

Bartłomiej ADAMSKI*, Krzysztof WRÓBEL*

SYMULACJA NAPĘDU O ZMIENNEJ KONFIGURACJI UZWOJEŃ Z TRÓJPASMOWYM PRZEŁĄCZALNYM SILNIKIEM RELUKTANCYJNYM

W artykule zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych napędu z trójpasmowym przełączalnym silnikiem reluktancyjnym, zasilanym ze zmodyfikowanego układu zasilania. Opracowany układ zasilania umożliwia zmianę konfiguracji połączeń uzwojeń biegunowych lub pasm silnika SRM z szeregowej na równoległą w trakcie pracy napędu bez przerywania obwodu przepływu prądu [2]. Do przeprowadzenia badań opracowano program symulacyjny dla napędu z trójpasmowym silnikiem SRM zasilanym z badanego układu zasilania. Dotychczas przeprowadzono tylko podstawowe badania tego typu napędu z wysokoobrotowym silnikiem dwupasmowym. Badania mają na celu wstępną ocenę przydatności tego rozwiązania do stosowania w energooszczędnych napędach pojazdów elektrycznych i ewentualnej możliwości redukcji liczby przełożeń mechanicznych. Badania przeprowadzono w środowisku Matlab z wykorzystaniem pakietu Matlab/Simulink dla modelu napędu z silnikiem małej mocy.

SŁOWA KLUCZOWE: przełączalny silnik reluktancyjny, układ zasilania, symulacja.

1. WSTĘP

Napędy z przełączalnymi silnikami reluktancyjnymi SRM posiadają charakterystyki mechaniczne zbliżone do charakterystyk mechanicznych silników szeregowych prądu stałego. Sprawia to, że mogą być z powodzeniem wykorzystywane do napędu pojazdów elektrycznych [3]. Dodatkowymi ich zaletami są prosta konstrukcja i wysoka sprawność w całym zakresie prędkości, ze względu na możliwość dostosowania parametrów sterowania do warunków pracy. Dzięki temu są to maszyny niezawodne i odporne na uszkodzenia. Do ich wad należy jednak stosunkowo wysoki koszt produkcji, wynikający z konieczności zachowania wysokiej precyzji, ze względu na bardzo małą grubość szczeliny powietrznej, która w istotny sposób wpływa na charakterystyki wyjściowe silnika. Drugą poważną wadą jest większa masa tego typu silnika niż większość innych typów maszyn. Wynika to z masywnej konstrukcji wirnika. Duża masa wirnika jest parametrem niekorzystnym w zastosowaniu do napędów pojazdów. Jest to

* Politechnika Opolska

jeden z powodów rzadszego wykorzystywania tego typu maszyn do napędu pojazdów, ograniczonego najczęściej do pojazdów trakcyjnych.

Interesującym więc zagadnieniem jest ograniczenie masy napędu przy jednoczesnym zwiększeniu jego mocy i zachowaniu żądanej wartości momentu w szerokim zakresie prędkości roboczych. Ograniczenie masy napędu możliwe jest poprzez zabiegi konstrukcyjne, takie jak drażnienie otworów w obwodzie magnetycznym, z zachowaniem odpowiedniego przekroju magnetowodu i parametrów wytrzymałościowych. Dzięki zasadzie pracy tego typu napędów można również w układzie napędowym zastosować silnik wolnoobrotowy o dużym momencie, zasilając go z układu zasilania o specjalnej konstrukcji, uzyskując charakterystyki zbliżone do typowych napędów z silnikami o wyższych prędkościach znamionowych o większej mocy [4], nie przekraczając dopuszczalnych wartości parametrów zasilania maszyny. Użycie mniejszego silnika umożliwia redukcję masy napędu, czyli wyeliminowanie lub ograniczenie podstawowej wady tego typu napędów.

Silniki SRM nie tylko mogą pracować w szerokim zakresie prędkości ze stałym momentem z dużą sprawnością, ale również mogą pracować jako napędy pozycjonujące i generatory o regulowanej wydajności. Regulując wartość prądów w uzwojeniach można regulować moment hamujący podczas zwalniania i zatrzymywania pojazdu. Dzięki temu w napędach pojazdów wyposażonych w tego typu maszyny można w prosty sposób uzyskać płynną regulację momentu zarówno podczas przyspieszania jak i podczas hamowania, a odzyskiwaną energię zwrócić z dużą sprawnością do źródła zasilania.

Ze względu na to, że silnik SRM stanowi obwód magnetyczny o dużej indukcyjności, prędkość narastania prądów w uzwojeniach pasm silnika jest ograniczona i zależna od położenia kąтового wirnika oraz wartości prądów pasm. Przy zadanej prędkości narastania prądów w uzwojeniach, wraz ze wzrostem prędkości obrotowej procesy narastania i zaniku prądu w uzwojeniach mają coraz większy udział w procesie zasilania pasm silnika. W zakresie dużych prędkości zanim prąd w uzwojeniach osiągnie wartość znamionową następuje wyłączenie zasilania tego pasma. Prowadzi to do zmniejszenia średniej wartości prądu w uzwojeniach, a co za tym idzie momentu elektromagnetycznego. Objawia się to spadkiem wartości momentu w funkcji prędkości w tego typu napędach. Dodatkowo, proces wygaszania prądów w uzwojeniach jest uwarunkowany stałą czasową układu i trwa na tyle długo, że wirnik przemieszcza się w tym czasie w zakres pracy generatorowej i w maszynie powstają momenty hamujące. Te dwa zjawiska są podstawową przyczyną spadku momentu silnika w zakresie dużych prędkości obrotowych. Ograniczenie czasów narastania i zaniku prądów w uzwojeniach umożliwia więc uzyskanie znamionowej wartości momentu przy prędkościach większych od prędkości znamionowej [1, 2].

Jednym z możliwych rozwiązań w zakresie przeciwdziałania spadkowi momentu jest zasilanie silnika oraz rozładowywanie energii z uzwojeń do źródła

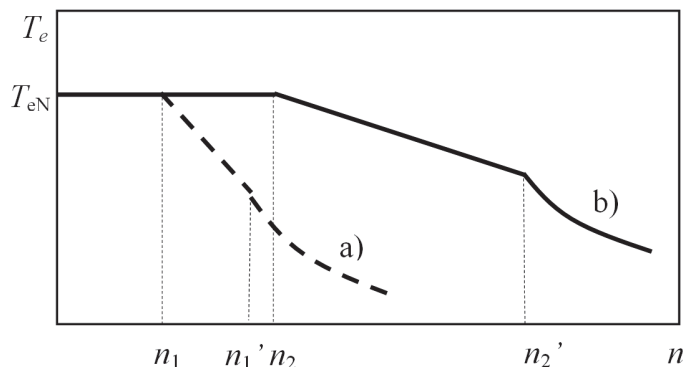
o wysokim napięciu. Taka metoda nie jest jednak pozbawiona wad. Przy wyższym napięciu źródła zasilania w zakresie małych prędkości obrotowych konieczne jest zasilanie silnika napięciem PWM lub stosowanie układu ograniczenia prądowego. Zwiększone napięcie zasilania powoduje, że rośnie częstotliwość kluczowania tranzystorów wykonawczych lub pulsacje prądu, co prowadzi do wzrostu strat komutacyjnych w tranzystorach wykonawczych.

Zdecydowanie lepszym rozwiązaniem jest zasilanie silnika ze źródła o niskim napięciu w zakresie małych prędkości obrotowych i wyższym napięciem w zakresie dużych prędkości, w celu uzyskania szerokiego zakresu regulacji prędkości przy stałym momencie. Jednak stosowanie dwóch źródeł zasilania wymaga zapewnienia możliwości ich przełączania w trakcie pracy napędu. Można to zrealizować modyfikując odpowiednio układ zasilania.

Drugim problemem, szczególnie w urządzeniach mobilnych, jest konieczność ładowania dwóch baterii akumulatorów lub ich rekonfiguracja na czas ładowania. Rozwiązaniem kompromisowym jest stosowanie jednego źródła zasilania i kondensatora C-dump, pełniącego rolę dodatkowego źródła energii o wyższym napięciu. Niestety, ze względu na niewielką w porównaniu z akumulatorem pojemność kondensatora C-dump, napięcie to ulega dużym wahaniom w cyklu zasilania, pogarszając efekt działania układu [5].

Innym możliwym do realizacji rozwiązaniem, dającym podobny efekt, jest zasilanie uzwojeń silnika w konfiguracji szeregowej lub równoległej. Takie rozwiązanie jest często stosowane w silnikach krokowych. Stosując połączenie szeregowe napięcie zasilania każdej cewki jest równe połowie napięcia źródła zasilania, natomiast przy połączeniu równoległym napięcie to jest równe napięciu źródła zasilania. W związku z tym w układzie szeregowym przy pracy układu w ograniczeniu prądowym lub przy modulacji PWM, zakładając jednakową wartość tętnień prądów w uzwojeniach, częstotliwość komutacji tranzystorów jest o połowę mniejsza, a co za tym idzie straty komutacyjne są o połowę mniejsze niż przy połączeniu równoległym. W napędach SRM problemem jest jednak konieczność wykonywania takich przełączeń konfiguracji uzwojeń w sposób zapewniający ciągłość przepływu prądu w uzwojeniach pasm.

Istnieje możliwość zmian konfiguracji uzwojeń w trakcie cyklu zasilania pasma przy zastosowaniu odpowiednio zmodyfikowanego układu zasilania. Pozwala to na zachowanie wartości strat komutacyjnych na poziomie zbliżonym do dotychczasowego w zakresie małych prędkości, przy jednoczesnym zwiększeniu zakresu pracy napędu ze stałym momentem [2]. Idea zwiększenia mocy napędu w wyniku rozszerzenia zakresu prędkości przedstawiona została na rys. 1.



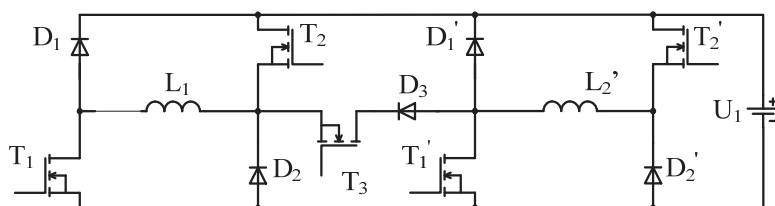
Rys. 1. Idea zwiększenia mocy napędu poprzez rozszerzenie zakresu pracy przy stałym momencie, charakterystyka układu przy zasilaniu w konfiguracji a) szeregowej i b) równoległej

Efektom zastosowania tego typu układu jest możliwość zwiększenia mocy silnika w zakresie średnich i dużych prędkości. W napędach pojazdów rozszerzenie zakresu pracy napędu przy zachowaniu stałej wartości momentem może umożliwić dodatkowo zmniejszenia liczby stopni przekładni mechanicznej. Rozwiązanie takie jest możliwe przy zastosowaniu układu zasilania przedstawionego w [2]. Przy wykorzystaniu takiego układu istnieje potencjalna możliwość zastosowania go do napędu pojazdów silników wolnoobrotowych o wymaganej wartości momentu lecz o mniejszej mocy znamionowej, niż wymagana do napędu pojazdu. Układ zasilania umożliwia uzyskanie żądanej wartości momentu w zakresie wyższych prędkości, czyli zapewni możliwość uzyskania większej mocy.

2. UKŁAD NAPIĘDOWY O ZMIENNEJ KONFIGURACJI UZWOJEŃ

Schemat układu zasilania przedstawionego w [2] dla jednego pasma silnika pokazano na rys. 2. Układ ten dotychczas został zbadany tylko w zakresie zasilania wysokoobrotowego dwupasmowego silnika SRM. Umożliwił około dwukrotne zwiększenie mocy napędu.

Układ pokazany na rys. 2 składa się z dwóch asymetrycznych półmostków H oraz obwodu łączącego półmostki, złożonego z tranzystora i diody. Każdy półmostek zasila uzwojenia jednego bieguna pasma. Układ ten może pracować we wszystkich trybach w jakich pracuje układ półmostka oraz w dodatkowych, wykorzystywanych do rozszerzenia zakresu prędkości pracy ze stałym momentem i zwiększenia mocy w zakresie dużych prędkości. Dokładny sposób działania układu przedstawiono w [2]. Wadą tego układu są zwiększone straty w przewodzeniu w zakresie małych prędkości obrotowych, wynikające z przepływu prądu przez elementy łączące półmostki.



Rys. 2. Układ zasilania jednego pasma silnika SRM, umożliwiający zmianę konfiguracji uzwojeń biegunowych bez przerywania obwodu przepływu prądu pasm

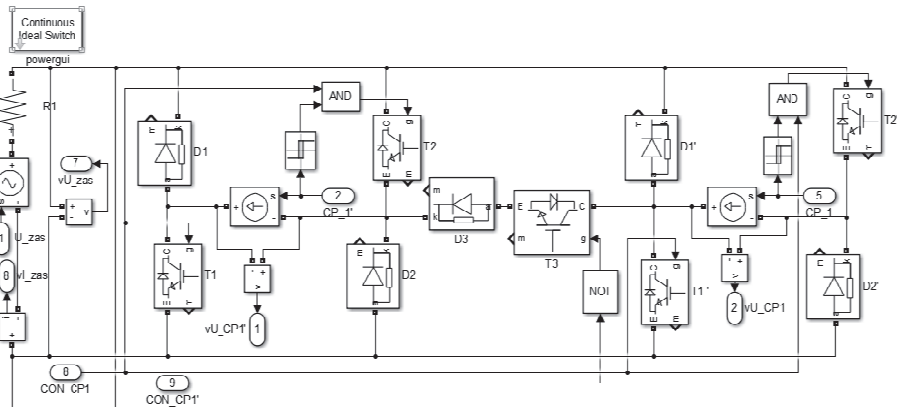
Z tego względu w napędach zasilanych niskim napięciem, np. z akumulatora, w tym zakresie prędkości istotnie zmniejsza się sprawność napędu. Inaczej wygląda to jednak w przypadku silników zasilanych ze źródła o wyższym napięciu. W takim przypadku straty na elementach energoelektronicznych w przewodzeniu odgrywają mniejszą rolę niż straty komutacyjne. Całkowite straty w prezentowanym układzie w zakresie małych prędkości są wówczas nieznacznie większe niż w układzie półmostka. Jednak w związku z właściwościami tego układu należy go porównywać nie z napędem o mocy znamionowej silnika lecz z napędem o większej mocy, umożliwiającym uzyskanie zadanej wartości momentu w takim samym zakresie prędkości. W przypadku napędu z silnikiem dwupasmowym uzyskano ponad dwukrotny wzrost mocy maksymalnej bez zmiany silnika.

W napędach pojazdów wskazane jest jednak stosowanie silników wolnoobrotowych. W przypadku napędów z silnikami SRM ich prędkość w znacznym stopniu zależy od konstrukcji silnika, tj. od liczby pasm stojana i zębów wirnika. W związku z tym badania prowadzone są obecnie dla silnika trójpasmowego o wyższym napięciu zasilania. Mają one na celu określenie parametrów napędu przy zasilaniu silnika w różnych konfiguracjach połączeń uzwojeń. Badania przeprowadzono metodą symulacji komputerowej dla czterech wariantów połączeń uzwojeń: zasilanie i zwrot energii w połączeniu szeregowym, zasilanie w układzie szeregowym zwrot energii w układzie równoległym, zasilanie w układzie równoległym i zwrot energii w układzie szeregowym, zasilania i zwrot energii w układzie równoległym. Obliczenia miały na celu wyznaczenie wartości momentu dla różnych prędkości w celu późniejszego wyznaczenia strategii sterowania układem.

3. SYMULACJA PRACY NAPĘDU

Program symulacyjny opracowano w środowisku Matlab Simulink. Program zawiera model matematyczny silnika i układu zasilania. Sterowanie pracą silnika realizowane jest w funkcji kąta obrotu wirnika. Parametry modelu zostały ustalone pomiarowo. W modelu maszyny uwzględniono nieliniowość obwodu magnetycznego. Pomiary indukcyjności własnej uzwojeń pasm i momentu elektro-

magnetycznego wykonano z rozdzielczością 1° w zakresie 90° , który stanowi zakres powtarzalności cyklu sterowania. Zależności indukcyjności od prądu pasma wyznaczono dla różnych pozycji kątowych wirnika mierząc odpowiedź układu na skokową zmianę napięcia, przy zablokowanej pozycji wirnika. Na podstawie uzyskanych wyników opracowano dwie tablice: zależności strumienia magnetycznego oraz momentu od kąta i prądu pasma. Następnie, zależności te aproksymowano wielomianami oraz wyznaczono wykorzystywaną w modelu symulacyjnym zależność prądu pasma od kąta obrotu i strumienia magnetycznego. Zależności te w postaci dwuwymiarowych struktur danych zaimplementowano w środowisku Matlab Simulink. Model symulacyjny wykorzystuje dwie tablice: tablicę zależności prądów pasma od położenia kąтового wirnika i strumienia magnetycznego, oraz tablicę zależności momentu elektromagnetycznego od położenia kąтового wirnika i prądu pasma. W modelu pominięto wzajemne sprzężenia magnetyczne między uzwojeniami pasm silnika oraz straty w rdzeniu silnika. Model przystosowano do obliczeń dla zadanych wartości prędkości obrotowej. W trakcie obliczeń wyznaczane są wartości napięć, prądów, mocy oraz momentu. Model symulacyjny układu zasilania jednego pasma w środowisku Matlab Simulink pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Model symulacyjny układu zasilania jednego pasma silnika SRM, umożliwiającego zmianę konfiguracji uzwojeń w czasie zasilania pasma

W celu określenia wpływu poszczególnych trybów pracy na parametry napędu obliczenia wykonano dla kilku prędkości obrotowych, poniżej i powyżej prędkości znamionowej silnika. Wstępnie zbadano dwa tryby pracy uwzględniające konfiguracje szeregową i równoległą połączeń uzwojeń podczas zasilania pasm i podczas zwrotu energii do źródła zasilania. Przyjęto stałą wartość napięcia zasilania, ograniczenia prądowego oraz zakresu kątów zasilania pasm. Badania przeprowadzono dla silnika o napięciu zasilania 220 V, prędkości znamionowej 3000 obr/min i prądzie znamionowym 8 A.

Obliczenia wykonano dla różnych wartości kątów wyłączania zasilania pasm, wyznaczanych jako wyprzedzenie kątowe w stosunku do położenia wirnika o minimalnej reluktancji magnetycznej dla zasilanego pasma. Na tej podstawie wyznaczono wartości kątów, przy jakich napęd posiadał największą sprawność dla zadanych prędkości i konfiguracji uzwojeń.

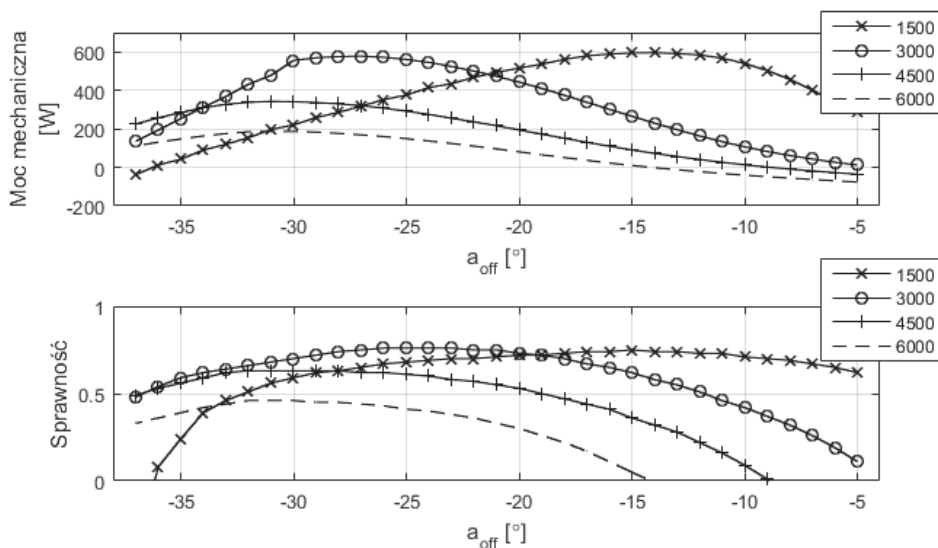
4. WYNIKI OBLICZEŃ

Układ może pracować w czterech trybach pracy, które przedstawiono w tabeli 1. Tabela ta zawiera opis sposobu sterowania tranzystorami wykonawczymi. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń dla dwóch podstawowych trybów pracy. Zasadność stosowania pozostałych będzie przedmiotem dalszych badań.

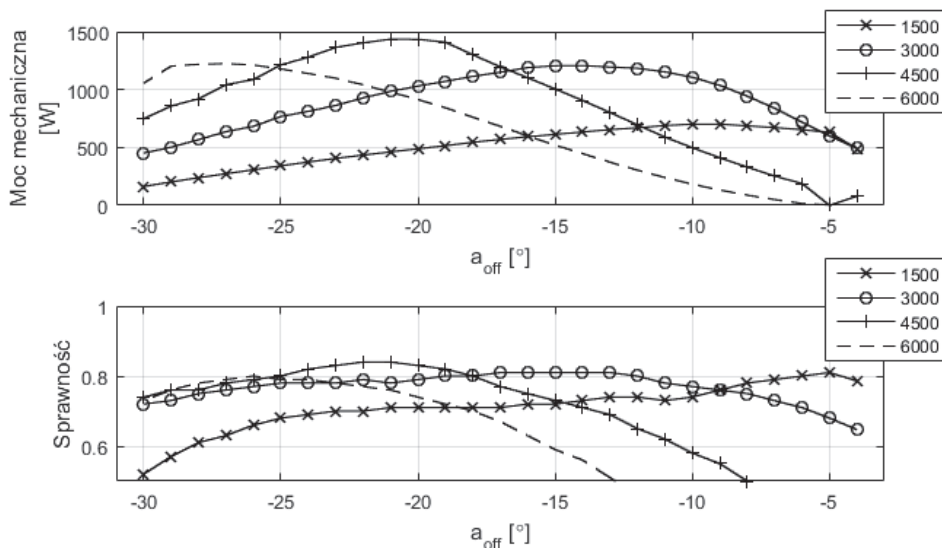
Tabela 1. Opis sposobu wyboru trybu pracy układu w programie symulacyjnym (oznaczenia tranzystorów zgodne z rys. 2).

Lp.	Konfiguracja i stan pracy układu	Załączone tranzystory				
1	Konfiguracja szeregową podczas zasilania i szeregową podczas zwrotu energii					
	Stan zasilania pasma	T_1	–	–	T_2'	T_3
	Stan zwrotu energii	–	–	–	–	T_3
2	Konfiguracja szeregową podczas zasilania i równoległą podczas zwrotu energii					
	Stan zasilania pasma	T_1	–	–	T_2'	T_3
	Stan zwrotu energii	–	–	–	–	–
3	Konfiguracja równoległą podczas zasilania i szeregową podczas zwrotu energii					
	Stan zasilania pasma	T_1	T_2	T_1'	T_2'	–
	Stan zwrotu energii	–	–	–	–	T_3
4	Konfiguracja równoległą podczas zasilania i równoległą podczas zwrotu energii					
	Stan zasilania pasma	T_1	T_2	T_1'	T_2'	–
	Stan zwrotu energii	–	–	–	–	–

Na rys. 4 przedstawiono wyniki obliczeń mocy i sprawności układu przy zasilaniu w konfiguracji szeregowej i szeregowym zwrocie energii w funkcji kąta wyłączania zasilania, dla różnych prędkości obrotowych. Obliczenia wykonano dla prędkości od 1500 obr./min do 6000 obr./min oraz dla stałego kąta zasilania uzwojeń równego 30°. Kolejny rys. 5 przedstawia podobne zależności uzyskane dla napędu pracującego z równoległe zasilanymi uzwojeniami.



Rys. 4. Zależność mocy wyjściowej i sprawności napędu od kąta wyłączania zasilania dla różnych prędkości obrotowych silnika zasilanego w konfiguracji szeregowej

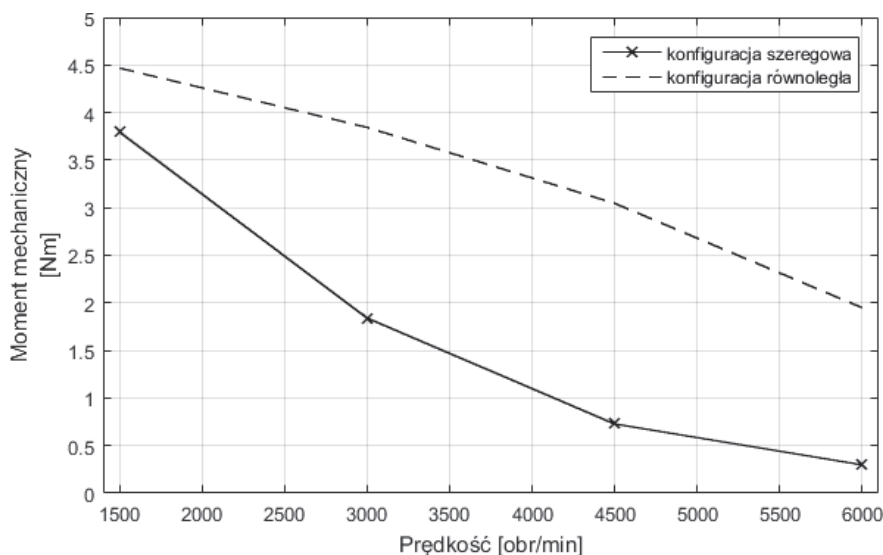


Rys. 5. Zależność mocy wyjściowej i sprawności napędu od kąta wyłączania zasilania dla różnych prędkości obrotowych silnika zasilanego w konfiguracji równoległej

Zależności uzyskane dla poszczególnych prędkości obrotowych posiadają ekstrema, co świadczy o konieczności dostosowywania wartości kątów wyłączania zasilania do warunków pracy. Dla układu pracującego w konfiguracji równoległej uzwojeń uzyskano większe wartości momentu. Wyniki wskazują na

możliwość uzyskania dla silnika trójfazowego podobnych efektów do tych jakie uzyskano dla silnika dwufazowego.

Na rys. 6 przedstawiono zależności maksymalnych wartości momentu od prędkości obrotowej dla obu układów. Jak wynika z wykresów przy zasilaniu uzwojeń w konfiguracji równoległej uzyskano większe wartości momentu w całym badanym zakresie prędkości.



Rys. 6. Zależności maksymalnych wartości momentu na wale od prędkości obrotowej przy zasilaniu uzwojeń pasm silnika w konfiguracji szeregowej i równoległej

5. WNIOSKI

Badania przeprowadzono dla silnika trójfazowego. W trakcie obliczeń przyjęto stałe wartości napięcia zasilania i szerokości zakresu zasilania pasm. W ramach badań wyznaczono zależności mocy, momentu i sprawności układu od kąta wyłączania zasilania dla różnych prędkości. Uzyskano wyniki zbliżone do uzyskanych dla silnika dwufazowego [2].

Przy zasilaniu w konfiguracji równoległej uzyskano większą wartość momentu i rozszerzono zakres regulacji prędkości. Określono wartości kątów wyłączania zasilania, dla których uzyskiwana jest największa moc oraz najlepsza sprawność. Wartości te są różne dla obu tych wielkości.

Nie przeprowadzono dotychczas badań w zakresie niskich prędkości, w którym układ pracuje przy modulacji PWM lub w ograniczeniu prądowym.

W kolejnym etapie zostaną wyznaczone zależności parametrów napędu w zakresie małych prędkości i określona sprawność w pozostałych trybach pracy. Dalsze obliczenia zostaną przeprowadzone dla różnych szerokości przedzia-

łów zasilania pasm. Zostanie również sprawdzona zasadność stosowania pozostałych dwóch trybów pracy układu.

Przeprowadzone badania wstępne wykazały potencjalną możliwość zastosowania prezentowanego układu do napędu pojazdów.

LITERATURA

- [1] Wach P., Dynamics and control of Electrical Drives, Springer, ISBN 978-3-642-20221-6, 2011.
- [2] Tomczewski K., Wróbel K., Quasi-three-level converter for switched reluctance motor drives reducing current rising and falling Times, IET Power Electronics, Volume 5, Issue 7, Pages: 1049-1057, DOI: 10.1049/iet-pel.2011.0124, 2012.
- [3] Jazdzynski W., Majchrowicz M., An approach to find an optimum designed SRM for electric vehicle drive, ICEM, 18th International Conference on Electrical Machines, 6-9 Sept. 2008, pp. 1-6.
- [4] Miller T. J. E., Switched reluctance motors and their control, Magna Physics, Oxford, 1993.
- [5] Yong-Ho Y., Sang-Hoon S., Tae-Won L., Chung-Yüen W., Gyu-Sik K., High Performance Control of C-dump Converters fed Switched Reluctance Motor for Automobiles, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany, 20-25 June 2004, vol. 2, pp. 1322-1328.

SIMULATION OF A DRIVE SYSTEM WITH VARIABLE CONFIGURATION OF A WINDINGS OF THREE-PHASE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

The paper presents the results of simulation studies of the drive with a three-band switched reluctance motor, powered from a modified power supply system. The developed power supply system enables to change the configuration of connections of windings or SRM motor bands from serial to parallel during operation of the drive without interrupting the current flow circuit. A simulation program for the drive with a SRM motor supplied from the tested power supply system was developed. The aim of the research is preliminary assessment of the suitability of this solution for use in energy-efficient drives of electric vehicles. The tests were carried out in the Matlab Simulink program for the drive model with a low power motor.

(Received: 30.01.2019, revised: 08.03.2019)