

Adam POWRÓZEK
Politechnika Rzeszowska

BADANIA LABORATORYJNE RELUKTANCYJNEJ MASZYNY PRZEŁĄCZALNEJ PRACUJĄCEJ W ZAKRESIE PRACY GENERATOROWEJ

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych maszyny reluktancyjnej przełączalnej SRM (ang. *Switched Reluctance Machine*) trójfazowej 6/4, pracującej w zakresie pracy generatorowej przy sterowaniu jednopulsowym. Na podstawie wyników badań laboratoryjnych pokazano wpływ parametrów sterowania, tj. kąta załączenia i kąta wyłączenia, na kształt prądów generatora oraz parametry maszyny.

1. Wprowadzenie

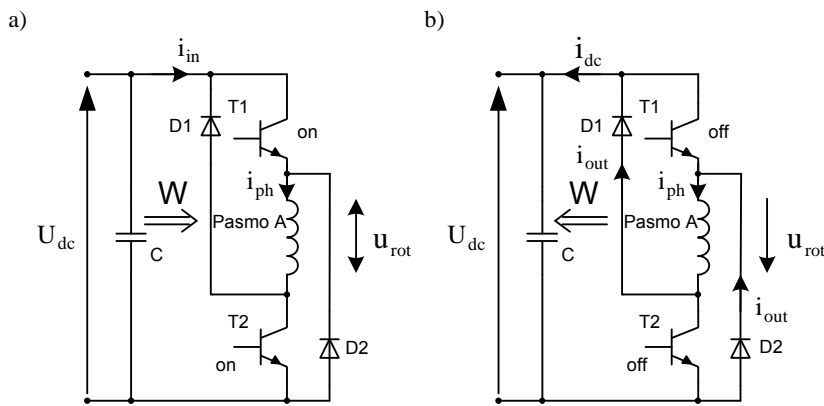
Maszyny reluktancyjne przełączalne SRM (ang. *Switched Reluctance Motors*) ze względu na prostotę budowy, możliwość pracy w dużym zakresie prędkości mają coraz większe zastosowanie w przemyśle. Wynika to także z niższych cen elektroniki i podzespołów mocy. Maszyny te są alternatywą dla napędów o regulowanej prędkości obrotowej. Charakteryzuje je duża niezawodność oraz pewność pracy.

W napędach o regulowanej prędkości istnieją zastosowania, w których występuje hamowanie generatorowe, np. napędy pojazdów elektrycznych, lub też typowy stan pracy generatorowej, np. zintegrowany system rozrusznik–generator [1] lub elektrownia wiatrowa [2]. Aby możliwe było zastosowanie maszyny SRM w tego typu układach, musi ona spełniać wiele wymagań. Jednym z nich jest warunek, który określa szerokość zakresu stałej mocy. Wskazane jest, aby zakres pracy maszyny ze stałą mocą pokrywał się z zakresem regulacji prędkości obrotowej.

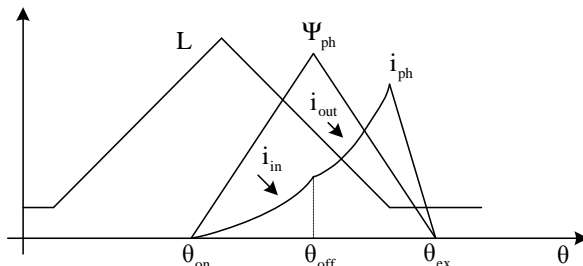
Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników badań eksperymentalnych trójfazowej maszyny SRM 6/4 pracującej w zakresie pracy generatorowej przy sterowaniu jednopulsowym. Na podstawie wyników badań omówiono wpływ kątów sterowania zarówno na kształt prądów, jak i na podstawowe parametry eksploatacyjne maszyny.

2. Praca generatorowa maszyny SRM

Maszyna SRM może pracować w trybie pracy silnikowej i generatorowej. Dobór kątów sterujących, tj. kąta załączenia θ_{on} oraz kąta wyłączenia θ_{off} , dostosowuje się do trybu pracy maszyny. Podczas pracy generatorowej kąt załączenia θ_{on} jest tak dobierany, aby prąd pasma płynął, gdy pochodna $dL/d\theta < 0$, w przypadku zaś pracy silnikowej – aby pochodna $dL/d\theta > 0$. Podczas pracy generatorowej napięcie rotacji u_{rot} ma wartość ujemną. Dzięki temu możliwy jest wzrost prądu pasma przy dużej prędkości obrotowej. Amplituda napięcia rotacji jest proporcjonalna do prędkości wirnika i napięcie to wpływa na kształt prądu pasmowego. Na rysunku 1a pokazano przepływ energii dla stanu wzbudzenia maszyny, natomiast na rys. 1b przepływ energii dla stanu generacji. Na rysunku 2. pokazano zaś prąd pasma, strumień sprzężony na tle wyidealizowanej indukcyjności własnej pasma maszyny SRM pracującej jako generator.



Rys. 1. Kierunek przepływu energii dla jednego pasma maszyny SRM: a) dla stanu wzbudzenia, b) dla stanu generacji



Rys. 2. Prąd pasma (i_{ph}), strumień sprzężony (Ψ_{ph}) na tle wyidealizowanej indukcyjności własnej pasma (L)

W przedziale od θ_{on} do θ_{off} pasmo jest zasilane ze źródła i w tym przedziale jest gromadzona energia w polu magnetycznym. Po wyłączeniu tranzystorów (θ_{off}) prąd wciąż płynie przez diody D1, D2, zwracając zgromadzoną energię do źródła zasilania, aż do momentu zaniku prądu (θ_{ex}). Gdy ilość energii zwróconej jest większa niż pobranej, występuje tryb pracy generatorowej, natomiast gdy ilość energii pobranej jest większa niż zwróconej, występuje tryb pracy hamulcowej.

Sterowanie maszyną SRM pracującą jako generator

Zakładając analogię do pracy silnikowej, można przyjąć, że maszyna SRM może być sterowana w zakresie pracy generatorowej [3]:

- prądowo,
- napięciowo z regulacją współczynnika wypełnienia,
- jednopulsowo.

Zasadniczą różnicą jest praca przy opadającym zboczu indukcyjności własnej pasma. Sterowanie jednopulsowe jest szczególnym przypadkiem sterowania napięciowego, gdy współczynnik wypełnienia sygnału PWM wynosi 1. W przypadku pracy generatorowej ma ono szczególne znaczenie. Maszynę SRM pracującą jako generator projektuje się najczęściej tak, aby sterowanie jednopulsowe pokrywało cały zakres zmian prędkości obrotowej powyżej prędkości bazowej. Kąty sterowania są tak dobierane, aby otrzymać wymaganą średnią moc wyjściową P_{outav} lub średni prąd I_{dcav} . Jednak jednocześnie należy kontrolować napięcie na zaciskach maszyny U_{dc} , dlatego też kąty sterowania muszą być nie tylko uzależnione od prędkości n , ale także od wartości napięcia na zaciskach maszyny U_{dc} [4].

3. Sposoby konfiguracji uzwojeń biegunów pasma fazowego

W zależności od liczby biegunów (N_a) przypadających na jedno pasmo uzwojenia biegunów maszyny SRM mogą być konfigurowane na kilka sposobów. W przypadku badanej maszyny SRM 6/4, gdzie dwa bieguny przypadają na jedno pasmo ($N_a = 2$), uzwojenia były łączone:

- szeregowo,
- równoległe.

Połączenie szeregowe jest najpowszechniej stosowanym rozwiązaniem i w tym przypadku prąd uzwojenia bieguna jest jednocześnie prądem pasma. Stosowane jest głównie w rozwiązaniach niskoobrotowych. W przypadku połączenia równoległego uzwojeń biegunów pasma prąd pasmowy jest sumą prądów pochodzących od uzwojeń biegunów tworzących pasmo i ma zastosowanie głównie w rozwiązaniach wysokoobrotowych. Ponieważ prąd pasmowy jest sumą prądów pochodzących od obu uzwojeń biegunów, stwarza to większe wymagania prądowe dla źródła zasilania, i dlatego też jest rzadko stosowane w praktyce.

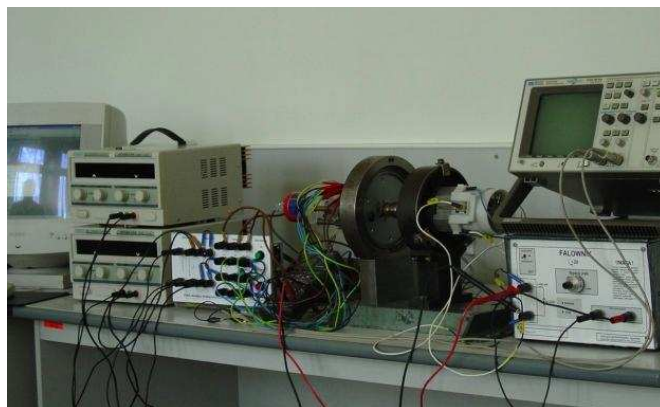
4. Wyniki badań laboratoryjnych

4.1. Stanowisko pomiarowe

W tabeli 1. przedstawiono wybrane parametry oraz wymiary geometryczne badanej maszyny SRM. Na rysunku 3. pokazano stanowisko do badań laboratoryjnych badanej trójfazowej maszyny SRM 8/6.

Tabela 1. Wymiary geometryczne i parametry modelu maszyny SRM 6/4

Konfiguracja N_s/N_r	6/4
Liczba pasm m	3
Liczba biegunów przypadających na jedno pasmo N_s	2
Kąt szerokości bieguna stojana β_s	30°
Kąt szerokości zęba wirnika β_r	34°
Średnica zewnętrzna stojana d_{se} [m]	0,094
Długość pakietu żelaza l_{Fe} [m]	0,032
Minimalna grubość szczeliny powietrznej g [m]	0,0003
Indukcyjność L_a [mH @2A]	21,2
Indukcyjność L_{ll} [mH @2A]	4,2
Rezystancja pasma R_{ph} [Ω @20°C]	1,2



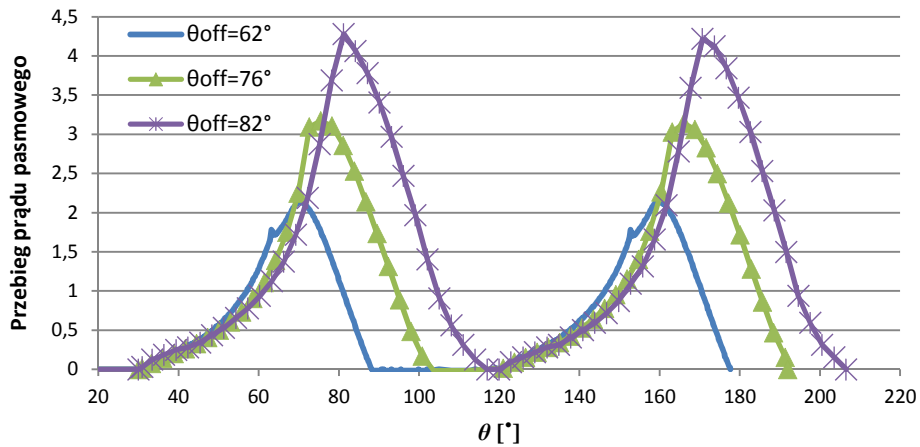
Rys. 3. Stanowisko do badań laboratoryjnych

Jako układ zasilający zastosowano półmostek asymetryczny typu H z bardzo szybkimi, wysokonapięciowymi tranzystorami IGBT. Układ sterowania oparto na mikrokontrolerze 8-bitowym, umożliwiającym implementację prostych algorytmów sterowania pracą maszyny. Maszyna SRM została sprzęgnięta z maszyną komutatorową. Zastosowanie maszyny komutatorowej umożliwia realizację zarówno pracy silnikowej, jak i generatorowej maszyny SRM. Pod-

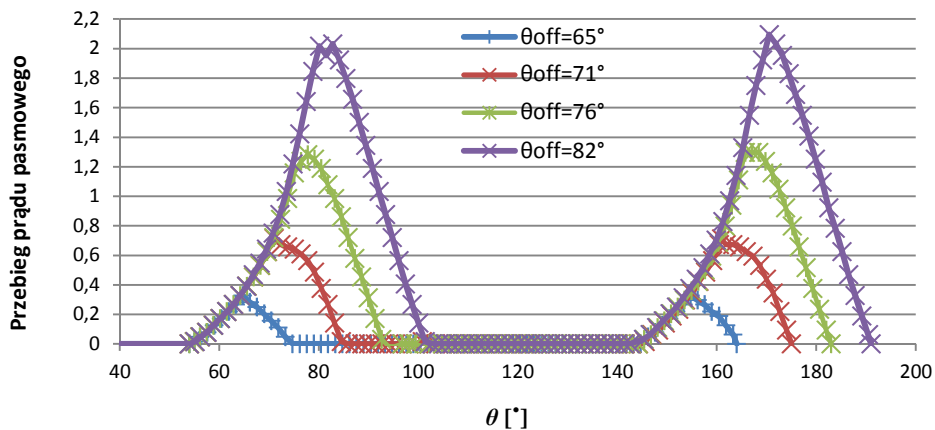
czas pracy generatorowej przełączalna maszyna reluktancyjna była obciążana baterią akumulatorów o napięciu 24 V z dołączonym równolegle rezystorem.

4.2. Wpływ kątów sterowania na kształt prądu pasmowego

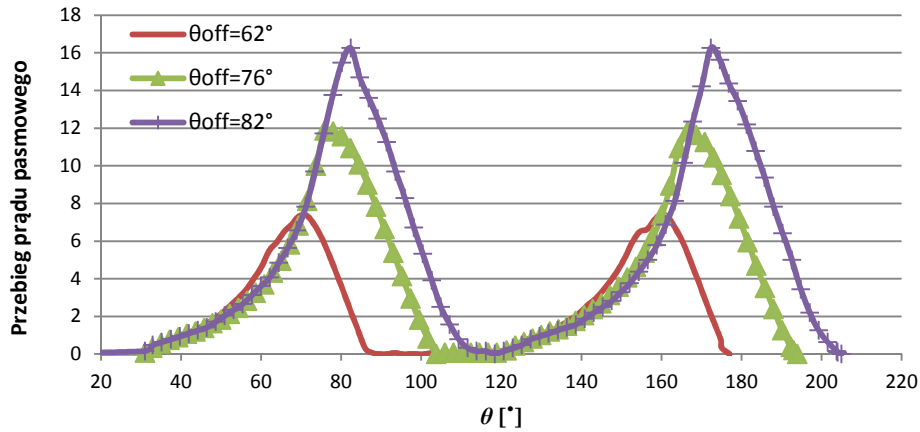
Rysunki 4-7. przedstawiają wykresy prądu pasma w połączeniu szeregowym i równoległym uzwojeń biegunów dla różnych wartości kąta wyłączenia θ_{off} przy stałym kącie załączenia θ_{on} i prędkości obrotowej n .



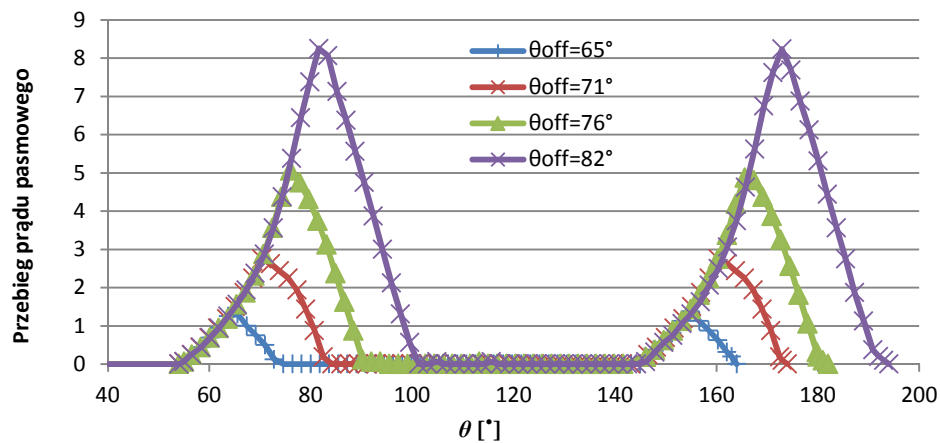
Rys. 4. Wykresy prądów pasma dla pracy generatorowej w przypadku szeregowego połączenia uzwojeń biegunów w funkcji kąta położenia wirnika dla różnych kątów wyłączenia θ_{off} przy $\theta_{on} = 31^\circ$ i $n = 9000$ obr/min



Rys. 5. Wykresy prądów pasma dla pracy generatorowej w przypadku szeregowego połączenia uzwojeń biegunów w funkcji kąta położenia wirnika dla różnych kątów wyłączenia θ_{off} przy $\theta_{on} = 55^\circ$ i $n = 9000$ obr/min

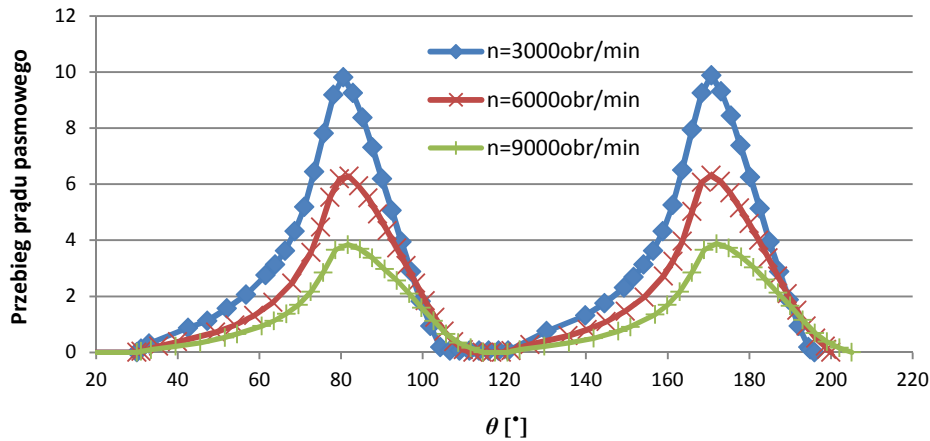


Rys. 6. Wykresy prądów pasma dla pracy generatorowej w przypadku równoległego połączenia uzwojeń biegunów w funkcji kąta położenia wirnika dla różnych kątów wyłączenia θ_{off} przy $\theta_{\text{on}} = 31^\circ$ i $n = 9000$ obr/min

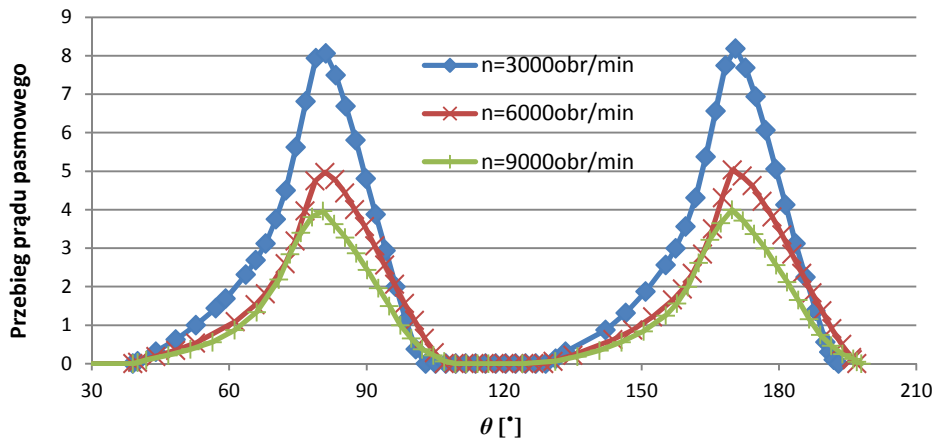


Rys. 7. Wykresy prądów pasma dla pracy generatorowej w przypadku równoległego połączenia uzwojeń biegunów w funkcji kąta położenia wirnika dla różnych kątów wyłączenia θ_{off} przy $\theta_{\text{on}} = 55^\circ$ i $n = 9000$ obr/min

Na rysunkach 8. i 9. pokazano wykresy prądu pasma przy połączeniu szeregowym uzwojeń biegunów dla różnych wartości prędkości obrotowej n przy stałym kącie załączenia θ_{on} i kącie wyłączenia θ_{off} .



Rys. 8. Wykresy prądów pasma dla pracy generatorowej w przypadku szeregowego połączenia uzwojeń biegunów w funkcji kąta położenia wirnika dla różnych prędkości obrotowych n przy $\theta_{on} = 31^\circ$ i $\theta_{off} = 80^\circ$

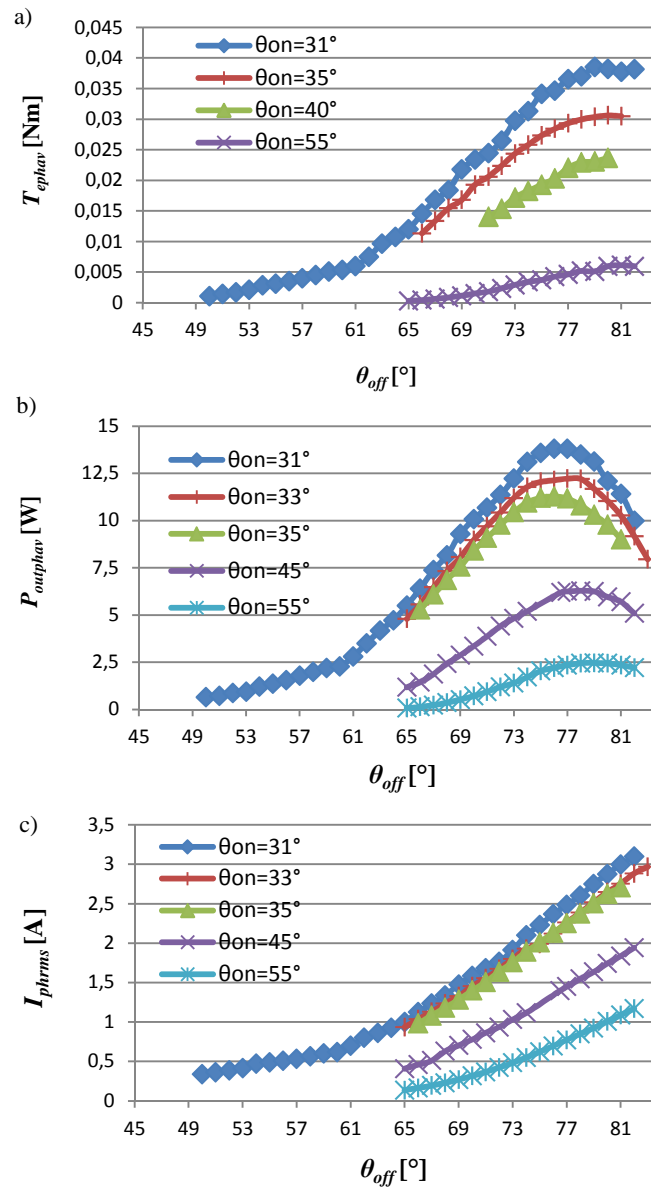


Rys. 9. Wykresy prądów pasma dla pracy generatorowej w przypadku szeregowego połączenia uzwojeń biegunów w funkcji kąta położenia wirnika dla różnych prędkości obrotowych n przy $\theta_{on} = 40^\circ$ i $\theta_{off} = 80^\circ$

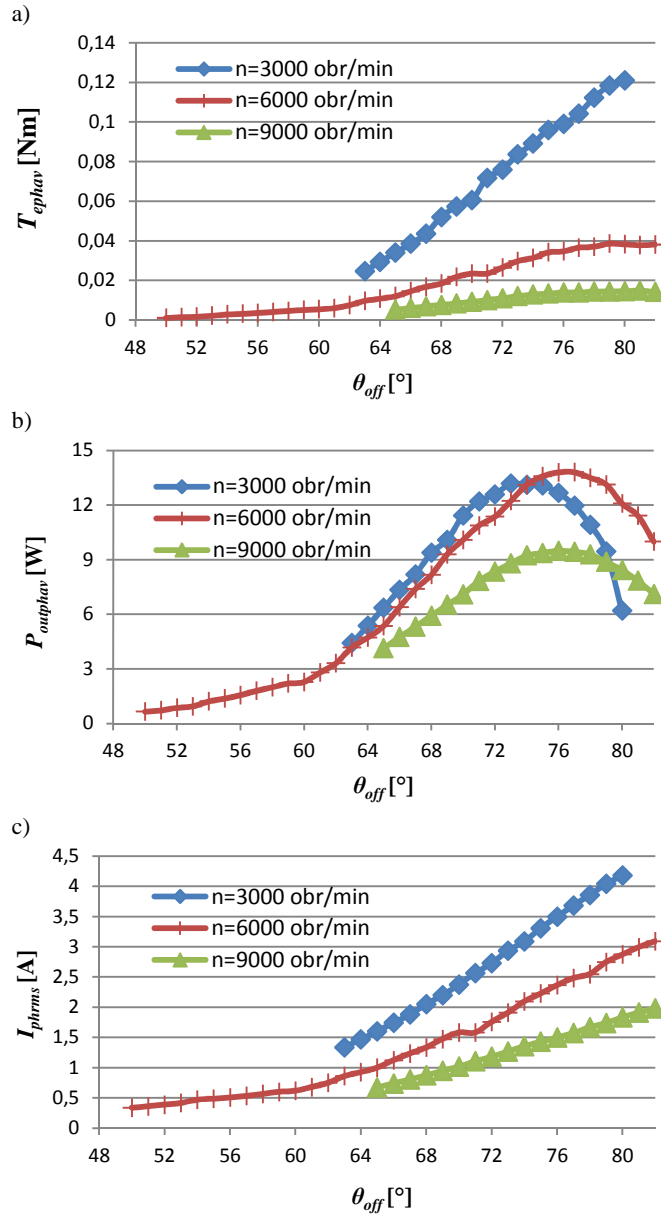
4.3. Wpływ kątów sterowania na właściwości maszyny SRM

Badania eksperymentalne maszyny SRM wykonywano dla połączeń szeregowego i równoległego uzwojeń biegunów pasma. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów czasowych pasm obliczano wartości skuteczne I_{phrms} prądu pasma i_{ph} , średnią moc oddawaną przez pasmo $P_{outphav}$, wytwarzany średni moment elektromagnetyczny T_{ephav} . Na rysunkach 10-14. przedstawiono przykładowe wyniki badań eksperymentalnych. Na rysunku 10. zilustrowano zależności średniego momentu elektromagnetycznego jednego pasma T_{ephav} , średniej

mocy wyjściowej pasma $P_{outphav}$ oraz wartości skutecznej prądu pasma I_{phrms} w funkcji kąta wyłączenia θ_{off} przy różnych wartościach kąta załączenia θ_{on} .



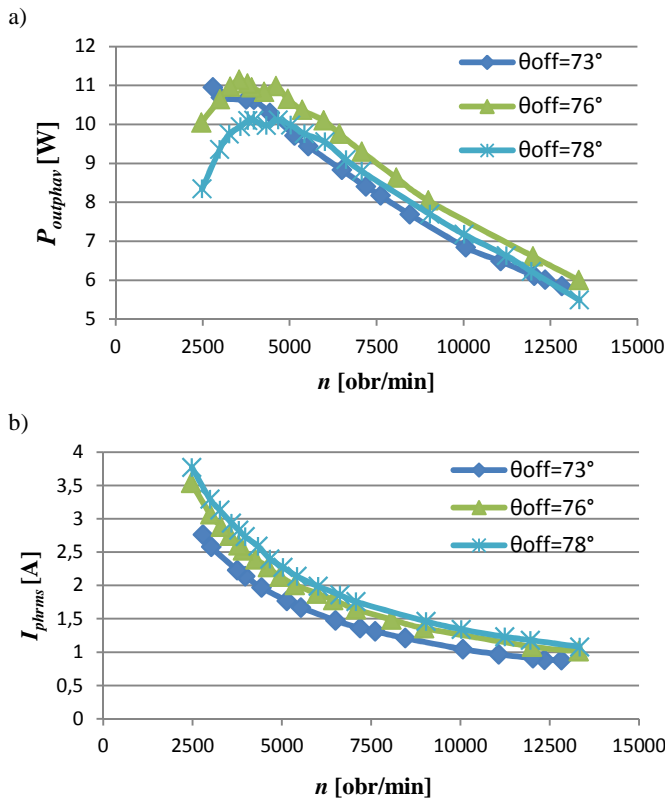
Rys. 10. Zależność: a) średniego momentu elektromagnetycznego T_{ephav} , b) średniej mocy wyjściowej $P_{outphav}$, c) prądu I_{phrms} pasma w funkcji kąta wyłączenia θ_{off} dla różnych wartości kąta załączenia θ_{on} i $n = 6000$ obr/min



Rys. 11. Zależność: a) średniego momentu elektromagnetycznego T_{ephav} , b) średniej mocy wyjściowej $P_{outphav}$, c) prądu I_{phrms} pasma w funkcji kąta wyłączenia θ_{off} dla różnych prędkości i $\theta_{on} = 31^\circ$

Na rysunku 10b widać, że dla każdego kąta załączenia θ_{on} istnieje taka wartość kąta wyłączenia θ_{off} , przy której moc wyjściowa maszyny $P_{outphav}$ osiąga

wartość maksymalną. Po przekroczeniu tej wartości kąta wyłączenia następuje spadek mocy. Są to maksymalne wartości kąta wyłączenia w zakresie pracy generatorowej. Zwiększanie kąta wyłączenia zwiększało przedział wzbudzenia, czyli więcej energii mogło być zgromadzone w polu magnetycznym. Kąty sterowania zapewniające maksymalizację mocy wyjściowej nie są stałe. Są funkcją zmieniającej się prędkości obrotowej. Na rysunku 11b pokazano wpływ prędkości obrotowej na przesuwanie się maksimum mocy wyjściowej przy kącie załączenia $\theta_{on} = 31^\circ$. Wraz ze wzrostem wartości kąta wyłączenia zwiększał się również średni moment elektromagnetyczny pasma T_{ephav} (rys. 11a) i prąd pasma I_{phrms} (rys. 11c).

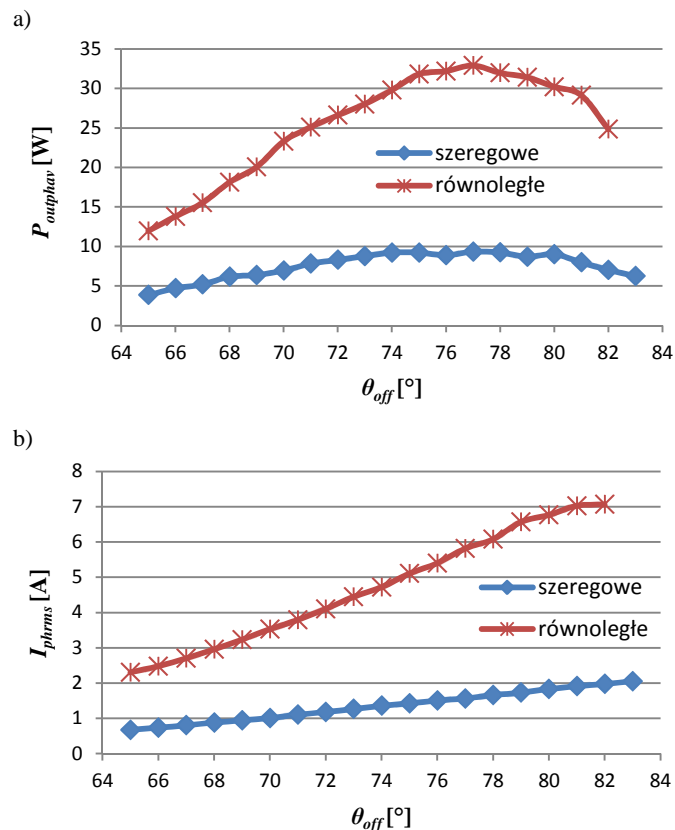


Rys. 12. Zależność: a) średniej mocy wyjściowej $P_{outphav}$, b) prądu I_{phrms} pasma w funkcji prędkości dla różnych kątów wyłączenia θ_{off} i $\theta_{on} = 35^\circ$

Rysunki 10. i 11. pokazują, że każdemu kątowi załączenia można przyporządkować taką wartość kąta wyłączenia, przy której uzyskuje się punkt maksymalnej mocy wyjściowej maszyny. Wartość tego kąta ulega jednak zmianie wraz

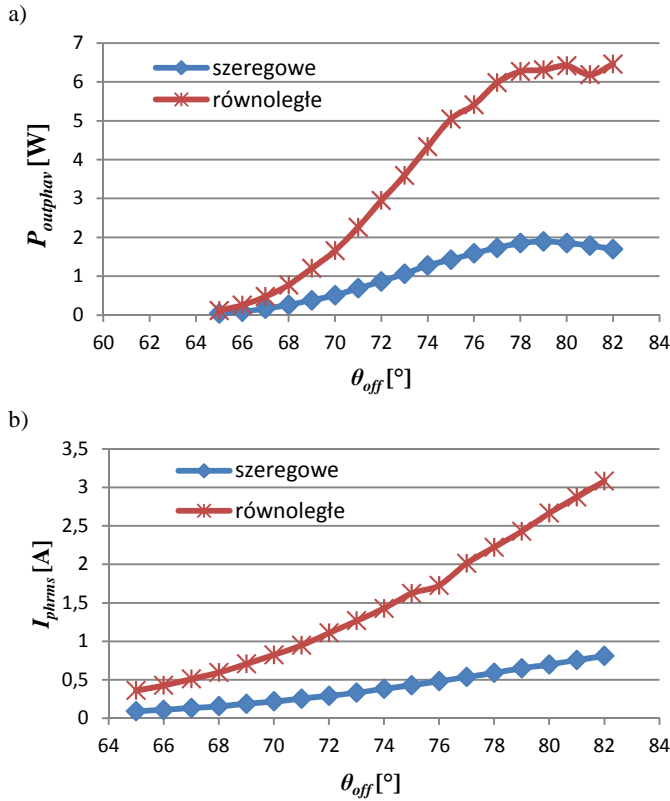
ze zmianą prędkości obrotowej. Podczas pracy ze stałymi kątami sterowania po przekroczeniu pewnej prędkości obrotowej n (około 4500 obr/min) (rys. 12.) prąd pasma się zmniejsza, a co za tym idzie – moc wyjściowa maszyny również ulega zmniejszeniu (rys. 12a).

Po przełączeniu uzwojeń biegunów pasma z konfiguracji szeregowej na równoległą następuje wzrost mocy wyjściowej pasma. Na rysunku 13. pokazano zależność średniej mocy wyjściowej pasma i wartości skutecznej prądu pasma w funkcji kąta wyłączenia dla prędkości obrotowej równej 9000 obr/min i przy kącie załączenia 31° . Widać wyraźnie wzrost mocy wyjściowej maszyny. Jednak ze względu na to, że prąd jest sumą prądów pochodzących od uzwojeń biegunów, to rozwiązanie stwarza większe wymagania prądowe dla źródła zasilania.



Rys. 13. Zależność: a) średniej mocy wyjściowej $P_{outphav}$, b) prądu I_{phrms} pasma w funkcji kąta wyłączenia θ_{off} dla $n = 9000$ obr/min i $\theta_{on} = 31^\circ$

Na rysunku 14. pokazano te same zależności, co na rys. 13., ale przy zmianie wartości kąta załączenia na 55° , co tylko potwierdziło wcześniejsze spostrzeżenia.



Rys. 14. Zależność: a) średniej mocy wyjściowej $P_{outphav}$, b) prądu I_{phrms} pasma w funkcji kąta wyłączenia θ_{off} dla $n = 9000$ obr/min i $\theta_{on} = 55^\circ$

5. Podsumowanie

Wyniki badań eksperymentalnych potwierdziły, że dla każdego kąta załączenia istnieje taka wartość kąta wyłączenia, przy której występuje maksymalizacja średniej mocy wyjściowej maszyny w przypadku pracy generatorowej. Wraz ze zmianą prędkości obrotowej wartość tego kąta ulegała zmianie. Po przełączeniu uzwojeń biegunów z konfiguracji szeregowej na równoległą uzyskano ponad dwukrotne zwiększenie wartości średniej mocy wyjściowej maszyny. Jednak konfiguracja ta wymusza większy pobór prądu ze źródła zasilania ze

względu na fakt, że prąd pasmowy jest sumą prądów pochodzących od uzwojeń biegunów. Stwarza to konieczność dostosowania podzespołów mocy (tranzystorów, diod) układu zasilającego do wymaganego prądu, co zwiększa koszt całego układu. Jednak w połączeniu równoległym występuje naturalna kompensacja nierównomiernego naciągu magnetycznego [4].

Literatura

- [1] Viorel I.A., Szabo L., Lowenstein L., Stet C.: Integrated starter-generators for automotive applications. *Acta Electrotechnica*, vol. 45, no 3, 2004.
- [2] Nassereddine M., Rizk J., Nagrial M.: Switched reluctance generators for wind power applications. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, no 41, 2008.
- [3] Bogusz P.: Silnik reluktancyjny przełączalny sterowany z procesora sygnałowego. Warszawa 2003 (rozprawa doktorska).
- [4] Korkosz M.: Praca silnikowo-generatorowa przełączalnej maszyny reluktancyjnej. Gliwice 2003 (rozprawa doktorska).

LABORATORY TESTS OF SWITCHED RELUCTANCE MACHINE IN GENERATING MODE

Abstract

The paper presents the laboratory test results of the three-phase 6/4 switched reluctance machine in generating mode with single-pulse control. The influence of control parameters i.e. switching angles on the generator currents shape and the machine parameters was shown.

DOI: 10.7862/re.2012.3