

Stabilizacja napięcia wyjściowego generatora reluktancyjnego przełączalnego

Streszczenie. W pracy przedstawiono nieliniowy model symulacyjny czteropasmowego generatora reluktancyjnego przełączalnego (SRG) o konfiguracji 8/6. Model zbudowano z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych ANN (ang. Artificial Neural Networks) w systemie Matlab/Simulink. W ramach prowadzonych badań symulacyjnych przetestowano dwie metody stabilizacji napięcia SRG. Pierwsza metoda polegała na regulacji kąta wyłączenia, a druga na regulacji współczynnika wypełnienia sygnału PWM. Badania wykonano dla dwóch przypadków: zmieniającej się skokowo rezystancji obciążenia oraz zmieniającej się prędkości wirowania wirnika generatora.

Abstract. In paper was presented nonlinear simulation model of four-phase 8/6 Switched Reluctance Generator built based on artificial neural networks (ANN) in Matlab/Simulink. Two methods of SRG output voltage control were tested (turn-off angle control and PWM control). Studies were developed for two cases: change of load resistance and change of rotor speed. **Nonlinear simulation model of four-phase 8/6 Switched Reluctance Generator**

Słowa kluczowe: generator reluktancyjny przełączalny, model symulacyjny, stabilizacja napięcia wyjściowego, sieci neuronowe
Keywords: Switched Reluctance Generator, simulation model, output voltage control, neural networks

doi:10.12915/pe.2014.03.38

Wstęp

Maszyny reluktancyjne przełączalne (ang. Switched Reluctance Machine - SRM) należą do grupy maszyn sterowanych elektronicznie. 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]. Cechą charakterystyczną tego typu maszyn jest praca przy nasyceniu obwodu magnetycznego.

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 [3-4]. W wielu tych zastosowaniach wymagana jest zarówno praca silnikowa i generatorowa. Przykładem tego typu rozwiązań jest zintegrowany system rozrusznik-generator [5-7].

W przypadku pracy generatorowej istotnym zagadnieniem w wielu zastosowaniach jest stabilizacja napięcia wyjściowego niezależnie od zmian obciążenia i prędkości. Nie jest to możliwe bez zastosowania odpowiedniego algorytmu sterowania [8].

Celem niniejszej pracy jest prezentacja nieliniowego modelu symulacyjnego generatora reluktancyjnego przełączalnego (ang. Switched Reluctance Generator - SRG) zbudowanego w oparciu o sztuczne sieci neuronowe ANN (ang. Artificial Neural Networks) w systemie Matlab/Simulink [10]. Model ten posłużył do testowania dwóch algorytmów stabilizacji napięcia SRG wykorzystujących:

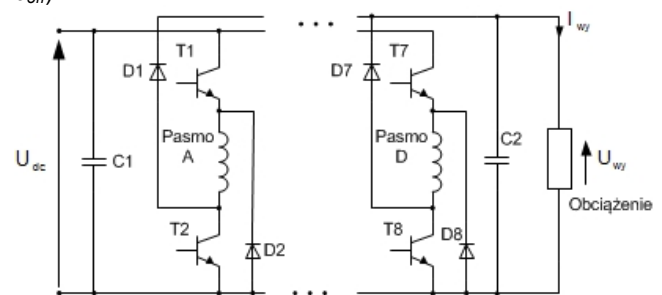
- zmianę kąta wyłączenia θ_{off} ,
- zmianę współczynnika wypełnienia sygnału PWM.

Stabilizacja napięcia generatora SRG

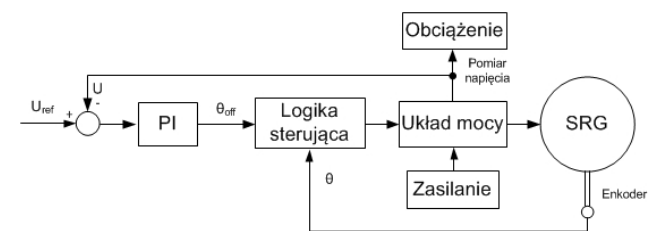
W celu rozpatrywania pracy generatora SRG, w której możliwa jest stabilizacja i regulacja napięcia wyjściowego, zastosowano układ mocy przedstawiony na rysunku 1. Układ ten oddziela źródło napięcia wzbudzenia U_{dc} od napięcia wyjściowego U_{wy} . Po wyłączeniu tranzystorów w kolejnych gałęziach prąd pasma płynie przez diody do obciążenia rezystancyjnego. Kondensator C_2 służy do filtrowania napięcia wyjściowego U_{wy} .

Stabilizacja napięcia generowanego przez SRG niezależnie od zmian obciążenia i prędkości ma w wielu

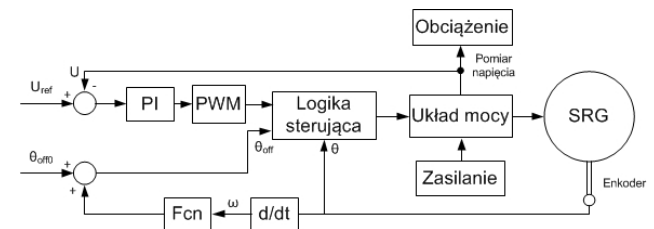
zastosowaniach istotne znaczenie. Niezbędne jest w tym przypadku zastosowanie odpowiedniego algorytmu sterowania. Na wartość napięcia wyjściowego wpływ ma metoda sterowania oraz wartości kątów sterujących (θ_{on} i θ_{off}).



Rys. 1. Schemat układu mocy SRG



Rys. 2. Schemat blokowy sterowania realizującego stabilizację napięcia wyjściowego przy zmianie kąta wyłączenia θ_{off}

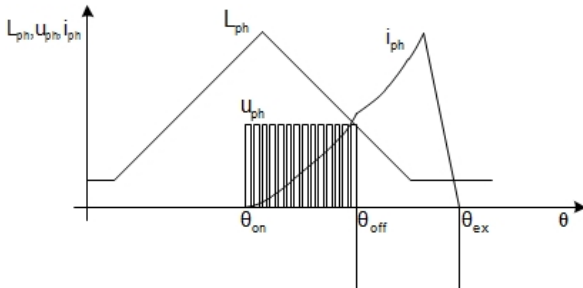


Rys. 3. Schemat blokowy sterowania realizującego stabilizację napięcia wyjściowego przy zmianie współczynnika wypełnienia sygnału PWM

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono schematy blokowe dwóch metod stabilizacji napięcia generatora reluktancyjnego przełączalnego:

- I metoda – polega na regulacji kąta wyłączenia θ_{off} przy sterowaniu jednopulsowym (rys.2),
- II metoda – polega na regulacji współczynnika wypełnienia sygnału PWM (rys.3).

W obu metodach do regulacji parametru sterującego zastosowano regulatory proporcjonalno-całkujące (PI). Natomiast w metodzie II dodatkowo zastosowano funkcję korekcji kąta wyłączenia (Fnc), która jest zależna od prędkości kątowej wirnika (ω). Przebieg funkcji został wyznaczony eksperymentalnie. Regulacja PWM jest realizowana w przedziale zasilania (wzbudzenia), jak pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Ilustracja sterowania realizującego stabilizację napięcia wyjściowego metodą II

Model symulacyjny

Obiektem badań symulacyjnych był czteropasmowy generator SRG 8/6, o parametrach zestawionych w tabeli 1. Model symulacyjny zbudowano w systemie Matlab/Simulink, na podstawie modelu matematycznego zamieszczonego w pracy [9].

Tabela 1. Podstawowe parametry generatora SRG 8/6

| | |
|---------------------|--------------|
| Moc znamionowa | 750 W |
| Prędkość znamionowa | 3000 obr/min |
| Napięcie znamionowe | 24 V |

Przy realizacji modelu przyjęto następujące założenia:

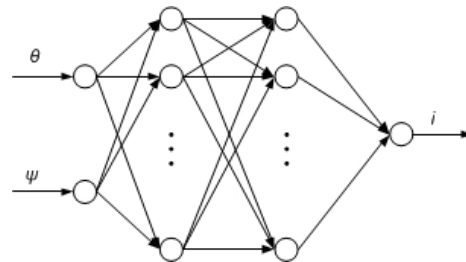
- sprzężenia międzypasmowe są pomijalnie małe,
- obwód magnetyczny może pracować na nieliniowej części charakterystyki magnesowania,
- straty w rdzeniu generatora są pomijalne.

W opracowanym modelu symulacyjnym, korzystając z metod FEM obliczone charakterystyki statyczne strumieniowo-prądowo-kątowe ($\Psi=f(\theta,i)$) oraz momentowo-prądowo-kątowe ($T_e=f(i,\theta)$), które wykorzystano do uczenia sieci neuronowych. Inną metodą zapisu tych charakterystyk w obwodowych modelach symulacyjnych, czy też układach mikroprocesorowych pracujących w układach rzeczywistych są tablice LUT (ang. Look Up Table). Największą zaletą LUT przy implementacji w układach rzeczywistych jest szybkość dostępu do danych, wadą natomiast zużycie pamięci, zwłaszcza przy bardzo rozbudowanych tablicach danych. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych pozwala na ograniczenie zużycia pamięci, ale ich implementacja wiąże się z większym obciążeniem jednostki obliczeniowej. Jednak sieci neuronowe wykorzystywane do implementowania charakterystyk $i=f(\theta,\Psi)$ oraz $T_e=f(i,\theta)$ nie są złożonymi sieciami, tak więc są alternatywą dla stosowanych tablic LUT. Modele tych charakterystyk zrealizowane za pomocą sieci neuronowych zaimplementowano w obwodowym modelu symulacyjnym zbudowanym w systemie Matlab/Simulink. Równanie napięć generatora SRG można zapisać w postaci:

$$(1) \quad u_k = R_k i_k + \frac{d}{dt} \psi_{kk}(\theta, i_k)$$

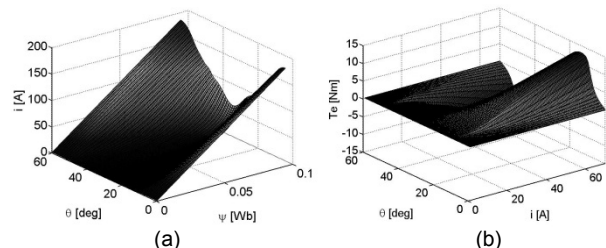
gdzie: u_k – napięcie na uzwojeniu k -tego pasma, R_k – rezystancja uzwojenia k -tego pasma, i_k – prąd w uzwojeniu k -tego pasma, Ψ_{kk} – strumień skojarzony z danym pasmem. W celu rozwiązania równania napięciowego generatora (1) konieczne było przekształcenie charakterystyki $\Psi=f(\theta,i)$ do postaci $i=f(\theta,\Psi)$. W opracowanym modelu symulacyjnym do uczenia wykorzystano sieci trójwarstwowe, gdzie dwie wewnętrzne warstwy liczyły kolejno 10 i 15 neuronów. Na rysunku 5 przedstawiono strukturę sieci modelującej charakterystykę prądowo-kątowo-strumieniową. Do budowy i uczenia sieci neuronowych wykorzystano pakiet *Neural Network Toolbox* programu Matlab.

Warstwy ukryte miały sigmoidalne funkcje aktywacji, natomiast warstwa wyjściowa – liniową funkcję aktywacji. Sieci uczone były według algorytmu Levenberga – Marquardta wstecznej propagacji.



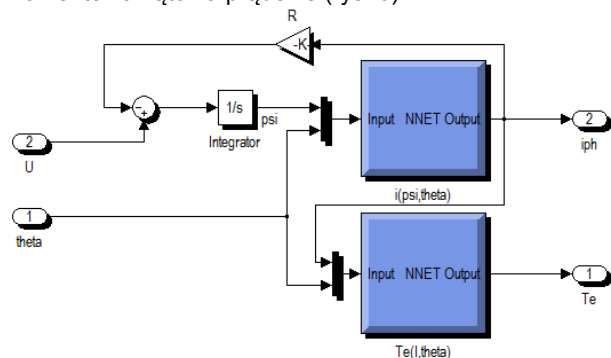
Rys. 5. Struktura proponowanej sieci neuronowej modelującej charakterystykę $i=f(\theta,\psi)$

Na rysunku 6 przedstawiono wygenerowane charakterystyki $i=f(\theta,\Psi)$ oraz $T_e=f(i,\theta)$ będące wynikiem procesu uczenia sieci poszczególnych.



Rys. 6. Charakterystyki $i=f(\theta,\Psi)$ (a) oraz $T_e=f(i,\theta)$ (b) będące wynikiem procesu uczenia sieci neuronowych

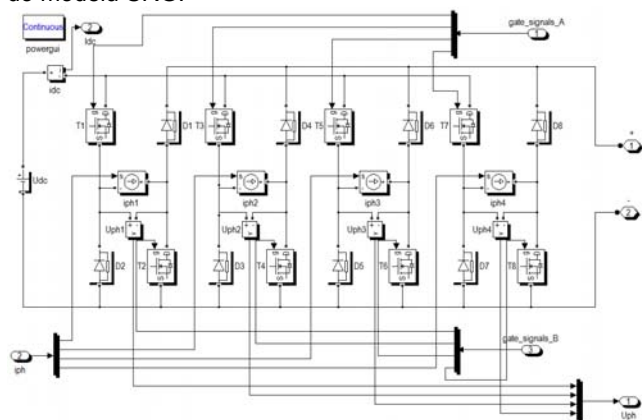
Na rysunku 7 przedstawiono strukturę blokową generatora SRG z wykorzystaniem wyuczonych sieci neuronowych zrealizowaną w systemie Matlab/Simulink. Model ten składa się z rezystancji pasma R oraz dwóch wyuczonych sieci neuronowych reprezentujących charakterystyki prądowo-kątowo-strumieniowe i momentowo-kątowo-prądowe (rys. 6).



Rys. 7. Model pasma generatora SRG

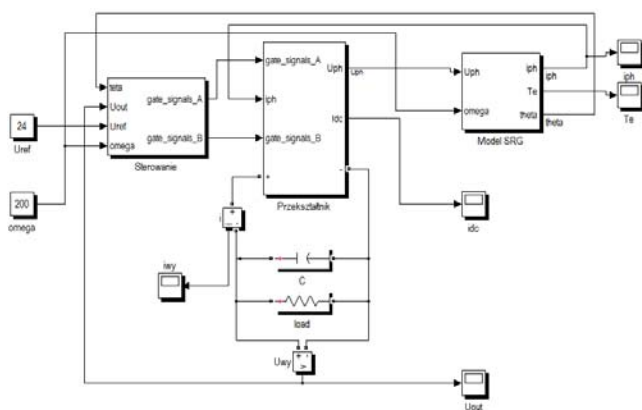
Na rysunku 8 przedstawiono schemat przekształtnika SRG. Do budowy tego układu zastosowano bibliotekę SimPowerSystems, która zawiera m.in. gotowe modele

elementów półprzewodnikowych oraz źródeł zasilania. Do połączenia modelu maszyny z modelem układu mocy zastosowano źródła prądowe sterowane oraz bloki do pomiaru napięcia. Sygnałami wejściowymi układu mocy są sygnały bramkowe tranzystorów MOSFET (*gate_signals*) oraz sygnały sterujące źródłami prądowymi (*iph*). Sygnały *U_{ph}*, to zmierzone napięcia pasmowe, które są przyłączone do modelu SRG.



Rys. 8. Schemat układu przekształtnika SRG

Na rysunku 9 przedstawiono schemat blokowy pełnego modelu generatora SRG. Blok *Sterowanie* zawiera zamiennie zaimplementowane algorytmy sterowania (metody I i II), których schematy blokowe przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 9. Model symulacyjny generatora SRG

Wyniki badań symulacyjnych

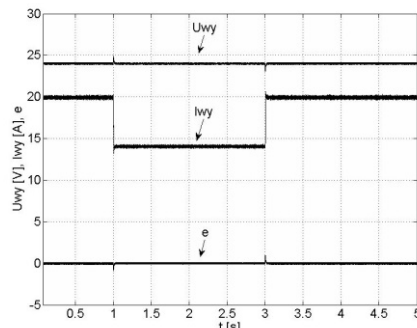
Badania symulacyjne przeprowadzono dla dwóch metod sterowania (I i II) w warunkach:

- skokowej zmiany rezystancji obciążenia, przy stałej prędkości wirowania wirnika,
- zmieniającej się prędkości wirowania wirnika, przy stałej rezystancji obciążenia.

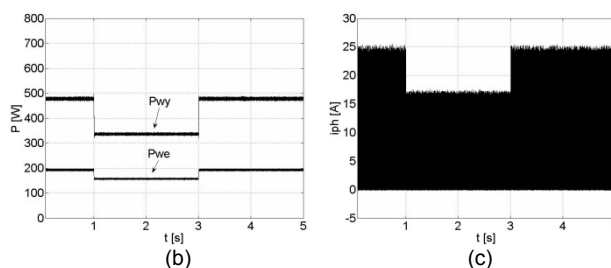
W pierwszym przypadku badania wykonano przy ustalonej prędkości $\omega=200\text{rad/s}$. W chwili $t=1\text{s}$ skokowo zmieniono rezystancję obciążenia z $1,2\ \Omega$ na $1,7\ \Omega$. Natomiast w chwili $t=3\text{s}$ - odwrotnie, czyli z $1,7\ \Omega$ na $1,2\ \Omega$. Napięcie odniesienia ustalono na $U_{ref}=24\text{V}$. Przy stabilizacji napięcia wyjściowego metodą I, kąt załączenia miał stałą wartość $\theta_{on}=24^\circ$ (zakładając, że punkt 0° występuje w położeniu, gdzie indukcyjność uzwojenia pasma osiąga minimum), natomiast kąt wyłączenia θ_{off} był wyliczany przez regulator PI. Przy stabilizacji napięcia metodą II obydwa kąty sterujące miały stałą wartość i wynosiły $\theta_{on}=24^\circ$, $\theta_{off}=43^\circ$.

Na rysunku 10 przedstawiono wyniki symulacji dla stabilizacji napięcia generowanego metodą I. Rysunek 10a przedstawia przebiegi napięcia wyjściowego prądnicy U_{wy} ,

prądu wyjściowego I_{wy} i uchybu napięcia e . Przebiegi średniej mocy pobranej przez układ przekształtnika P_{we} i średniej mocy generowanej P_{wy} przedstawiono na rysunku 10b, natomiast przebieg prądu pasmowego I_{ph} przy zmianie rezystancji obciążenia zamieszczono na rysunku 10c. Przy skokowym zmniejszeniu obciążenia napięcie wzrosło chwilowo do wartości 25V, natomiast przy zwiększeniu obciążenia zmalało do wartości 23V. Regulator potrzebował 15ms na ustabilizowanie napięcia po zmianie obciążenia.



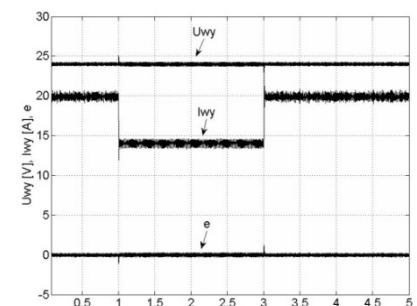
(a)



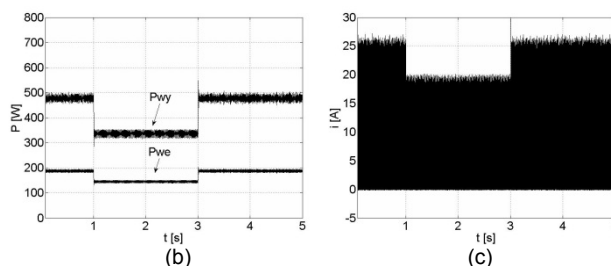
(b)

(c)

Rys. 10. Przebiegi: (a) napięcia wyjściowego U_{wy} , prądu wyjściowego I_{wy} , uchybu e , (b) średniej mocy generowanej P_{wy} i średniej mocy pobranej przez przekształtnik P_{we} oraz (c) prądu pasmowego I_{ph} , dla I metody stabilizacji napięcia i $\omega=200\text{rad/s}$



(a)



(b)

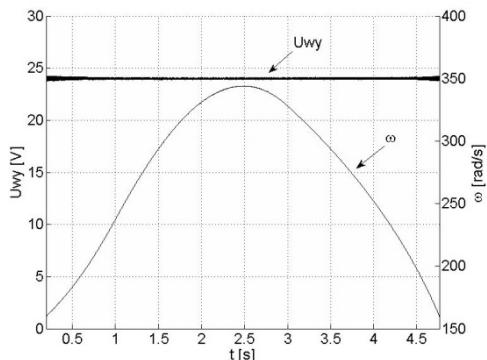
(c)

Rys. 11. Przebiegi: (a) napięcia wyjściowego U_{wy} , prądu wyjściowego I_{wy} , uchybu napięcia e (rys. 11a), przebiegi średniej mocy pobranej przez układ przekształtnika P_{we} i średniej mocy generowanej P_{wy} (rys. 11b) oraz przebieg prądu pasmowego I_{ph} dla II metody stabilizacji napięcia i $\omega=200\text{rad/s}$

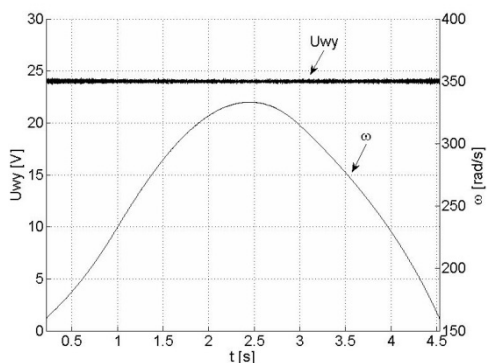
Na rysunku 11 przedstawiono przebiegi napięcia wyjściowego prądnicy U_{wy} , prądu wyjściowego I_{wy} , uchybu napięcia e (rys. 11a), przebiegi średniej mocy pobranej przez układ przekształtnika P_{we} i średniej mocy generowanej P_{wy} (rys. 11b) oraz przebieg prądu

pasmowego i_{ph} (rys. 11c), które uzyskano II metodą stabilizacji napięcia. Podobnie jak w przypadku wyników badań dla I metody, zakres zmian napięcia wynosił $24 \pm 1V$, a czas dostosowania do zmiany obciążenia wynosił 15ms.

W drugiej części badań przy stałym obciążeniu ($1,2 \Omega$) zmieniano prędkość wirnika. Przy metodzie I prędkość zmieniana była według trajektorii pokazanej na rysunku 12, gdzie zamieszczono również przebieg stabilizowanego napięcia wyjściowego prądnicy U_{wy} . W metodzie II prędkość zmieniana była według trajektorii pokazanej na rysunku 13. Napięcie odniesienia wynosiło $U_{ref}=24V$. W całym zakresie zmian prędkości obie metody spełniły swoją rolę i stabilizowały napięcie wyjściowe na założonym poziomie.



Rys. 12. Przebieg napięcia wyjściowego prądnicy U_{wy} uzyskany I metodą stabilizacji oraz trajektoria prędkości wirnika ω



Rys. 13. Przebieg napięcia wyjściowego prądnicy U_{wy} uzyskany II metodą stabilizacji oraz trajektoria prędkości wirnika ω

Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono nieliniowy model symulacyjny czteropasmowego generatora reluktancyjnego przełączalnego (SRG) o konfiguracji 8/6. Model symulacyjny zbudowano w systemie Matlab/Simulink w oparciu o sztuczne sieci neuronowe za pomocą, których dokonano regresji charakterystyk momentowo-kątowo-prądowych oraz prądowo-kątowo-strumieniowych. Wykorzystanie sieci neuronowych do implementacji tych charakterystyk jest alternatywnym rozwiązaniem dla powszechnie stosowanych tablic LUT, które przy dużych ilościach danych obciążają pamięć mikrokontrolera. Zastosowanie sieci neuronowych wymaga z kolei dużych możliwości obliczeniowych jednostki sterującej. Jednak

coraz nowsze generacje procesorów DSP posiadają bardzo wydajne jednostki arytmetyczno-logiczne.

Stosując opracowany model symulacyjny przeprowadzono badania dwóch algorytmów stabilizacji napięcia generatora SRG, w pierwszej części przy skokowej zmianie obciążenia, w drugiej części przy zmianie prędkości wirnika. Pierwsza metoda stabilizacji opierała się na regulacji napięcia generatora poprzez zmianę kąta wyłączenia (przy zachowaniu stałego kąta załączenia). W drugiej metodzie do regulacji napięcia zastosowano zmianę współczynnika wypełnienia sygnału PWM. W przypadku badań przy zmianie prędkości wirnika dodatkowo w tej metodzie wymagana była korekcja kąta wyłączenia. Korekcję tego kąta uzależniono od prędkości wirnika. Obie metody spełniły swoją rolę w chwilach skokowej zmiany obciążenia i w obu przypadkach skoki napięcia nie przekraczały 1V. Czas jaki regulatory potrzebowały na ustabilizowanie napięcia nie przekraczał w obu przypadkach 15ms. Zmiana prędkości w badanym zakresie nie powodowała praktycznie zmiany napięcia wyjściowego prądnicy.

Przeprowadzone badania symulacyjne dają podstawy do sprzętowej implementacji prezentowanych metod stabilizacji napięcia generatora SRG.

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] Fluery A., Andrade D. A., Silva F., Domingos J. L.: *Switched Reluctance Generator for complementary Wind Power Generation in Grid Connection*, IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2007,
- [5] 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,
- [6] 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,
- [7] 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
- [8] Silveira A. W. F. V., Andrade D. A., Fleury A. V. S., Gomes L. C., Bissochi C. A., Dias R. J.: *Generated Voltage Control of the SRM operating as Motor/Generator*, Power Electronics Conference, COBEP 2009,
- [9] Bogusz P., Korkosz M., Powrózek A., Prokop J.: *Modelowanie pracy silnikowo-prądnicowej napędu z maszyną reluktancyjną przełączalną*, Przegląd elektrotechniczny, 12a 2012, 56-61,
- [10] Matlab User's Guide, MathWorks 2012.

Autorzy: mgr inż. Adam Powrózek, E-mail: apow@prz.edu.pl, dr inż. Piotr Bogusz, E-mail: pbogu@prz.edu.pl, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów