

Badania symulacyjne przełączalnego napędu reluktancyjnego z układem zasilania o zmiennej konfiguracji uzwojeń

Streszczenie. Badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy dotyczą modelowania napędu z silnikiem reluktancyjnym zasilanym z układu zasilania o zmiennej konfiguracji uzwojeń. Ich celem jest analiza parametrów napędu oraz wyznaczenie charakterystyk silnika w zależności od wartości kątów komutacji, współczynnika wypełnienia napięcia PWM oraz konfiguracji połączeń uzwojeń pasm przełączalnego silnika reluktancyjnego. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem modelu symulacyjnego w środowisku Matlab/Simulink.

Abstract. The research carried out as part of this work concerns modeling of a drive with a reluctance motor powered from a power supply system with variable winding configuration. Their purpose is to analyze drive parameters and determine the drive characteristics depending on the value of the commutation angles, PWM voltage fill factor and configuration of the winding connections of the switchable reluctance motor phases. The research was carried out using a simulation model in the Matlab / Simulink environment. (**Simulation studies of a switched reluctance drive with a variable windings configuration power supply system**).

Słowa kluczowe: przełączalny silnik reluktancyjny, układ zasilania, symulacja, modelowanie.

Keywords: switched reluctance motor, supply system, simulation, modeling.

Wstęp

Napędy z przełączalnymi silnikami reluktancyjnymi (SRM – ang. Switched Reluctance Motor) zyskują na popularności dzięki możliwości ich stosowania w aplikacjach wymagających regulacji prędkości obrotowej w szerokim zakresie. Zasada ich działania opiera się na dążeniu obwodu magnetycznego do minimalizacji reluktancji magnetycznej. Zgodnie z tym wirnik silnika SRM dąży do zajęcia położenia odpowiadającego najmniejszej zastępczej reluktancji obwodu magnetycznego, czyli pozycji zgodnej zębów stojana i wirnika. W pozycji tej moment elektromagnetyczny jest równy zeru, a każde odchylenie od niej powoduje generowanie momentu dążącego do doprowadzenia wirnika do tej pozycji. Stojan posiada parzystą liczbę wydatnych biegunów z uzwojeniami. Cewki tworzące pasmo wykonane są w postaci koncentrycznych uzwojeń umieszczonych zazwyczaj na przeciwległych biegunach stojana. Cewki łączy się szeregowo lub równoległe, tworząc pasma fazowe. Parzystą liczbę biegunów stojana determinuje potrzeba zrównoważenia sił naciągu magnetycznego. Wirnik posiada również wydatne zęby, tworzące zwory zamykające obwód magnetyczny stojana. W celu uzyskania w dowolnej pozycji wirnika odpowiedniej wartości momentu elektromagnetycznego, liczba zębów wirnika powinna być różna od liczby zębów stojana, a zasilanie uzwojeń powinno odbywać się sekwencyjnie w ten sposób, aby zasilanie danego pasma zostało wyłączone przed osiągnięciem pozycji zgodnej zębów wirnika i stojana.

Na charakterystyki silnika SRM, poza jego konstrukcją, decydujący wpływ ma układ zasilania i sposób sterowania. Silnik SRM stanowi obwód magnetyczny o dużej indukcyjności, która zmienia się zależnie od położenia kąтового wirnika i wartości prądu w uzwojeniach stojana. W związku z tym prędkość narastania oraz zanikania prądów w uzwojeniach zależy od pozycji kątowej wirnika. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej, istotnym problemem staje się wzrastający udział procesów komutacyjnych w całkowitym czasie trwania cyklu zasilania pasma. Indukcyjność uzwojeń stojana zależy od liczby zwojów w cewkach, sposobu ich połączenia oraz grubości szczeliny magnetycznej. Można również ją zmieniać łącząc cewki biegunowe szeregowo lub równoległe.

W zakresie średnich i wysokich prędkości procesy komutacyjne powodują zmniejszenia wartości średniej prądów w pasmach. Spadek wartości średniej prądów

powoduje z kolei ograniczenie wartości momentu elektromagnetycznego, wzrost jego tętnień oraz pogorszenie sprawności układu. W ten sposób dochodzi do ograniczenia zakresu prędkości, w którym silnik utrzymuje znamionową wartość momentu.

W celu przeciwdziałania temu niekorzystnemu zjawisku opracowano kilka metod poprawiających parametry napędów w tym zakresie prędkości.

Jedną z tych metod jest zwiększenie wartości napięcia źródła zasilania [1, 2]. Wyższe napięcie zasilania powoduje szybsze zmiany wartości prądów w uzwojeniach. Modyfikacja ta pozwala na poprawę parametrów układu w zakresie średnich i wysokich prędkości obrotowych, natomiast wpływa niekorzystnie w zakresie niskich prędkości, powodując zwiększenie częstotliwości komutacji tranzystorów podczas pracy w trybie ograniczenia prądowego. Skutkiem tego jest wzrost strat komutacyjnych.

Znacznie lepszym rozwiązaniem jest zasilanie napędu napięciem znamionowym w zakresie niskich prędkości i umożliwienie jego zwiększenia w zakresie średnich i wysokich prędkości.

Taką zasadę wykorzystano między innymi w układach typu C-DUMP [3, 4], które dzięki dodatkowemu kondensatorowi umożliwiają zasilanie układu wyższym napięciem. Niestety, ze względu na ograniczoną pojemność kondensatora, układy C-DUMP pozwalają na podwyższenie napięcia tylko na czas jego rozładowania, przy czym napięcie to zmniejsza się w trakcie tego procesu. Pozwala to jednak przyspieszyć narastanie prądu w początkowej fazie cyklu zasilania pasma.

W celu poprawy parametrów pracy napędu z SRM w zakresie średnich i wysokich prędkości obrotowych opracowano układ zwiększający napięcie zasilania cewek biegunowych, ale w wyniku zmiany konfiguracji połączeń cewek pasm. Pozwala on na zasilanie połączonych szeregowo cewek tworzących pasma napięciem znamionowym w zakresie niskich prędkości, a napięciem dwukrotnie wyższym przy połączeniu. Układ ten zapewnia możliwość rekonfiguracji tych połączeń z konfiguracji szeregowej na równoległą lub odwrotnie, nie przerywając ciągłości przepływu prądów pasm.

Układ zasilania

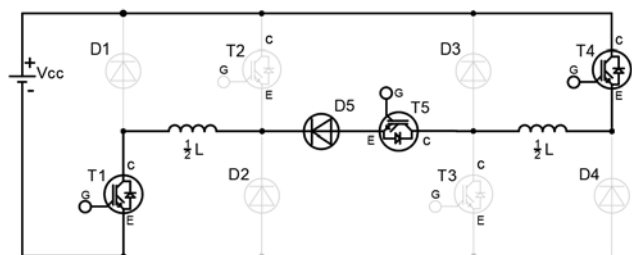
Typowy układ zasilania jednego pasma SRM składa się z asymetrycznego półmostka H i zawiera dwa tranzystory

oraz dwie diody. W układzie tym cewki pasm połączone są w sposób trwały, najczęściej szeregowo.

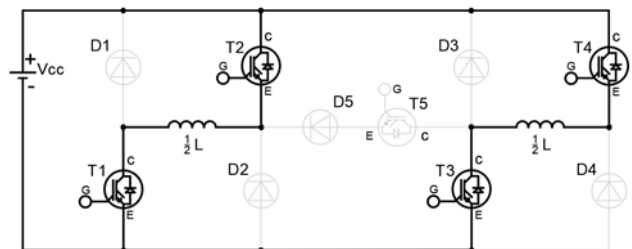
Rozpatrywany układ zasilania jest bardziej złożony i wymaga, aby końce oraz początki uzwojeń każdej cewki pasm silnika były wyprowadzone do skrzynki zaciskowej. Układ zasilania jednego pasma składa się z dwóch półmostków H, połączonych ze sobą tranzystorem i diodą (rysunek 1). Istnieje też uproszczona wersja tego układu, bez dodatkowego tranzystora łączącego półmostki [5].

Omawiany układ zasilania pozwala na pracę napędu w trybach zbliżonych do występujących w asymetrycznym półmostku H oraz w trybach dodatkowych, umożliwiających rozszerzenie zakresu prędkości i zwiększenie mocy napędu. W pierwszym trybie pracy cewki pasma łączone są szeregowo (rysunek 1). W tym połączeniu możliwe jest zarówno zasilanie pasm silnika jak i zwrot energii do źródła. W trakcie zasilania w tym trybie pracy załączone są tranzystory T1 i T4 oraz tranzystor T5 łączący uzwojenia obu cewek. W czasie zwrotu energii w tym trybie pracy załączony jest tylko tranzystor T5.

Układ ten umożliwia przełączanie cewek w połączenie równoległe. W tym połączeniu możliwe są również zasilanie uzwojeń i zwrot energii do źródła (rysunek 2). W trybie pracy równoległej w trakcie zasilania załączone są tranzystory T1, T2, T3 i T4. Równoległy zwrot energii wymaga wyłączenia wszystkich tranzystorów, łącznie z T5. Dioda D5 zabezpiecza tranzystor T5 przed napięciem wstecznym.



Rys.1. Układ w stanie zasilania uzwojeń w konfiguracji szeregowej



Rys.2. Układ w stanie zasilania uzwojeń w konfiguracji równoległej

Zmiany konfiguracji uzwojeń z szeregowej na równoległą i odwrotnie możliwe są w dowolnym momencie cyklu zasilania pasma. Przełączenia te odbywają się z zachowaniem ciągłości przepływu prądu w uzwojeniach.

Model symulacyjny napędu

Model opracowano dla trójfazowego silnika SRM o: 6 biegunach w stojanie i 4 zębach w wirniku (konstrukcja 6/4), napięciu zasilania 220V, prędkości znamionowej 1500 obr/min. Silnik klasyfikuje się w grupie napędów małej mocy (750 W). Silniki tego typu należą do jednej z najczęściej spotykanych rozwiązań.

Model symulacyjny napędu z omawianym układem zasilania opracowano w środowisku Matlab Simulink (rysunek 3). Program składa się z układu zadawania kątów, bloku zawierającego model silnika SRM, modułu sterowania oraz układu zasilania.

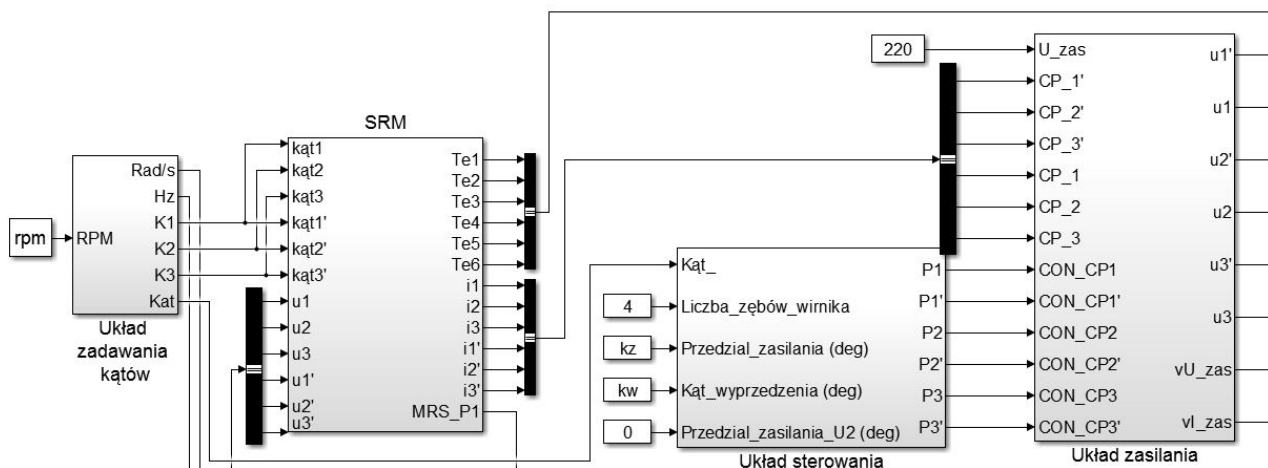
Cykl pracy modułów silnika i układu sterowania jest ściśle związany z kątem położenia wirnika. W układzie zadawania kątów położenie katowe wirnika zostaje zamienione na trzy sygnały sterujące przesunięte względem siebie o 60°. Sygnały te doprowadzane są do modułu silnika, gdzie na ich podstawie wyznaczone są zakresy katowe zasilania poszczególnych pasm silnika SRM.

Model silnika utworzono z sześciu równoważnych bloków, które odpowiadają cewkom stojana silnika trójfazowego. Model ten umożliwia rekonfigurację uzwojeń w szeregowo i równoległe połączenie cewek zgodnie ze schematami z rysunków 1 i 2.

Moduł pasma silnika bazuje na tablicach wartości momentu i strumienia wyznaczonych w trakcie obliczeń połowych metodą elementów skończonych. Wartości w tablicach są określone jako funkcja kąta położenia wirnika oraz prądu cewki. Dla potrzeb modelu tablica strumienia została przekształcona i zaimplementowana w modelu jako wartość prądu w funkcji kąta obrotu wirnika oraz strumienia sprzężonego z jedną cewką pasma.

Sterowanie pracą silnika odbywa się w funkcji kąta obrotu wirnika. Generowane sygnały doprowadzane są do modułu układu zasilania, gdzie sterują pracą tranzystorów.

Układ zasilania pokazany na rysunkach 1 i 2 został zaimplementowany z wykorzystaniem źródeł prądowych reprezentujących cewki pasm silnika, tranzystorów IGBT oraz diod mocy. Dodatkowo układ ten zawiera moduły logiczne umożliwiające zmianę konfiguracji uzwojeń zgodnie z algorytmem sterowania. Zaimplementowane układy ograniczenia prądowego zabezpiecza model przed przekroczeniem znamionowych wartości prądów.



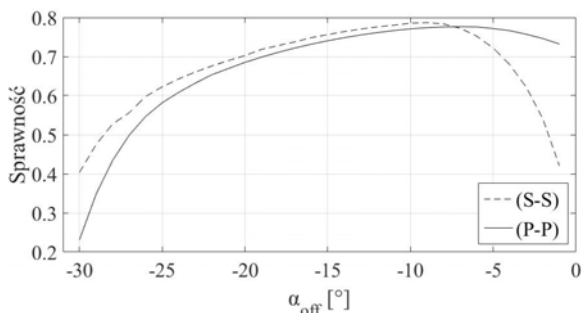
Rys.3. Modelu symulacyjnego napędu z przełączalnym silnikiem reluktancyjnym w programie Matlab Simulink

Wyniki obliczeń

Prezentowane wyniki uzyskano w trakcie badań dwóch podstawowych trybów pracy napędu: zasilania przy szeregowym połączeniu cewek w pasmach i szeregowym zwrocie energii (oznaczone S-S) oraz przy równoległym zasilaniu cewek i równoległym zwrocie energii z cewek do źródła (oznaczone P-P).

W trakcie symulacji każde pasmo silnika było zasilane napięciem znamionowym w zakresie kątowym 30° , a zmianie ulegała wartość kąta wyłączenia zasilania pasma α_{off} . W modelu zaimplementowano układ ograniczenia prądowego przeciwdziałający przekraczaniu dopuszczalnej wartości prądu. Maksymalną wartość prądu w pojedynczej cewce określono na 3,9A.

Początkowo dla każdej prędkości obrotowej wirnika wyznaczono charakterystyki momentu oraz sprawności. Charakterystyki te były wyznaczane dla stałych prędkości w funkcji kąta wyłączenia zasilania pasma α_{off} . Przykładowa zależność uzyskana dla prędkości 1000 obr./min. została pokazana na rysunku 4. Otrzymane zależności pozwoliły na określenie dla każdej prędkości obrotowej takich wartości kątów α_{off} , dla których obliczona sprawność napędu była największa. W przedstawionym na rysunku 4 przypadku kąt ten wynosił odpowiednio dla konfiguracji (P-P) $\alpha_{off} = -7^\circ$, a dla konfiguracji (S-S) $\alpha_{off} = -9^\circ$.

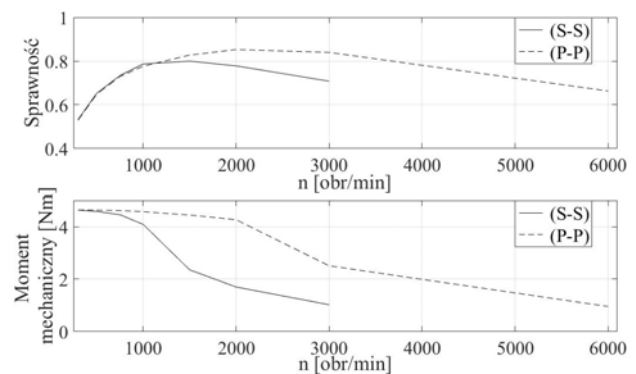


Rys.4. Zależność sprawności napędu w konfiguracjach (P-P) i (S-S) od kąta wyłączenia α_{off} dla prędkości 1000 obr./min.

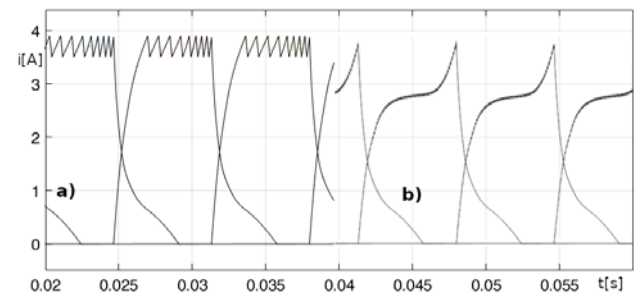
Dla wyznaczonych w ten sposób wartości kątów α_{off} zostały obliczone odpowiadające im zależności momentu i sprawności od prędkości obrotowej. Zależności te pokazano na rysunku 5. Dla konfiguracji (P-P) zakres pracy napędu ze stałym momentem jest ponad dwukrotnie szerszy niż odpowiadający mu zakres dla konfiguracji (S-S). Dodatkowo, przy połączeniu szeregowym cewek, nie uzyskano dodatkowej wartości momentu dla prędkości 6000 obr./min. Zaletą tego połączenia jest jednak wyższa sprawność w zakresie małych prędkości obrotowych. W związku z tym, że opracowany model nie uwzględnia strat komutacyjnych w tranzystorach, rzeczywiste wartości sprawności w zakresie niskich prędkości ulegną zmniejszeniu, szczególnie dla konfiguracji (P-P), z powodu pracy układu w trybie ograniczenia prądowego. Ze względu na większą indukcyjność uzwojeń pasma przy połączeniu szeregowym cewek, częstotliwość komutacji wynikających z pracy układu ograniczenia prądowego będzie mniejsza niż dla konfiguracji równoległej. Należy więc oczekiwać dalszego zwiększenia się różnic w zakresie wartości sprawności uzyskiwanych dla obu konfiguracji uzwojeń w zakresie małych prędkości obrotowych. Ich wyznaczenie będzie tematem dalszych badań.

Kolejnym etapem badań było sprawdzenie wpływu regulacji napięcia metodą modulacji PWM na parametry wyjściowe napędu. Regulacja napięcia zasilania ma szczególne znaczenie w zakresie małych prędkości obrotowych, gdy wartość siły elektromotorycznej rotacji jest mała, co powoduje szybkie narastanie prądów w

uzwojeniach pasm. Regulacja napięcia PWM może być metodą alternatywną dla pracy układu w trybie ograniczenia prądowego. Przykładowe przebiegi prądu pasma w trybie ograniczenia prądowego i przy modulacji PWM pokazano na rysunku 6. W obu przypadkach przyjęto jednakową wartość kąta wyłączenia, a wartość współczynnika wypełnienia sygnału PWM ustalono tak, aby prąd nie przekraczał wartości ustalonej w układzie ograniczenia prądowego. W przypadku z rysunku 6 współczynnik wypełnienia napięcia PWM wynosił 0,81. Wartość momentu mechanicznego dla przypadku z rysunku 6a wynosiła 4,45 Nm, a sprawność 0,73, natomiast dla przypadku z rysunku 6b odpowiednio 3,48 Nm i 0,74.



Rys.5. Zależności sprawności i momentu mechanicznego w konfiguracjach (P-P) i (S-S) dla układu z ograniczeniem prądowym przy różnych prędkościach wirnika

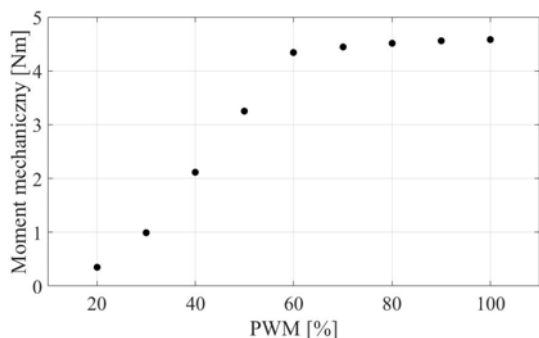


Rys.6. Przebiegi prądów pasm dla konfiguracji (S-S), przy prędkości 750 obr./min., a) w trybie ograniczenia prądowego, b) przy zasilaniu napięciem PWM

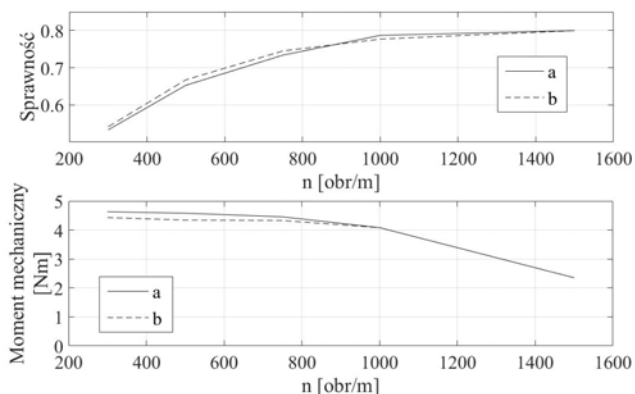
Ostatnim etapem badań było sprawdzenie wpływu modulacji napięcia metodą PWM na parametry wyjściowe napędu, przy takim jej doborze, aby wartość momentu przy zwiększaniu współczynnika wypełnienia pozostawała na stałym poziomie. Przykład wyznaczenia wartości współczynnika wypełnienia napięcia PWM dla konfiguracji (S-S) przy prędkości 500 obr./min. przedstawiono na rysunku 7. W tym przypadku została ustalona wartość 60%.

Dla wybranych wartości współczynników wypełnienia obliczono zależności maksymalnych wartości momentu oraz sprawności, przy pracy w ograniczeniu prądowym oraz dla modulacji PWM z dobranymi wcześniej wartościami współczynnika wypełnienia. Wymagało to wykonania obliczeń w całym zakresie zmian kąta wyłączenia α_{off} dla wszystkich rozpatrywanych prędkości. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 8 i 9.

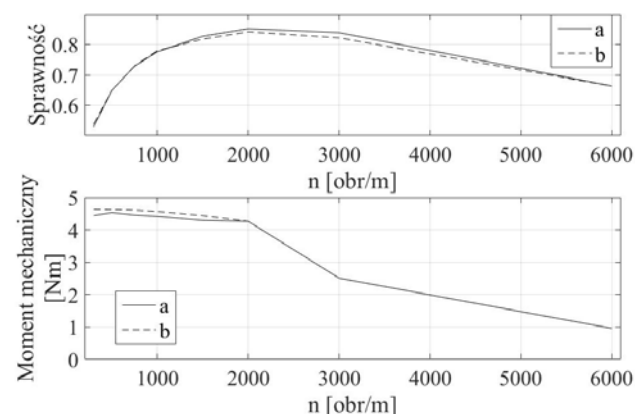
Wyznaczone w ten sposób kąty pozwalają na określenie sposobu sterowania napędem z maksymalnym momentem lub z maksymalną sprawnością. Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono uzyskane wartości kątów wyłączenia w funkcji prędkości obrotowej dla modulacji PWM i porównano je z kątami uzyskanymi przy sterowaniu w trybie ograniczenia prądowego.



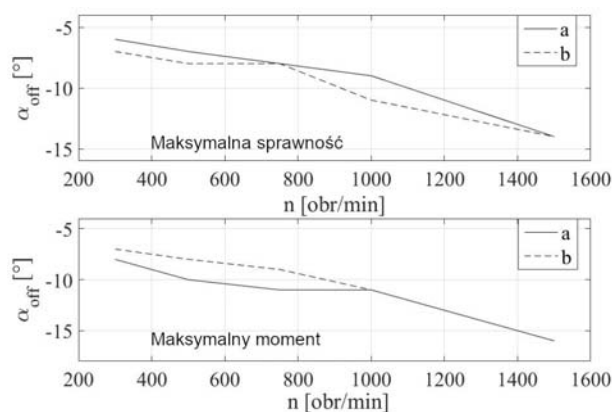
Rys.7. Zależność momentu mechanicznego od współczynnika wypełnienia napięcia PWM dla prędkości 500 obr./min. w konfiguracji (S-S)



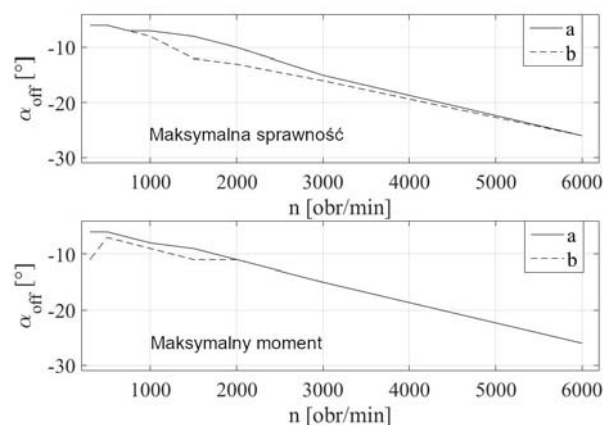
Rys.8. Zależność maksymalnych wartości momentu i sprawności przy a) ograniczeniu prądowym, b) modulacji PWM, dla prędkości 500 obr./min. i konfiguracji (S-S)



Rys.9. Zależność maksymalnych wartości momentu i sprawności przy a) ograniczeniu prądowym, b) modulacji PWM, dla prędkości 500 obr./min. i konfiguracji (P-P)



Rys.10. Zależności kąta α_{off} , przy których uzyskano maksymalną sprawność i maksymalny moment w konfiguracji (S-S) od prędkości a) dla ograniczenia prądowego, b) dla PWM



Rys.11. Zależności kąta α_{off} , przy których uzyskano maksymalną sprawność i maksymalny moment w konfiguracji (P-P) od prędkości a) dla ograniczenia prądowego, b) dla PWM

Wnioski

Zmiana konfiguracji uzwojeń cewek pasma z szeregowej na równoległą pozwala na znaczne zwiększenie zakresu prędkości napędu z zachowaniem dużej wartości momentu oraz wysokiej sprawności dla trójfazowego silnika SRM.

Przeprowadzone badania stanowią podstawę do opracowania strategii sterowania napędem z badanym układem zasilania. Wstępne wyniki wskazują na to, że największą sprawność w całym zakresie prędkości będzie można uzyskać stosując: konfigurację (S-S) w połączeniu z modulacją PWM w zakresie małych prędkości, natomiast w zakresie dużych prędkości konfigurację (P-P). W zakresie średnich prędkości zakłada się możliwość stosowania kombinacji tych dwóch połączeń.

Obliczone zależności kątów w funkcji prędkości pozwalają sterować napędem z maksymalnym momentem lub z maksymalną sprawnością.

Uzyskanie szerszego zakresu pracy ze stałym momentem daje możliwość, np. w aplikacjach mobilnych, zredukowania liczby stopni przekładni mechanicznej.

Autorzy: mgr inż. Bartłomiej Adamski, Politechnika Opolska, Instytut Systemów Napędowych i Robotyki, ul. Prószkowska 76, bud.1, 45-758 Opole, E-mail: bks.adamski@gmail.com; dr inż. Krzysztof Wróbel, Politechnika Opolska, Instytut Systemów Napędowych i Robotyki, ul. Prószkowska 76, bud.1, 45-758 Opole, E-mail: k.wrobel@po.edu.pl

LITERATURA

- [1] Gan C., Wu J., Hu Y., Yang S., Cao W., Guerrero J. M., New Integrated Multilevel Converter for Switched Reluctance Motor Drives in Plug-in Hybrid Electric Vehicles With Flexible Energy Conversion, *IEEE Trans.on Power Electron.*, vol. 32 (2017), no.5, 3754-3766
- [2] Korkosz M., Pakla B., Multilevel converter for high-voltage high-speed switched reluctance motor, *Innovative Materials and Technologies in Electrical Engineering (i-MITEL)*, Sulecin, (2018), 1-4
- [3] Zhang C., Zhang S. H., Wang K., A novel active boost power converter with application to torque ripple reduction control for switched reluctance motor, *IEEE Internat. Conf. on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, Shanghai (2015), 173-174
- [4] Setiawan K. L. B., Analysis Performance of Capacitor Voltage in C-Dump Converter for SRM Drive, *IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD)*, Selangor, Malaysia, (2018), 1-5.
- [5] Tomczewski K., Układy zasilania rozszerzające zakresy pracy przełączalnych silników reluktancyjnych, *Wydawnictwo Politechniki Opolskiej*, Opole (2012)