

Badanie wpływu pojemności kondensatora C-Dump na parametry układu napędowego z silnikiem SRM

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań napędu ze zmodyfikowanym układem zasilania typu C-Dump. Do badań zastosowano model symulacyjny zaimplementowany w programie Matlab Simulink. Układ ten został wykorzystany do zasilania trójfazowego przełączalnego silnika reluktancyjnego. Obliczenia wykonano dla różnych punktów pracy i parametrów układu. Celem badań było określenie wpływu wartości kondensatora C-Dump na właściwości napędu.

Abstract. The paper presents the results of tests on the drive with modified C-Dump supply system. A simulation model implemented in Matlab Simulink was used for the tests. The supply system was used for a three-band switchable reluctance motor. Calculations were carried out for various motor speed and selected system parameters. The purpose of the work was to determine the effect of C-Dump capacitor value on drive parameters. **Determination of the effect of C-Dump capacitor value on drive with SRM motor**

Słowa kluczowe: przełączalny silnik reluktancyjny, układ typu C-Dump, układ napędowy.

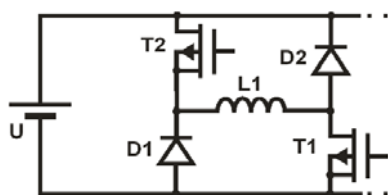
Keywords: switched reluctance motor, C-dump converter, drive system.

Wstęp

W przypadku napędów z przełączalnymi silnikami reluktancyjnymi (SRM) bardzo duży wpływ na charakterystyki wyjściowe ma układ zasilania. Znanych jest wiele topologii układów zasilania tych silników. Charakteryzują się one różnymi właściwościami. Dlatego, zależnie od przewidywanego zastosowania napędu, można wybrać odpowiedni typ układu zasilania. Optymalizacja silników SRM oraz układów zasilania tych maszyn jest ważna, ze względu na możliwość ich wykorzystania w napędach pojazdów elektrycznych [1-4]. Aktualnie są one wykorzystywane głównie w napędach pojazdów trakcyjnych. Jednak ich wysoka bezawaryjność, dobre charakterystyki sprawności, momentu oraz brak momentu zaczepowego sprawiają, że są one coraz bardziej atrakcyjne również w innych zastosowaniach, pomimo stosunkowo dużej masy. W napędach pojazdów większy niż w innych typach maszyn moment bezwładności wirnika nie stanowi istotnej wady ze względu na znacznie większą masę pojazdu. Zaletą jest brak momentu zaczepowego.

Na rysunku 1 pokazano typowy układ zasilania jednego pasma SRM. Składa się on z asymetrycznych półmostków typu H. Alternatywą dla niego może być napęd z układem zasilania typu C-Dump. Badania wykonano w celu określenia wpływu układu zasilania na parametry napędu z trójfazowym silnikiem SRM.

Układ C-Dump pokazany na rysunku 2 zawiera połączony w szereg ze źródłem zasilania kondensator, stanowiący dynamiczne źródło energii. Początkowo głównym celem stosowania układów typu C-Dump było obniżenie kosztu napędu w stosunku do napędu złożonego z półmostków H w wyniku redukcji liczby tranzystorów. Typowy układ zasilania zawiera 2N tranzystorów, natomiast układy C-Dump zawierały zwykle N+1 tranzystorów, gdzie N to liczba pasm silnika. Dzięki zmianie topologii układu i zastosowaniu kondensatora C-Dump, zmniejszenie liczby elementów półprzewodnikowych praktycznie nie wpływało negatywnie na charakterystyki wyjściowe napędu.

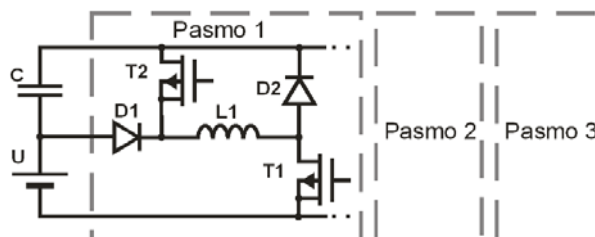


Rys.1. Typowy układ zasilania SRM złożony z asymetrycznych półmostków typu H

W chwili obecnej cena tranzystorów nie wpływa w takim stopniu na koszt napędu jak cena silnika. Dzięki temu możliwe jest stosowanie większej liczby tranzystorów bez istotnego zwiększania kosztu napędu. Jednakże poprzez zastosowanie dodatkowo kondensatora C-Dump można uzyskać poprawę charakterystyk napędu w stosunku do układu typowego stosując 2N tranzystorów. Rozszerzenie zakresu prędkości z zachowaniem stałej wartości momentu może umożliwić w wielu przypadkach wykorzystanie w układzie napędowym silnika o mniejszej mocy znamionowej, a tym samym obniżyć koszt całego napędu [5].

Dotychczas badania układu z rysunku 2, zawierającego 2N tranzystorów, wykonano dla napędu z silnikiem dwupasmowym niskonapięciowym. Kondensator był wówczas ładowany do napięcia, które kilkukrotnie przekraczało napięcie znamionowe silnika. Było to możliwe ze względu na to, że napięcie dopuszczalne izolacji uzwojeń silnika było wielokrotnie wyższe niż napięcie znamionowe zasilania silnika. W przypadku silnika zasilanego napięciem sieciowym, którego uzwojenia nawinięte zostały typowym drutem nawojowym w emalii, wzrost napięcia nie może przekroczyć wartości napięcia zasilania silnika. Trudno jest więc ocenić, jak wpłynie zastosowanie tego układu na charakterystyki tego typu napędu. Dodatkowo konieczne jest określenie minimalnej pojemności kondensatora, przy jakiej uzyskuje się poprawną pracę napędu oraz zakresy napięciowe ładowania i rozładowywania kondensatora.

W układach typu C-Dump sterowanie procesem ładowania i rozładowywania kondensatora może mieć wyraźny wpływ na charakterystyki wyjściowe napędu [6]. Zbyt mała pojemność może uniemożliwić zmagazynowanie energii zwracanej z uzwojeń fazowych bez przekraczania dopuszczalnej wartości napięcia i spowoduje konieczność rozładowywania energii w pętli jałowej. Dobór kondensatora o odpowiedniej pojemności może w istotny sposób wpłynąć na charakterystyki wyjściowe napędu SRM.



Rys.2. Układ zasilania SRM typu C-Dump z niezależnymi sekcjami zasilającymi

Układ C-Dump z niezależnymi sekcjami zasilającymi

Układ typu C-Dump z niezależnymi sekcjami zasilającymi pokazano na rysunku 2. Podczas pracy badanego układu wyróżnić można cztery stany: zasilania ze źródła U , pętli jałowej (beznapięciowy), ładowania kondensatora C oraz zasilania z połączonych szeregowo: źródła zasilania U i kondensatora C .

Stan zasilania ze źródła U i stan pętli jałowej są zbliżone do występujących w napędach z typowym układem zasilania, z tą różnicą, że w układzie typowym prąd fazowy przepływa przez dwa tranzystory. W badanym układzie prąd zasilający uzwojenia pasma przepływa przez tranzystor $T1$ i diodę $D1$. Wyłączenie tranzystora $T1$ powoduje przejście w stan zwrotu energii (ładowania kondensatora C), a w przypadku załączenia tranzystora $T2$ w stan pętli jałowej. Po naładowaniu kondensatora, możliwe jest zasilanie silnika wyższym napięciem przez załączenie obu tranzystorów. Powoduje to szybsze narastanie prądu w uzwojeniach. Czas zasilania uzwojenia wyższym napięciem zależy od pojemności kondensatora i ustalonych wartości napięcia do jakich możliwe jest ładowanie i rozładowywanie kondensatora. Zależnie od przyjętego algorytmu sterowania i pojemności kondensator może być ładowany oraz rozładowywany całkowicie lub częściowo. W pracy przyjęto amplitudę zmian napięcia kondensatora równą 10V.

W stanie zasilania ze źródła U stan obwodu elektrycznego opisuje równanie (1), przy zasilaniu napięciem zwiększonym (2), w stanie pętli jałowej (3), a w czasie ładowania kondensatora (4).

$$(1) \quad \frac{d\psi}{dt} + Ri = U - u_{T1} - u_{D1}$$

$$(2) \quad \frac{d\psi}{dt} + Ri = U + u_C - u_{T1} - u_{T2}$$

$$(3) \quad \frac{d\psi}{dt} + Ri = -u_{T2} - u_{D2}$$

$$(4) \quad \frac{d\psi}{dt} + Ri = -u_C - u_{D1} - u_{D2}$$

Wykorzystanie tego układu do zasilania SRM powoduje skrócenie procesów narastania i opadania prądu w uzwojeniach, a co za tym idzie zwiększa wartość średnią prądu w zakresie pracy silnikowej. Natomiast szybsze rozładowanie energii pola magnetycznego po wyłączeniu zasilania zmniejsza wartość średnią prądu w strefie hamulcowej. Ze względu na parametry izolacji i napięcie zasilania silnika równe 300 V, przyjęto maksymalną wartość napięcia ładowania kondensator równą 300 V. Tak więc wartość napięcia zasilania silnika wynosi więc 600 V. Podejście takie umożliwia uzyskanie znamionowej wartości momentu elektromagnetycznego w zakresie prędkości, w którym przy stosowaniu typowego układu zasilania następuje już jego spadek. Efektem jest rozszerzenie zakresu pracy silnika z zachowaniem stałej wartości momentu, a co za tym idzie wzrost mocy maksymalnej napędu oraz rozszerzenie zakresu prędkości. Wielkość tych zmian zależy od energii dostarczanej i pobieranej z kondensatora, czyli od jego pojemności i amplitudy zmian napięcia. Jednak ze względu na to, że w prezentowanym układzie każde uzwojenie zasilane jest z niezależnej sekcji zasilającej, część energii przekazywana jest bezpośrednio pomiędzy uzwojeniami z pominięciem kondensatora. W związku z tym nie można wyznaczyć pojemności kondensatora bezpośrednio na podstawie energii zmagazynowanej w polu magnetycznym silnika. W rzeczywistości pojemność ta może być mniejsza. Jej wartość można ustalić na podstawie wyników symulacji. W tym celu należy jednak wcześniej ustalić właściwe warunki

komutacji. Z tego względu wstępnie wyznaczono zależność kątów komutacji od prędkości dla stałej pojemności.

Ze względu na duże prędkości zmian napięcia, kondensator C-dump powinien charakteryzować się małą stratnością. Należy więc stosować np. kondensatory polipropylenowe.

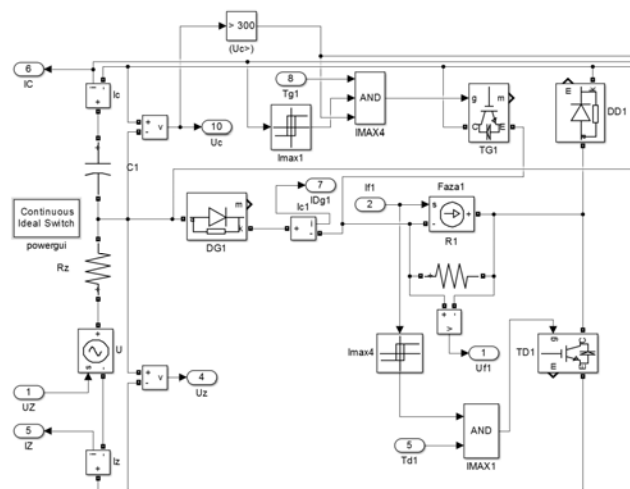
Model napędu w programie Matlab Simulink

Model napędu z trójfazowym SRM i badanym układem zasilania został zaimplementowany w programie Matlab Simulink. Parametry silnika w postaci zależności prądów pasm od strumienia magnetycznego i kąta obrotu wirnika oraz momentu elektromagnetycznego od kąta obrotu wirnika i prądu pasm zaimplementowano w postaci tablic. Stabilizowane wartości interpolowano krzywymi sklejanymi trzeciego stopnia i extrapolowano liniowo. Wartości zapisane w tablicach zostały wyznaczone wcześniej w programie FEMM przeznaczonym do obliczeń rozkładu pola magnetycznego metodą elementów skończonych. W modelu przyjęto uproszczenia polegające na pominięciu wzajemnych sprzężeń magnetycznych między pasmami i pominięciu strat w żelazie. Zastosowano jednakowe modele wszystkich pasm silnika, natomiast ich wzajemne przesunięcie kątowe uzyskano doprowadzając do ich wejść odpowiednio przesunięte względem siebie wartości kąta obrotu wirnika. W kolejnych blokach programu zaimplementowano dekodery położenia kąтового wirnika oraz energoelektroniczny układ zasilania (rysunek 3). Program przystosowano do obliczeń przy stałych prędkościach. Model układu C-dump został opracowany na podstawie schematu pokazanego na rysunku 2. Uwzględniono w nim elementy ograniczające wartość prądu pasma do 8 A oraz napięcia ładowania kondensatora do 300 V. Wartości te wynikają z parametrów silnika w układzie prototypowym i izolacji uzwojeń.

Wyniki obliczeń

Do obliczeń masowych z zastosowaniem modelu symulacyjnego układu C-dump opracowano skrypt w programie Matlab.

Badania zostały ukierunkowane na określenie wpływu pojemności kondensatora C-dump na parametry napędu. Obliczenia wykonano dla pięciu wartości pojemności kondensatora od 4,7 μF do 100 μF . Przejęto przy tym dodatkowe założenia, że przedział kątowy zasilania pasm jest stały i wynosi $k_z = 30^\circ$. Natomiast wartość kąta wyłączenia zasilania pasma k_w zmieniano od -24° do -4° (w stosunku do pozycji zgodnej zębów wirnika i stojana).

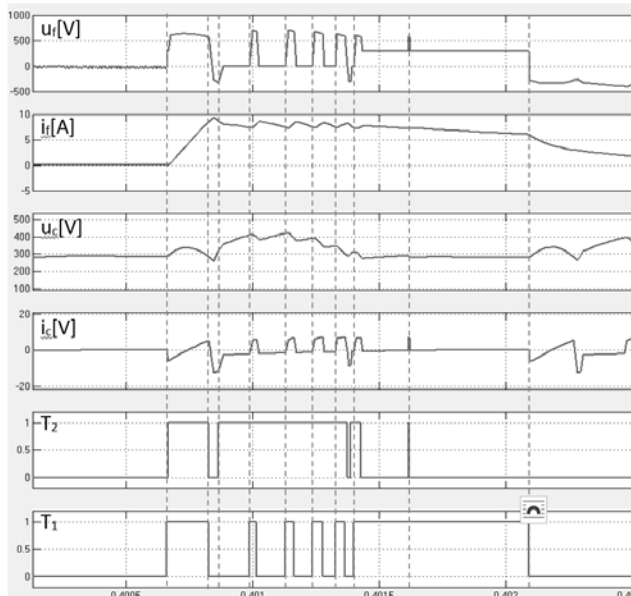


Rys.3. Model jednej sekcji układu zasilania C-Dump zaimplementowany w programie Matlab Simulink

Obliczenia wykonano w zakresie prędkości do 7500 obr./min. dla wszystkich wartości kąta wyłączenia. Z wyników uzyskanych dla kolejnych prędkości obrotowych wybrano te, dla których uzyskano największe wartości momentu, mocy lub sprawności. W ten sposób ustalono wymaganą w procesie sterowania zależność kąta wyłączenia od prędkości obrotowej. Wyznaczona zależność umożliwia uzyskanie najwyższej mocy napędu.

Podczas cyklu zasilania pasma w układzie typu C-dump możliwe są wielokrotne przełączenia pomiędzy różnymi trybami pracy. Zmiany te wynikają z działania układów ograniczenia prądowego i napięciowego. Opracowanie odpowiedniej strategii sterowania ma istotny wpływ na osiągnięcie napędu. Przykładowe wyniki symulacji cyklu zasilania pasma silnika przedstawiono na rysunku 4.

Dwa dolne przebiegi określają aktualny stan układu sterowania. Pierwszy odnosi się do tranzystora T_2 , drugi do tranzystora T_1 z rysunku 2. W pierwszej fazie załączony zostaje tylko tranzystor T_1 , co powoduje zasilenie pasma ze źródła U . Stan ten trwa do chwili przekroczenia napięcia 290V na kondensatorze. Wzrost napięcia na kondensatorze wynika ze zwrotu części energii pola magnetycznego z poprzednio zasilanego pasma. Po osiągnięciu tego napięcia załączony zostaje tranzystor T_2 i układ przechodzi w stan zasilania wyższym napięciem z szeregowo połączonych: źródła zasilania U oraz kondensatora C . Powoduje to spadek napięcia na kondensatorze, co w konsekwencji prowadzi do wyłączenia tranzystora T_2 w celu umożliwienia ponownego doładowania kondensatora. Wzrost prądu może prowadzić również do wyłączenia tranzystora T_1 , spowodowanego przekroczeniem wartości dopuszczalnej prądu pasma. Wyłączenie obu tranzystorów powoduje przejście układu w stan zwrotu energii do kondensatora, co w konsekwencji zwiększa wartość napięcia na tym elemencie. Naładowanie kondensatora do ustalonej wartości dopuszczalnej powoduje ponowne załączenie tranzystora T_2 i przejście w stan pętli jałowej. Po stopniowym spadku wartości prądu pasma poniżej dolnej granicy (7,5 A), załączony zostaje tranzystor T_1 i układ przechodzi w stan zasilania ze źródła i kondensatora. W kolejnym etapie następuje przekroczenia maksymalnej wartości prądu pasma (8 A) i poprzez wyłączenie tranzystora T_1 następuje przejście w stan pętli jałowej. W tym czasie do kondensatora może być zwracana energia z innych pasm.



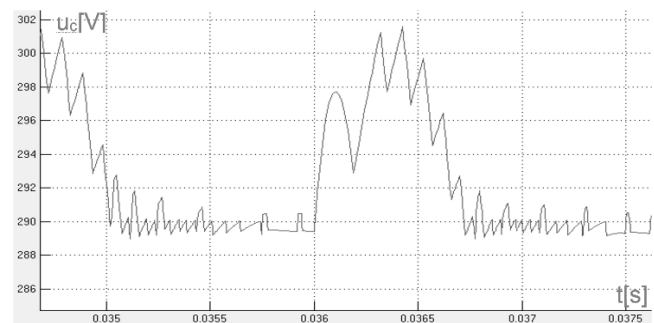
Rys.4. Przebieg napięć, prądów oraz sygnałów sterujących pracą tranzystorów dla układu z kondensatorem 4,7 μF

Stany te powtarzają się do momentu spadku napięcia na kondensatorze poniżej przyjętej granicy dolnej (290 V). W przypadku rozładowania się kondensatora dane pasmo zasilane jest tylko ze źródła. Tryb zasilania pasma zostaje przerwany w wyniku osiągnięcia przez wirnik kąta wyłączenia. Następnie rozpoczyna się proces zasilania kolejnego pasma.

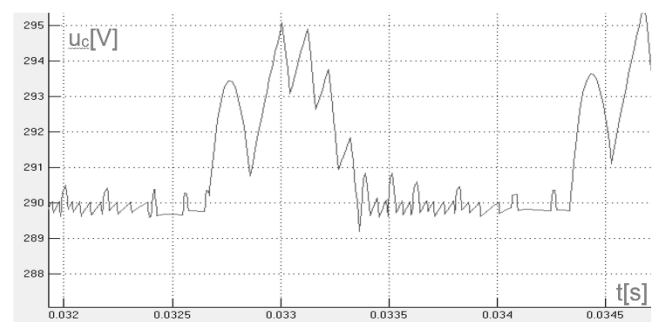
W trakcie symulacji nie przerywano procesu zwrotu energii do źródła przełączając układ w stan pętli jałowej w celu określenia zależności przyrostów napięcia na kondensatorze od jego pojemności. Przejście w stan pętli jałowej jest niekorzystne, ponieważ spowalnia proces rozładowania energii pola magnetycznego i zmniejsza sprawność napędu. W związku z tym pojemność kondensatora powinna być wystarczająca do zmagazynowania całego nadmiaru energii zwracanej z wyłączonego pasma. Przedstawione na rysunku 4 przebiegi napięć, prądów i sygnałów sterujących zostały uzyskane dla kondensatora o pojemności 4,7 μF przy prędkości obrotowej równej 3500 obr./min. Trzeci przebieg od góry pokazuje zmiany napięcia na kondensatorze C-dump. Ze względu na zbyt małą pojemność kondensatora w trakcie zwrotu energii z wyłączonego pasma napięcie znacznie przewyższa ustalone 300 V. Jego wartość zależy od prędkości obrotowej. Dla małych prędkości napięcie na kondensatorze przekracza przyjętą dopuszczalną wartość o ponad 200 V, a układ na początku cyklu zasilania pasma znaczną część czasu pracuje w stanie pętli jałowej.

W związku z tym, że energia rozładowywana jest z innych pasm w czasie pracy sekcji zasilanego pasma w stanie pętli jałowej możliwe jest znaczne przekraczanie przyjętej wartości napięcia na kondensatorze. Przyjęto, że dopuszczalne przekroczenie napięcia ładowania kondensatora może wynosić 10% ustalonej wartości. Na rysunkach 5 i 6 pokazano przebiegi napięcia dla kondensatorów 47 μF i 100 μF przy prędkości 3000 obr./min. Dla tych pojemności przekroczenie ustalonej wartości napięcia nie jest już tak duże. Zaobserwowano maksymalną wartość napięcia na poziomie 305 V.

W tabeli 1 zebrano największe zarejestrowane wartości napięcia dla różnych wartości pojemności kondensatora.



Rys.5. Przebieg napięcia na kondensatorze 47 μF przy prędkości 3000 obr./min.



Rys.6. Przebieg napięcia na kondensatorze 100 μF przy prędkości 3000 obr./min.

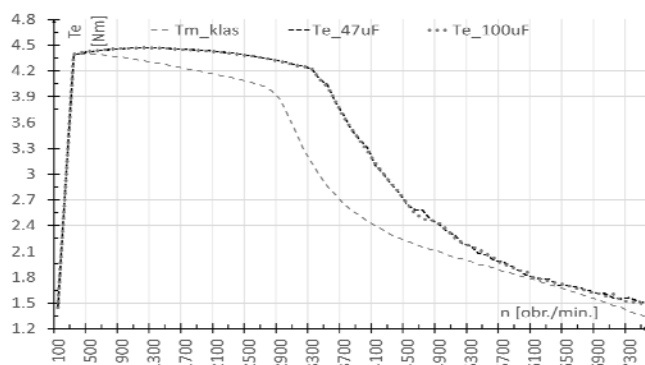
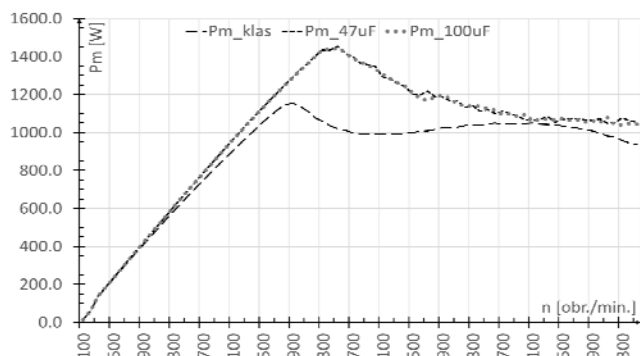
Tabela 1. Szczytowe wartości napięcia na kondensatorach

n [obr./min.]	U_c [V] C=4,7 μ F	U_c [V] C=10 μ F	U_c [V] C=22 μ F	U_c [V] C=47 μ F	U_c [V] C=100 μ F
300	580	460	390	330	312
1500	440	365	324	306	298
3000	405	345	315	304	296

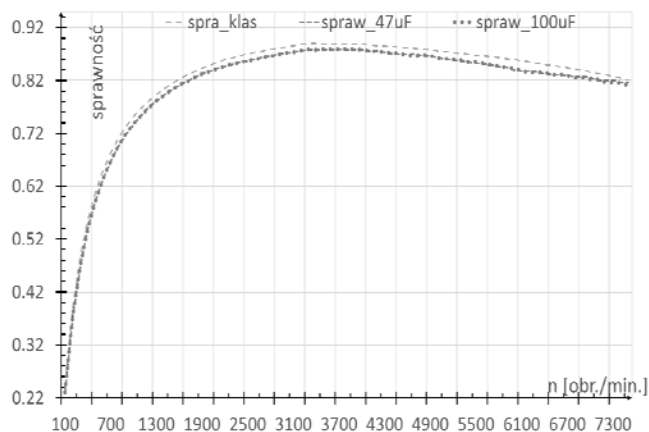
Przyjęte założenie spełniają kondensatory o pojemności 47 μ F i 100 μ F. Kondensatory o mniejszych wartościach zostały pominięte w dalszych rozważaniach.

Wyniki dalszych obliczeń dla układu typu C-dump z kondensatorami o wyznaczonych pojemnościach porównano z uzyskanymi dla układu typowego, zasilanego z półmostków typu H (rysunek 1). Wyznaczone zależności mocy wyjściowej od prędkości przy wyznaczonych wcześniej zależnościach kąta wyłączenia zasilania pasm od prędkości przedstawione zostały na rysunku 5. Dla układu typowego zależność mocy wyjściowej od prędkości obrotowej $P_{m_klas}(n)$ najwyższą wartość 1155 W uzyskuje przy prędkości około 2900 obr./min. Natomiast charakterystyki układu typu C-dump narastają szybciej i uzyskują większą wartość maksymalną 1444 W przy prędkości około 3500 obr./min. Wartość ta jest o ponad 25% większa od uzyskanej dla układu z typowym układem zasilania. Po osiągnięciu wartości maksymalnej moc napędu zmniejsza się, ale utrzymuje na wyższym poziomie niż w układzie typowym. Na rysunku 6 pokazano podobne charakterystyki dla momentu elektromagnetycznego.

W przypadku układu złożonego z półmostków typu H wartość momentu utrzymuje się w przedziale od 4,3 Nm do 3,9 Nm. Zaczyna jednak spadać przy prędkości około 2900 obr./min. Dla układu C-dump wartość momentu utrzymuje się na wyższym poziomie pomiędzy 4,4 Nm, a 4,2 Nm, aż do prędkości przekraczającej 3300 obr./min.



Rys.7. Zależności momentu elektromagnetycznego od prędkości obrotowej dla układu C-dump oraz układu półmostka



Rys.8. Charakterystyka sprawności napędów z typowym układem zasilania i ze zmodyfikowanym układem C-dump

Sprawność napędów z obydwoma układami jest zbliżona (rysunek 7), jednak jej dokładne wyznaczenie wymaga zastosowania bardziej rozbudowanych modeli tranzystorów.

Podsumowanie

Przy zastosowaniu kondensatora o odpowiedniej pojemności wzrost napięcia w układzie wynikający ze zwrotu energii z niezasilanego pasma jest na dopuszczalnym poziomie. Układ nie wymaga sterowania procesem rozładowywania energii pola magnetycznego poprzez przełączanie w stan pętli jałowej, z wyjątkiem stanu hamowania. Dzięki temu napęd zachowuje wysoką sprawność. Ze względu na duże prędkości narastania napięcia i impulsowy pobór prądu z kondensatora, w układzie C-dump należy stosować kondensatory o małej stratności, np. polipropylenowe.

Przy zbyt małych wartościach pojemności napięcie na kondensatorze osiągało wartości niebezpieczne dla izolacji uzwojeń silnika. Z tego względu rozwiązanie takie odrzucono. Dla kondensatora o pojemności 47 μ F niekontrolowany przyrost napięcia wynosił maksymalnie do 30V, natomiast dla kondensatora o pojemności 100 μ F do 12V w zakresie niskich prędkości obrotowych. Nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy charakterystykami układów z kondensatorami o pojemności 47 μ F i 100 μ F.

Autorzy: mgr inż. Daniel Rataj, dr hab. inż. Krzysztof Tomczewski, Politechnika Opolska, Instytut Systemów Napędowych i Robotyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, e-mail: k.tomczewski@po.edu.pl

LITERATURA

- [1] Riyadi S., Analysis of C-Dump Converter for SRM Drives, *International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, Indonesia (2018)
- [2] Kho Lukas Budi Setiawan, Analysis Performance of Capacitor Voltage in C-Dump Converter for SRM Driver, *IEEE Student Conference on Research and Development*, Malaysia (2018)
- [3] Yoon Y.-H., Control of SRM with modified C-dump converter in cooling system of automobiles, *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 66 nr 8 (2017), 1291-1302
- [4] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J, Powrózek A.: Modelowanie pracy silnikowo-prądnicowej napędu z maszyną reluktancyjną przełączalną, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88, nr 12a (2012), 56-61
- [5] Zalke RD., Thosar AG.: C-Dump Converter fo Switched Reluctance Motor, *2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology*, INDIA (2017), 1733-1738
- [6] Ardine GD., Riyadi S., C-Dump Converter without Inductor for Switched Reluctance Motor Drive, *IEEE Student Conference on Research and Development*, Malaysia (2017)