POLITECHNIKA
OPOLSKA

Politechnika Opolska

Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki

Katedra Automatyzacji Napędów i Robotyki

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

ANALIZA WPŁYWU PARAMETRÓW UKŁADU ZASILANIA TYPU C-DUMP NA WŁAŚCIWOŚCI NAPĘDÓW Z PRZEŁĄCZALNYMI SILNIKAMI RELUKTANCYJNYMI

mgr inż. Daniel Rataj

Promotor:
dr hab. inż. Krzysztof Tomczewski, prof. uczelni

Promotor pomocniczy:
dr inż. Krzysztof Wróbel

Opole 2024

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP **2**

2. CEL I TEZA PRACY **3**

2.1 CEL PRACY 3

2.2 TEZA PRACY 3

3. ZAKRES PRACY **4**

4. PRZEŁĄCZALNE SILNIKI RELUKTANCYJNE **5**

5. UKŁADY ZASILANIA DLA NAPĘDÓW Z SRM **7**

6. SYMULACJE KOMPUTEROWE **11**

7. STANOWISKO BADAWCZE **12**

8. STEROWNIK FPGA **13**

9. BADANIA EKSPERYMENTALNE **15**

9.1. BADANIA UKŁADU KLASYCZNEGO 16

9.2. BADANIA UKŁADU TYPU C-DUMP 20

10. ANALIZA PORÓWNAWCZA **23**

10.1. KLASYCZNY UKŁAD ZASILANIA I UKŁAD C-DUMP 23

10.2.WPŁYW NAPIĘCIA ZASILANIA I POJEMNOŚCI KONDENSATORA 30

11. WNIOSKI **31**

12. LITERATURA **32**

1. WSTĘP

Silniki elektryczne odgrywają kluczową rolę w przemyśle i technologii. Wynalezienie tej maszyny elektrycznej to jedno z najważniejszych odkryć ludzkości. Maszyny te znajdują zastosowanie w niemal każdej gałęzi przemysłu i są stosowane w wielu urządzeniach, od małych sprzętów domowych po wyspecjalizowane maszyny. Silniki te w zależności od konstrukcji i zasady działania mogą być stosowane w różnorodnych aplikacjach, co sprawia, że są one przedmiotem ciągłych badań i udoskonaleń.[10, 13]

Jednym z typów silników elektrycznych, który znajduje zastosowanie w wielu urządzeniach w ostatnich latach, jest przełączalny silnik reluktancyjny (ang. SRM). Silniki te charakteryzują się z pozoru prostą budową, wysoką niezawodnością oraz możliwością pracy w trudnych warunkach środowiskowych. Chociaż silniki te wymagają dużej precyzji wykonania, co może wpływać na ich cenę, ich zaletą jest brak konieczności stosowania drogich materiałów, takich jak magnesy z ziem rzadkich. Ze względu na swoją budowę i zasadę działania SRM wymagają dedykowanych układów zasilania oraz specjalnie opracowanych algorytmów sterowania, które umożliwiają w pełni wykorzystanie ich potencjału. Odpowiedni dobór układu zasilania oraz sterowania jest ważny ze względu na możliwość minimalizowania głównych wady tych silników, którymi są tętnienia momentu, hałas i drgania.[3,4]

Rolę typowego układu zasilania dla napędu SRM pełnią np. asymetryczne półmostki tranzystorowe typu H. Jednak ze względu na ich istotny wpływ na parametry wyjściowe SRM często stosuje się zamienne układy, które umożliwiają wzrost mocy, momentu oraz ograniczenie omawianych wady. Przykładem może być np. układ zasilania typu C-Dump, który w swojej topologii zawiera dodatkowy, często sterowalny element pojemnościowy umożliwiający poprawę parametrów pracy silnika SRM.

Jednym z takich układów zasilania typu C-Dump jest układ opracowany na Politechnice Opolskiej, który wykorzystano do badania wpływu na właściwości napędu z trójpasmowym przełączalnym silnikiem reluktancyjnym. Dotychczasowe badania skupiały się głównie na napędach z dwupasmowymi silnikami o niskim napięciu zasilania do 36V. W tej pracy rozszerzono badania o wpływ układu C-Dump na trójpasmowy silnik SRM z wyprostowanym napięciem sieciowym.

2. CEL I TEZA PRACY

2.1 CEL PRACY

Celem pracy doktorskiej jest określenie wpływu zastosowania układu zasilania typu C-Dump oraz doboru jego parametrów i parametrów sterowania na charakterystyki wyjściowe napędu z trójpasmowym przełączalnym silnikiem reluktancyjnym.

2.2 TEZA PRACY

Możliwe jest uzyskanie wzrostu mocy napędu z trójpasmowym przełączalnym silnikiem reluktancyjnym oraz rozszerzenie zakresu prędkości obrotowej silnika dla pracy ze stałym momentem poprzez zastosowanie układu zasilania typu C-Dump z prostownika sieciowego, przy niewielkim obniżeniu sprawności w porównaniu z klasycznym układem zasilania złożonym z asymetrycznych półmostków tranzystorowych.

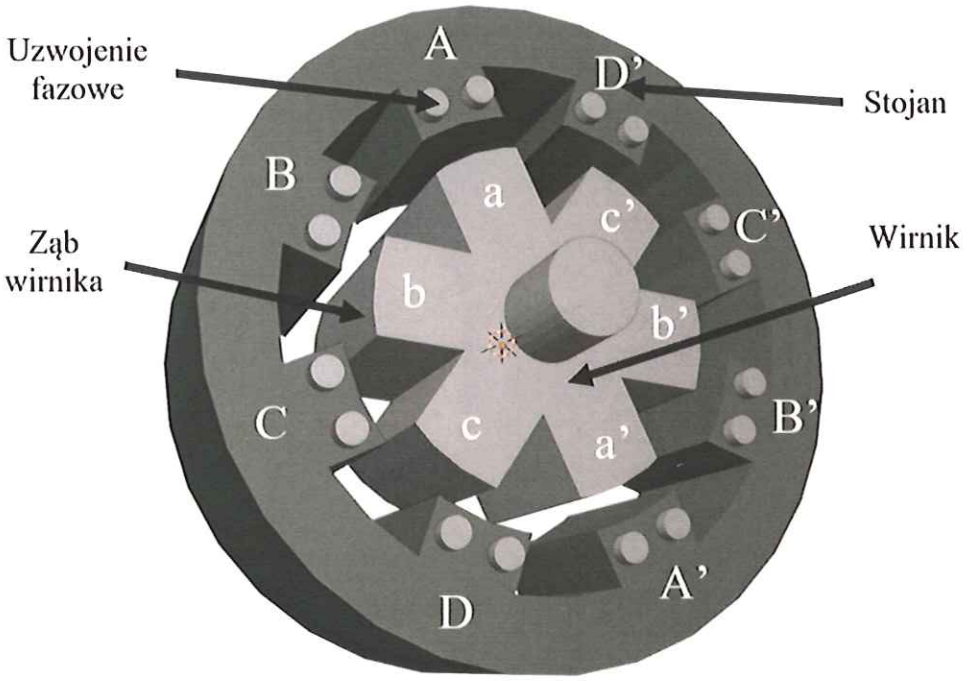
3. ZAKRES PRACY

Zakres pracy obejmuje:

1. Przegląd istniejących rozwiązań układów zasilania SRM.
2. Opracowanie programów symulacyjnych napędu z typowym układem zasilania, złożonym z asymetrycznych półmostków tranzystorowych typu H, oraz napędu z układem typu C-Dump.
3. Zaprojektowanie i wykonanie stanowiska do badań napędów SRM.
4. Opracowanie, wykonanie i zaprogramowanie układu sterowania.
5. Wykonanie pomiarów parametrów napędów w różnych stanach pracy.
6. Wykonanie obliczeń symulacyjnych w różnych stanach pracy obu układów.
7. Wykonanie weryfikacji pomiarowej wyników symulacji dla napędu z układem typowym i układem C-Dump.
8. Wykonanie obliczeń symulacyjnych dla różnych wartości wybranych parametrów układu zasilania, takich jak: pojemność kondensatora C-Dump, napięcie zasilania i kąty komutacji, dla obu układów.
9. Wyznaczenie charakterystyk wyjściowych obu układów na podstawie wyników symulacji.
10. Analiza porównawcza uzyskanych wyników.

4. PRZEŁĄCZALNE SILNIKI RELUKTANCYJNE

Przełączalne silniki reluktancyjne (SRM) mają jawnobiegunową budowę, wirnik nie ma uzwojeń ani magnesów trwałych, a moment obrotowy jest generowany przez zmianę reluktancji magnetycznej w obwodzie magnetycznym maszyny. Podstawowa konstrukcja SRM opiera się na uzwojonym stojanie i biernym wirniku o wydatnych zębach. Przekrój poprzeczny takiego silnika o przykładowej konfiguracji 8/6 (8 biegunów w stojanie i 6 zębów w wirniku) przedstawiono na rys. 4.1. W porównaniu z innymi silnikami, SRM są bardziej odporne na wysokie temperatury i trudne warunki środowiskowe.[1]



Rys. 4.1. Przekrój poprzeczny przykładowego przełączalnego silnika reluktancyjnego o konfiguracji 8/6

Stojan zbudowany jest z ośmiu zębów, na które nawinięto cewki, generujące pole magnetyczne napędzające wirnik. Zęby te oznaczono literami A, B, C, D na rys. 4.1. Pasma fazowe, utworzone przez połączenie cewek przeciwległych biegunów stojana np. A z A', tworzą pasma. W silniku o konfiguracji 8/6 (rys. 4.1) są cztery takie pary (pasma). Wirnik wykonany jest z materiału ferromagnetycznego, zazwyczaj z cienkich blach elektrotechnicznych, tworząc strukturę o zmiennej reluktancji magnetycznej podczas obrotu.[2]

W budowie wirnika stosuje się laminację z cienkich blach, które zmniejszają straty wynikające z przepływu prądów wirowych, powstające w zmiennym polu magnetycznym. Ogranicza to straty w żelazie, zmniejsza nagrzewanie silnika i zwiększa jego sprawność oraz trwałość. Laminacja może również poprawiać wytrzymałość mechaniczną wirnika.

Stosunek liczby biegunów stojana do liczby zębów wirnika jest zwykle taki, aby wirnik miał inną liczbę zębów niż stojan. [8] Taki układ zmniejsza pulsacje momentu obrotowego, generowane przez zmiany reluktancji obwodu magnetycznego przy obrocie wirnika. Asymetria biegunów wirnika i stojana zapewnia również rotację wirnika, po jego zatrzymaniu. Przy jednakowej liczbie zębów, w pozycjach zgodnych zębów wirnika i stojana, silnik nie wytwarza momentu i musi być uruchomiony zewnętrzną siłą.

Sterowanie przełączalnymi silnikami reluktancyjnymi polega na sekwencyjnym załączaniu i wyłączaniu zasilania uzwojeń stojana, co napędza wirnik. Dlatego kluczowe jest precyzyjne określanie położenia kątowego wirnika, np. za pomocą enkodera inkrementalnego. Na podstawie tych danych możliwa jest synchronizacja wzbudzenia uzwojeń z położeniem kątowym wirnika. Ważna jest także kontrola prądów w uzwojeniach stojana, aby osiągnąć określony moment, minimalizować drgania i hałas.

Wyróżnia się wiele strategii sterowania SRM, w tym sterowanie na podstawie znanych zależności parametrów sterowania np. sterowanie wektorowe, D-Θ (Delta-Theta) oraz inne zaawansowane techniki. Stosowane są także metody bezczujnikowe do wyznaczania położenia wirnika.[9, 11] W pracy wykorzystano sterowanie oparte o położenie kątowe wirnika na podstawie danych z enkodera inkrementalnego.

5. UKŁADY ZASILANIA DLA NAPĘDÓW Z SRM

Układy zasilania silników SRM odgrywają kluczową rolę w osiąganiu wysokich parametrów pracy tych napędów. Klasyczny układ zasilania SRM składa się z asymetrycznych półmostków tranzystorowych typu H, które umożliwiają niezależne sterowanie prądem w poszczególnych fazach silnika. Alternatywnym rozwiązaniem jest układ zasilania typu C-Dump, który pozwala na magazynowanie energii odzyskiwanej z uzwojeń silnika w kondensatorze i jej ponowne wykorzystanie, co może wpływać na poprawę parametrów pracy napędu. Układy zasilania SRM można podzielić na kilka kategorii:

- układy dwupoziomowe,
- układy wielopoziomowe,
- układy ze źródłem impedancyjnym,
- układy specjalne, charakteryzujące się odpornością na uszkodzenia.

W przypadku układów dwupoziomowych najczęściej spotykany jest podział ze względu na zastosowany typ przełącznika, dzielący się na układy z przełącznikami twardymi (ang. hard switched converters) oraz układy z przełącznikami miękkimi (ang. soft switched converters), z komutacją własną.

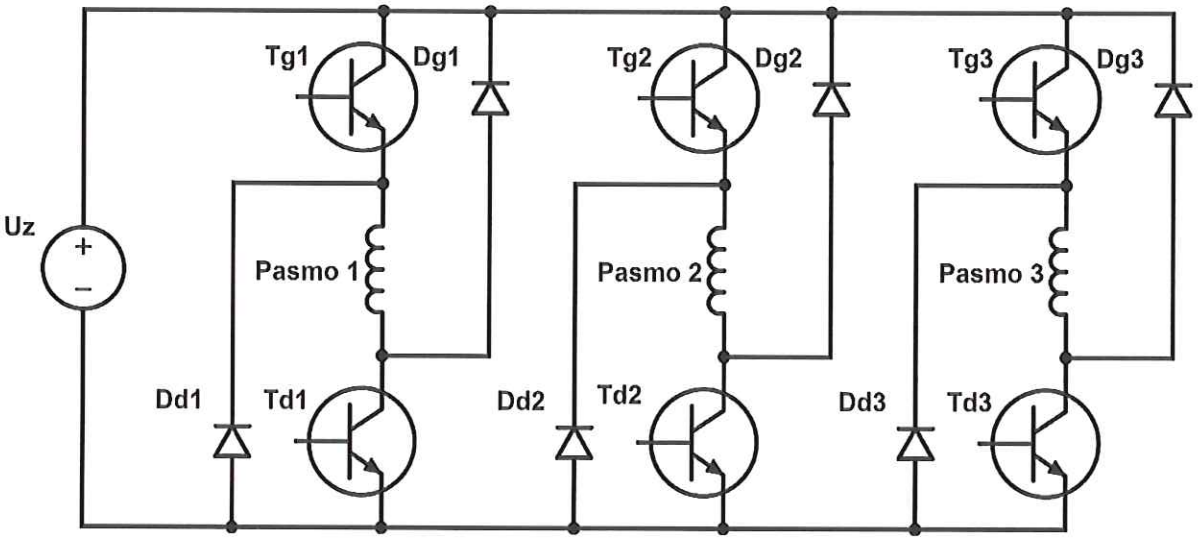
Twarde przełączniki to układy, w których tranzystory lub inne elementy przełączające zmieniają stan przy obecności prądu i napięcia w układzie. W takich układach mogą występować duże straty, wynikające ze zmiany stanu pracy elementów kluczujących, szczególnie w stanie przewodzenia. Powoduje to krótkotrwałe okresy przejściowe, w których tranzystory są w stanie aktywnym, co prowadzi do strat komutacyjnych i wydzielania energii w postaci ciepła.

Układy miękkiego przełączania są specjalnie zaprojektowane, aby zmiany stanów przełączeń następowały w warunkach zerowego napięcia lub zerowego prądu. Minimalizuje to straty komutacyjne, zwiększając sprawność układu oraz zmniejszając wydzielanie ciepła. Konwertery dzielą się na:

- mostkowe:
  - asymetryczne półmostki (ang. asymmetrical half-bridge),
  - ze współdzielonymi przełącznikami (ang. shared phase winding),
  - ze współdzielonymi uzwojeniami fazowymi, zwane również konwerterami Millera (ang. shared switch),
  - pełne mostki (ang. full-bridge, H-bridge),
- pojemnościowe – układy, w których energia zwracana z poprzednio zasilanego pasma jest magazynowana w kondensatorach i wykorzystywana do zasilania następnego pasma:
  - typu C-Dump,
  - z dzielonym napięciem zasilania (ang. split DC),
  - typu Sood, czyli układ z kondensatorem podwyższającym napięcie,
  - przetwornice step-up/step-down (ang. buck-boost),

- magnetyczne – obejmują układy, w których energia magazynowana jest w polu magnetycznym i może zostać przekazana do źródła zasilania lub do uzwojeń pasma:
    - typu bifilarnego,
    - z uzwojeniem pomocniczym (ang. auxiliary winding),
- dyssypatywne – rozpraszające energię (ang. dissipative topologies) np. typu R-Dump,
- typu pojedynczy klucz – konwertery wykorzystujące tylko jeden sterowany przełącznik do kontrolowania przepływu energii.[5]

Jednym z najbardziej popularnych i najczęściej wykorzystywanych układów jest asymetryczny półmostek tranzystorowy typu H, nazywany również w przypadku napędów z SRM układem klasycznym. Układ ten wykorzystuje $2q$ przełączników energoelektronicznych, gdzie q jest liczbą pasm fazowych silnika. Układy te mogą występować w konfiguracji twardej (ang. hard) oraz miękkiej (ang. soft). Na rys. 5.1 przedstawiono przykładowy schemat klasycznego układu zasilania stosowanego w silnikach SRM.



Rys. 5.1. Schemat klasycznego układu zasilania złożonego z asymetrycznych półmostków tranzystorowych typu H stosowany do zasilania trójpasmowego silnika SRM

Zaletą asymetrycznych półmostków tranzystorowych typu H jest możliwość niezależnego sterowania tranzystorami górnymi (T_{gi}), połączonymi z dodatnim biegunem zasilania, oraz dolnymi (T_{di}), dołączonymi do masy układu. Zapewnia to dużą elastyczność sterowania, umożliwiając sterowanie w szerokich przedziałach kątów wyłączenia i załączenia zasilania pasma oraz pracę hamulcową z odzyskiem energii.

Do wad tego rozwiązania należy zaliczyć dużą liczbę wymaganych elementów energoelektronicznych i przełączników, co prowadzi do znacznych spadków napięć na tych elementach podczas przewodzenia. Może to być problematyczne przy małych prędkościach, przez duże wartości skuteczne prądów w pasmach. Ponadto, przy zasilaniu z prostowników, układ asymetrycznego półmostka H może generować duże amplitudy tętnień napięcia, co wymusza zastosowanie kondensatorów o dużych pojemnościach w celu zapewnienia odpowiedniej filtracji napięcia zasilającego.

W procesie sterowania pracą silnika za pomocą układu typu półmostek H wyróżnia się trzy stany pracy dla każdego pasma:

1. Stan zasilania/przewodzenia – w którym tranzystory T_{gi} i T_{di} są w stanie przewodzenia, pasmo jest zasilane i możliwy jest przepływ prądu przez uzwojenia.
2. Stan pętli jałowej – tranzystor T_{gi} jest w stanie przewodzenia, a T_{di} w stanie zaporowym. Prąd przepływa przez tranzystor T_{gi} i diodę D_{gi}, tworząc tym samym pętlę, w której energia zmagazynowana w polu magnetycznym jest tracona w postaci ciepła w elementach obwodu.
3. Stan zwrotu energii – tranzystory T_{gi} i T_{di} są w stanie wyłączenia. Obwód zamyka się przez diody D_{gi} oraz D_{di}, umożliwiając odprowadzenie energii zmagazynowanej w polu magnetycznym do źródła zasilania.[1]

Podczas uruchamiania maszyny pierwszym stanem jest stan zasilania. W tym stanie steruje się odpowiednią sekcją układu na podstawie położenia kątowego wirnika, aby zasilić pasmo i wprowadzić wirnik w ruch. W trakcie tego procesu należy monitorować wartość prądu i odpowiednio reagować w przypadku przekroczenia jego dopuszczalnej wartości, gdy to nastąpi przechodzi się w stan pętli jałowej lub w stan zwrotu energii do źródła.

W stanie zwrotu energii do źródła wartość prądu w uzwojeniach pasma spada w czasie zbliżonym do czasu jego narastania. W momencie, gdy wartość prądu spadnie poniżej minimalnej wartości przyjętej w strategii sterowania, oba tranzystory są ponownie załączane. Napięcie na uzwojeniach pasma w trakcie wyłączenia wynosi około $-U_z$, aż do ponownego załączenia tranzystorów, po czym ponownie wynosi około $+U_z$.

Przyjęcie takiej strategii sterowania jest dyskusyjne, ponieważ napięcie w jednym cyklu pracy może wielokrotnie zmieniać polaryzację. Ma to wpływ na stan izolacji, obciążenie kluczy, wzrost strat komutacyjnych oraz zwiększenie tętnień prądu i napięcia źródła zasilania.

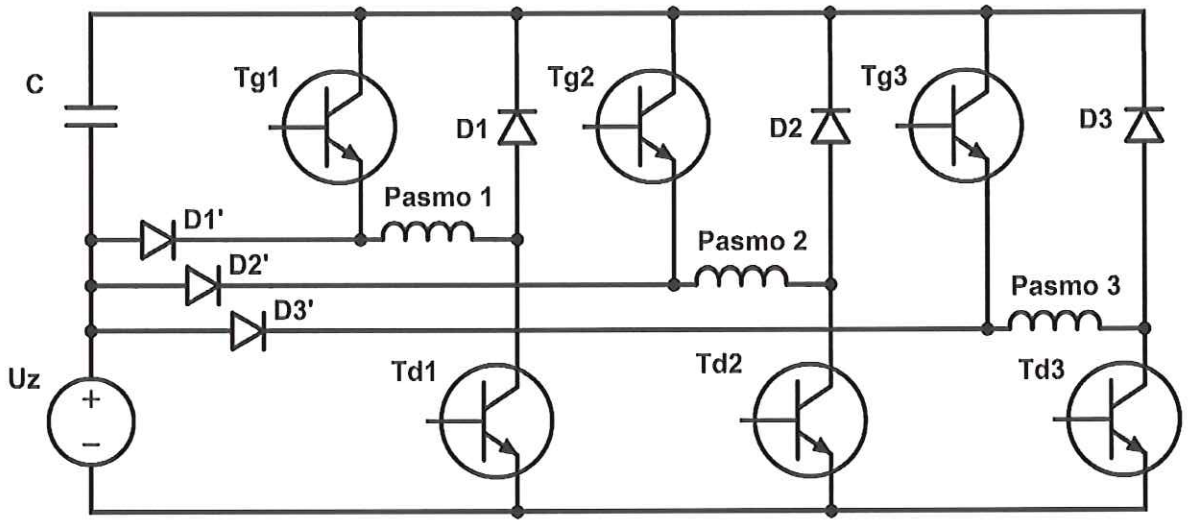
Drugą możliwością jest przejście ze stanu zasilania do stanu pętli jałowej po przekroczeniu dopuszczalnej wartości prądu zdefiniowanej dla pasma. W tym przypadku wyłącza się tylko jeden tranzystor, np. T_{di}, co powoduje zamknięcie obwodu przez załączony drugi tranzystor i diodę D_{gi} oraz przepływ prądu w zamkniętej pętli, z pominięciem źródła zasilania. Energia jest wówczas zamieniana w pracę mechaniczną i wytracana w postaci ciepła w uzwojeniach i elementach energoelektronicznych. W tym stanie pracy spadek wartości prądu w paśmie jest znacznie wolniejszy niż w przypadku zwrotu energii do źródła. W tym stanie napięcie na uzwojeniach pasma jest ujemne, lecz zbliżone do zera, co zmniejsza amplitudę zmian napięcia podczas przełączeń kluczy oraz częstotliwość przełączeń, a tym samym straty komutacyjne.

Układy typu C-Dump cechuje możliwość magazynowania części energii w dodatkowym obwodzie opartym na pojemnościowym magazynie energii (kondensatorze nazywanym C-Dump). Pierwsze tego typu układy powstały w celu zmniejszenia liczby drogich wówczas elementów półprzewodnikowych, przy jednoczesnym zachowaniu podobnych właściwości napędów, takich jak moment obrotowy, moc i szeroki zakres regulacji prędkości. Wspólną cechą tych układów jest magazynowanie energii zwracanej po wyłączaniu zasilania pasm w kondensatorach, a następnie wykorzystywanie tej energii do zasilania uzwojeń kolejnego pasma.[12]

Kondensator nie tylko przechowuje część energii, ale także zwiększa szybkość narastania prądów w uzwojeniach silnika poprzez zwiększenie napięcia zasilającego pasma, ale

również opadania prądów przez odbiór energii z pasma. Powoduje to zmniejszenie strat oraz szerokości przedziału kątowego zasilania pasma. Do zalet tych układów można zaliczyć także możliwość zmniejszenia liczby kluczy energoelektronicznych w porównaniu do tradycyjnych rozwiązań. Układy C-Dump charakteryzują się zdolnością do odzyskiwania i ponownego wykorzystywania części energii, która często jest tracona w innych układach. Dodatkowo pozwalają one na przyspieszenie procesu rozmagnesowania pasm po wyłączeniu zasilania oraz poprawę charakterystyk napędu.

Do wad układów C-Dump należy to, że muszą być projektowane z uwzględnieniem znacznie wyższych wartości napięć, co wymaga stosowania elementów o wyższym napięciu dopuszczalnym. Kolejną wadą jest bardziej złożony algorytm sterowania oraz cyrkulacja prądu pomiędzy uzwojeniami silnika a kondensatorem, co powoduje wzrost strat. Układ typu C-Dump, który wykorzystano podczas badań, przedstawiono na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Schemat układu zasilania typu C-Dump stosowany do zasilania trójpasmowego silnika SRM, który wykorzystano w badaniach

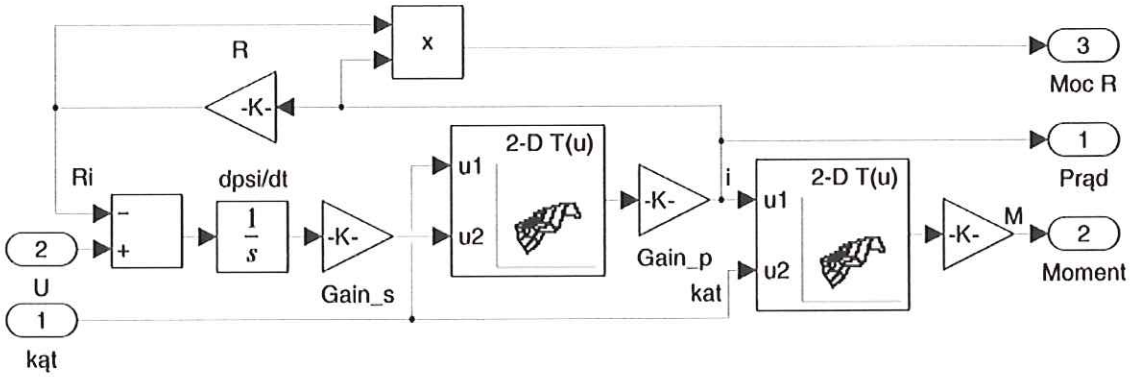
W procesie sterowania pracą silnika z wykorzystaniem układu typu C-Dump wyróżnia się cztery główne stany pracy: zasilania pasma, odzysku energii przez ładowanie kondensatora C-Dump, zasilanie pasma z szeregowo połączonego kondensatora i źródła zasilania oraz stan pętli jałowej. [7]

W pierwszym etapie pracy konwertera, załączany jest tranzystor T_{di} (gdzie i to numer pasma) wprowadzając układ w stan zasilania pasma ze źródła U_z. Wartość prądu w uzwojeniach pasma zaczyna narastać, aż osiągnie przyjęty limit. Po osiągnięciu tej wartości, zasilanie pasma jest wyłączane poprzez wyłączenie tranzystora T_{di}. Układ wprowadza się w stan pętli jałowej do czasu spadku wartości prądów w paśmie, przez załączenie tranzystora T_{gi}. Po zakończeniu cyklu zasilania pasma określanego przez kąt wyłączenia α_{OFF} układ wprowadzany jest w stan zwrotu do kondensatora C przez wyłączenie tranzystorów T_{gi} oraz T_{di}. Prąd zaczyna przepływać przez diodę D_i, która jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia, a następnie energia trafia do kondensatora C-Dump, oznaczonego jako C. Proces ten nazywany jest stanem odzysku energii. Narastanie napięcia na kondensatorze jest wynikiem jego ładowania prądem rozmagnesowującym pasma. Praca kondensatora jest ściśle monitorowana poprzez pomiar jego napięcia, aby nie przekroczyć ustalonej wartości napięcia zasilania.

6. SYMULACJE KOMPUTEROWE

W pracy opracowano model matematyczny napędu SRM do symulacji komputerowych, uwzględniający parametry elektryczne, magnetyczne i mechaniczne silnika. Wstępne obliczenia charakterystyk silnika SRM wykonano metodą elementów skończonych (MES), przy użyciu programu FEMM. Model silnika oparto na zależnościach strumienia magnetycznego i momentu elektromagnetycznego od prądu pasma i kąta obrotu wirnika. Ten model, wraz z modelem układu zasilania, zaimplementowano w MATLAB Simulink.

Uzyskane zależności przedstawiono w postaci dwóch tablic. Pierwsza tablica prezentuje zależność momentu elektromagnetycznego $T_e(\theta,i)$ od położenia kątowego wirnika θ i prądu pasma i. Druga tablica opisuje zależność prądu pasma $i(\Psi,\theta)$ od strumienia magnetycznego Ψ i położenia kątowego wirnika θ, uzyskaną przez przekształcenie zależności strumienia magnetycznego od kąta obrotu wirnika i prądu pasma. Model odwzorowujący pasmo silnika używany w badaniach symulacyjnych przedstawiono na rys. 6.1.

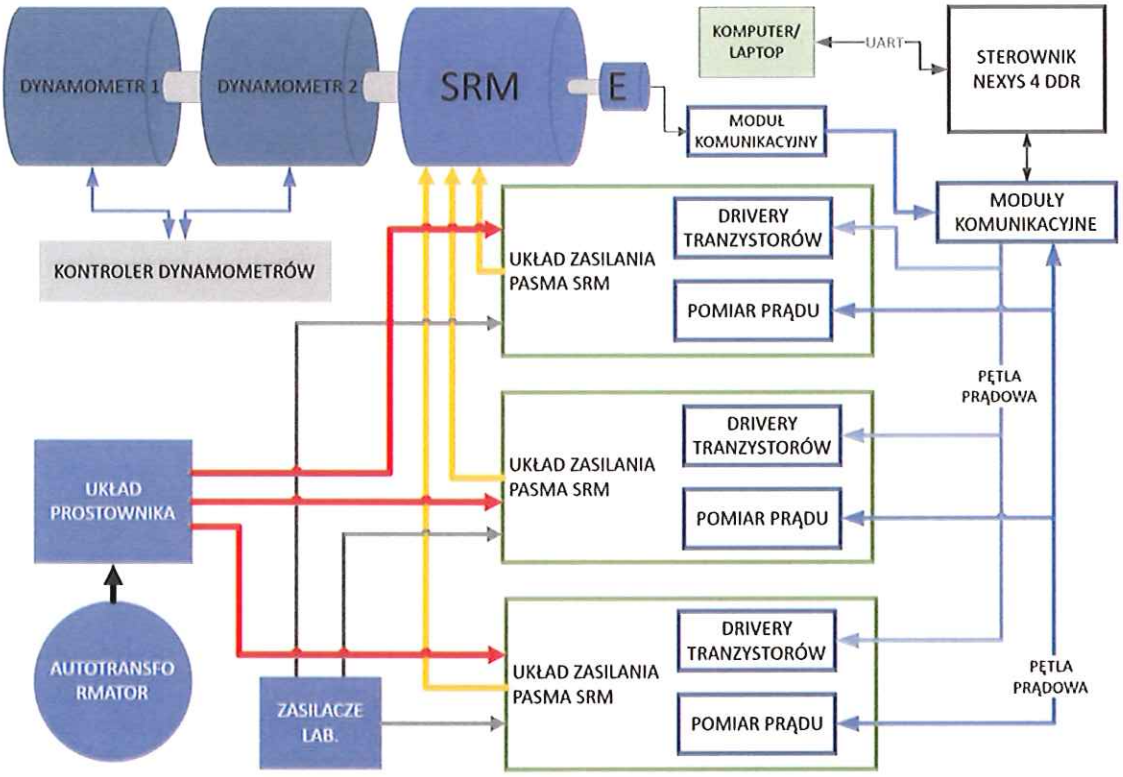


Rys. 6.1. Schemat symulacyjny pasma silnika opracowany w programie MATLAB Simulink

Sygnały wejściowe do modelu silnika obejmują napięcie u oraz kąt obrotu wirnika θ. Napięcie doprowadzane do uzwojeń, uwzględniając spadek napięcia na rezystancji R, odpowiada pochodnej zmian strumienia magnetycznego względem czasu. Sygnał ten jest całkowany, a wynikowa wartość strumienia wraz z aktualnym kątem wirnika trafia do wejścia *u2* pierwszej tablicy. Wartość wyjściowa z tej tablicy, czyli prąd pasma, przekazywana jest do wejścia *u1* drugiej tablicy, której drugie wejście *u2* otrzymuje aktualne położenie kątowe wirnika. Wyjściem z tej tablicy jest aktualna wartość momentu elektromagnetycznego. Cały układ, przedstawiony na rys. 6.1, znajduje się w bloku, którego wyjściami są: straty w rezystancji uzwojenia R, aktualna wartość prądu i oraz moment elektromagnetyczny T_e generowany przez pasmo silnika. Dla wszystkich pasm użyto identycznego modułu, a przesunięcia kątowe między nimi uzyskano, wprowadzając odpowiednie wartości kąta obrotu wirnika do poszczególnych bloków, aby zakres pracy każdego pasma obejmował właściwe przedziały kątowe.

7. STANOWISKO BADAWCZE

Badania przeprowadzono na silniku EMS-71 o mocy 750 W, sprzężonym z hamownicą firmy Magtrol, umożliwiającą zadawanie momentu obciążenia oraz pomiary mocy, momentu i prędkości. Do silnika podłączono enkoder inkrementalny monitorujący położenie kątowe wirnika i prędkość obrotową. Zaprojektowano i wykonano konfigurowalny układ zasilania składający się z trzech modułów dla trzech pasm silnika. Układ ten umożliwia zmianę konfiguracji pomiędzy topologią klasyczną, a układem typu C-Dump na tych samych modułach zasilających. Schemat zbudowanego układu zasilania przedstawiono na rys. 7.1.



Rys. 7.1. Schemat blokowy zbudowanego stanowiska badawczego z wyszczególnieniem wszystkich jego najważniejszych elementów

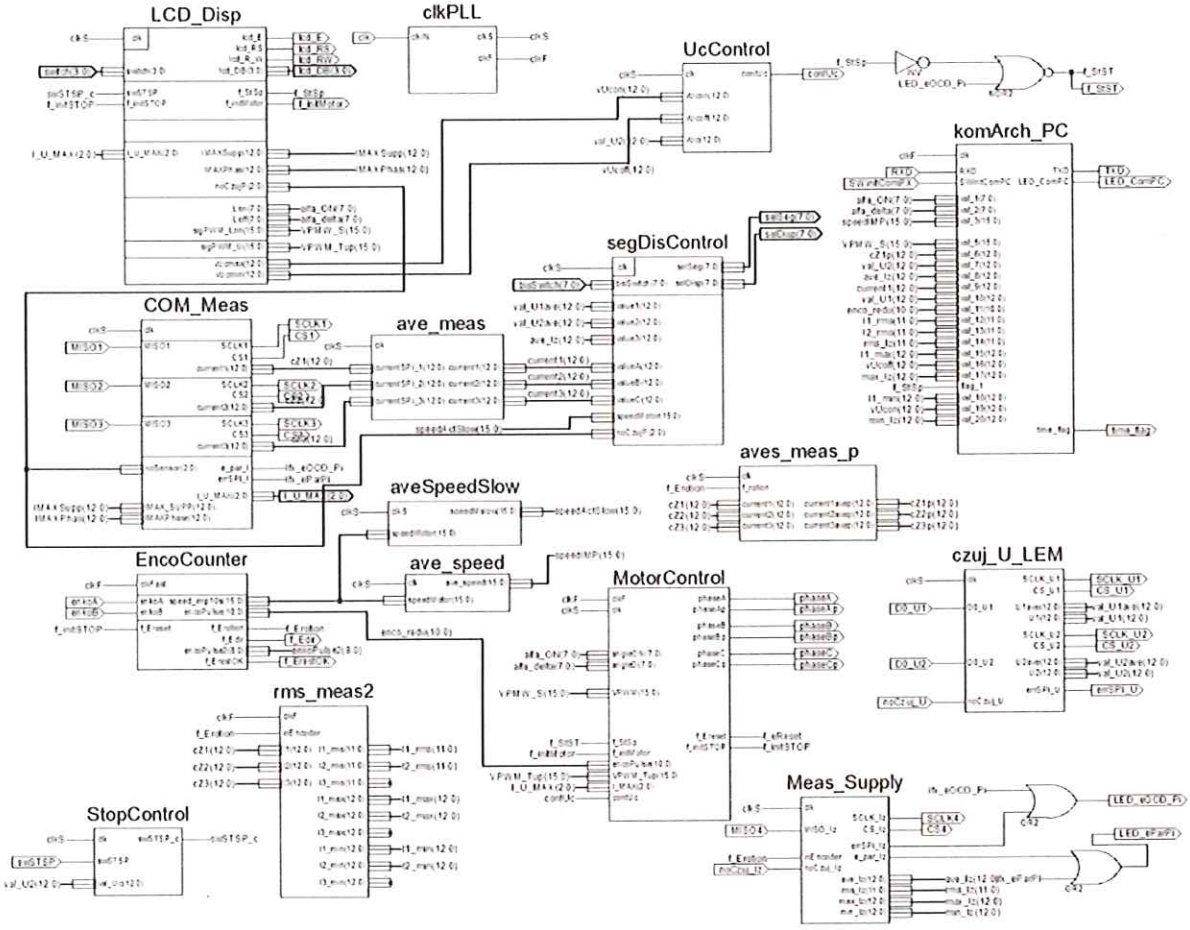
Opracowany układ zasilania w stanowisku badawczym pełni kluczową rolę, odpowiadając za zasilanie uzwojeń silnika SRM. Ze względu na zasilanie układu z prostownika sieciowego, sygnały sterujące i komunikacyjne odseparowano od części wysokonapięciowej, aby uniknąć zakłóceń w komunikacji i sterowaniu. Połączenia między częścią niskoprądową a wysokoprądową zrealizowano za pomocą pętli prądowych, wykorzystując układy RS485 (model ST3485EB firmy STMicroelectronics). Układy zaimplementowane w części wysokoprądowej, znajdują się na płytach do pomiaru prądów, sterowania tranzystorami czy pomiaru napięcia kondensatora. Po stronie niskoprądowej przy sterowniku, zaimplementowano specjalnie opracowane moduły komunikacyjne.

8. STEROWNIK FPGA

Rolę sterownika pełni układ programowalny FPGA, w którym zaimplementowano autorską strukturę sterowania silnikiem, pomiarów oraz komunikacji. Układy programowalne pozwalają na współbieżną realizację wielu skomplikowanych instrukcji, co odróżnia je od mikrokontrolerów. Ich główną zaletą jest pełna kontrola nad funkcjonalnością poszczególnych elementów sterownika, co pozwala na dostosowanie mechanizmów sprzętowych do specyficznych algorytmów sterowania, w przeciwieństwie do sterowników opartych na mikrokontrolerach.

Jednakże wadą tego rozwiązania jest większa złożoność opisu układu, wynikająca z konieczności implementacji standardowych modułów, takich jak interfejsy szeregowe do podłączenia przetworników ADC czy komputera PC. Zaletą jest możliwość implementacji wielu interfejsów, co eliminuje konieczność multipleksowania pomiarów.

Schemat struktury sterownika, opracowany w module Schematic środowiska Xilinx ISE, przedstawiono na rys. 8.1.



Rys. 8.1. Schemat układu sterowania zaimplementowanego w układzie FPGA

Opracowany sterownik został zaimplementowany w płycie rozwojowej Nexys4 DDR. Ostateczna wersja sterownika posiada możliwość zmiany parametrów konfiguracyjnych, co umożliwia jego zastosowanie w różnych topologiach układów zasilania oraz do różnych typów silników. Strukturę przystosowano do topologii badanego układu C-Dump i wyposażono w dodatkowe moduły służące do pomiaru prądów i napięć. Opracowany układ posiada strukturę hierarchiczną, a schemat przedstawia końcową syntezę pełnego układu (rys. 8.1). Opis budowy i struktury poszczególnych modułów został przedstawiony w dalszej części pracy. Układ ten realizuje algorytm sterowania dla badanego układu C-Dump.

Przeprowadzono badania eksperymentalne z wykorzystaniem klasycznego układu zasilania, analizując wpływ różnych parametrów na charakterystyki silnika. Wyniki tych badań posłużyły jako punkt odniesienia dla porównań z układem typu C-Dump.

Zmodyfikowana wersja tego układu sterowania została również wykorzystana do przeprowadzenia badań opracowanego regulatora dwuzakresowego dla silników SRM, co zostało przedstawione w publikacji [6].

9. BADANIA EKSPERYMENTALNE

W przełączalnym silniku reluktancyjnym kluczowymi parametrami sterującymi są kąt włączenia zasilania α_{OFF} oraz przedział kątowy zasilania pasma α_{Δ}. Parametry te umożliwiają w pewnym zakresie zmianę momentu obrotowego i prędkości obrotowej silnika przy stałym napięciu zasilania. Kąt wyłączenia zasilania określa położenie, w którym wyłączane jest zasilanie uzwojeń danego pasma w odniesieniu do położenia wirnika o minimalnej reluktancji magnetycznej. Wartość kąta wyłączenia zasilania pasma zależy od wymagań dotyczących pracy silnika i oczekiwanej mocy napędu, przy czym zależność ta jest nieliniowa i zależy od charakterystyki konkretnego silnika, jego parametrów elektrycznych oraz momentu obciążenia na wale.

Aby określić wartość kąta wyłączenia zasilania, można przeprowadzić eksperymenty lub symulacje komputerowe. W celu weryfikacji wyników uzyskiwanych w programie symulacyjnym, przeprowadzono badania eksperymentalne z wykorzystaniem klasycznego układu zasilania składającego się z asymetrycznych półmostków tranzystorowych oraz układu typu C-Dump. Uzyskane wyniki z badań umożliwiają porównanie wyników uzyskanych z symulacji z wynikami pomiarów wykonanych z użyciem napędu SRM, dla którego opracowano model symulacyjny.

Pomiary realizowano z wykorzystaniem analizatora mocy Norma D6000, który mierzył następujące wielkości elektryczne:

a) prąd źródła zasilania,
b) prąd pasma,
c) prąd kondensatora C-Dump,
d) napięcie źródła zasilania,
e) napięcie pasma,
f) napięcie kondensatora C-Dump.

Za pomocą sprzęgniętej z silnikiem hamownicy firmy Magtrol, służącej do ustalania wartości momentu obciążenia, mierzono:

a) prędkość silnika,
b) moment na wale silnika,
c) moc wyjściową na wale silnika.

Dodatkowo, przebiegi niektórych wielkości elektrycznych rejestrowano za pomocą czterokanałowego oscyloskopu YOKOGAWA DLM2000, wraz z ich wartościami średnimi, skutecznymi, minimalnymi oraz maksymalnymi. Układ FPGA, realizujący funkcję sterującą, rejestrował również wartości prądów w pasmach silnika oraz prądy źródła za pomocą zainstalowanych w układzie zasilania czujników prądu, a także wartości napięć źródła zasilania oraz kondensatora w przypadku układu C-Dump.

9.1. BADANIA UKŁADU KLASYCZNEGO

Badania eksperymentalne rozpoczęto od pomiarów parametrów silnika SRM zasilanego z klasycznego układu asymetrycznych półmostków tranzystorowych typu H. Przeprowadzono serię pomiarów obejmujących różne wartości napięcia zasilania U_z, kątów wyłączenia α_{OFF} oraz momentu obciążenia silnika T_L.

W pierwszym kroku zaczęto od testowania układu zasilania i sprawdzenia poprawności sygnałów w sterowniku FPGA. Początkowo testy przeprowadzono przy zasilaniu napędu z zasilacza laboratoryjnego o obniżonym napięciu do 30 V. Sprawdzano poprawność odczytów z elementów pomiarowych, przeprowadzano kalibrację i korekty wartości stałych w sterowniku FPGA.

Następnie układ zasilono z prostownika jednofazowego z układem filtrującym przez autotransformator i przeprowadzono pomiary, ustalając stałe wartości momentu obciążenia na hamownicy i stałe wartości napięcia zasilania. Dla zadanych nastaw tych parametrów zmieniano wartości kąta wyłączenia zasilania pasm. Pomiary wykonywano w stanach pracy ustalonej, gdy silnik ustabilizował prędkość obrotową po zmianach wartości zadanych kątów.

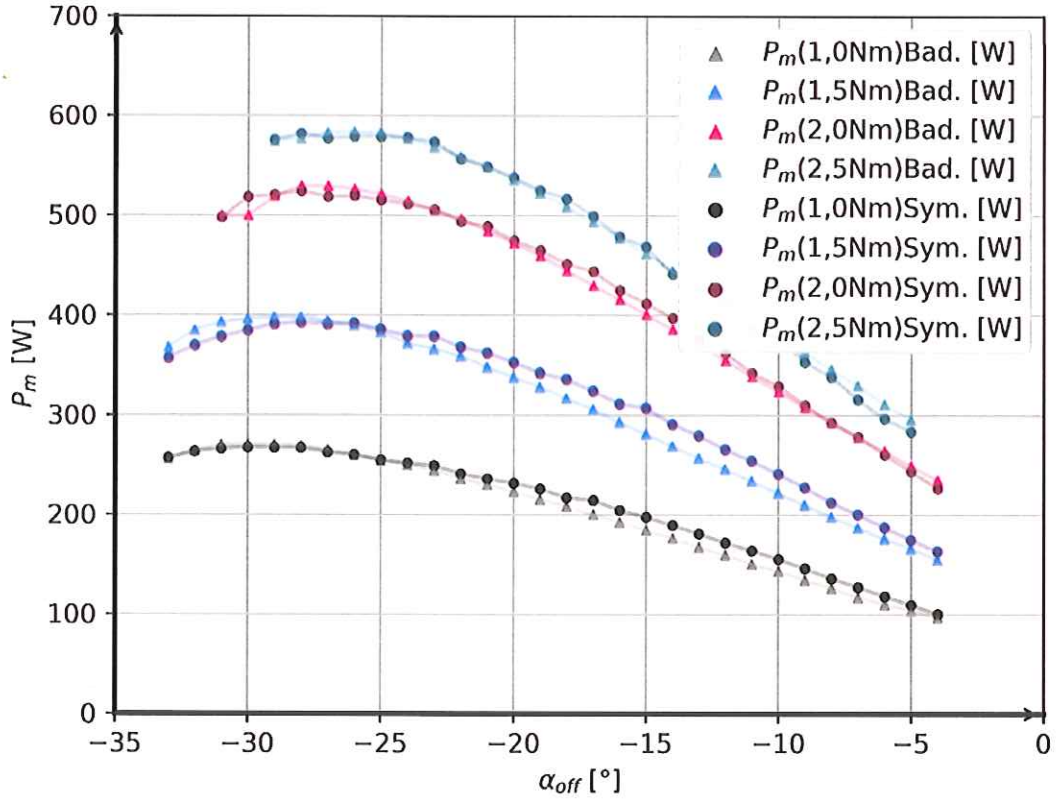
Pomiary dla każdego obciążenia zaczynano od kąta wyłączenia wynoszącego α_{OFF} = -27° i dla zadanego przedziału zasilania α_Δ = 30°. Wartość napięcia zasilania pozostawała stała w całym zakresie zmian kąta. Kąt wyłączenia α_{OFF} zmieniano do momentu, gdy wartości mierzone wykazywały duże wahania co utrudniało prawidłowy odczyt lub obserwowano wysoki poziom tętnień momentu i hałas silnika. Pomiary prowadzono dla kilku wartości momentu na wale.

Średnie wahania napięcia źródła zasilania wyniosły:

- dla 1,0 Nm około 6,9 V,
- dla 1,5 Nm około 9,3 V,
- dla 2,0 Nm około 9,2 V,
- dla 2,5 Nm około 9 V.

Po zakończeniu badań eksperymentalnych, dokonano weryfikacji wyników uzyskanych z modelu symulacyjnego opracowanego w programie Matlab Simulink. Wyniki pomiarów porównano z wynikami symulacji dla takich samych punktów pracy, jak te badane eksperymentalnie. Jako dane wejściowe do obliczeń zadawano wartości kątów, napięcia oraz prędkości uzyskane podczas badań laboratoryjnych.

Zależność (rys. 9.1.1) przedstawia porównanie mocy na wale silnika uzyskane z symulacji oraz w badaniach eksperymentalnych, w zależności od kąta wyłączenia zasilania pasma w układzie klasycznym.

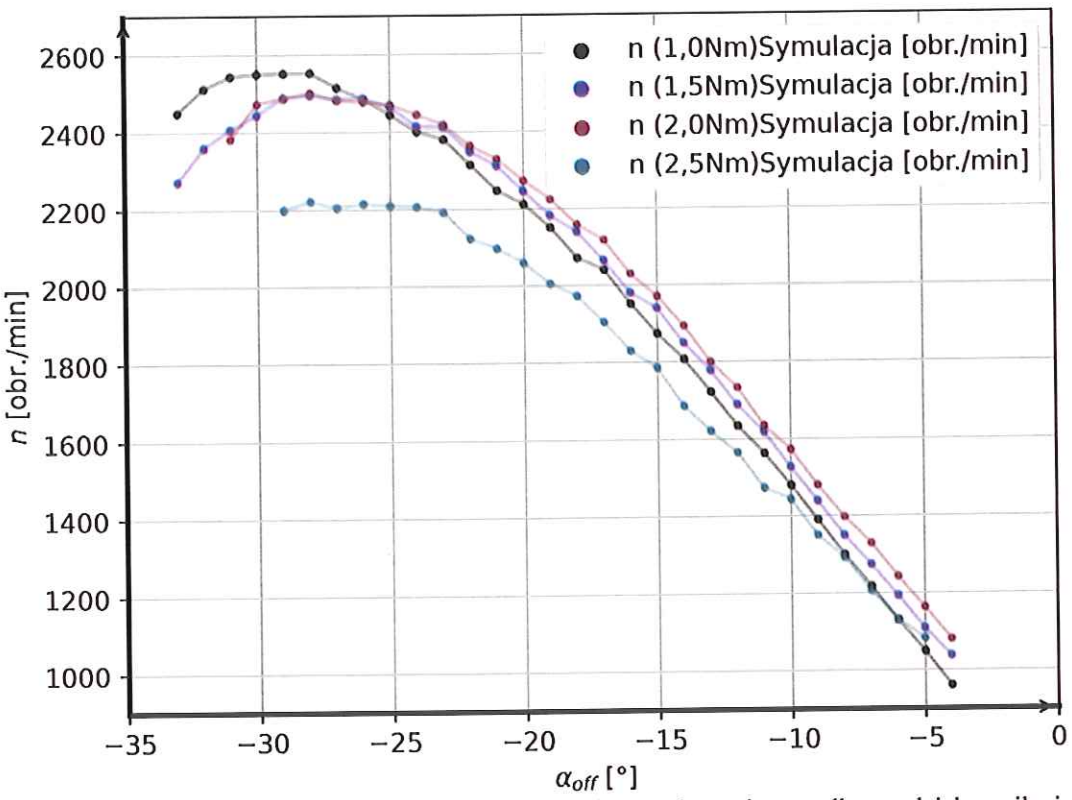


Rys. 9.1.1. Zależności mocy na wale silnika P_m od kąta wyłączenia α_{OFF} dla przedziału zasilania α_A =30°, uzyskane w modelu symulacyjnym i z badań eksperymentalnych napędu z układem klasycznym

W przypadku zależności mocy na wale silnika SRM od kąta wyłączenia w układzie rzeczywistym i symulacyjnym uzyskano zbliżone wartości. Najwyższe wartości błędów wystąpiły przy zadanym momencie obciążenia wynoszącym 1,5 Nm, w przedziale dużych wartości kątów wyłączenia (od -18°), gdzie błąd przekroczył 5%. Największe różnice zaobserwowano przy kącie -15°, gdzie błąd względny wyniósł około 9,6%. Najmniejsze rozbieżności między wartościami z symulacji a wynikami badań eksperymentalnych odnotowano dla momentu obciążenia 2 Nm, gdzie błąd wynosił około 3,7%.

Taki rozkład błędów w zakresie dużych wartości kątów wyłączenia zasilania może wynikać ze wzrostu oscylacji napięcia źródła zasilania oraz błędów pomiarowych. Podczas badań obserwowano wzrost nierównomiernej pracy silnika w tym przedziale kątów oraz zwiększenie oscylacji wartości wyjściowych.

Na rys. 9.1.2 pokazano zależności prędkości obrotowej wirnika od kąta wyłączenia zasilania pasma, uzyskane przy stałych wartościach momentu obciążenia.

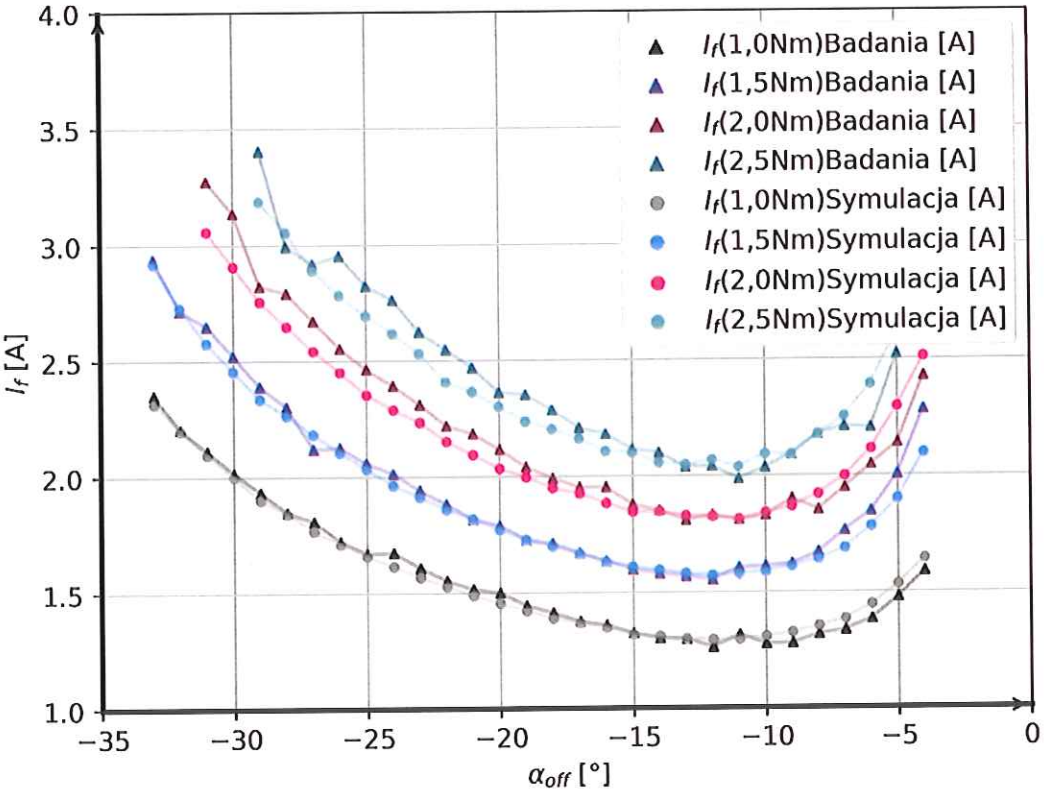


Rys. 9.1.2. Zależności prędkości wirnika n [obr./min] od kąta wyłączenia α_{OFF} dla przedziału zasilania α_{Δ} =30°, uzyskane w modelu symulacyjnym i z badań eksperymentalnych napędu z układem klasycznym

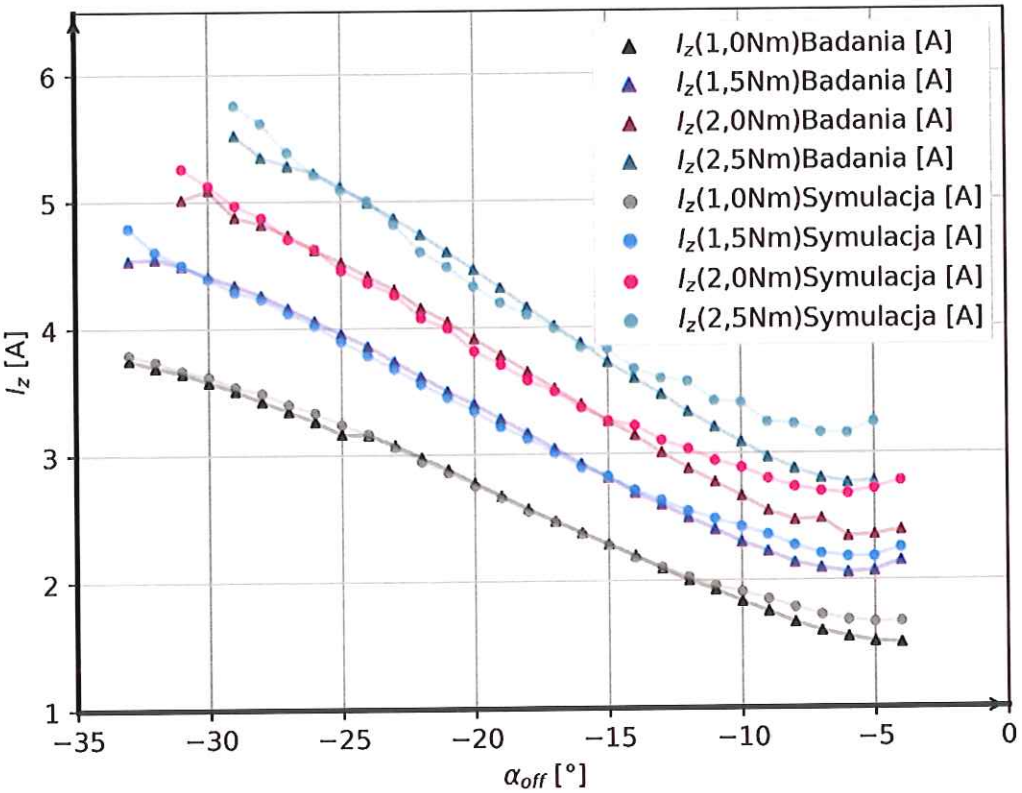
Prędkość wirnika dla zadanych wartości momentu obciążenia i poszczególnych kątów wyłączenia zasilania pasma była zbliżona do wyników uzyskanych podczas badań eksperymentalnych. Podczas testów dobierano wartość napięcia tak, aby przy kącie wyłączenia -27° uzyskać prędkość około 2500 obr./min. Wyjątkiem była zależność dla momentu obciążenia 2,5 Nm, gdzie zmniejszono napięcie, aby uzyskać niższą prędkość, zgodnie z pomiarami.

Prędkość wirnika przy różnych wartościach momentu obciążenia była zgodna z prędkością uzyskaną podczas badań eksperymentalnych w granicach błędu do około 9%. Najmniejsze błędy, wynoszące około 2%, uzyskano w zakresie najwyższych prędkości. Najlepszą zgodność wyników symulacji i badań eksperymentalnych uzyskano dla momentu obciążenia 2 Nm, z maksymalnym błędem około 3%. Dla obciążenia 2,5 Nm błąd wyniósł maksymalnie 4,6%. Kształt zależności był zbliżony do wyników badań eksperymentalnych.

Zależności średnich wartości prądu pasma I_f od kąta wyłączenia zasilania α_{OFF} przedstawiono na rys. 9.1.3. W tej zależności obserwuje się zbieżność wyników uzyskanych z symulacji z wynikami pomiarów w granicach 8,4% błędu. Uzyskano podobne kształty zależności dla poszczególnych wartości momentu obciążenia. Nieznaczne odchylenia zanotowano w przedziale dużych wartości kątów, od około -8°, gdzie wraz ze wzrostem kąta wyłączenia wartość prądu zaczynała rosnąć. W tym przedziale obserwowano także duże oscylacje wartości mierzonych oraz wzrost oscylacji parametrów silnika.



Rys. 9.1.3. Zależności średniej wartości prądu pasma silnika I_f [A] od kąta wyłączenia α_{OFF} dla przedziału zasilania α_Δ =30°, uzyskane w modelu symulacyjnym i z badań eksperymentalnych napędu z układem klasycznym



Rys. 9.1.4. Zależności średniej wartości prądu źródła zasilania I_z [A] od kąta wyłączenia α_{OFF} dla przedziału zasilania α_Δ =30°, uzyskane w modelu symulacyjnym i z badań eksperymentalnych napędu z układem klasycznym

Na rys. 9.1.4 przedstawiono zależności wartości średnich prądu pobranego ze źródła zasilania od kąta wyłączenia zasilania pasma. Najmniejsze różnice między wartościami uzyskanymi z symulacji i z badań eksperymentalnych występowały w środkowym przedziale kątów: dla 2,5 Nm od -26° do -13°, dla 2 Nm od -30° do -13°, dla 1,5 Nm od -32° do -11° oraz dla 1 Nm od -33° do -10°. W tych zakresach uzyskano błędy wynoszące niecałe 3%. Największe rozbieżności występowały w zakresie dużych kątów (od kąta -10°) dla największych wartości momentu obciążenia (2 Nm i 2,5 Nm).

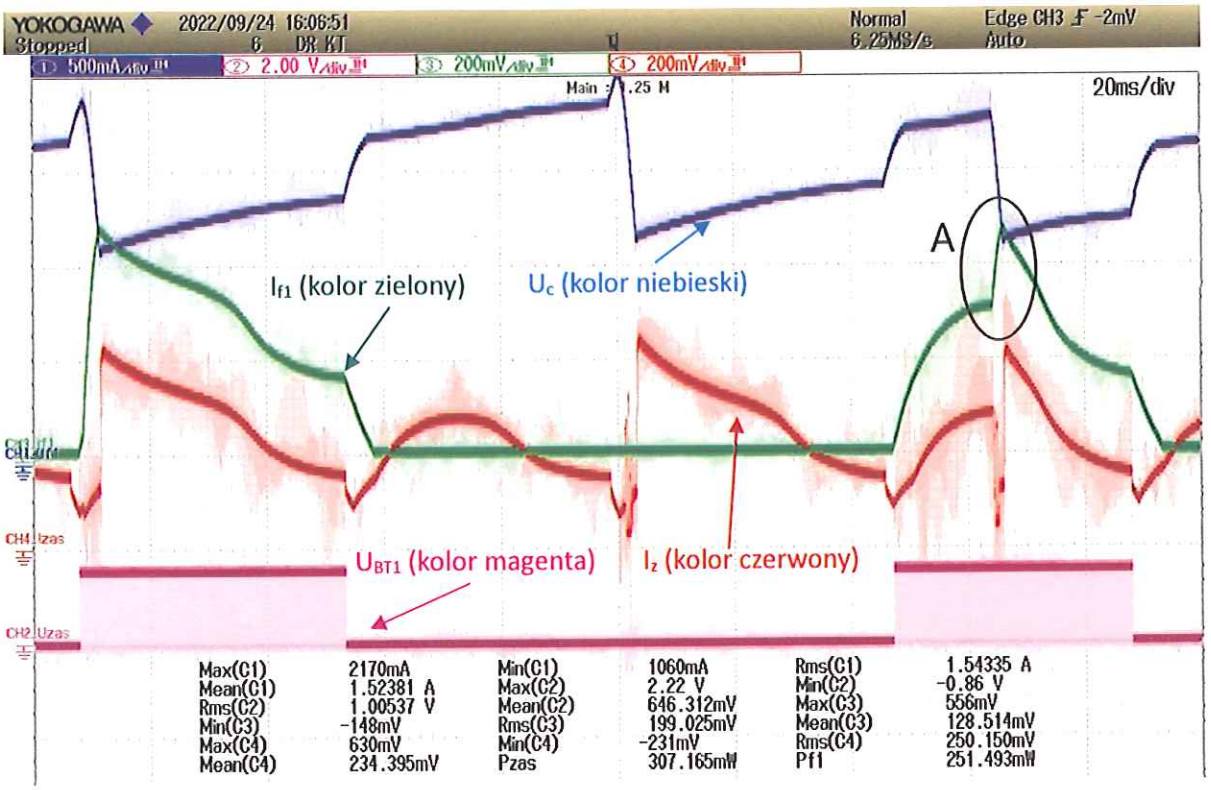
9.2. BADANIA UKŁADU TYPU C-DUMP

Badania eksperymentalne układu C-Dump rozpoczęto od rekonfiguracji układu zasilania i zmiany oprogramowania sterującego. Na stanowisku laboratoryjnym zmieniono ustawienia w płytach układów zasilania, aby odwzorować schemat badanego układu. Do układu zasilania podłączono kondensator C-Dump o pojemności 47 μF (zgodnie ze schematem rys. 5.2) i wgrano nową strukturę programu do sterownika FPGA, dostosowaną do obsługi badanego układu C-Dump. Dodano także obwody do pomiaru prądu oraz napięcia kondensatora.

Najpierw przeprowadzono weryfikację poprawności działania sterownika FPGA, obserwując działanie całego układu, w tym ładowanie i rozładowywanie kondensatora C-Dump. Do oscyloskopu podłączono dwie sondy prądowe oraz dwie napięciowe. Ustawiono napięcie źródła zasilania na około 30 V, kąt wyłączenia zasilania pasma α_{OFF} na -29°, przedział kątowy zasilania α_{Δ} na 30°, napięcie wyłączenia rozładowania kondensatora U_{c_off} na 15 V i maksymalne napięcie ładowania kondensatora U_{c_on} na 35 V. Stan załączenia powodował pobór energii ze źródła i kondensatora, a stan wyłączenia ładowanie kondensatora i zwrot części energii do źródła (kondensatorów filtrujących).

Pomiary wykonano w jednym paśmie silnika, mierząc stan sygnału załączania tranzystora od strony masy układu. Układ pracował w trybie zasilania zarówno ze źródła, jak i z połączonych źródła i kondensatora.

Zaprezentowano przykładowy oscylogram (rys. 9.2.1) prezentujący wyniki pomiarów przy nieznacznym obciążeniu. Przebieg ten przedstawia napięcia na kondensatorze C-Dump (kolor niebieski), prądu źródła zasilania (kolor czerwony), prądu pasma (kolor zielony) oraz sygnału sterującego pracą tranzystora dolnego T_{1D}, włączonego od strony masy układu (kolor magenta).



Rys. 9.2.1. Przebiegi prądów i napięć w badanym układzie, kolor niebieski - napięcie na kondensatorze U_C [15·V], kolor magenta – sygnał sterujący załączeniem tranzystora dolnego U_{BT1} [15·V] (załączenie pasma nr 1), czerwony – prąd źródła zasilania I_z [1·A], zielony – prąd pasma nr 1 I_{f1} [1·A]

W pomiarach tych ilość energii zwracana z uzwojeń pasma sprawia, że napięcie progowe załączenia kondensatora C-Dump było osiągane zwykle podczas zasilania co drugie pasmo. Widoczne jest to na przebiegu w kolorze niebieskim. Proces rozładowania kondensatora następował szybciej, a napięcie kondensatora szybko osiągało minimalną wartość progową. Wiązało się to z większym poborem energii, wynikającym ze zwiększonego obciążenia i większych wartości prądów pasm silnika. W tym przypadku wartość prądu pasma wzrosła do około 5,5 A, co było widoczne także, jako wzrost nachylenia zbocza sygnału prądu pasma (rys. 9.2.1 oznaczono polem A). Po zakończeniu procesu rozładowania kondensatora, następowało dalsze narastanie wartości prądu i pobór energii ze źródła.

W drugim cyklu zasilania pasm w obserwowanych przebiegach, napięcie załączenia w kondensatorze C-Dump zostało osiągnięte w połowie czasu trwania sygnału sterującego tranzystorem. Załączenie rozładowywania kondensatora spowodowało wzrost wartości prądu w paśmie, co skutkowało spadkiem napięcia do wartości minimalnej. Wzrost prądu pasma doprowadził do adekwatnego wzrostu prądu pobieranego ze źródła.

Prowadzono kilka prób dla różnych przedziałów napięć ładowania i rozładowania kondensatora, dla różnych napięć zasilania i obciążeń. Z przeprowadzonych prób można potwierdzić prawidłowe działanie układu oraz ustawienia sterownika. Dane zebrane podczas testów pozwoliły na prowadzenie dalszych badań eksperymentalnych tego układu. Jednocześnie pokazały, że układ wymaga precyzyjnego sterowania. W przeciwnym przypadku mogą wystąpić duże różnice w prądach pasm, co może powodować nierównomierną pracę silnika.

Po sprawdzeniu prawidłowości układu sterowania, połączeń i układu zasilania pasm, wykonano badania eksperymentalne napędu z układem C-Dump. Układ zasilono analogicznie, jak podczas badań eksperymentalnych prowadzonych z wykorzystaniem układu klasycznego, a więc za pomocą autotransformatora z prostownikiem jednofazowym z układem filtrującym. Wartościami zadawanymi były: moment obciążenia ustawiany za pomocą hamownicy Magtrol, napięcie zasilania, kąt załączenia zasilania pasma i wartości progowe napięcia załączenia oraz wyłączenia ładowania/rozładowania kondensatora C-Dump. Pomiary wykonywano w stanach pracy ustalonej, jeśli było to możliwe, gdy silnik ustabilizował prędkość obrotową po zmianach wartości zadanych kątów. Przyjęto stały przedział zasilania $\alpha_{\Delta} = 30°$.

Pomiary wykonywano dla różnych, losowo wybranych zestawów parametrów sterowania, ponieważ w wielu przypadkach obserwowano oscylację parametrów wyjściowych napędu, duże wahania wartości momentu i prędkości. W przypadku niektórych zestawów parametrów sterowania następowało nawet zatrzymanie silnika. W związku z tym wyznaczenie potrzebnych do weryfikacji parametrów w wielu punktach pracy było niemożliwe, ze względu na wahania wskazań przyrządów pomiarowych. Pomiary wykonano tylko dla zestawów parametrów dla których układ pracował stabilnie.

Pierwszą serię pomiarów składającą się z 7 różnych pomiarów przy różnych napięciach ładowania i rozładowania kondensatora wykonano przy obciążeniu wynoszącym 0,5 Nm i przy stałym kącie wyłączenia wynoszącym -25°. Porównano uzyskane prędkości wirnika w kolejno wykonanych próbach podczas badań eksperymentalnych oraz symulacyjnych.

Analizowano również wartości średnie prądów pobranych ze źródła oraz występujące wartości skuteczne prądów na paśmie silnika. Wyniki okazały się zbieżne na akceptowalnym poziomie, wykluczając dwa przypadki w których praca silnika nie była stabilna.

W kolejnej próbie weryfikacyjnej opracowanego modelu zwiększono wartość momentu obciążenia przy zadanym napięciu zasilania na poziomie 85 V. Wybrano wąski przedział od kąta wyłączenia α_{OFF} równy -28° do -25°. Największą różnicę obserwuje się dla kąta -28°, gdzie błąd wynosi około 9%. W rozpatrywanych punktach pracy silnik pracował z niewielkimi oscylacjami prędkości. Dla pozostałych kątów wartości błędu nie przekraczały 1%.

W eksperymencie dotyczącym mocy generowanej na wale silnika przy obciążeniu 1,5 Nm uzyskano około 286 W dla kąta -27° oraz ponad 340 W dla kąta -28°. Wyniki badań eksperymentalnych i symulacji były zgodne. Porównano wszystkie wyniki z 8 pomiarów, analizując prędkość, moc na wale i prądy, wykazując zgodność danych w granicach akceptowalnych błędów.

Sterowanie badanym układem jest trudniejsze niż w klasycznym układzie z powodu dodatkowych wymagań dotyczących napięć granicznych kondensatora C-Dump. Wymaga to precyzyjnego doboru parametrów, aby zapewnić stabilną pracę. Niewłaściwy dobór parametrów prowadzi do wzrostu oscylacji parametrów pracy napędu, w szczególności dużych wahań prędkości i prądów. Układ jest wrażliwy na właściwy dobór kąta wyłączania, ponieważ po naładowaniu kondensatora nie można zwrócić energii do źródła, co opóźnia demagnetyzację. Aby zapewnić bezpieczną i stabilną pracę silnika, należy stosować wcześniej określone zależności kątów.

10. ANALIZA PORÓWNAWCZA

10.1. KLASYCZNY UKŁAD ZASILANIA I UKŁAD C-DUMP

Celem przeprowadzonych badań była szczegółowa analiza porównawcza napędów z przełączalnym silnikiem reluktancyjnym (SRM) zasilanych klasycznymi półmostkami H oraz niebadanym dotychczas w tym zakresie układem zasilania typu C-Dump. Wykorzystanie symulacji komputerowych umożliwiło porównanie i ocenę parametrów wyjściowych obu układów w tych samych punktach pracy oraz w szerokim zakresie, również w obszarach w których prędkość napędu charakteryzowała się oscylacjami.

Przyjęto kryteria, że wartość skuteczna prądu pasma nie powinna przekraczać 8 A, a moment na wale powinien być większy niż 0 Nm. Na podstawie tych kryteriów przeprowadzono selekcję wyników uzyskanych z symulacji. W symulacjach zadano jednakowe wartości napięć, prędkości oraz kątów wyłączenia dla obu układów, co umożliwiło porównanie ich charakterystyk.

Analizując zależność mocy pobranej ze źródła P_z od kąta wyłączenia α_{OFF} w obu układach z wyselekcjonowanych danych przy prędkości 1500 obr./min i napięciu zasilania U_z = 50V, układ C-Dump pobierał największą moc, wynoszącą 296 W przy kącie -28°. W układzie klasycznym moc pobierana wyniosła około 144 W. Charakterystyka mocy pobieranej dla układu klasycznego była bardziej liniowa, natomiast dla układu C-Dump miała przebieg zbliżony do wykładniczego. Najmniejsza moc na wale silnika w układzie C-Dump wynosiła 102 W, a w układzie klasycznym jedynie 22 W.

Kondensator C-Dump znacząco zwiększa szybkość narastania i opadania prądów w uzwojeniach w porównaniu z półmostkami, co przyczynia się do wzrostu wartości prądów i momentu. Proces ładowania kondensatora umożliwia częściowy zwrot energii do źródła zasilania, co przyspiesza demagnetyzację pasma. W zakresie małych wartości kąta wyłączenia, wzrost mocy pobieranej ze źródła P_z nie przekłada się proporcjonalnie na wzrost mocy na wale silnika, obniżając sprawność napędu w tym zakresie kątów.

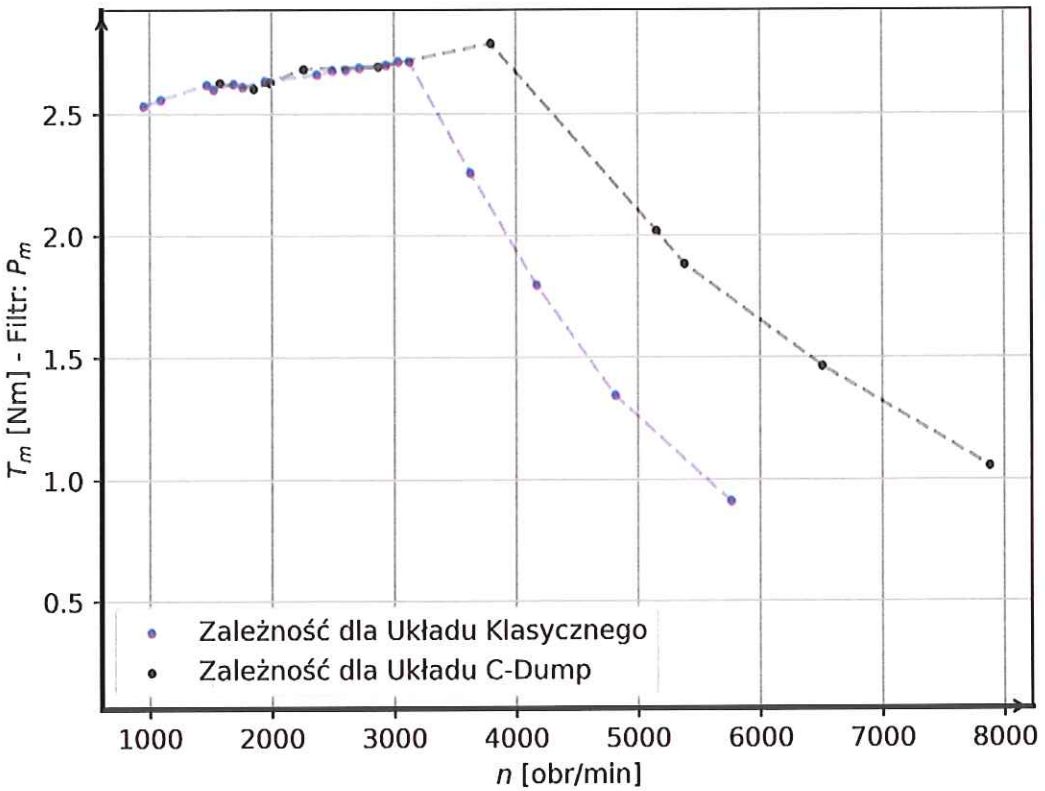
Przy prędkości silnika 3000 obr./min i napięciu zasilania 200 V, układ C-Dump uzyskał maksymalną moc wyjściową wynoszącą 1835 W, podczas gdy układ klasyczny osiągnął moc 836 W. Maksymalne wartości momentu również były wyższe dla układu C-Dump, wynosząc 5,8 Nm w porównaniu do 2,7 Nm w układzie klasycznym. Największe wartości mocy osiągano przy najmniejszych kątach wyłączenia α_{OFF}, natomiast stopniowo zwiększając kąt, moc malała. Najmniejsze wartości uzyskano dla kąta -7°, gdzie moc spadała do 87 W w układzie klasycznym i 129 W w układzie C-Dump.

Dalsze obliczenia przeprowadzono, używając stałych wartości momentu w przyjętej siatce danych wejściowych. Zakresy obejmowały: wartości momentu obciążenia T_L od 0,5 Nm do 2,5 Nm co 0,5 Nm, wartości napięć zasilania U_z od 50 V do 200 V co 25 V, przedział kątów wyłączenia α_{OFF} od -8° do -22° co 2°. W przypadku układu C-Dump obliczenia ograniczono

do napięcia zasilania 200 V. Dodano zakresy zmian maksymalnego napięcia, przy którym rozpoczyna się proces rozładowania kondensatora U_{c_on} od 50 V do 250 V co 50 V oraz przedział napięcia U_{c_hist}, w którym następuje rozładowanie kondensatora, od 5% do 20% napięcia maksymalnego U_{c_on}.

Ograniczenie wartości maksymalnej prądu pasma dobrano doświadczalnie w znamionowych punktach pracy silnika, tj. przy prędkości obrotowej 3000 obr./min i momencie na wale około 2,5 Nm. Wartość ograniczenia prądowego pasma ustawiono tak, aby wartość skuteczna prądu nie przekraczała 3,6 A. Przyjęto więc ograniczenie prądu pasma do 7,5 A, a wyłączenie ograniczenia prądowego na 7 A.

Wszystkie wyniki obliczeń wykonane w zadanych siatkach obliczeniowych poddano filtracji, odrzucając te, dla których moment na wale silnika T_m był mniejszy od 0 (praca generatorowa). Następnie wybrano najlepsze wyniki pod względem uzyskanej mocy napędu (Filtr: P_m) dla zadanych prędkości oraz uzyskiwanej sprawności. Selekcji najlepszych wyników dokonano w przedziałach o szerokości 1000 obr./min. Uzyskane z tej analizy zależności momentu od prędkości obrotowej silnika dla obu badanych układów przedstawiono na rys. 10.1.1.



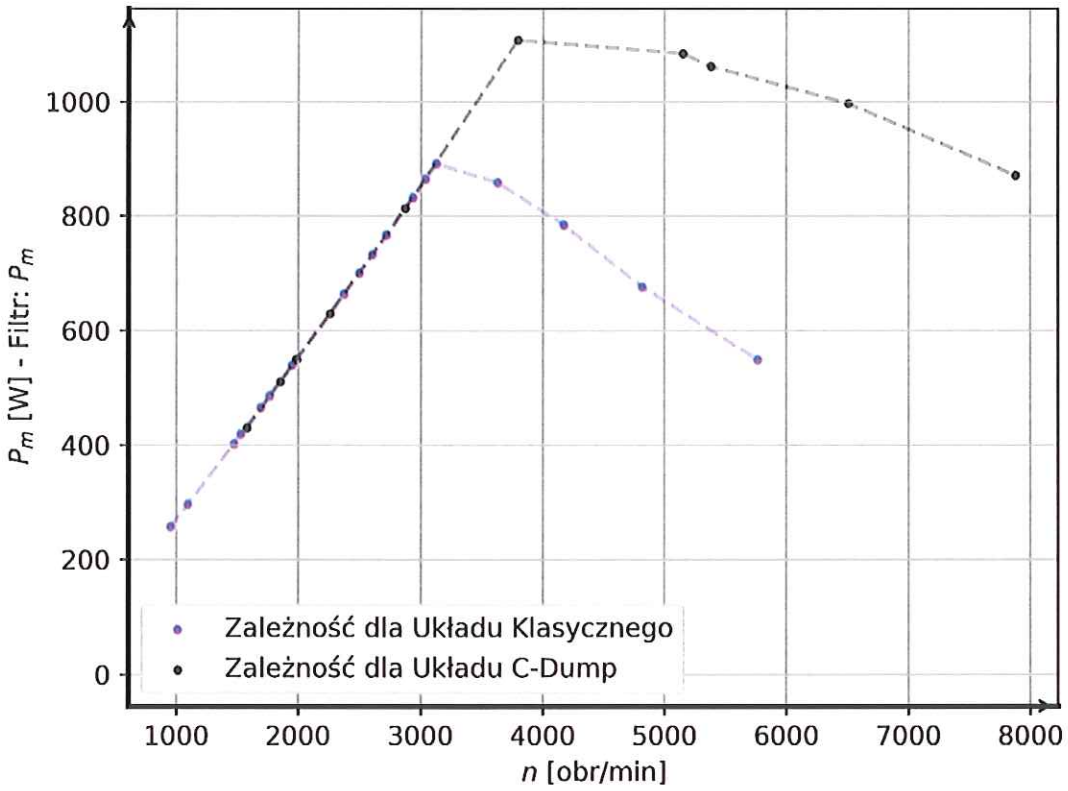
Rys. 10.1.1. Zależność momentu na wale T_m od prędkości silnika dla układu typu C-Dump (kolor czarny) oraz klasycznego (kolor niebieski) dla warunku największej mocy

Na przedstawionej zależności momentu od prędkości obrotowej (rys. 10.1.1) widoczne jest rozszerzenie zakresu prędkości obrotowej silnika, dla której moment przyjmuje w przybliżeniu stałą wartość. W przypadku silnika z układem klasycznym, moment na poziomie 2,5 - 2,7 Nm uzyskuje się do prędkości około 3130 obr./min. Natomiast dla silnika

zasilanego z układu C-Dump, moment wzrasta nieznacznie do około 2,79 Nm i utrzymuje się w przybliżeniu stały do prędkości 3793 obr./min. Niewielkie zmiany momentu w tym zakresie mogą wynikać z przyjętej siatki obliczeniowej.

Zastosowanie układu C-Dump pozwoliło zwiększyć zakres pracy silnika ze stałym momentem w porównaniu do układu klasycznego. W zakresie dużych prędkości uzyskuje się większe wartości momentu. W przypadku układu klasycznego, maksymalna prędkość obrotowa wirnika przy spadku momentu do 0,9 Nm wynosi około 5770 obr./min. Dla układu C-Dump, maksymalna prędkość wynosi około 7880 obr./min., przy spadku momentu do około 1 Nm.

Zależność mocy wyjściowej obu napędów od prędkości obrotowej silnika dla warunku pracy z największą mocą przedstawiono na rys. 10.1.2.

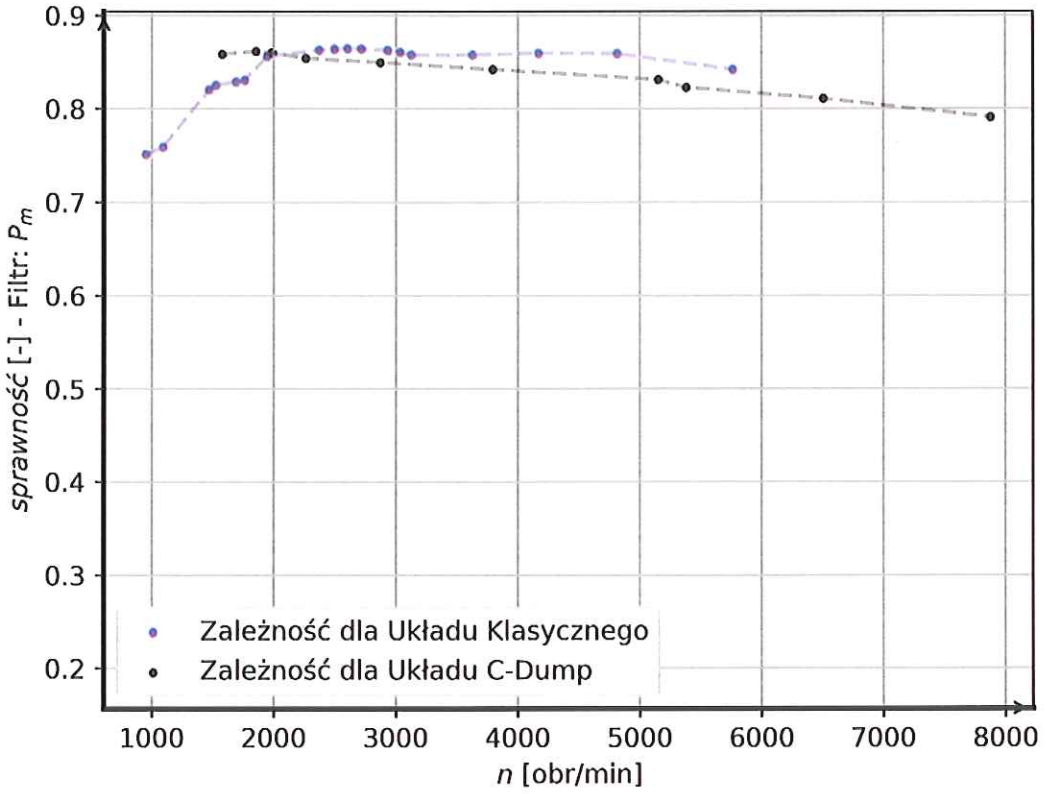


Rys. 10.1.2. Zależność mocy na wale P_m od prędkości silnika dla układu typu C-Dump (kolor czarny) oraz klasycznego (kolor niebieski) dla warunku najwyższej mocy

W przypadku zależności mocy wyjściowej napędów od prędkości obrotowej, moc uzyskiwana przez silnik w początkowym zakresie prędkości rośnie (zakres pracy ze stałym momentem). Dla zastosowanego układu klasycznego maksymalna moc wynosi około 890 W i jest osiągana przy prędkości 3130 obr./min. W zakresie większych prędkości moc spada do około 548 W przy prędkości 5770 obr./min. Po zasileniu silnika z układu C-Dump, w początkowym zakresie prędkości moc wzrasta podobnie jak w układzie półmostków, ale w szerszym zakresie prędkości. Moc wzrasta do prędkości 3793 obr./min, osiągając wartość 1108 W, i utrzymuje wysoką wartość, około 880 W, do prędkości 7880 obr./min.

Porównując zależności uzyskane dla obu układów, stwierdzono wzrost mocy napędu przy zastosowaniu układu zasilania C-Dump oraz zwiększenie zakresu prędkości w porównaniu z układem typowym. Moc silnika wzrosła o 332 W, a zakres regulacji prędkości o 2110 obr./min, przy zachowaniu mocy większej od maksymalnej uzyskiwanej przy zasilaniu z układu półmostków.

Wyniki uzyskane w zakresie porównania zależności sprawności od prędkości obrotowej przedstawiono na rys. 10.1.3.

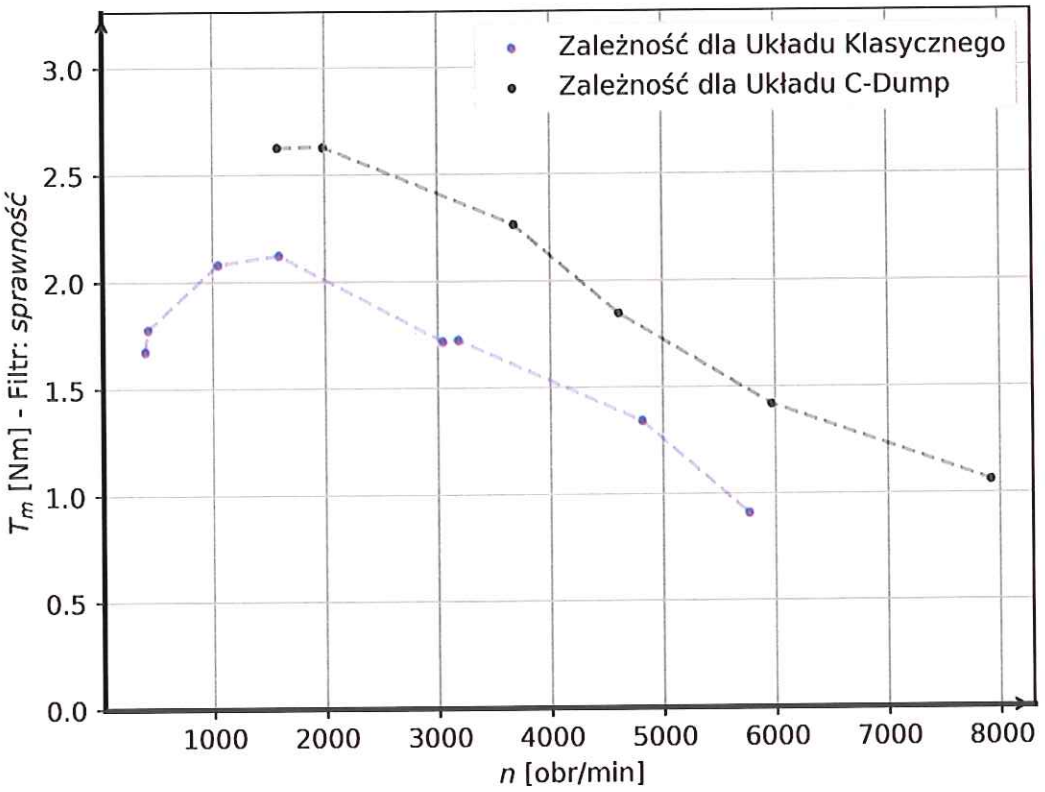


Rys. 10.1.3. Zależność sprawności η od prędkości silnika dla układu typu C-Dump (kolor czarny) oraz klasycznego (kolor niebieski) dla warunku najwyższej mocy

Zależności sprawności napędu SRM dla obu badanych układów wykazują w początkowym zakresie prędkości większą wartość dla układu C-Dump, do prędkości około 2000 obr./min. W dalszym zakresie prędkości większą sprawność uzyskano dla układu klasycznego, z różnicą do 2%. Największą sprawność, ponad 0,86, uzyskano dla prędkości przekraczającej 1850 obr./min w układzie C-Dump. W układzie opartym o półmostki największą sprawność osiągnięto również na poziomie 0,86.

W większości zakresu prędkości układ klasyczny ma większą sprawność, z różnicą między 2-3%, jednak układ C-Dump zapewnia szerszy zakres prędkości pracy. Wartości te nie uwzględniają strat w rdzeniu silnika.

W kolejnym etapie z siatki obliczeniowej wyselekcjonowano wartości, dla których uzyskano największą sprawność, i wyznaczono dla nich zależności. Pierwszą uzyskaną zależnością jest zależność momentu na wale od prędkości obrotowej silnika, którą przedstawiono na rys. 10.1.4.

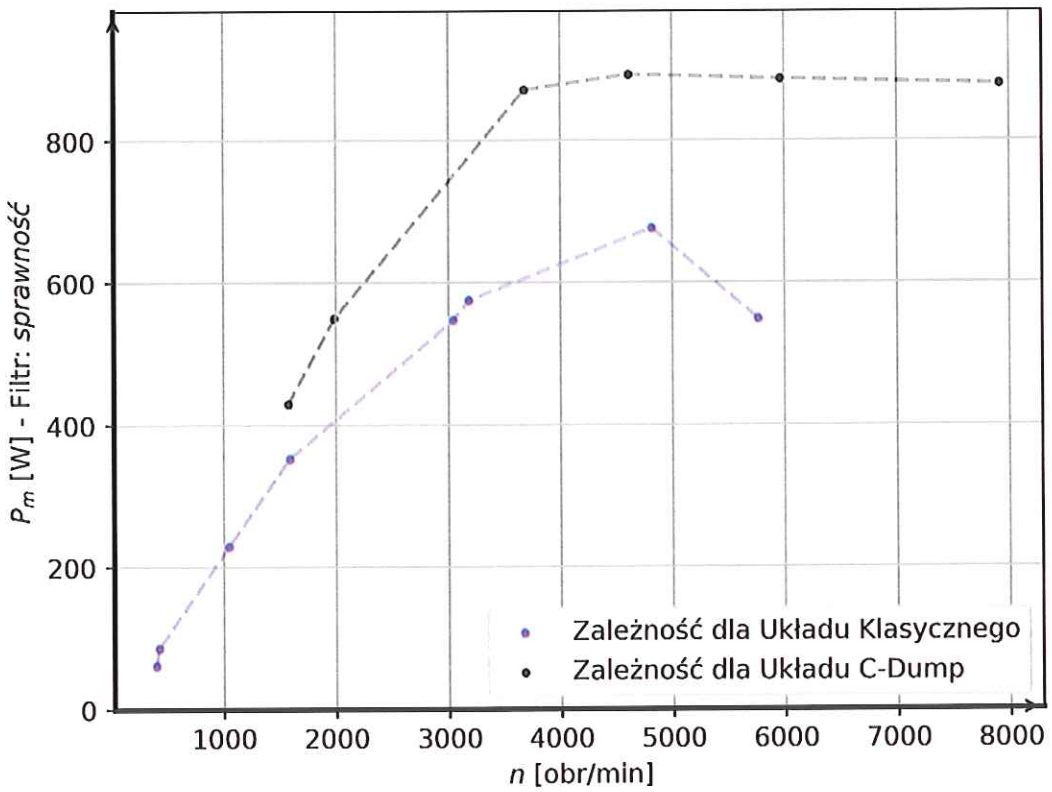


Rys. 10.1.4. Zależność momentu na wale T_m od prędkości silnika dla układu typu C-Dump (kolor czarny) oraz klasycznego (kolor niebieski) dla warunku najwyższej sprawności

Rysunek 10.1.4 przedstawia zależność momentu silnika w funkcji prędkości obrotowej dla warunku największej sprawności. Dla układu klasycznego największą wartość momentu 2,12 Nm osiągnięto przy prędkości około 1590 obr./min, po czym obserwuje się jego stopniowy spadek. Maksymalna prędkość dla tego układu wynosi 5770 obr./min, a moment spada do około 0,9 Nm, co odpowiada punktowi granicznemu przy analizie największych wartości mocy.

W przypadku układu C-Dump, moment jest większy w całym zakresie prędkości w porównaniu do układu klasycznego. Największą wartość momentu, około 2,65 Nm, uzyskano w zakresie najmniejszych prędkości od 1500 do 2000 obr./min. Wzrost prędkości silnika powoduje spadek momentu do około 1 Nm przy maksymalnej prędkości 7920 obr./min, co jest większe niż przy analizie największych mocy.

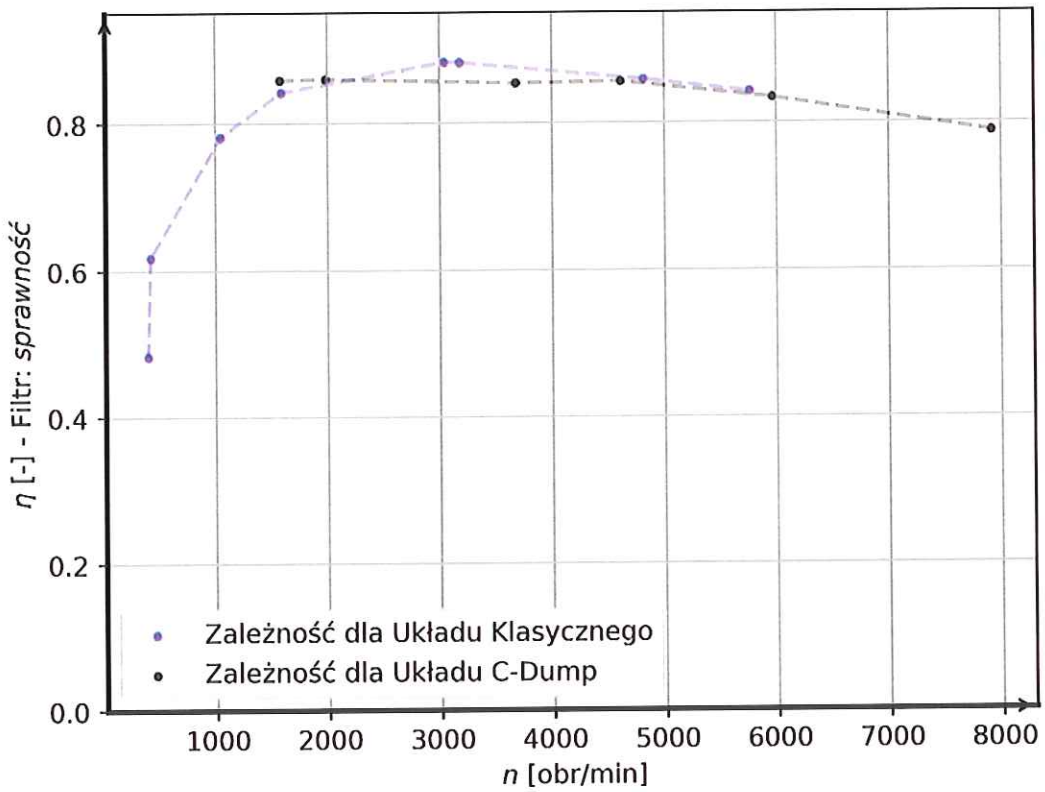
Kolejny wykres przedstawia zależność mocy wyjściowej od prędkości obrotowej przy analizie rozwiązań z największą sprawnością. Zależność tę przedstawiono na rys. 10.1.5.



Rys. 10.1.5. Zależność mocy na wale silnika P_m od prędkości silnika dla układu typu C-Dump (kolor czarny) oraz klasycznego (kolor niebieski) dla warunku najwyższej sprawności

Dla zależności przedstawionych na rys. 10.1.5, w układzie klasycznym moc rośnie do 676 W wraz ze wzrostem prędkości obrotowej do 4820 obr./min. Powyżej tej prędkości moc zaczyna spadać. W przypadku układu C-Dump moc rośnie podobnie, osiągając 891 W, po czym stabilizuje się na poziomie powyżej 870 W do prędkości prawie 7920 obr./min. Jest to większa wartość niż w poprzednich analizach, ale moc w tym zakresie jest mniejsza o prawie 200 W w porównaniu do punktów pracy o największej mocy.

Maksymalne wartości mocy uzyskano dla tych samych prędkości, przy czym w układzie klasycznym moc maksymalna osiągnięta została przy prędkości około 4800 obr./min. Ostatni wykres prezentuje zależność sprawności od prędkości obrotowej dla wyników wyselekcjonowanych pod względem sprawności (rys. 10.1.6).



Rys. 10.1.6 Zależność sprawności η od prędkości silnika dla układu typu C-Dump (kolor czarny) oraz klasycznego (kolor niebieski) dla warunku najwyższej sprawności

W układzie klasycznym sprawność jest większa o około 2% w przedziale prędkości od około 2000 do 4500 obr./min, co są prędkości zbliżone do znamionowej. Dla prędkości 2895 obr./min sprawność wyniosła ponad 0,88 (wartość ta nie uwzględnia strat w rdzeniu silnika). Od prędkości 1700 obr./min do 5100 obr./min sprawność utrzymuje się powyżej 0,85. Dla układu C-Dump uzyskano również wzrost sprawności o 2%, szczególnie widoczny w przedziale prędkości od 3000 obr./min do 5000 obr./min, gdzie sprawność osiąga ponad 0,85. Natomiast dla prędkości większych od 5000 obr./min sprawność zaczyna spadać, osiągając wartość 0,79 przy maksymalnej prędkości dla tego układu.

Przedstawione zależności pokazują, że zastosowanie układu z kondensatorem C-Dump pozwala na poprawę parametrów napędu. Silnik uzyskuje większą moc i moment w szerszym zakresie prędkości, choć przy niewielkim spadku sprawności napędu. [7]

Układ C-Dump generuje większą moc i moment obrotowy w szerokim zakresie prędkości w porównaniu do układu klasycznego. Proces ładowania i rozładowywania kondensatora C-Dump pozwala na poprawę parametrów napędu.[6] Układ C-Dump umożliwia stabilną pracę silnika w szerszym zakresie prędkości przy zachowaniu wysokiej sprawności. Zastosowanie układu C-Dump wymaga przyjęcia odpowiedniej strategii sterowania w zakresie doboru, kątów wyłączenia, parametrów prądowych i napięciowych, aby w pełni wykorzystać jego możliwości.

10.2. WPŁYW NAPIĘCIA ZASILANIA I POJEMNOŚCI KONDENSATORA

Wartość pojemności oraz strategia sterowania procesem ładowania i rozładowywania kondensatora C-Dump odgrywają kluczową rolę w działaniu napędu z silnikiem SRM. Aby określić zakresy kątów sterowania, które zapewniają stabilną pracę badanego napędu, przeprowadzono badania symulacyjne. Zebrano dane obejmujące różne parametry, takie jak prędkość obrotowa (od 1500 obr./min. do 7500 obr./min. z krokiem 1500 obr./min.), napięcie zasilania (od 50 V do 200 V z rozdzielczością 25 V), napięcie załączenia rozładowania kondensatora (od 50 V do 250 V co 50 V), napięcie wyłączenia rozładowywania kondensatora (od 5% do 25% wartości napięć załączania z rozdzielczością 5%), wartość kąta wyłączenia (od -28° do -1° z rozdzielczością co 3°), stały przedział zasilania pasma (30°), oraz pojemności kondensatora C-Dump (10 μF, 22 μF, 47 μF i 100 μF).

Łącznie uzyskano 28000 przypadków obliczeniowych, z których dokonano selekcji pod kątem uzyskiwanych sprawności η, obliczanej jako stosunek mocy na wale silnika do mocy pobieranej ze źródła zasilania. W analizie odrzucono przypadki, w których moment obrotowy T_m był mniejszy od zera, co wskazywało na pracę silnika w strefie hamulcowej. Dodatkowo zastosowano ograniczenie wartości skutecznej prądu pasma I_{f_RMS} do 8 A ze względu na brak ograniczenia prądów w układzie zasilania podczas obliczeń symulacyjnych.

Przeprowadzone badania dla kondensatora o pojemności 10 μF przy stałej prędkości i napięciu zasilania wymagają zmiany nastaw zakresu napięć rozładowywania i ładowania kondensatora. Określono napięcia maksymalne, przy których aktywowany jest tranzystor górny T_{gi} oraz napięcia minimalne, przy których zasilanie pasma z kondensatora jest wyłączane.

Na podstawie zależności mocy na wale silnika od kąta wyłączenia α_{OFF} dla różnych prędkości (1500 i 3000 obr./min) i napięć zasilania (50V, 100V, 150V) wyprowadzono analizę, która pokazuje, że dla różnych ustawień napięć kondensatora C-Dump uzyskuje się różne wartości mocy, które są ważne dla stabilnej pracy silnika.

Dobór pojemności oraz odpowiednie ustawienia napięć kondensatora C-Dump są kluczowe dla pracy napędu z silnikiem SRM. Wartości napięć oraz kąty wyłączenia mają znaczący wpływ na stabilność i moc wyjściową silnika. Dalsze badania mogą skupić się na doborze tych parametrów w celu poprawy sprawności i stabilności napędu.

11. WNIOSKI

Celem pracy było określenie wpływu zastosowania układu zasilania typu C-Dump oraz doboru jego parametrów sterowania na charakterystyki wyjściowe napędu z trójpasmowym przełączalnym silnikiem reluktancyjnym (SRM). Przyjęty cel został w tej pracy osiągnięty.

Badania eksperymentalne i symulacyjne potwierdziły tezę, że możliwe jest zwiększenie mocy napędu oraz rozszerzenie zakresu prędkości obrotowej silnika przy pracy ze stałym momentem dzięki zastosowaniu układu C-Dump.

W poprzednich badaniach układ C-Dump testowano dla niskich napięć (do 36 V) i małej mocy z silnikami dwupasmowymi. W niniejszej pracy rozszerzono badania o wyższe napięcia sieciowe oraz zastosowano silnik trójpasmowy o większej mocy.

Zastosowanie układu zasilania typu C-Dump pozwoliło na osiągnięcie znacznie wyższych wartości momentu w szerszym zakresie prędkości w porównaniu do klasycznego układu zasilania złożonego z półmostków tranzystorowych typu H. Maksymalny moment przy użyciu konwertera C-Dump wyniósł około 2,79 Nm, podczas gdy system klasyczny osiągnął około 2,7 Nm. Badany układ typu C-Dump utrzymywał wyższą wartość momentu nawet przy wzroście prędkości, rozszerzając tym samym zakres pracy SRM.

Konwerter C-Dump umożliwił SRM osiągnięcie wyższych poziomów mocy wyjściowej. Maksymalna moc wzrosła z 891 W (układ klasyczny) do ponad 1100 W (C-Dump), a maksymalna prędkość z 5760 obr./min do 7870 obr./min. Układ typu C-Dump dla kryterium najwyższej mocy osiągał sprawność około 70% dla kąta wyłączenia α_{OFF} = -12°, podczas gdy układ klasyczny osiągnął 60% dla α_{OFF} = -28°. Praca układu C-Dump była bardziej wrażliwa na dobór parametrów sterowania, co wymagało bardziej precyzyjnego dostosowania wartości kąta wyłączenia.

Porównanie wyników dla obu układów zasilania pokazało, że zastosowanie układu C-Dump pozwala na rozszerzenie zakresu prędkości pracy ze stałym momentem o ponad 20% (rys. 10.1.1), wzrost momentu o ponad 3% oraz wzrost mocy mechanicznej o 24%. Dla końca zakresu pracy badanego napędu ze stałą mocą uzyskano wzrost prędkości o 36%, wzrost mocy o 60% oraz wzrost momentu obrotowego o 11%.

Do wad tych układów zaliczyć należy brak możliwości przekazania energii do źródła co wyklucza jego zastosowanie np. w pojazdach. Niewłaściwe ustawienia parametrów może prowadzić do oscylacji, dużych tętnień momentu i prędkości. W szczególności na pracę napędu wpływają pojemność kondensatora oraz jego napięcia ładowania i rozładowania.

Zastosowanie układu C-Dump w trójpasmowym SRM przy precyzyjnym doborze parametrów pozwala na zwiększenie mocy i prędkości obrotowej silnika, przy zachowaniu akceptowalnej sprawności.

12. LITERATURA

[1] Aaliya Farzana P. A., Bindu V. R.: Regenerative Braking of Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle Application. IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), Thiruvananthapuram, India, 2022, pp. 162-167, doi:10.1109/SPICES52834.2022.9774223.

[2] Abdalmagid M., Sayed E., Bakr M.H., Emadi A.: Geometry and Topology Optimization of Switched Reluctance Machines: A Review. IEEE Access, vol. 10, 2022, pp. 5141-5170, doi:10.1109/access.2022.3140440.

[3] Abdel Aziz G.A., Amin M.: High-precision speed control of four-phase switched reluctance motor fed from asymmetric power converter. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 5, 2018, doi:10.1016/j.jesit.2018.03.006.

[4] Abhijith V., Hossain M. J., Lei G., Sreelekha P. A., Kadam S. B.: High Torque Capability Segmented Hybrid Excited Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle Applications. IEEE International Conference on Energy Technologies for Future Grids (ETFG), Wollongong, Australia, 2023, pp. 1-6, doi:10.1109/ETFG55873.2023.10407998.

[5] Ahn J-W., Lukman G.: Switched Reluctance Motor: Research Trends and Overview. China Electrotechnology, 2020.

[6] Tomczewski K., Wróbel K., Rataj D., Trzmiel G.: A Switched Reluctance Motor Drive Controller Based on an FPGA Device with a Complex PID Regulator. Energies, 2021, 14(5):1423, doi:10.3390/en14051423

[7] Wróbel K., Tomczewski K.: Improved C-dump converter for switched reluctance motor drives. IET Power Electronics, vol. 7, 2014, pp. 2628-2635, doi:10.1049/iet-pel.2013.0738.

[8] Xu Z., Li T., Zhang F., Zhang Y., Lee D.-H., Ahn J-W.: A Review on Segmented Switched Reluctance Motors. Energies, 2022, 15, 9212, doi:10.3390/en15239212.

[9] Yan N., Cao X., Deng Z.: Direct Torque Control for Switched Reluctance Motor to Obtain High Torque–Ampere Ratio. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 7, 2019, pp. 5144-5152, doi:10.1109/TIE.2018.2870355.

[10] 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, pp. 1291-1302, doi:10.5370/KIEE.2017.66.8.1297.

[11] Yuan H., Yano S., Qiu S., Kiyota K.: Acoustic Noise Performance of Vector Controlled Switched Reluctance Motor with Radial Force Ripple Suppression. 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Zhuhai, China, 2023, pp. 5016-5021, doi:10.1109/ICEMS59686.2023.10344739.

[12] Zalke R.D., Thosar A.G.: C-dump converter for switched reluctance motor. 2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2017, pp. 1733-1738, doi:10.1109/RTEICT.2017.8256896.

[13] Zine M., Labiod C., Ikhlef M., Srairi K., Benbouzid M.: Improving Efficiency and Power Output of Switched Reluctance Generators through Optimum Operating Parameters. Machines, 2023, 11(8):816, doi:10.3390/machines11080816.