd Elektrotechniczny*, 12a/2012, pp. 56-61.

Autorzy:

dr inż. Piotr Bogusz, e-mail: pbogu@prz.edu.pl, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

dr hab. inż. Mariusz Korkosz, prof. PRZ, e-mail: mkosz@prz.edu.pl, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

mgr inż. Adam Powrózek, e-mail: apow@prz.edu.pl, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów