

WPLYNĘŁO

dn.....2024...01...10.....

Gdynia, 2024-01-02

prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki
Katedra Elektroniki Morskiej
Wydział Elektryczny
Uniwersytet Morski w Gdyni

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Rafała Kopacza

nt. „Medium Voltage Power Converters with SiC Power Devices”

1. Uwagi ogólne

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Kopacza została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej. Rozprawa ta dotyczy badania właściwości przetwornic impulsowych średniego napięcia zawierających półprzewodnikowe przyrządy mocy wykonane z węgliku krzemu. Celem pracy było zbadanie możliwości efektywnego przekształcania energii elektrycznej w zakresie średniego napięcia (na poziomie paru kilowoltów) za pomocą przetwornic impulsowych zawierających półprzewodnikowe przyrządy mocy wykonane z węgliku krzemu. Badanie te obejmowały zarówno metody precyzyjnej charakteryzacji pojemności wyjściowej tranzystora mocy MOS wykonanego z węgliku krzemu (SiC MOSFET), metody dokładnego wyznaczania mocy traconej w takich tranzystorach, analizę właściwości wybranych układów zasilających średniego napięcia zawierających rozważane tranzystory, opracowanie metody projektowania wysokosprawnych przetwornic dc-dc pracujących w zakresie wysokich częstotliwości, opracowanie techniki sterowania takimi przetwornicami oraz sposób uzyskiwania w pełni miękkiego przełączania tranzystorów SiC MOSFET w zakresie średnich napięć.

Poruszane w pracy zagadnienia są ważne z punktu widzenia energoelektroniki. Wyniki uzyskane przez Doktoranta mogą być także przydatne dla projektantów nowoczesnych układów impulsowego przekształcania energii dedykowanych do pracy w zakresie średnich napięć. Efekty tych badań mogą pozwolić na uzyskanie wyższej sprawności rozważanej klasy układów w porównaniu do takich układów zawierających klasyczne przyrządy półprzewodnikowe wykonane z krzemu.

Tematyka podjęta w ocenianej pracy doktorskiej jest aktualna i ważna, a cząstkowe problemy rozważane przez Doktoranta są również poruszane w pracach innych autorów.

Prace te zostały opublikowane w ostatnich kilku latach. Dowodzi to trafnego wyboru zagadnienia badawczego i jego aktualności.

Doktorant przedstawił wyniki swoich badań, które zostały już opublikowane. Wyniki te dowodzą, że zastosowanie przyrządów półprzewodnikowych wykonanych z węglika krzemu może pozwolić na istotne zmniejszenie strat łączeniowych w takich przyrządach pracujących w przetwornicach impulsowych dedykowanych do zastosowań w zakresie średniego napięcia. Zaproponowane przez Doktoranta metody pomiarów i obliczeń mogą być użytecznym narzędziem dla projektantów takich układów. Przedstawione w rozprawie wyniki badań dowodzą wysokich kompetencji Doktoranta w zakresie projektowania i konstrukcji układów energoelektronicznych, techniki pomiarowej, modelowania i analizy właściwości elementów i układów elektronicznych oraz planowania i realizacji badań naukowych.

2. Ocena merytoryczna pracy

Praca jest napisana w języku angielskim, liczy łącznie 143 strony i zawiera 4 rozdziały, wykaz cytowanej literatury, spis treści, streszczenia w języku polskim i angielskim, podziękowania, objaśnienia skrótów oraz wykazy rysunków i tabel.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawił wprowadzenie do tematyki rozprawy. Uzasadnił, dlaczego układy energoelektroniczne średniego napięcia są ważne. Wskazał możliwości zastosowania przyrządów półprzewodnikowych z węglika krzemu w układach należących do tej klasy. Porównał na wybranych przykładach wartości kluczowych parametrów krzemowych tranzystorów IGBT oraz tranzystorów MOS mocy wykonanych z węglika krzemu. Porównanie takie przedstawiono zarówno dla tranzystorów dyskretnych, jak i dla modułów mocy zawierających takie tranzystory. Doktorant opisał typowe rozwiązania układowe przetwornic stosowane w zakresie średnich napięć, a następnie uzasadnił podjęcie tematyki badawczej oraz sformułował cel oraz zakres pracy. Ze względu na fakt, że podstawą ubiegania się Doktoranta o stopień naukowy jest cykl 5 publikacji naukowych, Doktorant podał dane bibliometryczne tych prac oraz wskazał swój udział procentowy przy ich powstawaniu. Przedstawił też inne swoje osiągnięcia naukowe obejmujące poza głównym osiągnięciem także 5 artykułów opublikowanych w czasopiśmie, 9 artykułów konferencyjnych oraz uzyskanie stypendiów ministra za wybitne osiągnięcia dla studentów oraz dla doktorantów i wybitnych młodych naukowców.

Rozdział drugi zawiera opis osiągnięć naukowych przedstawionych w artykułach stanowiących integralną część ocenianej rozprawy. Doktorant pogrupował te artykuły w 3 grupy opisane w poszczególnych podrozdziałach. W każdym z podrozdziałów krótko

scharakteryzował treść rozważanych artykułów, najważniejsze osiągnięcia naukowe prezentowane w każdym z tych artykułów oraz własny wkład w ich powstanie. Wkład ten jest w każdym przypadku istotny, a udział procentowy Doktoranta wynosi od 25% do 50%. A zatem jest on znaczący i większy od przeciętnego udziału autorów tych prac. W trzech podrozdziałach opisano osiągnięcia naukowe Doktoranta w zakresie modelowania półprzewodnikowych przyrządów mocy wykonanych z węgliku krzemu i przetwornic dedykowanych do zastosowań w zakresie średnich napięć, koncepcji układowych przetwornic impulsowych średniego napięcia oraz przetwornic DC-DC średniego napięcia wykorzystujących przyrządy półprzewodnikowe z węgliku krzemu. W każdym z omawianych artykułów występuje analiza stanu wiedzy w zakresie tematyki artykułu, prezentacja własnych koncepcji, wyniki weryfikacji tych koncepcji oraz wnioski z przeprowadzonych badań. Wkład Doktoranta w powstanie omawianych w rozdziale drugim prac naukowych obejmował m.in. realizację takich zadań jak:

- przygotowanie przeglądu literatury na temat pojemności pasożytniczych tranzystora SiC MOSFET i metod ich charakteryzacji,
- zaprojektowanie i konstrukcję układu sterowania systemu pomiarowego,
- udział w badaniach eksperymentalnych,
- analiza, przetwarzanie i ocena wyników badań,
- opracowanie pierwszej wersji artykułu i pełnienie zadań autora korespondencyjnego,
- przygotowanie przeglądu literatury na temat różnych metod realizacji przetwornic impulsowych średniego napięcia z przyrządami półprzewodnikowymi wykonanymi z węgliku krzemu,
- zaprojektowanie i konstrukcja układu do pomiaru właściwości systemów wielopoziomowych i quasi-dwupoziomowych,
- opracowanie nowej koncepcji sterowania TCM-Q2L dedykowanej dla wysokosprawnych i nieizolowanych przetwornic DC-DC z tranzystorami z węgliku krzemu pracującymi w warunkach miękkiego przełączania,
- opracowanie nowej metody balansowania napięcia w przetwornicach DC-DC typu Q2L,
- udział w analizie teoretycznej opracowanego systemu,
- przygotowanie przeglądu literatury na temat różnych metod realizacji nieizolowanych przetwornic DC-DC średniego napięcia z przyrządami półprzewodnikowymi z węgliku krzemu i porównanie ich z innymi metodami opisanymi w literaturze,
- opracowanie modelu symulacyjnego i przeprowadzenie symulacji,

- zaprojektowanie i konstrukcja przetwornicy oraz układu pomiarowego,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych,
- opracowanie nowej koncepcji zastosowania kondensatorów o małej pojemności włączonych równolegle do zacisków tranzystorów MOSFET z węgla krzemu w celu obniżenia strat przełączania, zwiększenia sprawności energetycznej przetwornicy DC-DC i zredukowania stromości nachylenia dv/dt przy sterowaniu sygnałem quasi-prostokątnym,
- przygotowanie przeglądu literatury na temat różnych metod realizacji miękkiego przełączania w przetwornicach DC-DC pracujących w zakresie średniego napięcia z porównaniem do innych koncepcji literaturowych.

Wszystkie wymienione zadania miały kluczowe znaczenie dla powstania przedmiotowych artykułów naukowych. Dowodzi to istotnego wkładu Doktoranta w powstanie tych artykułów.

Rozdział trzeci jest zasadniczą częścią rozprawy i zawiera 5 podrozdziałów stanowiących kopie 5 artykułów, których współautorem jest Doktorant. Są to następujące prace:

- [P1] J. Rąbkowski, M. Zdanowski, R. Kopacz, F. Gonzalez-Hernando, I. Villar and U. Larranaga, "From the Measurement of COSS-VDS Characteristic to the Estimation of the Channel Current in Medium Voltage SiC MOSFET Power Modules," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 72, pp. 1-10, 2023,
- [P2] J. Rąbkowski, H. Skoneczny, R. Kopacz, P. Trochimiuk, G. Wrona, "A Simple Method to Validate Power Loss in Medium Voltage SiC MOSFETs and Schottky Diodes Operating in a Three-Phase Inverter", Energies, 13, 4773, 2020.
- [P3] P. Trochimiuk, R. Kopacz, K. Frąc and J. Rąbkowski, "Medium Voltage Power Switch in Silicon Carbide—A Comparative Study," IEEE Access, vol. 10, pp. 26849-26858, 2022.
- [P4] R. Kopacz, M. Harasimeczuk, P. Trochimiuk, G. Wrona and J. Rąbkowski, "Medium Voltage Flying Capacitor DC-DC Converter With High-Frequency TCM-Q2L Control," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 4, pp. 4233-4248, April 2022.
- [P5] R. Kopacz, M. Harasimeczuk, P. Trochimiuk and J. Rąbkowski, "Investigation of Soft-Switching QSW Technique in DC/DC SiC-Based Flying Capacitor Converter With Q2L Control," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 70, no. 9, pp. 9035-9045, Sept. 2023.

Każdy z powyższych artykułów zamieszczony jest czasopiśmie z listy ministerialnej, a przypisana im wartość punktowa mieści się w zakresie od 100 do 200 punktów. Szczególnie wysokim prestiżem wśród specjalistów z zakresu elektroniki oraz elektrotechniki cieszą się

prace oznaczone jako [P1], [P4] oraz [P5] zaliczane do pierwszego kwartyła wg bazy WoS. Publikacja wyników Doktoranta w tych czasopismach dowodzi uznania dla wyników jego badań w międzynarodowym środowisku naukowym.

W pracy [P1] opisano wewnętrzną strukturę tranzystora SiC MOSFET, ze szczególnym uwzględnieniem pojemności wyjściowej takiego tranzystora zawartego w modułach mocy. Zaproponowano nową i prostą w realizacji metodę wyznaczania charakterystyki $C_{oss}(V_{DS})$ dla takich tranzystorów. Przedyskutowano relację między prądem drenu a prądem kanału. Wskazano możliwość zastosowania opracowanej metody przy szacowaniu strat przełączania w przetwornicach impulsowych. Przeprowadzono weryfikację praktycznej użyteczności opracowanej metody dla modułu z tranzystorami SiC MOSFET o dopuszczalnym napięciu 1,7 kV i dopuszczalnym prądzie 0,9 kA. Oszacowano błąd wyznaczenia wartości ładunku Q_{oss} na 4,5 %, co jest wartością zadowalającą.

W pracy [P2] przeprowadzono analizę teoretyczną rozplywu prądu między kanał tranzystora SiC MOSFET a diodę antyrównoległą w czasie przełączania. Oceniono wpływ tego podziału prądu na straty łączeniowe w falowniku dwupoziomowym pracującym w zakresie średniego napięcia. Zaproponowano nową metodę szacowania takich strat w stanie ustalonym. Opracowano odpowiednią procedurę obliczeniową i zaimplementowano ją w programie MATLAB. Przeprowadzono weryfikację doświadczalną poprawności tej metody w układzie półmostkowym. Wyznaczono straty mocy w tranzystorach i w diodach dla modułu mocy o dopuszczalnym napięciu 3,3 kV oraz dopuszczalnym prądzie 450 A.

Praca [P3] zawiera przegląd i porównanie wybranych układów przetwornic impulsowych pracujących w zakresie średnich napięć zawierających tranzystory mocy wykonane z węgliku krzemu. Rozważano układy dwupoziomowe oraz wielopoziomowe. Zmierzone straty mocy w przyrządach półprzewodnikowych dla każdej z rozważanych konfiguracji. Przeprowadzono szczegółową analizę zalet i wad każdego z rozważanych układów pod kątem sprawności energetycznej, wymagań dotyczących sterowników bramek tranzystorów, złożoności obwodów, niezbędnych systemów chłodzenia, niezawodności oraz kosztów realizacji.

Praca [P4] zawiera opis nowej koncepcji sterowania TCM-Q2L dla kompaktowej nieizolowanej przetwornicy DC-DC o wysokiej sprawności i zawierającej miękko przełączane tranzystory SiC MOSFET. W pracy tej zaproponowano nową metodę bilansowania napięć w przetwornicach DC-DC o sterowaniu Q2L. Przedstawiono opis teoretyczny działania przetwornicy w trybie TCM, uwzględniający także jej pracę w warunkach rezonansowych. Przeprowadzono symulację rozważanej przetwornicy w programie Sabre i porównano uzyskane wyniki obliczeń z wynikami pomiarów. Porównano

też właściwości rozważanego układu z innymi układami tej samej klasy opisanymi w literaturze. Uzyskano wysoką sprawność energetyczną sięgającą aż 99,1% przy mocy szczytowej 10 kW i napięciu wejściowym 1,5 kV.

W pracy [P5] zaproponowano nową koncepcję wykorzystania kondensatorów o małej pojemności włączonych równolegle do zacisków wyjściowych tranzystorów SiC MOSFET w celu zmniejszenia strat przełączania w oparciu o technikę fali quasi-kwadratowej. Zabieg ten pozwala na maksymalizowanie sprawności przetwornicy DC-DC przy jednoczesnym ograniczaniu wartości pochodnej dv/dt . W cytowanej pracy zawarto wnikliwą analizę teoretyczną proponowanej przetwornicy z uwzględnieniem dodatkowego rezonansu związanego z zastosowaniem dodatkowych kondensatorów. Przedstawiono też analizę strat mocy w rozważanym układzie. Sformułowano zalecenia projektowe dotyczące doboru kondensatorów pomocniczych, umożliwiające pełne wykorzystanie możliwości tranzystorów SiC MOSFET w przetwornicach DC-DC średniego napięcia. Badania prototypu zaprojektowanego i wykonanego przez autorów cytowanej pracy wykazały, że układ ten umożliwia uzyskanie sprawności energetycznej równej aż 99,5% przy mocy maksymalnej 15 kW i napięciu wejściowym do 1,5 kV. Porównano właściwości opracowanego układu z innymi rozwiązaniami układowymi opisanymi w literaturze. Wykazano, że jest on lepszy od innych układów w zakresie średniego napięcia.

Rozdział 4 stanowi podsumowanie pracy, w którym Doktorant wskazał swoje najważniejsze osiągnięcia naukowe opisane w rozprawie i stwierdził, że cel badań został osiągnięty. Wskazane zostały także potencjalne obszary dalszych badań Doktoranta.

Wykaz literatury zawiera łącznie 162 pozycje, w tym 18 prac, których współautorem jest Doktorant. Cytowane są zarówno prace klasyczne, jak i aktualne prace opublikowane w ciągu ostatnich 10 lat. Dobór cytowanych prac świadczy o bardzo dobrej orientacji Doktoranta we współczesnej wiedzy z zakresu energoelektroniki.

3. Uwagi ogólne

Praca jest napisana w języku angielskim w sposób zrozumiały. W niektórych miejscach pracy widoczne jest dążenie Autora do nadmiernego skracania myśli. Niektóre skróty używane w tekście pracy nie są objaśnione. Praca jest starannie przygotowana pod względem edycyjnym, a w tekście występują jedynie nieliczne i drobne błędy gramatyczne.

Zamieszczone w pracy rysunki są dobrze dobrane i ułatwiają zrozumienie zagadnień poruszanych przez Autora, a także dobrze ilustrują prezentowane w pracy spostrzeżenia i wnioski. Wrażenie robi szeroki zakres prac wykonanych przez Doktoranta i umiejętność

syntezy uzyskanych rezultatów, która świadczy o jego wysokich kompetencjach badawczych.

W pracy przedstawiono wyniki badań Doktoranta dotyczące właściwości przetwornic impulsowych średniego napięcia zawierających nowoczesne tranzystory SiC MOSFET. Te przyrządy półprzewodnikowe są dostępne na rynku dopiero od kilku lat, a ich właściwości są ciągle udoskonalane przez producentów. Jednak Doktorant zdołał już wykonać cykl badań wskazujących na możliwość poprawy właściwości eksploatacyjnych rozważanej klasy układów energoelektronicznych zawierających wymienione tranzystory, zarówno w postaci elementów dyskretnych, jak i modułów mocy. Dowodzi to trafności doboru tematyki badawczej, która znajduje się w głównym nurcie rozwoju współczesnej energoelektroniki.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta, przedstawionych w recenzowanej rozprawie, można zaliczyć:

- przegląd metod budowy przekształtników mocy dla sieci średniego napięcia, łącznie z możliwymi ich zastosowaniami,
- przegląd rozwiązań układowych urządzeń zasilających zawierających tranzystory z węgla krzemu,
- opracowanie nowatorskich koncepcji przekształtników energoelektronicznych średniego napięcia, np. TCM-Q2L i metody QSW,
- wykonanie zaawansowanych badań symulacyjnych układów energoelektronicznych średniego napięcia,
- zaprojektowanie i konstrukcję układów doświadczalnych i badanych przetwornic pracujących w zakresie średniego napięcia,
- wykonanie badań eksperymentalnych skonstruowanych prototypów układów przetwornic impulsowych średniego napięcia.

Osiągnięcia te dowodzą, że Doktorant opanował umiejętność formułowania problemów badawczych i ich rozwiązywania przy zastosowaniu nowoczesnych metod naukowych oraz prezentacji uzyskanych wyników badań. Oceniana rozprawa dowodzi, że Doktorant opanował zaawansowaną wiedzę z zakresu energoelektroniki, projektowania, konstrukcji i modelowania układów energoelektronicznych pracujących w zakresie średnich napięć i metod pomiaru właściwości elektrycznych przyrządów półprzewodnikowych mocy i układów energoelektronicznych oraz potrafi twórczo ją wzbogacać.

Podczas lektury tej interesującej pracy nasunęło mi się kilka uwag:

- a) W rozprawie mało uwagi poświęcono modelowaniu charakterystyk statycznych używanych tranzystorów SiC MOSFET. Czy były one opisywane za pomocą funkcji

odcinkami liniowych?

- b) Czy przy obliczaniu strat mocy w przyrządach półprzewodnikowych uwzględniano tylko straty w obwodzie wyjściowym tranzystora pomijając moc związaną z przeładowywaniem pojemności bramkowych?
- c) Przy wyznaczaniu strat mocy w elementach magnetycznych (dławikach) zakładano, że elementy te są liniowe, tzn., że ich indukcyjność jest stała. Czy Doktorant próbował oszacować wpływ zależności indukcyjności od prądu dławika na te straty?
- d) Zastosowane w analizowanych układach energoelektronicznych przyrządy półprzewodnikowe cechują się krótkimi czasami przełączania, co może skutkować pojawianiem się przepięć wynikających m.in. z elementów pasożytniczych tych układów. Czy w układach testowych niezbędne było stosowanie specjalnych zabiegów umożliwiających ograniczenie wartości tych przepięć?

Uwagi powyższe mają charakter dyskusyjny i w żadnym stopniu nie obniżają bardzo wysokiej oceny pracy.

4. Uwagi szczegółowe

Oceniana praca jest zredagowana starannie, ale Autor nie ustrzegł się drobnych uchybień, które jednak nie wpływają w istotny sposób na jednoznacznie pozytywną ocenę pracy. Najważniejsze z tych usterek podano poniżej.

- a) Autor posługuje się sformułowaniem „SiC power devices”. W odniesieniu do przyrządów półprzewodnikowych lepiej jest używać sformułowania „SiC power semiconductor devices”.
- b) Wykaz skrótów, podany na stronie 6, jest niepełny. Brakuje w nim objaśnienia takich skrótów jak np. 2LMV, 2LSC, 2LFC.
- c) W artykułach zamieszczonych w rozdziale 3 prezentowane są często wyniki obliczeń i pomiarów jako osobne rysunki. Warto porównać takie wyniki na wspólnych wykresach, bo to umożliwi lepszą ocenę rozbieżności między takimi wynikami.
- d) W artykułach zawartych w rozdziale 3 podpisy pod niektórymi rysunkami są bardzo rozbudowane. Moim zdaniem lepszą praktyką jest stosowanie krótszych podpisów i przeniesienie niezbędnych objaśnień do opisu rysunku w tekście pracy.

5. Wniosek końcowy

Oceniana praca zawiera oryginalne i wartościowe wyniki stanowiące istotny wkład Doktoranta w badania właściwości półprzewodnikowych przyrządów mocy z węgla krzemu

oraz układów energoelektronicznych zawierających takie przyrządy i pracujących w zakresie średnich napięć. Badania te obejmowały zarówno nowe metody pomiarowe, sposoby wyznaczania wartości parametrów modeli rozważanych przyrządów, symulacje komputerowe, projektowanie i konstrukcję układów energoelektronicznych, jak i pomiary oraz analizę uzyskanych wyników. Doktorant wniósł istotny wkład w rozwiązanie ważnych zagadnień badawczych i wykazał się znajomością aktualnej literatury naukowej w zakresie tematyki pracy. Przedstawione wyniki badań dowodzą, że ich cel sformułowany przez Doktoranta został osiągnięty. Sposób przeprowadzenia badań i przedstawienia ich wyników dowodzą dobrego przygotowania Doktoranta do prowadzenia badań naukowych. Miejsce publikacji wyników badań dowodzi aktualności poruszanych zagadnień oraz potwierdza uznanie ważności uzyskanych rezultatów w skali światowej.

Uwagi sformułowane w punkcie 3 mają charakter dyskusyjny i wymagają ustosunkowania się do nich Doktoranta w czasie obrony.

W mojej opinii praca spełnia z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa. Temat i zakres pracy wpisują się w obszar energoelektroniki, czyli odpowiadają dyscyplinie naukowej Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. W związku z tym zgłaszam wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie mgr inż. Rafała Kopacza do publicznej obrony.

Ze względu na wysoki poziom naukowy ocenianej pracy oraz ponadprzeciętny dorobek publikacyjny Doktoranta wnoszę także o wyróżnienie jego rozprawy doktorskiej.

G. Szekli