

Prof. dr hab. inż. Wojciech Jarzyna
Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin
tel. 81 5384339; e-mail: w.jarzyna@pollub.pl

Lublin, 03.11.2023 r.

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR. INŻ. BARTOSZA WOSZCZYNY PT. „INDYWIDUALNE, MIĘKKIE PRZEŁĄCZANIE TRANZYSTORÓW W TRÓJFAZOWYM, TRÓJPOZIOMOWYM FALOWNIKU NAPIĘCIA”

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Krakowskiej z dnia 20 września 2023 r.

1. Ocena problematyki rozprawy

Wielopoziomowe falowniki napięcia cieszą się niezmiennym zainteresowaniem naukowców. Pojawia się dość dużo artykułów i komunikatów naukowych z tego zakresu. Dotyczą one zarówno topologii jak również metod sterowania i regulacji tych przekształtników. Zainteresowanie tymi układami wynika z wielu ich zalet, a w szczególności poprawy jakości napięcia, możliwości budowy układów na duże i bardzo duże moce oraz mniejszych wymagań napięciowych tranzystorów i diod. Jedną z zalet układów wielopoziomowych jest ograniczenie strat przełączania półprzewodnikowych elementów aktywnych. W tym obszarze istnieją nadal pewne możliwości, które Doktorant dostrzegł, a za główny kierunek badań w pracy doktorskiej wybrał opracowanie nowej struktury o cechach miękkiego przełączania tranzystorów.

Dlatego podjęcie badań nad opracowaniem nowego układu wielofazowego z miękkim przełączaniem tranzystorów uważam za uzasadniony.

2. Ocena układu rozprawy, zastosowanego piśmiennictwa celu i hipotezy badawczej

Oceniana praca doktorska liczy 114 stron i podzielona została na dziewięć rozdziałów merytorycznych, spis bibliografii, wykaz oznaczeń oraz streszczenie w wersji polskiej i angielskiej.

Merytoryczny układ rozprawy jest zgodny z wymaganiami stawianymi przed pracami naukowymi. W początkowej części, praca zawiera wprowadzenie, w którym Doktorant charakteryzuje zagadnienia budowy trójfazowych falowników napięcia z miękkim przełączaniem tranzystorów. Konstrukcje te krótko charakteryzuje ze względu na zastosowane elementy i podstawowe własności. W szczególności podaje ich wady, w tym między innymi niebezpieczeństwo załączenia tranzystorów przy nierozładowanych kondensatorach komutacyjnych czy niebezpieczeństwo wyłączenia tranzystorów

pomocniczych przy różnym od zera prądzie elementu indukcyjnego. Z tych krótkich, acz treściwych rozważań, Doktorant dochodzi do przekonania, że w dotychczas proponowanych układach miękkiego przełączania tranzystorów w trójfazowych, trójpoziomowych falownikach napięcia, przełączanie zarówno tranzystorów głównych jak i pomocniczych wymaga dość złożonego algorytmu sterowania, co prowadzi do występowania niepożądanego wieloetapowości pracy falownika. W rezultacie takiej konkluzji, Doktorant sformułował główny cel rozprawy, a jest nim: *omówienie działania trójfazowego, trójpoziomowego falownika napięcia z diodami poziomującymi, w którym zastosowano układ miękkiego przełączania w celu ograniczenia strat powstających podczas załączania i wyłączania tranzystorów*. Doktorant też wysuwa przypuszczenie, że w proponowanym przez niego rozwiązaniu *nie mogą wystąpić niebezpieczne stany pracy skutkujące jego uszkodzeniem, a przede wszystkim nie jest możliwe udarowe rozładowanie kondensatora przez załączony tranzystor oraz nie wystąpi nagle przerwanie prądu płynącego przez którykolwiek dławik dodatkowy, co poprawia istotnie pewność działania i niezawodność pracy trójpoziomowego falownika z proponowanymi układami miękkiego przełączania*. Zacytowany fragment można przyjąć, że spełnia cechy tezy naukowej, chociaż sam Autor nigdzie w pracy jasno nie deklaruje co jest tą tezą lub jaki jest problem badawczy jego badań.

Przystępując do badań Doktorant rozważał układ falownika trójpoziomowego z diodami poziomującymi. W rozdziale drugim przedstawił ogólne rozważania dotyczące strat w podstawowych podzespołach falownika. Wyjaśniając metody pracy z miękkim przełączaniem opisał, znane z wcześniejszych prac zespołu energoelektroniki Politechniki Krakowskiej, metody sterowania grupowego i indywidualnego. Jego autorskim opisem jest natomiast część dotycząca sterowania układami trójpoziomowymi.

Kolejny, czwarty rozdział jest jednym z kluczowych rozdziałów rozprawy. Doktorant wykorzystując dorobek zespołu, nadbudowuje go o topologię i sterowanie trójfazowego trójpoziomowego falownika. Szczegółowo opisuje kolejne etapy w cyklu pracy przekształtnika. Dla każdego takiego etapu formułuje równania i ilustruje przebiegi przejściowe. Wyróżnia różne grupy tranzystorów i obwodów komutujących. Jedną z przyjętych przez Niego zasad sterowania dla zaproponowanego układu miękkiego przełączania jest nieingerowanie w zastosowany algorytm sterowania tranzystorów głównych falownika w układzie bez wspomaganie przełączania. Opracowany algorytm sterowania tranzystorów pomocniczych zakłada, że sygnały sterujące tranzystorów pomocniczych zależą od stanów pracy tranzystorów głównych, a nie odwrotnie. Implikuje to cechę, że sterowanie tranzystorów pomocniczych nie wpływa na sygnały sterujące tranzystorów głównych, dlatego takie rozwiązanie może być stosowane z dowolnym algorytmem sterowania opartym o modulację szerokości impulsów, nawet w układach sterowania wektorowego.

Badania laboratoryjne Doktorant przeprowadził na stanowisku z zaprojektowanym i wykonanym przez Niego przekształtnikiem. W celu zachowania dużego zapasu niezawodności, moc przekształtnika ograniczył do 1 kW, a napięcie w obwodzie prądu

stałego do 60V. Zarejestrowane przebiegi z badań laboratoryjnych potwierdziły, że przełączenia tranzystorów głównych i pomocniczych mają łagodny charakter.

Badania numeryczne zrealizował dla przekształtnika i odbiorów odbiegających znacznie od modelu laboratoryjnego. Wykonane obliczenia i symulacje obejmowały wieloraką analizę przypadków. Badano bowiem:

- układy z obwodami rezonansowymi o różnych wartościach krotności maksymalnej napięcia na kondensatorze rezonansowym w odniesieniu do napięcia pojedynczego źródła zasilania U_{DC} ,
- układ obciążano odbiornikiem RL o regulowanym kącie przesunięcia fazowego oraz silnikiem indukcyjnym klatkowym w pracującym w różnych stanach pracy.

W rozdziale tym Doktorant obliczył i analizował wielkość strat mocy. Obliczenia te wykonał wielowariantowo, a w prezentacji wyników zwrócił uwagę na zależność strat od wcześniej zdefiniowanego współczynnika k oraz częstotliwości przełączania. Obliczone wyniki odniósł do przypadku z twardym przełączaniem tranzystorów. Rozbudowane wyjaśnienia i interpretacje wyników dobrze świadczą o umiejętności oceny wyników i formułowaniu wniosków.

W rozdziale ósmym Doktorant badał różne aspekty niezawodności pracy stworzonego przez siebie rozwiązania. Szczególnie dokładnie analizował przypadki niezachowania warunków łagodnego przełączania tranzystorów.

W podsumowaniu rozprawy Doktorant powrócił do opisu zrealizowanych w rozprawie zadań, krótko wymienił co zrobił w poszczególnych rozdziałach. Pojawiły się tam również plany dotyczące dalszych zamierzonych prac badawczych oraz dostrzeżonych kolejnych problemów, które powinny być przebadane w przyszłości. W rozdziale tym zabrakło jednak odniesienia do podanego we wstępie celu rozprawy oraz stwierdzenia, czy badany problem naukowy Doktorant uważa za rozstrzygnięty. Uwagi dotyczące tego spostrzeżenia zawarte są w części piątej niniejszej recenzji.

3. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

Zastosowane przez Doktoranta metody badawcze są zgodne z metodyką prac doktorskich i składają się na nie:

- a) motywacja podjęcia tematu, określenie celów badawczych i wskazanie problemu naukowego,
- b) studia literaturowe, analiza rozwiązań opisywanych w literaturze,
- c) formułowanie własnych modeli i analiza stanów,
- d) projekt, budowa, uruchomienie i badania modelu laboratoryjnego,
- e) badania modelowe i prace symulacyjne,
- f) studia przypadków potwierdzających uzyskanie celów,
- g) formułowanie wniosków.

Wymienione metody badawcze realizowane były w poszczególnych rozdziałach pracy doktorskiej:

- Ad.a) Zasadność podjęcia tematu przedstawiona jest w rozdziale pierwszym. W rozdziale tym Doktorant sformułował cel badań, a z dalszej treści wnioskuje się o problemie badawczym.
- Ad.b) Studia literaturowe zawarte są w rozdziałach drugim i trzecim. W przedstawionym przeglądzie rozwiązań falowników o miękkim przełączaniu Doktorant uwzględnił osiągnięcia naukowe zespołu energoelektroniki Politechniki Krakowskiej.
- Ad.c) Formułowaniu własnych modeli poświęcony jest rozdział czwarty. Jest to kluczowy rozdział, w którym Doktorant przedstawił topologię, wyprowadził zależności oraz podał zasady sterowania trójpoziomym falownikiem o przełączaniu miękkim.
- Ad.d) Projekt, budowa, uruchomienie i badania modelu laboratoryjnego opisane są w rozdziale piątym, który zawiera dokumentację wykonanych badań laboratoryjnych dowodzącą praktycznego spełnienia wyprowadzonych zależności rozwiązania.
- Ad.e) Badania modelowe i symulacyjne uwzględniające różne obciążenia i wzajemne relacje w obwodzie przełączania opisane są w rozdziale szóstym. badania te mają charakter rozszerzający. Szkoda, że przynajmniej w części nie uwzględniają parametrów i badań laboratoryjnych opisanych w rozdziale piątym.
- Ad.f) Studia przypadków potwierdzających uzyskanie celów zawarte są w rozdziałach siódmym i ósmym. Doktorant zawarł w nich obliczenia numeryczne potwierdzające uzyskanie własności istotnych do osiągnięcia celów oraz wykonał badania rozszerzające o charakterze testującym układ w stanach pracy określonych przez Autora jako niepoprawne, a wynikających np. z niewłaściwego doboru elementów układu rezonansowego.
- Ad.g) Doktorant formułował wnioski z badań na bieżąco, począwszy od czwartego do ósmego rozdziału. Jest to jak najbardziej pożądane działanie. Wnioski te są celne i dość szczegółowe. Mankamentem jest jednak brak w rozdziale dziewiątym końcowej rekapitulacji uzyskanych wyników. Zarzut ten jest rozwinięty w części piątej niniejszej recenzji.

4. Ocena oryginalności osiągnięcia naukowego

Jako oryginalne osiągnięcia Doktoranta uznaję:

- Opracowanie struktury i zaproponowanie sterowania trójfazowego trójpoziomowego falownika o miękkim przełączaniu, w którym zarówno tranzystory główne jak i pomocnicze przełączane są w sposób łagodny.
- Sformułowanie opisu zaproponowanego modelu przedstawiającego założenia dotyczące doboru powyższych parametrów oraz wpływ dobieranych podzespołów LC na procesy przełączania tranzystorów głównych i pomocniczych.

- Szczegółowe opracowanie algorytmu sterowania.
- Potwierdzenie uzyskania własności takiego sterowania tranzystorów pomocniczych, które nie wymaga ingerencji w sterowanie tranzystorów głównych. Własność tę Doktorant uzyskał poprzez przyjęcie sterowania tranzystorów głównych jako sterowanie nadrzędne. Tranzystory pomocnicze włączane są z niewielkim opóźnieniem względem głównych, przy czym ich wyłączenie może już odbywać się równocześnie z głównymi.
- Zaprojektowanie, uruchomienie i przebadanie modelu laboratoryjnego.
- Przeprowadzenie dyskusji nt. własności układu, w którym wyszczególniono również mankamenty opracowanego układu przekształtnika.

5. Uwagi, zagadnienia problemowe oraz pytania nt. zauważonych nieprawidłowości lub wątpliwości recenzenta

Praca została zredagowana bardzo starannie. Zastosowane konstrukcje zdań są odpowiednie i mimo złożoności przekazywanej treści, przekaz myśli jest jednoznaczny. Rysunki i ich opisy są wykonane bardzo starannie, co znakomicie pozwala analizować uzyskane wyniki. Pojedyncze uchybienia nie zasługują na poświęcanie im uwagi. Rzadko się zdarza, ale do części redakcyjnej recenzent nie sporządził żadnych uwag.

Pytania główne dotyczące konstrukcji rozprawy naukowej sformułowano w podpunktach A.+C.. Ustosunkowanie się do nich jest kluczowe ze względu na formalny wymóg jaki stawia się rozprawom doktorskim.

- A. Problem badawczy rozprawy jest dość jasny, ale niestety w rozprawie nie odnaleziono bezpośredniego wskazania, jak Doktorant formułuje ten problem lub jaką wskazuje tezę naukową.
- B. Recenzent nie ma wątpliwości, że cel rozprawy został osiągnięty a problem naukowy rozwiązany, jednak doktorant nie sformułował takich wniosków. Powinny się one znaleźć w rozdziale dziewiątym. Proszę o przedstawienie takich konkluzji.
- C. W podsumowaniu zabrakło informacji, co Doktorant uważa za swoje największe osiągnięcia?

Inne uwagi mają charakter szczegółowy i podane są w podpunktach a.+e. .

- a. Czym grozi utrata parametrów elementów L i C w układzie przełączania tranzystorów? Czy w takich warunkach można korygować pracę układu poprzez zmianę parametrów modulacji?
- b. Jak interpretuje Pan oscylacje napięć na tranzystorach T11 i T11a (np. Rys. 5.4)? Czy można je ograniczyć i czy nie stwarzają dodatkowych zagrożeń zwłaszcza przy rozstrojeniu układu przełączania?
- c. Jakie wartości THD napięcia i prądu fazowego uzyskano dla przekształtnika uruchomionego w warunkach laboratoryjnych? Jakie metody poprawy THD można zastosować?

- d. W pracy brak jest porównania wyników badań laboratoryjnych z modelem obliczeniowym. Czy wykonano badania symulacyjne dla modelu o parametrach powtarzających badania laboratoryjne?
- e. Czy częstotliwość modulacji dla stosowanych tranzystorów IGBT może być podwyższona? Wykazane w rozdziale szóstym częstotliwości są nadal dużo niższe od ograniczeń tych tranzystorów. Czy wprowadzenie tranzystorów MOSFET SiC i wyższych częstotliwości przełączania nie wywoła dodatkowych problemów z zachowaniem warunków miękkiego przełączania, w szczególności w różnych stanach obciążenia i temperatury pracy?

Doktoranta proszę o ustosunkowanie się do przedstawionych uwag formie pisemnej i przesłanie odpowiedzi za pośrednictwem korespondencji e-mail.

6. Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Na podstawie przedstawionej dyskusji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Bartosza Woszczyzny stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz szczegółową wiedzą w zakresie modelowania i projektowania trójfazowych, trójpoziomowych falowników napięcia o miękkim przełączaniu. Realizując pracę naukową dowiódł posiadania umiejętności stosowania różnych metod badawczych co świadczy o posiadaniu kwalifikacji i umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

Uwzględniając wymienione argumenty wnioskuję, aby rozprawę doktorską mgra inż. Bartosza Woszczyzny uznać za istotny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Stwierdzam, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartosza Woszczyzny do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Krakowskiej.

