

doi:10.15199/48.2025.03.27

## Wpływ zakresu napięcia ładowania kondensatora C-dump na parametry napędu SRM

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu zakresu napięcia ładowania kondensatora w układzie C-Dump na parametry napędu z przełączalnym silnikiem reluktancyjnym (SRM). Badania przeprowadzono w określonych punktach pracy. Analizę oparto o dwa kryteria oceny: uzyskanie maksymalnej mocy wyjściowej oraz uzyskanie maksymalnej sprawności napędu. Badania przeprowadzono metodą symulacji dla trójfazowego silnika SRM o mocy 750 W, zasilanego napięciem sieciowym z układu typu C-Dump. Poprawność wyników obliczeń została zweryfikowana pomiarowo na stanowisku badawczym.

**Abstract.** The article presents the results of research on the impact of the capacitor charging voltage range in the C-Dump supply system on the performance parameters of a switched reluctance motor (SRM) drive. The study was conducted at defined operating points. The analysis was based on two evaluation criteria: achieving maximum output power and obtaining maximum drive efficiency. The research was carried out using simulation methods for a three-phase 750 W SRM powered by a mains voltage from a C-Dump system. The accuracy of the simulation results was verified experimentally on a test bench. (*Influence of the C-dump capacitor charging voltage range on the SRM drive parameters*)

**Słowa kluczowe:** przełączalny silnik reluktancyjny (SRM), układ zasilania C-Dump, napęd elektryczny, symulacja.

**Keywords:** Switched Reluctance Motor (SRM), C-Dump supply system, electrical drive, simulation.

### Wstęp

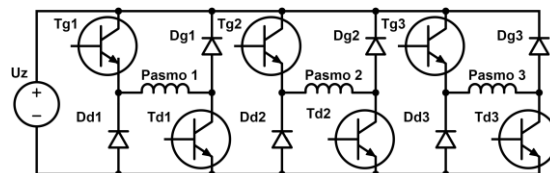
Maszyny elektryczne z grupy silników bezszczotkowych, zyskują coraz większą popularność. Do grupy silników bezszczotkowych należą przełączalne silniki reluktancyjne (SRM, ang. Switched Reluctance Motor). Stosuje się je ze względu na wysoką niezawodność, beziskrowość, szeroki zakres prędkości obrotowej, oraz dynamikę jej zmian. Maszyny te znajdują zastosowanie w urządzeniach przemysłowych [1, 2], systemach ciśnieniowych, np. do tłoczenia gazów oraz cieczy łatwopalnych, jako generatory energii w OZE [3], oraz w pojazdach elektrycznych [4] i lotnictwie [5]. W wielu gałęziach przemysłu stosuje się z powodzeniem tego typu maszyny elektryczne. Ich dodatkowym atutem jest możliwość poprawy parametrów napędu, np. przez zastosowanie różnych topologii układów zasilania, czy też poprawę lub zmianę strategii sterowania. W literaturze można spotkać wiele różnego rodzaju układów zasilania SRM, takich jak: układ podstawowy, złożony z półmostków tranzystorowych, układy C-Dump, R-Dump, Split DC, Sood i inne [6].

Prezentowane badania wykonano dla napędu z układem zasilania typu C-Dump, w którym ustalano zakres napięcia kondensatora C-Dump, poprzez zmianę progowych wartości napięcia załączenia, od którego następuje proces jego rozładowania i napięcia wyłączenia, od którego zaczyna się proces jego ładowania. Badania przeprowadzono w dwóch punktach pracy, tj. na końcu zakresu pracy ze stałym momentem (oznaczanego jako K1) i po spadku mocy napędu do 60% mocy maksymalnej (K2), wyznaczonych przy zasilaniu silnika z układu złożonego z asymetrycznych półmostków tranzystorowych typu H. Charakterystykę napędu z tymi układami kształtuje się poprzez odpowiedni dobór kątów komutacji. [7, 8]. Celem badań była poprawa parametrów wyjściowych napędu.

### Typowy układ zasilania SRM

Typowym układem stosowanym do zasilania silników SRM jest układ złożony z asymetrycznych półmostków tranzystorowych typu H. Układy tego typu stosuje się często jako punkt odniesienia podczas badań nowych układów zasilania tych maszyn. Najważniejszymi cechami tego typu układów jest możliwość regulacji wartości prądu w pasmach, np. za pomocą sygnału PWM, oraz możliwość zwrotu energii do źródła zasilania, o ile umożliwia to prostownik. [9-11].

Schemat układu zasilania typowego dla trójfazowego silnika SRM przedstawiono na rysunku 1.



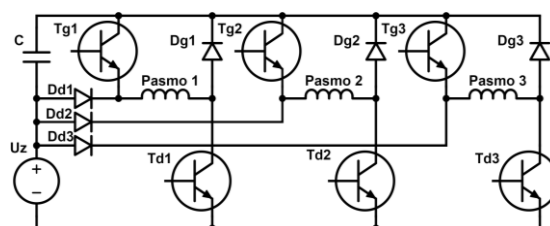
Rys. 1. Schemat typowego układu zasilania trójfazowego SRM złożony z asymetrycznych półmostków typu H

W układzie typowym wyróżnić można trzy stany pracy: zasilania, pętli jałowej oraz zwrotu energii do źródła. Załączenie kluczy  $T_{gi}$  i  $T_{di}$  (gdzie  $i$  numer pasma) powoduje przepływ prądu przez uzwojenia, czyli stan zasilania. Załączenie jedynie klucza  $T_{gi}$  powoduje stan pętli jałowej, a wyłączenie obu kluczy umożliwia zwrot energii do źródła.

### Badany układ zasilania SRM typu C-dump

Badany układ typu C-Dump składa się z dwóch kluczy oraz dwóch diod w obwodach zasilania każdego pasma silnika. Liczba elementów wchodzących w skład tego układu jest równa liczbie elementów stosowanych w układzie półmostków.

Historycznie powodem opracowywania układów typu C-Dump było dążenie do zmniejszenia liczby stosowanych elementów energoelektronicznych względem układu podstawowego, w celu obniżenia kosztu napędu, na który duży wpływ miały drogie elementy półprzewodnikowe [12]. Obecnie nie jest to tak istotne. Celem stosowania układów C-Dump jest aktualnie dążenie do poprawy parametrów napędu SRM, niezależnie od liczby stosowanych elementów energoelektronicznych. Schemat badanego układu C-Dump przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat badanego układu zasilania typu C-Dump dla trójfazowego SRM

W przedstawionym układzie kondensator C-Dump połączony jest w szereg ze źródłem zasilania, od strony dodatniego bieguna. Taka budowa umożliwi zwiększenie wartości napięcia zasilania pasma i zwrot energii do źródła o wyższym napięciu (szeregowego połączenia źródła i ładowanego kondensatora).

W tej topologii ładowanie kondensatora C-Dump rozpoczyna się od momentu wyłączenia kluczy w obwodzie zasilania pasma, co umożliwia przepływ prądu z uzwojenia silnika do kondensatora. Proces ładowania kondensatora C-Dump powinien odbywać się do momentu osiągnięcia dopuszczalnej wartości napięcia, a po jego osiągnięciu układ powinien przejść do stanu pętli jałowej. W stanie tym załączony jest tylko jeden klucz  $T_{gi}$ , gdzie  $i$  to numer danego pasma, a obwód przepływu prądu zamyka się przez diodę  $D_{gi}$ . Stan pętli jałowej nakłada jednak w procesie sterowania pewne ograniczenia, ponieważ proces zaniku prądów w pasmach w tym trybie pracy jest powolny. Może to powodować przepływ prądów w zakresie pracy hamulcowej. Zjawisko to jest niepożądane, ponieważ powoduje wzrost tętnień momentu, zmniejsza wartość średnią momentu, może powodować oscylacje prędkości i pogorszenie charakterystyk wyjściowych silnika.

Oprócz stanu pętli jałowej oraz stanu zwrotu energii do kondensatora w omawianym układzie, możliwe są dwa stany zasilania pasma. Pierwszym jest zasilanie ze źródła  $U_z$ , gdy załączony jest tylko tranzystor  $T_{di}$ , a drugim zasilanie ze źródła i kondensatora, gdy załączone są oba tranzystory  $T_{gi}$  i  $T_{di}$ .

Przełączanie pomiędzy różnymi stanami pracy realizowane jest przez sterownik. W trakcie badań do sterowania wykorzystano sterownik oparty o układ programowalny FPGA, w którym zaimplementowano wszystkie funkcjonalności niezbędne do sterowania pracą napędu [8, 13]. Zmiany stanów pracy tego układu zależą od wielu czynników, takich jak: położenie kątownego wirnika, wartości prądów pasm, pojemność kondensatora C-dump oraz przyjęte wartości napięć jego ładowania i rozładowania. Wartości napięć ładowania i rozładowania kondensatora wpływają na wielkości charakteryzujące napęd, takie jak moment i prędkość. Nieprawidłowy dobór tych wartości może negatywnie wpływać na charakterystyki wyjściowe.

### Model symulacyjny napędu

Model matematyczny napędu sformułowano metodą Lagrange'a. Charakterystyki silnika obliczono wstępnie w programie do obliczeń polowych i zaimplementowano w postaci tablic, których elementy są interpolowane krzywymi sklejanymi trzeciego stopnia [14]. W związku z koniecznością wykonania dużej liczby obliczeń w modelu pominięto wzajemne sprzężenia magnetyczne między pasmami silnika oraz nie uwzględniono strat w rdzeniu silnika. Badania obejmowały wpływ wartości napięć do jakich jest ładowany i rozładowywany C-Dump. Badania przeprowadzono dla trójfazowego silnika SRM w konfiguracji 6/4 o mocy 750 W, w dwóch punktach pracy wyznaczonych dla układu złożonego z półmostków.

Model symulacyjny opracowano w programie Matlab Simulink. Model ten zawiera cztery główne moduły. Pierwszym jest blok, który odpowiada za wyznaczenie położenia kątownego wirnika. Położenie określane jest dla każdego pasma niezależnie.

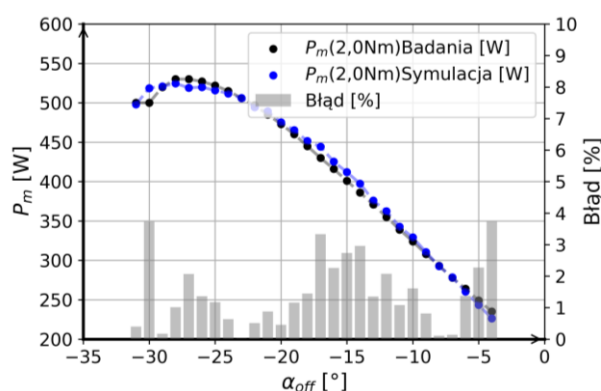
Kolejny moduł zawiera charakterystyki silnika obliczone metodą elementów skończonych. Model każdego pasma zawiera dwie tablice. Pierwsza opisuje zależność momentu elektromagnetycznego od położenia kątownego wirnika i prądu pasma, a druga zależność prądu pasma od położenia kątownego wirnika i strumienia magnetycznego.

W kolejnym bloku wyznaczany jest przedział kątowy załączania zasilania poszczególnych pasm silnika, zależny od zakresów kąta obrotu, w których załączane i wyłączane jest zasilanie pasma. Ostatni moduł odwzorowuje układ zasilania. Dodatkowo, w modelu zaimplementowano bloki pomiarowe w celu wyznaczenia wartości niezbędnych do oceny napędu.

### Weryfikacja model symulacyjnego

Poprawność opracowanego modelu symulacyjnego została sprawdzona przez porównanie wartości uzyskiwanych z symulacji z wynikami badań eksperymentalnych. W pierwszym etapie zweryfikowano wyniki uzyskane dla układu typowego, opartego na półmostkach. Weryfikację wykonano dla różnych wartości obciążeń.

Na rysunku 3. przedstawiono przykładowe porównanie wyników dla zależności mocy wyjściowej napędu  $P_m$  od kąta wyłączenia  $\alpha_{off}$  dla stałej wartości momentu obciążenia  $T_L = 2 \text{ Nm}$ , stałej wartości napięcia zasilania  $U_z = 132 \text{ V}$  i stałej szerokości przedziału zasilania  $\alpha_\Delta = 30^\circ$ .



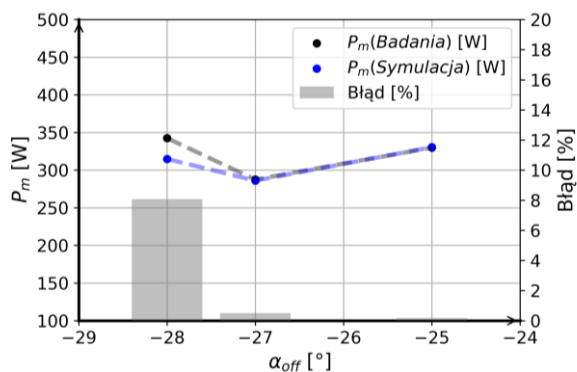
Rys. 3. Zależność mocy wyjściowej od kąta wyłączenia  $\alpha_{off}$  uzyskana z pomiarów i symulacji przy obciążeniu 2 Nm, napięciu zasilania 132 V i szerokości przedziału zasilania  $30^\circ$

Dla zależności przedstawionej na rysunku 3 błąd względny pomiędzy wynikami uzyskanymi z symulacji i pomiarów mieści się w zakresie do 4%. Maksymalną moc wyjściową osiągnięto dla kąta wyłączenia zasilania pasm  $\alpha_{off}$  wynoszącego  $-28^\circ$ . Podczas pomiarów maksymalna moc wyniosła 530 W, natomiast podczas symulacji wartość ta wyniosła około 524 W. W tych punktach uzyskano prędkość około 2500 obr./min. Zmniejszenie i zwiększenie wartości kąta wyłączenia powodowało zmniejszenie mocy napędu. Zwiększanie wartości kąta wyłączenia do  $-4^\circ$  powodowało spadek mocy do 235 W podczas pomiarów oraz do 226 W podczas symulacji. Weryfikację modelu wykonano również dla innych wielkości, tj.: prądów pasm, prądu źródła zasilania, prędkości i sprawności.

Na podstawie przeprowadzonej weryfikacji stwierdzono poprawność uzyskiwanych wyników modelu symulacyjnego napędu z typowym układem zasilania.

W drugim etapie przeprowadzono weryfikację wyników symulacyjnych dla silnika zasilanego z badanego układu C-Dump. W tym przypadku pomiary wykonano w węższym przedziale kątów ze względu na nierównomierną pracę silnika. Podczas pomiarów stwierdzono, że źle dobrane wartości napięć ładowania i rozładowania kondensatora powodują duże oscylacje prądów i prędkości.

Przykładowe zależności mocy wyjściowej od kąta wyłączenia, uzyskane z symulacji i pomiarów przy zadanym obciążeniu  $T_L = 1,5 \text{ Nm}$ , dla przedziału zasilania  $\alpha_\Delta = 30^\circ$  przy napięciu zasilania  $U_z = 90 \text{ V}$  przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Zależność mocy wyjściowej od kąta wyłączenia  $\alpha_{off}$  uzyskana z pomiarów i symulacji przy obciążeniu 1,5 Nm

W punktach stabilnej pracy napędu uzyskano moc około 286 W dla kąta  $-27^\circ$  oraz ponad 340 W dla kąta  $-28^\circ$ . W tych punktach błąd względny był najmniejszy i nie przekroczył 1%. Większe rozbieżności uzyskano dla kąta wyłączenia  $-28^\circ$ , dla którego błąd wyniósł około 8%. Podczas badań eksperymentalnych w tym punkcie pracy pojawiały się oscylacje mierzonych wartości.

Na podstawie przeprowadzonej weryfikacji stwierdzono poprawność wyników symulacji napędu z układem C-dump.

#### Badanie wpływu napięć ładowania i rozładowania kondensatora C-dump

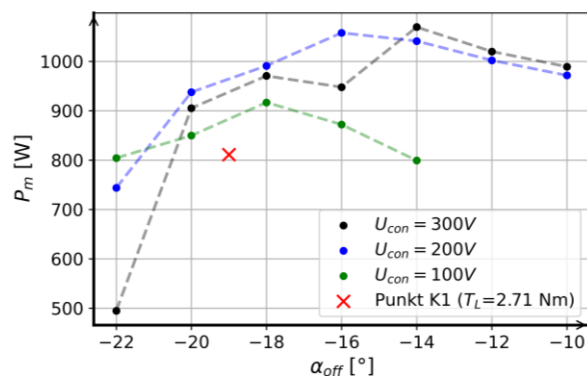
Do przeprowadzenia obliczeń wybrano dwa punkty pracy napędu, wyznaczone w układzie z asymetrycznymi półmostkami typu H. Punkty te to koniec zakresu pracy ze stałym momentem (oznaczony jako K1), oraz prędkość, przy której moc napędu spada do 60% mocy maksymalnej (oznaczony jako K2) przy znamionowym momencie obciążenia. Przyjęto stałą wartość zakresu zasilania  $\alpha_s = 30^\circ$ .

Pierwszy badany punkt pracy przy obciążeniu 2,71 Nm jest osiągany dla kąta wyłączenia  $\alpha_{off} = -19^\circ$  i z napięciem zasilania  $U_z = 200$  V. Moment obciążenia oraz napięcie źródła są wartościami zadawanymi w modelu podczas symulacji pracy napędu z układem C-Dump. Do badań zastosowano kondensator o pojemności 100  $\mu$ F. Symulacja obejmowała różne wartości napięcia  $U_{c,on}$ , do jakiego ładowano kondensator odpowiednio 100 V, 200 V oraz 300 V. Napięcie, do jakiego rozładowywano kondensator  $U_{c,off}$  przyjęto, w zakresie od 0% do 90% napięcia ładowania, z rozdzielczością 10%. Po wstępnej analizie wyników zwiększono zakres obliczeń o napięcia  $U_{c,off}$  w przedziale napięć od 90% do 98% napięcia ładowania  $U_{c,on}$ . Wartość kąta wyłączenia zasilania pasm  $\alpha_{off}$  zadawano w zakresie od  $-10^\circ$  do  $-28^\circ$  z krokiem co  $2^\circ$ . W modelu ustalono ograniczenie wartości maksymalnej prądu dla wszystkich pasm na poziomie 7,5 A.

Uzyskane wyniki obliczeń poddano filtracji. Odrzucono wszystkie przypadki, w których kondensator nie był rozładowywany w zadanym zakresie (napięcie na C-Dump nie spadało poniżej przyjętego  $U_{c,off}$ ), w związku z czym układ pracował tylko w trybie zasilania z kondensatora i źródła  $U_z$ . Przyjęto również dwa kryteria selekcji wyników: pod względem uzyskiwania największej mocy  $P_m$  oraz pod względem uzyskania największej sprawności  $\eta_c$ .

Dla pierwszego kryterium w punkcie K1 (koniec zakresu pracy ze stałym momentem) wyselekcjonowano punkty pracy pokazane na rysunku 5.

W procesie selekcji wyników odrzucono wszystkie przypadki, dla których kąt wyłączenia był mniejszy niż  $-22^\circ$ , ze względu na brak możliwości pracy SRM w tym zakresie. Czerwonym krzyżykiem na rysunku 5 zaznaczono punkt K1 uzyskany dla układu typowego, gdzie uzyskano moc  $P_m = 811$  W dla kąta wyłączenia  $\alpha_{off} = -19^\circ$ .



Rys. 5. Zależność mocy wyjściowej układu C-Dump od kąta wyłączenia  $\alpha_{off}$  uzyskana w punkcie K1 przy obciążeniu 2,71 Nm dla kryterium największej mocy przy różnych napięciach załączenia rozładowania

Od kąta wyłączenia  $-20^\circ$  do  $-16^\circ$  najlepsze wyniki uzyskano dla napięcia ładowania C-Dump wynoszącego  $U_{c,on} = 200$  V. Nieznacznie lepsze wyniki uzyskano dla napięcia  $U_{c,on} = 300$  V w zakresie od  $-14^\circ$  do  $-10^\circ$ . Wyniki pokazują, że wraz ze wzrostem napięcia ładowania kondensatora powinna się zwiększać wartość kąta wyłączenia. Widoczne przesunięcie przedziału zasilania pasma bliżej położenia zgodnego zębów wirnika i stojana wynika ze zwiększenia szybkości narastania prądów w uzwojeniach, dzięki czemu wzrasta moc na wale silnika. Proces narastania prądu jest szybszy dzięki zwiększeniu napięcia źródła zasilania o napięcie kondensatora C-Dump.

W tabeli 1 zestawiono wyniki uzyskane dla kryteriów największej mocy i największej sprawności w układzie C-dump z układem półmostków w punkcie K1.

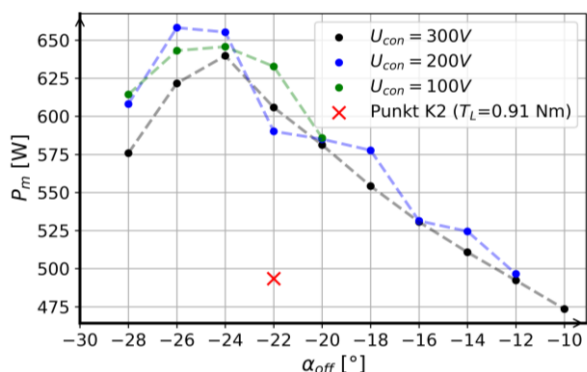
Tabela 1. Porównanie wyników uzyskanych dla układu C-Dump (kryterium największej mocy  $P_m$  i sprawności  $\eta_c$ ) i półmostków dla końca zakresu pracy ze stałym momentem (K1)

Parametr	Układ klasyczny	Układ C-Dump ( $P_m$ )	Układ C-Dump ( $\eta_c$ )
$P_m$ [W]	811	1069	900
$n$ [obr./min]	2860	3766	3160
$I_z$ [A]	4,3	5,9	4,5
$I_{zRMS}$ [A]	4,9	6,2	5,6
$I_{D1}$ [A]	2,3	1,6	2,4
$I_{D1RMS}$ [A]	3,7	3,2	3,7
$\eta_c$ [-]	0,80	0,75	0,78
$\alpha_{off}$ [°]	-19	-24	-18

Największą moc  $P_m = 1070$  W uzyskano dla kąta  $\alpha_{off} = -24^\circ$  i napięć  $U_{c,on} = 300$  V oraz  $U_{c,off} = 194$  V. Uzyskano niemal 32% wzrost mocy w stosunku do układu półmostków. Przez zwiększenie napięcia zasilania pasma szybciej narastają prądy w uzwojeniach, dzięki czemu możliwe jest zwiększenie ich wartości średniej i uzyskanie większej wartości mocy.

W przypadku warunku największej sprawności najlepszy wynik uzyskano dla kąta  $\alpha_{off} = -18^\circ$ , dla którego moc jest większa od układu półmostków o około 11%. Natomiast sprawność całego napędu jest nieznacznie mniejsza i wyniosła 0,78. Napięcia ładowania i rozładowania C-Dump w tym przypadku wyniosły  $U_{c,on} = 200$  V i  $U_{c,off} = 160$  V. Dla tego kryterium oceny większość parametrów jest zbliżona do układu półmostków.

Kolejną analizę wykonano w punkcie K2, czyli dla prędkości po spadku mocy napędu do 60% mocy uzyskanej dla znamionowej wartości momentu obciążenia. Uzyskany wykres zależności mocy wyjściowej napędu od kąta wyłączenia przy kryterium najwyższej mocy przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Zależność mocy wyjściowej od kąta wyłączenia  $\alpha_{off}$  uzyskana w punkcie K2 dla kryterium największej mocy  $P_m$  dla różnych napięć załadowania rozładowania

W punkcie K2 w układzie półmostków uzyskano moc na wale o wartości około 493 W, dla kąta  $\alpha_{off} = -22^\circ$ . Najlepszy wynik w badanym układzie osiągnięto dla kąta  $-26^\circ$  i napięcia  $U_{c.on} = 200$  V. Moc w tych warunkach wynosiła 658 W. Zastosowanie układu C-Dump umożliwiło zwiększenie mocy wyjściowej silnika o ponad 33%. Najgorsze rezultaty uzyskano dla napięcia ładowania  $U_{c.on}$  wynoszącego 300 V. We wszystkich przypadkach moc zmniejsza się dla kątów większych od  $-24^\circ$ , a jej wartości dla różnych napięć rozładowania są zbliżone. Ze względu na pracę silnika w zakresie większych prędkości, w punkcie K2 należy wcześniej załączać zasilanie pasm. Zwiększone napięcie przyłożone do uzwojeń pozwala zwiększyć wartość średnią prądów w uzwojeniach pasm, co wymaga wcześniejszego wyłączenia zasilania pasm ( $\alpha_{off} = -26^\circ$ ) w porównaniu z układem półmostków ( $\alpha_{off} = -22^\circ$ ).

W tabeli 2 przedstawiono zestawienie wyników uzyskanych dla kryteriów największej mocy i największej sprawności w punkcie K2.

Tabela 2. Porównanie wyników uzyskanych w układach półmostków i C-Dump dla kryterium największej mocy i największej sprawności dla punktu K2

Parametr	Układ klasyczny	Układ C-Dump ( $P_m$ )	Układ C-Dump ( $\eta_c$ )
$P_m$ [W]	493	658	586
$n$ [obr./min]	5177	6808	6181
$I_z$ [A]	2,9	5,4	5,0
$I_{zRMS}$ [A]	3,2	5,8	5,8
$I_{\theta 1}$ [A]	1,3	1,8	3,6
$I_{\theta 1RMS}$ [A]	2,2	3,1	4,2
$\eta_c$ [-]	0,62	0,53	0,54
$\alpha_{off}$ [°]	-22	-26	-20

Ponownie najlepsze wyniki uzyskano dla kryterium największej mocy. Natomiast w przypadku kryterium największej sprawności uzyskano wzrost mocy w stosunku do układu półmostków o około 19%, a sprawność wyniosła 0,54 dla kąta  $\alpha_{off} = -20^\circ$ .

## Wnioski

Układ zasilania typu C-Dump w napędzie z przełączalnym silnikiem reluktancyjnym umożliwia poprawę parametrów pracy napędu, szczególnie mocy. W pracy przeprowadzono badania wpływu zakresów napięć ładowania i rozładowania kondensatora na parametry wyjściowe napędu w dwóch punktach pracy: na końcu zakresu pracy ze stałym momentem (K1) oraz przy spadku mocy do 60% mocy maksymalnej (K2). Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem zweryfikowanego pomiarowo modelu symulacyjnego napędu SRM z układem typowym i C-Dump.

Przeprowadzone badania wykazały, że dobór zakresów napięć kondensatora C-Dump musi być powiązany z doborem wartości kąta wyłączenia zasilania pasm, ponieważ zarówno napięcia, jak i kąty mają istotny wpływ na uzyskiwaną moc i sprawność napędu.

Badania wykazały, że zastosowanie układu C-Dump z odpowiednio dobranymi wartościami napięć ładowania i rozładowywania kondensatora oraz zakresami kątowymi zasilania, pozwala na zwiększenie mocy o 33%. W większości przypadków zastosowanie układu C-Dump powoduje niewielki spadek sprawności, spowodowany stratami związanymi z przepływem prądów ładowania i rozładowywania kondensatora. Mimo to, zaletą układu C-Dump jest zwiększenie mocy napędu oraz rozszerzenie zakresu prędkości obrotowych.

**Authors:** mgr inż. Daniel Rataj, Politechnika Opolska, Katedra Automatyk Napędów i Robotyki, ul. Prószkowska 76 (budynek 1) 45-758 Opole, E-mail: d.rataj@po.edu.pl.

## LITERATURA

- [1] Lan Y., Benomar Y., Deepak K., Aksoz A., Baghdadi M.E., Bostanci E., Hegazy O., Switched Reluctance Motors and Drive Systems for Electric Vehicle Powertrains, State of the Art Analysis and Future Trends, *Energies*, 14 (2021), 2079.
- [2] Sree Lakshmi S., Sreeshobha E., Swarupa M., Pandraka V. Bi-directional DC-DC Converter and Fuzzy Logic Controller Based Switched Reluctance Motor for EV Applications, *Przegląd Elektrotechniczny*, 100 (2024), No. 9, 39-43.
- [3] Śliwiński A., Wróbel K., Tomczewski K., The influence of switched reluctance generator winding parameters on output power at different rotational speeds, *ITM Web of Conf*, 19 (2018), 01031.
- [4] Gabor R., Mynarek P., Koncepcja i obliczenia parametrów przełączalnego silnika reluktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym do napędu roweru, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), nr 2, 39-42.
- [5] Valdivia V., Todd R., Bryan F.J., Barrado A., Lázaro A., Forsyth A. J., Behavioral Modeling of a Switched Reluctance Generator for Aircraft Power Systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61 (2014), No. 6, 2690-2699.
- [6] Shambhavi K., Chayapathy V., Power Converter Configurations for Switched Reluctance Motors: A Review, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 9 (2022), nr 6, 2045-2048.
- [7] Tomczewski K., Wach P., Control characteristics for quasi-optimal operation of switched reluctance motors, *Electrical Engineering*, 85 (2003), No. 5, 275-281.
- [8] Tomczewski K., Wróbel K., Rataj D., A Switched Reluctance Motor Drive Controller Based on an FPGA Device with a Complex PID Regulator, *Energies*, 14 (2021), No. 5, 1-22.
- [9] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J., Control method of high-speed switched reluctance motor with an asymmetric rotor magnetic circuit, *Archives of Electrical Engineering*, 65 (2016), No. 4, 685-701.
- [10] Bilgin B., Jiang J.W., Emadi A., Power Electronic Converters to Drive Switched Reluctance Machines, *Switched Reluctance Motor Drives: Fundamentals to Applications*, CRC Press, 425-450.
- [11] Fang G., Scalcon F. P., Xiao D., Vieira R. P., Gründling H. A., Emadi A., Advanced Control of Switched Reluctance Motors (SRMs): A Review on Current Regulation, Torque Control and Vibration Suppression, *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 2 (2021), 280-301.
- [12] Riyadi S., Analysis of C-Dump Converter for SRM Drives, *International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, Banda Aceh, Indonesia, (2018), 179-184.
- [13] Kandhasamy S., Machine learning based SRM control using FPGAs for torque ripple minimization, *International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication*, Fukuoka, Japan, (2020), 675-680.
- [14] Fabiański B., Zawirski K., Simplified model of Switched Reluctance Motor for real-time calculations, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 07, 19-23.