

Piotr BOGUSZ¹
Mariusz KORKOSZ²
Adam POWRÓZEK³

ANALIZA WPLYWU SPRZEŻEŃ MAGNETYCZNYCH NA CHARAKTERYSTYKI GENERATORA RELUKTANCYJNEGO PRZEŁĄCZALNEGO

W pracy omówiono wpływ sprzężeń magnetycznych międzypasmowych na wybrane właściwości czteropasmowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej pracującej jako generator. Na podstawie modelu obwodowo-polowego wyznaczono przebiegi czasowe prądów poszczególnych pasm oraz zależności momentu elektromagnetycznego, mocy wyjściowej i sprawności w zależności od zmian prędkości przy uwzględnieniu wszystkich istniejących sprzężeń magnetycznych oraz przy założeniu niezależności magnetycznej pomiędzy poszczególnymi pasmami generatora. Zamieszczono wnioski odnośnie wpływu sprzężeń magnetycznych na wybrane charakterystyki generatora oraz wnioski dotyczące wyboru typu zasilania uzwojeń.

Słowa kluczowe: generator reluktancyjny przełączalny, sprzężenia magnetyczne

1. Wstęp

Maszyny reluktancyjne przełączalne (ang. Switched Reluctance Machine) charakteryzują się prostotą budowy wirnika (brak uzwojeń i magnesów), a co za tym idzie niskim kosztem produkcji, niewielką bezwładnością wirnika, czy możliwością pracy w wysokiej temperaturze [1]. Ze względu na gwałtowny rozwój elementów energoelektronicznych oraz spadku cen podzespołów mocy maszyny te zaczynają w coraz większej ilości dziedzin życia zastępować inne rodzaje silników.

¹ Piotr Bogusz, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrodynamiki i Układów Elektromaszynowych, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, email: pbogu@prz.edu.pl

² Mariusz Korkosz, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrodynamiki i Układów Elektromaszynowych, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, email: mkosz@prz.edu.pl

³ Autor do korespondencji: Adam Powróżek, Politechnika Rzeszowska, Katedra Elektrodynamiki i Układów Elektromaszynowych, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, email: apow@prz.edu.pl

Poprzez odpowiedni dobór kątów sterujących maszyna SRM może pracować zarówno, jako silnik jak i generator. Ze względu na wymienione cechy charakterystyczne tych maszyn prowadzone są na świecie badania nad zastosowaniem ich w napędach pojazdów elektrycznych i hybrydowych [2], w systemach lotniczych czy w elektrowniach wiatrowych [3]. W wielu tych zastosowaniach wymagana jest zarówno praca silnikowa i generatorowa. Przykładem tego typu rozwiązań jest zintegrowany system rozrusznik-generator [4-6]. Pomimo niezależnego zasilania uzwojeń maszyny pomiędzy pasmami występują sprzężenia magnetyczne, których stopień zależy od trybu i punktu pracy maszyny. W badaniach prowadzonych na świecie wzajemne sprzężenia magnetyczne międzypasmowe są pomijane, co prowadzi do znacznego uproszczenia modelu symulacyjnego. Pomińnięcie wpływu sprzężeń w przypadku pracy generatorowej objawia się w postaci wzrostu tętnień napięcia wyjściowego U_{dc} [7].

Celem niniejszej pracy jest analiza wpływu sprzężeń magnetycznych międzypasmowych na właściwości pracy generatora reluktancyjnego przełączalnego. Dokonano analizy wpływu sprzężeń na przebiegi prądów pasmowych oraz na wartość mocy wyjściowej i sprawności generatora przy różnych wartościach prędkości obrotowej w zależności od sposobu zasilania uzwojeń maszyny. Na podstawie modelu polowo-obwodowego wyznaczono przebiegi mocy wyjściowej generatora reluktancyjnego przełączalnego przy różnych prędkościach obrotowych dla pełnego modelu oraz przy pominięciu sprzężeń. Wyznaczono również przebiegi prądów pasmowych. Zamieszczono wnioski dotyczące wpływu sprzężeń magnetycznych międzypasmowych na parametry generatora reluktancyjnego przełączalnego.

2. Obiekt badań

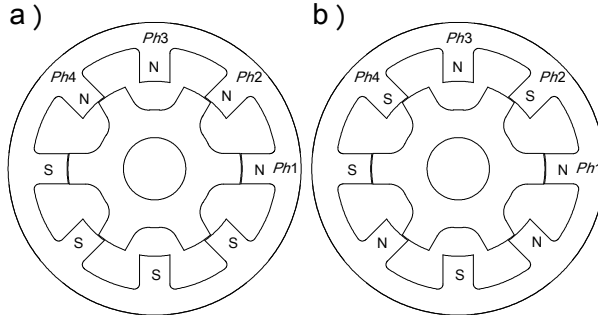
Obiektem badań była czteropasmowa maszyna reluktancyjna przełączalna o konfiguracji 8/6 i parametrach zestawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie wybranych parametrów elektrycznych badanej maszyny

Table 1. Chosen electrical parameters of tested machine

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

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

Fig. 1. Tested configurations of windings supply for four-phase 8/6 construction a) NNNNSSSS, b) NSNSSNSN

3. Model matematyczny

Pomijając prądy wirowe w rdzeniu stojana i wirnika, i zakładając, że w przypadku nieliniowości obwodu magnetycznego wektor strumieni skojarzonych ψ zależy od kąta obrotu wirnika i od N prądów w poszczególnych pasmach, według definicji:

$$\psi(\theta, \mathbf{i}) \stackrel{\text{def}}{=} [\psi_1(\theta, i_1, \dots, i_N), \dots, \psi_N(\theta, i_1, \dots, i_N)]^T \quad (1)$$

równania napięciowe N - pasmowej maszyny SRM mają postać:

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \frac{d}{dt}\psi(\theta, \mathbf{i}) \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_L = T_e \quad (3)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (4)$$

$$T_e = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta}{\delta \theta} \int_0^{i_i} \psi_i(\theta, i_1, \dots, \bar{i}_i, 0, \dots, 0) d\bar{i}_i \right) \quad (5)$$

przy czym:

$$\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_N]^T, \quad \mathbf{i} = [i_1, \dots, i_N]^T, \quad \mathbf{R} = \text{diag}(R_1, \dots, R_N).$$

W równaniach (1) - (5) zastosowano następujące oznaczenia: θ – kąt położenia wirnika, J – moment bezwładności wirnika, D – współczynnik tarcia lepkiego, T_L – moment obciążenia, T_e – moment elektromagnetyczny silnika.

4. Badania symulacyjne

W ramach badań symulacyjnych wyznaczono na bazie modelu połowo-obwodowego zbudowanego w programie komercyjnym przebiegi czasowe prądów poszczególnych pasm i_{ph} oraz zależności średniego momentu elektromagnetycznego T_{eav} , mocy wyjściowej P_{out} generatora oraz sprawności η w funkcji prędkości obrotowej wirnika n . Przy wyznaczaniu mocy wyjściowej P_{out} uwzględnione były tylko straty w miedzi, natomiast nie uwzględniono strat w rdzeniu magnetycznym. Sprawność generatora η wyznaczono z zależności:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (6)$$

gdzie: P_{out} – wyjściowa moc elektryczna generatora, P_{in} – dostarczona moc mechaniczna. Wejściowa moc mechaniczna wyznaczona może być z zależności:

$$P_{in} = \frac{T_e n}{9,55} \quad (7)$$

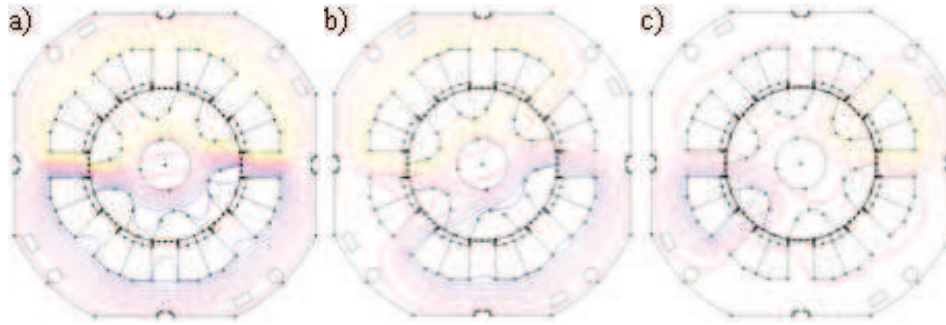
gdzie: T_e – moment elektromagnetyczny, n – prędkość obrotowa wirnika.

Przebiegi czasowe prądów wyznaczono przy założeniu stałej wartości napięcia ($U_{dc}=24V$) oraz dwóch wartości prędkości ($n=2000$ obr/min i $n=3000$ obr/min), natomiast zależności momentu T_{eav} , mocy wyjściowej P_{out} oraz sprawności η generatora w funkcji prędkości n wyznaczono przy założeniu stałej wartości napięcia ($U_{dc}=24V$) i zmian prędkości w zakresie od $n=1000$ obr/min do $n=4000$ obr/min. Przyjęto, że punkt 0° występuje w położeniu, gdzie indukcyjność uzwojenia pasma osiąga minimum. W obu przypadkach obliczeń dokonano przy założeniu sterowania jednopulsowego w trzech wariantach:

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

W przypadku zasilania tylko jednego pasma (przypadek a) wyniki zostały powielone, co pozwala uzyskać przebiegi czasowe z całkowitym pominięciem sprzężeń magnetycznych międzypasmowych.

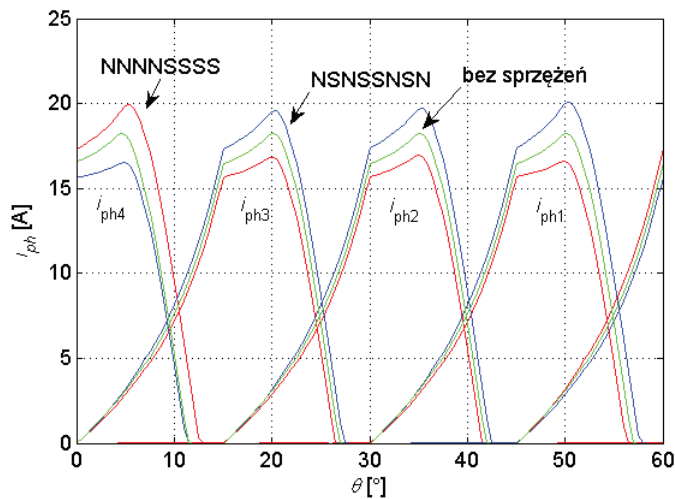
Na rysunku 2 pokazano przykładowy rozkład izolinii strumienia magnetycznego uzyskane dla wariantów: zasilania tylko jednego pasma $Ph1$ (rys.2a), zasilania NNNNSSSS (rys.2b), zasilania NSNSSNSN (rys.2c) uzyskane przy $\theta_{on}=15^\circ$ i $\theta_{off}=45^\circ$ (dla pasma $Ph1$) oraz położeniu wirnika $\theta=45^\circ$.



Rys. 2. Rozkład izolunii strumienia magnetycznego dla wariantów a) tylko uzwojenia Ph1 b) NNNNSSSS, c) NSNSSNSN dla $\theta_{on}=15^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$ przy prędkości $n=3000$ obr/min oraz położeniu wirnika $\theta=40^\circ$

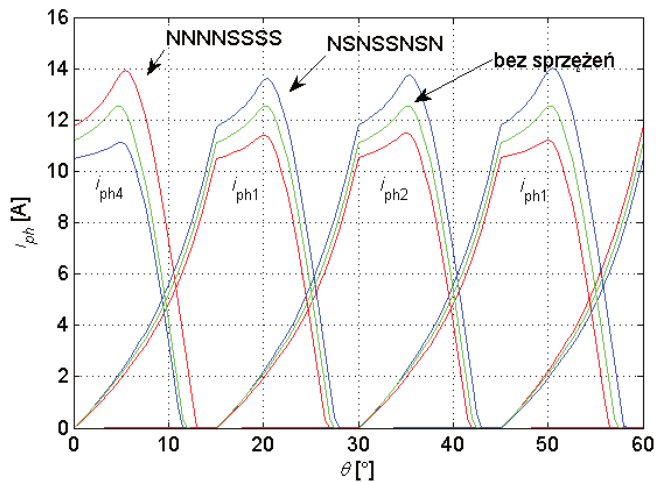
Fig. 2 . Distribution of magnetic flux for a) only Ph1, b) NNNNSSSS, c) NSNSSNSN for $\theta_{on}=30^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$ at speed $n=3000$ rev/min and rotor position $\theta=40^\circ$

Na rysunkach 3 i 4 pokazano zależności prądów poszczególnych pasm i_{ph} w funkcji kąta położenia wirnika θ , dla kątów załączenia $\theta_{on}=30^\circ$ i wyłączenia $\theta_{off}=45^\circ$ uzyskane przy prędkościach $n=2000$ obr/min (rys. 3) oraz $n=3000$ obr/min (rys. 4).



Rys. 3. Zależność prądów pasmowych i_{ph} od położenia wirnika θ dla $\theta_{on}=30^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$ przy prędkości $n=2000$ obr/min

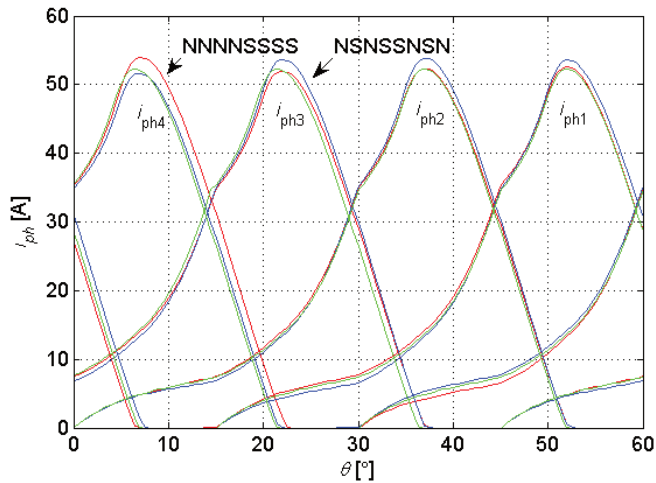
Fig. 3 . Dependence of phase currents i_{ph} in the function of rotor position θ for $\theta_{on}=30^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$ at speed $n=2000$ rev/min



Rys. 4. Zależność prądów pasmowych i_{ph} od położenia wirnika θ dla $\theta_{on}=30^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$ przy prędkości $n=3000$ obr/min

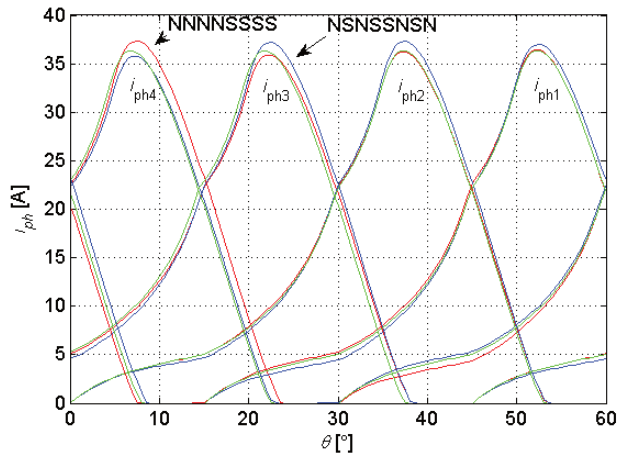
Fig. 4 . Dependence of phase currents i_{ph} in the function of rotor position θ for $\theta_{on}=30^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$ at speed $n=3000$ rev/min

Dla pokazania wpływu zmiany kąta załączenia θ_{on} oraz przedziału przewodzenia wyznaczone zostały zależności prądów przy $\theta_{on}=15^\circ$ i $\theta_{off}=45^\circ$ (dla pasma $Ph1$). Na rysunkach 5 i 6 pokazano zależność prądów i_{ph} od kąta położenia wirnika θ wyznaczone w w/w warunkach sterowania dla prędkości $n=2000$ obr/min (rys. 5) oraz $n=3000$ obr/min (rys. 6).



Rys. 5. Zależność prądów pasmowych i_{ph} od położenia wirnika θ dla $\theta_{on}=15^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$ przy prędkości $n=2000$ obr/min

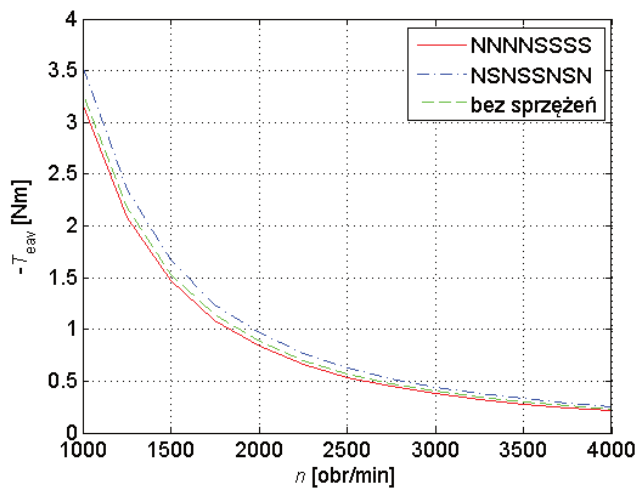
Fig. 5 . Dependence of phase currents i_{ph} in the function of rotor position θ for $\theta_{on}=15^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$ at speed $n=2000$ rev/min



Rys. 6. Zależność prądów pasmowych i_{ph} od położenia wirnika θ dla $\theta_{on}=15^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$ przy prędkości $n=3000$ obr/min

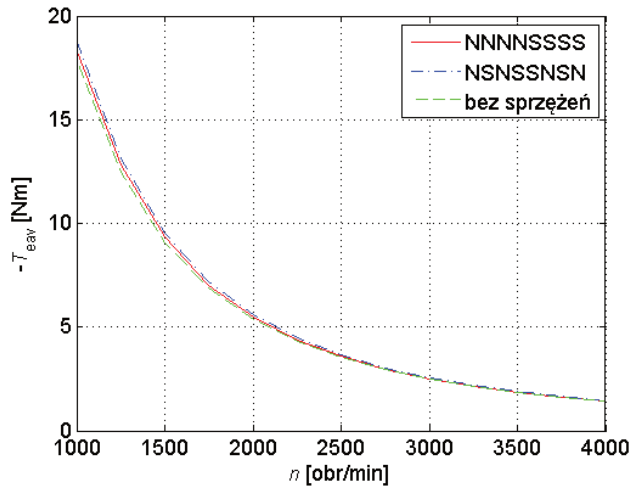
Fig. 6 . Dependence of phase currents i_{ph} in the function of rotor position θ for $\theta_{on}=15^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$ at speed $n=3000$ rev/min

Na rysunkach 7 i 8 pokazano zależności średniego momentu elektromagnetycznego T_{eav} od prędkości obrotowej wirnika n dla trzech przypadków konfiguracji uzwojeń przy $\theta_{on}=30^\circ$ i $\theta_{off}=45^\circ$ (rys. 7) oraz $\theta_{on}=15^\circ$ i $\theta_{off}=45^\circ$ (rys. 8).



Rys. 7. Zależność średniego momentu elektromagnetycznego T_{eav} od prędkości obrotowej n dla $\theta_{on}=30^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$

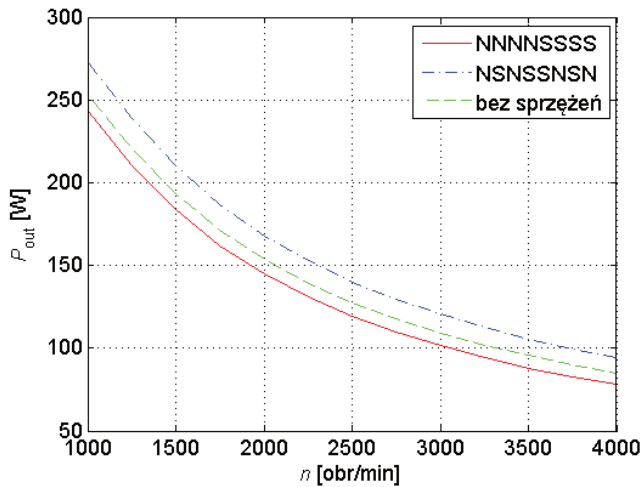
Fig. 7 . Dependence of average electromagnetic torque T_{eav} in the function of rotor speed n for $\theta_{on}=30^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$



Rys. 8. Zależność średniego momentu elektromagnetycznego T_{eav} od prędkości obrotowej n dla $\theta_{\text{on}}=15^\circ$, $\theta_{\text{off}}=45^\circ$

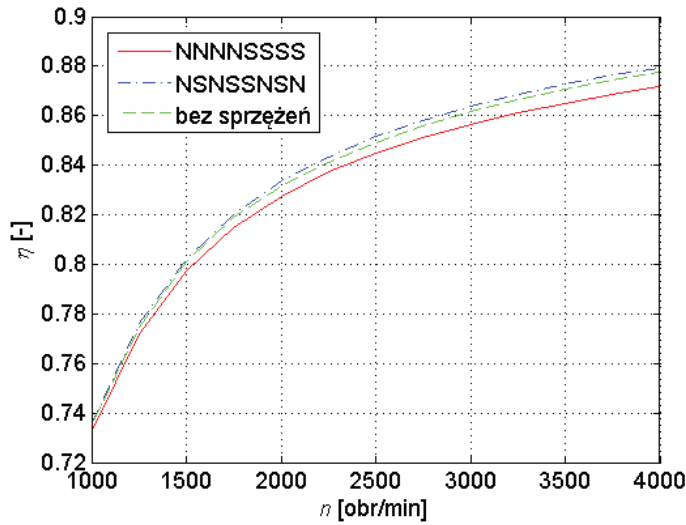
Fig. 8. Dependence of average electromagnetic torque T_{eav} in the function of rotor speed n for $\theta_{\text{on}}=15^\circ$, $\theta_{\text{off}}=45^\circ$

Na rysunkach 9 i 10 pokazano zależności mocy wyjściowej P_{out} generatora SRG oraz sprawności η od prędkości obrotowej wirnika n dla trzech przypadków konfiguracji uzwojeń przy $\theta_{\text{on}}=30^\circ$ i $\theta_{\text{off}}=45^\circ$, natomiast na rysunkach 11 i 12 przy $\theta_{\text{on}}=15^\circ$ i $\theta_{\text{off}}=45^\circ$.



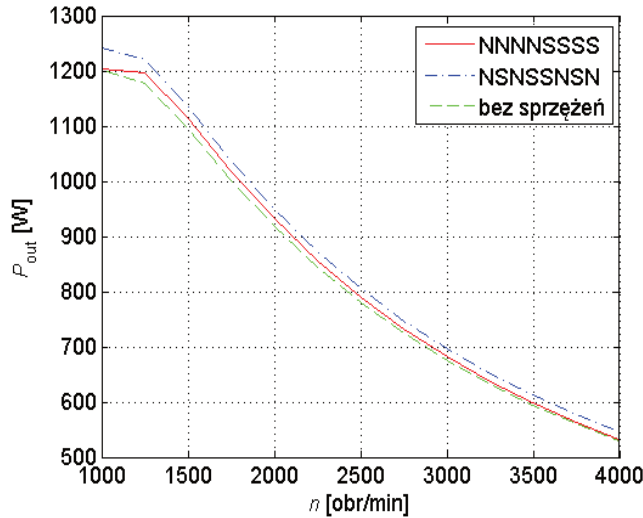
Rys. 9. Zależność mocy wyjściowej P_{out} od prędkości obrotowej n dla $\theta_{\text{on}}=30^\circ$, $\theta_{\text{off}}=45^\circ$

Fig. 9. Dependence of output power P_{out} in the function of rotor speed n for $\theta_{\text{on}}=30^\circ$, $\theta_{\text{off}}=45^\circ$



Rys. 10. Zależność sprawności η od prędkości obrotowej n dla $\theta_{on}=30^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$

Fig. 10 . Dependence of efficiency η in the function of rotor speed n for $\theta_{on}=30^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$

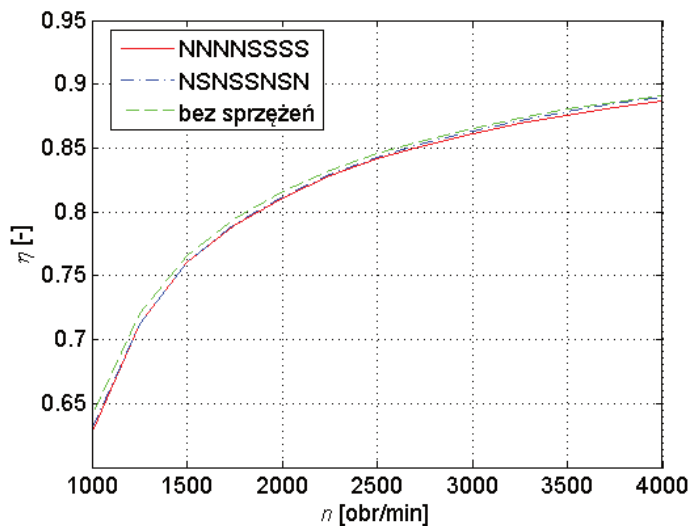


Rys. 11. Zależność mocy wyjściowej P_{out} od prędkości obrotowej n dla $\theta_{on}=15^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$

Fig. 11 . Dependence of output power P_{out} in the function of rotor speed n for $\theta_{on}=15^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$

W przypadku zasilania uzwojeń przy położeniu współosiowym ($\theta_{on}=30^\circ$) wpływ sprzężeń międzypasmowych jest szczególnie zauważalny i w tym przypadku rodzaj zasilania uzwojeń odgrywa istotne znaczenie. Przy zasilaniu typu NNNNSSSS uzyskuje się jeden prąd pasma o znacznie zwiększonej

wartości (rys. 3 i 4), ale pozostałe trzy prądy mają znacznie mniejszą wartość, mniejszą nawet od przypadku gdzie sprzężenia magnetyczne są pominięte. Wpływ na to mają sprzężenia międzypasmowe co pokazano na rysunku 2. Wpływa to na wartość mocy wyjściowej generatora, która w tym przypadku jest najmniejsza w całym zakresie zmian prędkości (rys. 9), przetwarzanie energii odbywa się również przy najmniejszej sprawności (rys. 10). Przy zasilaniu typu NSNSSNSN jeden z prądów pasm jest znacznie mniejszy niż pozostałe, które mają większą wartość niż w przypadku pominięcia sprzężeń (rys. 3 i 4), co przekłada się na wartość mocy wyjściowej, która przy tym typie zasilania ma największą wartość w całym zakresie zmian prędkości (rys. 9) przy największej sprawności (rys. 10). Przesunięcie kąta załączenia w kierunku położenia niewspółosiowego ($\theta_{on}=15^\circ$) przy pozostawieniu kąta wyłączenia bez zmiany powoduje, że wpływ sprzężeń magnetycznych na prądy poszczególnych pasm (rys. 5 i 6) jest mniej istotny. Moc wyjściowa w przypadku zasilania NSNSSNSN jest największa, natomiast wraz ze wzrostem prędkości maleje różnica między wartością mocy wyjściowej przy zasilaniu typu NNNNSSSS, a przypadkiem w którym całkowicie pominięto sprzężenia (rys. 11). Sprawność generatora przy zasilaniu typu NSNSSNSN (rys. 12) jest największa w całym zakresie zmian prędkości.



Rys. 12. Zależność sprawności η od prędkości obrotowej n dla $\theta_{on}=15^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$

Fig. 12. Dependence of efficiency η in the function of rotor speed n for $\theta_{on}=15^\circ$, $\theta_{off}=45^\circ$

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można stwierdzić, że sprzężenia międzypasmowe mają wpływ na parametry maszyny reluktancyjnej przełączalnej pracującej w zakresie pracy generatorowej. Wpływ tych sprzężeń jest większy niż w przypadku pracy silnikowej. Największy wpływ sprzężeń magnetycznych na charakterystyki generatora widoczny był w przypadku zasilania uzwojeń przy opadającym zboczcu indukcyjności. Rozpatrując pracę generatora pod kątem uzyskania jak największej mocy wyjściowej przy jednoczesnej maksymalizacji sprawności najkorzystniejszym rozwiązaniem jest zasilanie typu NSNSSNSN. Zarówno w przypadku wzbudzenia uzwojeń przy opadającym zboczcu indukcyjności, jak i przy przesunięciu kąta załączenia w zakres narastającego profilu indukcyjności moc wyjściowa i sprawność miały największą wartość dla tego typu zasilania.

Literatura

- [1] Miller T. J. E.: *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Newnes, 2001,
- [2] Rahman K. M., Fahimi B., Suresh G., Rajarathnam A., V., Ehsani M.: *Advantages of Switched Reluctance Motor Applications to EV and HEV: Design and Control Issues*, IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 36, no. 1, 1/2 2000, 111-121,
- [3] Cardenas R., Pena R., Perez M., Clare J.: *Control of a Switched Reluctance Generator for Variable-Speed Wind Energy Applications*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.20, no.4, 12 2005, 781-791,
- [4] 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, 3 2004, 116-124,
- [5] Schofield N., Long S.: *Generator Operation of a Switched Reluctance Starter/Generator at Extended Speeds*, IEEE Transactions of Vehicular Technology, vol. 58, no. 1, 1 2009, 48-56,
- [6] Radun A. V., Ferreira C. A., Richter E.: *Two-Channel Switched Reluctance Starter/Generator Results*, IEEE Transactions on Industry Applications, col. 34, no. 5, 9/10 1998, 1026-1034,
- [7] 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,

AN ANALYSIS OF MAGNETIC COUPLINGS INFLUENCE ON CHARACTERISTICS OF THE SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR

Summary

In the paper an influence of magnetic couplings on chosen properties of the four-phase switched reluctance generator was discussed. Waveforms of phase currents and dependencies of electromagnetic torque, output power and efficiency in the function of rotor speed were determined on the basis of field-circuit model with taking into account magnetic couplings between phases and case with magnetic independencies of particular phases. Conclusions concerning influence of magnetic couplings on chosen characteristics of generator and conclusions concerning selection of windings supply type were presented.

Keywords: switched reluctance generator, magnetic couplings

DOI: 10.7862/re.2015.12

Tekst złożono w redakcji: luty 2015

Przyjęto do druku: kwiecień 2015