

Dr hab. inż. Zbigniew Kaczmarczyk, prof. PŚ
Wydział Elektryczny
Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki
Politechnika Śląska

**Recenzja rozprawy doktorskiej
dla Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika,
Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej**

Dissertation title: *Medium voltage power converters with SiC power devices*

Tytuł rozprawy: *Przekształtniki energoelektroniczne średniego napięcia z przyrządami mocy z węgla krzemu*

Auto rozprawy: mgr inż. Rafał KOPACZ

Promotor: dr hab. inż. Jacek RĄBKOWSKI, profesor uczelni

Promotor pomocniczy: dr inż. Michał HARASIMCZUK

Najważniejszą częścią recenzowanej rozprawy doktorskiej jest pięć, powiązanych tematycznie, następujących artykułów naukowych opracowanych z udziałem Doktoranta:

- [1] J. Rąbkowski, M. Zdanowski, **R. Kopacz (25%)**, F. Gonzalez-Hernando, I. Villar and U. Larrañaga: *From the Measurement of C_{oss} - V_{DS} Characteristic to the Estimation of the Channel Current in Medium Voltage SiC MOSFET Power Modules*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, **100 pkt.**, **IF 5.332**,
- [2] J. Rąbkowski, H. Skoneczny, **R. Kopacz (25%)**, 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, MDPI, 2020, **140 pkt.**, **IF 3.252**,
- [3] P. Trochimiuk, **R. Kopacz (40%)**, K. Frąc and J. Rąbkowski: *Medium Voltage Power Switch in Silicon Carbide – A Comparative Study*, IEEE Access, vol. 10, pp. 26849-26858, 2022, **100 pkt.**, **IF 3.476**,
- [4] **R. Kopacz (40%)**, M. Harasimczuk, 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, 2022, **200 pkt.**, **IF 5.967**,
- [5] **R. Kopacz (50%)**, M. Harasimczuk, 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, 2023, **200 pkt.**, **IF 8.162**.

Wszystkie artykuły opublikowane zostały w renomowanych czasopismach naukowych, znajdujących się w wykazie ministerialnym czasopism naukowych oraz wyróżniających się dużą rozpoznawalnością wyrażoną przez wartości współczynnika wpływu. Ponadto w skład rozprawy doktorskiej wchodzi: wprowadzenie do poruszanej problematyki, komentarze do zawartości merytorycznej pięciu artykułów naukowych z jednoczesnym wyjaśnieniem wkładu autorskiego Doktoranta, wnioski oraz spis wykorzystanej literatury. Rozprawa doktorska przygotowana została w języku angielskim.

Forma rozprawy doktorskiej i zawarte w niej informacje umożliwiają opracowanie recenzji zawierającej ocenę spełnienia przez rozprawę doktorską warunków określonych w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm.).

1. Ocena rozpatrywanego zagadnienia naukowego/badawczego i jego przedstawienia w rozprawie

Rozprawa doktorska dotyczy zagadnień przekształtników energoelektronicznych przeznaczonych do pracy w zakresie średnich napięć i realizowanych na bazie przyrządów półprzewodnikowych mocy wykonanych z węgliku krzemu (SiC). Tematyka ta jest niezmiernie istotna i aktualna ze względu na powszechność wykorzystania energii elektrycznej, konieczność jej efektywnego przekształcania oraz dokonującą się współcześnie transformację energetyczną, związaną m.in. z szerokim wykorzystywaniem źródeł energii odnawialnej. Bezpośrednio wiąże się z tym wymóg opracowania przekształtników energoelektronicznych o podwyższonych parametrach użytkowych, charakteryzujących się wysokimi sprawnościami, gęstościami mocy, niezawodnością oraz zapewnieniem wysokiej jakości energii elektrycznej. Stopniowe przejście od ugruntowanej technologii krzemowej do intensywnie rozwijającej się technologii węgliku krzemu wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych mocy staje się nieuniknione w różnorodnych aplikacjach średniego napięcia. Technologia węgliku krzemu, materiału półprzewodnikowego należącego do grupy materiałów o poszerzonym paśmie zabronionym, oferuje mniejsze rezystancje w stanie przewodzenia, wyższe dopuszczalne temperatury złącza, mniejsze pojemności pasożytnicze oraz krótsze czasy przełączania i obniżone energie łączeniowe, umożliwiając ograniczenie strat mocy, zwiększenie sprawności i podniesienie częstotliwości pracy przekształtników oraz w rezultacie ograniczenie gabarytów i masy. Problematyka realizacji przekształtników średniego napięcia o jak najlepszych parametrach, z wykorzystaniem najbardziej wydajnych podzespołów, jest również uzasadniona ich powszechnymi zastosowaniami, np. w instalacjach fotowoltaicznych, turbinach wiatrowych, systemach magazynowania energii, lokalnych mikrosieciach, filtrach aktywnych, systemach ładowania pojazdów elektrycznych i nagrzewania indukcyjnego oraz technice napędowej. Jednak ze względu na jeszcze „niedojrzałość” technologii węgliku krzemu, związaną z wytwarzaniem, asortymentem i stosowaniem tego typu przyrządów półprzewodnikowych mocy oraz konstruowaniem całych przekształtników w aplikacjach średniego napięcia występuje szereg problemów do przebadania, wyjaśnienia i pokonania. W wielu przypadkach nie jest możliwe bezpośrednie zastosowanie dotychczasowych rozwiązań związanych z technologią krzemową. Przykładowe tego typu problemy to: wiarygodne określanie parametrów i efektywne modelowanie elementów, opracowanie dostosowanych układów sterowania i pomiarów tranzystorów oraz przekształtników, stosowanie typowych obudów elementów i związane z tym projektowanie połączeń (obwodów) ograniczających parametry pasożytnicze oraz w celu podwyższenia napięć pracy przekształtników na bazie dostępnych podzespołów, zastosowanie łączenia szeregowego lub topologii wielopoziomowych. Wymienione problemy znajdują swe odzwierciedlenie w recenzowanej rozprawie doktorskiej.

We wprowadzeniu rozprawy doktorskiej uzasadniono istotność i przedstawiono szeroki zakres zastosowań przekształtników średniego napięcia, charakteryzując zalety wynikające z zastępowania technologii Si przez technologię SiC oraz odnosząc się jednocześnie do jej specyfiki i koniecznego dopracowania stosowanych dotychczas i opracowania nowych rozwiązań. Doktorant w prosty sposób porównał aktualne możliwości wykorzystania różnych topologii do konstruowania przekształtników średniego napięcia wykorzystujących technologię SiC oraz przedstawił motywację i wskazał cele rozprawy.

Pięć artykułów naukowych [1]-[5], stanowiących rdzeń rozprawy doktorskiej, odnosi się do trzech ważnych aspektów badań przekształtników średniego napięcia wykorzystujących technologię SiC.

- Pierwszy to identyfikacja parametrów i modelowanie, a następnie wyznaczanie strat mocy podzespołów i konstruowanie na ich bazie przekształtników. W artykule [1] wyjaśniono, opracowano i eksperymentalnie zweryfikowano stosunkową prostą metodę eksperymentalnej

identyfikacji parametrów nieliniowej pojemności wyjściowej tranzystorów (modułów) SiC MOSFET. Na tej podstawie możliwe jest m.in. rozłożenie prądu tranzystora podczas jego wyłączania na składową pojemnościową i składową kanału. Metoda ta umożliwia dokładniejszą analizę procesu wyłączania tranzystora, w tym poprawne określenie strat mocy przełączeniowych, które ze względu na niskie straty mocy przewodzenia odgrywają istotną rolę w bilansie strat mocy całkowitych. Uzupełnieniem jest artykuł [2], który poświęcono opracowaniu wiarygodnej metody wyznaczania strat mocy w tranzystorach i diodach Schottky'ego z węgla krzemu (modułach SiC) pracujących w trójfazowych falownikach średniego napięcia. Jest to metoda hybrydowa, teoretyczno-eksperymentalna, która wykorzystuje wstępne, uproszczone obliczenia strat mocy podzespołów do wyznaczenia wymaganych parametrów pracy weryfikacyjnego układu laboratoryjnego (moduł półmostka z obciążeniem indukcyjnym), odwzorowującego warunki pracy falownika trójfazowego.

- Drugi aspekt związany jest z artykułem [3] i dotyczy wielokryterialnej analizy porównawczej wybranych topologii przekształtników średniego napięcia z tranzystorami (modułami) SiC MOSFET. Przeprowadzając odpowiednie badania laboratoryjne, porównano następujące przekształtniki: dwupoziomowy, dwupoziomowy z podwójnymi tranzystorami łączonymi szeregowo, quasi-dwupoziomowy typu FC (Flying Capacitor) oraz trzypoziomowy typu FC. Tylko w pierwszym przypadku zastosowano tranzystory średniego napięcia (3,3 kV), natomiast w pozostałych przypadkach była to podwójna liczba tranzystorów o niższym napięciu (1,2 kV) – wykorzystano możliwości zapewnienia równomiernego rozkładu napięć na poszczególnych tranzystorach. Każdorazowo przeprowadzono badania laboratoryjne, w układzie typu półmostek z obciążeniem indukcyjnym, w zbliżonych warunkach pracy w przeliczeniu na liczbę tranzystorów. W wielokryterialnym porównaniu korzystnie zaprezentował się przypadek przekształtnika quasi-dwupoziomowego typu FC, którego modyfikacje i rozszerzone badania przeprowadzone zostały w ramach ostatnich dwóch publikacji.
- Trzeci aspekt badań (artykuły [4] i [5]), moim zdaniem najważniejszy, dotyczy opracowania koncepcji i zweryfikowania odpowiednio zmodyfikowanej metody Q2L (Quasi Two Level) sterowania dwukierunkowym przekształtnikiem DC/DC typu FC. W artykule [4] uzyskano zmniejszenie strat mocy poprzez zapewnienie załączania wszystkich tranzystorów w warunkach ZVS (Zero Voltage Switching). Starając się uzyskać dalsze polepszenie właściwości przekształtnika, w artykule [4], poprzez dołączenie równolegle do tranzystorów odpowiednio dobranych, zewnętrznych kondensatorów i zmodyfikowanie sterowania uzyskano załączenie i wyłączenie w warunkach ZVS oraz zmniejszenie stromości zboczy napięć tranzystorów – ograniczenie poziomu generowanych zaburzeń elektromagnetycznych. Dokonano analizy teoretycznej, symulacyjnej i rozbudowanych badań laboratoryjnych. Opracowane prototypy charakteryzowały się napięciami po stronie wysokiego napięcia 1,5 i 1,2 kV, mocą 10 i 15 kW oraz szczytowymi sprawnościami całkowitymi 99,1 i 99,5%, odpowiednio dla przekształtników zaprezentowanych w [1] i [2]. Tego typu przekształtniki średniego napięcia z tranzystorami SiC MOSFET mogą pośredniczyć pomiędzy różnymi systemami napięcia stałego, w szczególności współpracując z systemami fotowoltaiki, gromadzenia energii lub lokalnymi mikrościekami napięcia stałego.

W ramach rozprawy doktorskiej sformułowano cel ogólny, którym była analiza możliwości przekształcania energii elektrycznej w zakresie średnich napięć za pomocą przekształtników mocy bazujących na przyrządach półprzewodnikowych z węgla krzemu. Dodatkowo wskazano następujące cele szczegółowe pracy:

- opracowanie metody charakteryzacji pojemności wyjściowej tranzystorów (modułów) mocy SiC MOSFET średniego napięcia, z wykorzystaniem której możliwe jest określanie strat mocy wyłączania tranzystorów na podstawie prostych pomiarów laboratoryjnych,
- opracowanie metody określania strat mocy tranzystorów i diod z węgla krzemu, pracujących w przekształtnikach średniego napięcia, wykorzystując proste stanowisko laboratoryjne,

- porównanie wybranych topologii przekształtników średniego napięcia pod względem efektywnego wykorzystania tranzystorów (modułów) mocy SiC MOSFET,
- wykazanie przydatności sterowania metodą TCM-Q2L (Triangular Current Mode – Quasi Two Level) do realizacji wysokosprawnego i wysokoczęstotliwościowego przekształtnika DC/DC średniego napięcia z tranzystorami SiC MOSFET,
- zastosowanie techniki QSW (Quasi Square Wave) do uzyskania w pełni miękkiego przełączania tranzystorów SiC MOSFET średniego napięcia.

W rozprawie nie sformułowano tezy. Jej rolę pełnią wymienione powyżej cele szczegółowe, które poprawnie określają zakres pracy. Tematyka rozprawy doktorskiej, jej poszczególne części składowe i cele zostały jasno sformułowane i wyjaśnione.

2. Ocena analizy źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle

Analiza źródeł literaturowych, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań jest przeprowadzona bardzo rzetelnie. Spis literatury rozprawy liczy łącznie 162 pozycje. Wymienione pozycje są odpowiednio zróżnicowane i reprezentatywne dla tematyki badań. Większość z nich pochodzi z renomowanych czasopism zagranicznych i materiałów konferencji międzynarodowych. Znacząca część opublikowana została w ostatnich pięciu latach. Ponadto uzupełnienie stanowią opracowania zamieszczone w spisach literatury artykułów [1]-[5]. Średnia liczba tych pozycji wynosi 36. Ponieważ artykuły te przeszły proces wydawniczy, dlatego właściwy dobór literatury musiał również zostać pozytywnie oceniony przez recenzentów.

Podsumowując, dobór i zakres cytowanej literatury świadczą o bardzo dobrych kompetencjach Doktoranta i dogłębnej znajomości tematyki badań.

3. Ocena rozwiązania postawionego problemu oraz metod i przyjętych założeń

Poszczególne etapy w ramach rozprawy realizowane są w kompletnym cyklu badawczym, stanowiąc przedmiot oddzielnych i pełnowartościowych artykułów naukowych. Najpierw identyfikowany jest problem i dokonywany przegląd potencjalnych rozwiązań. Następnie przeprowadzana jest jego analiza i opis teoretyczny dla przyjętych założeń oraz wstępna weryfikacja na podstawie opracowanych modeli i ich symulacji. Na zakończenie, zgodnie z uzyskanymi wytycznymi, przeprowadzana jest weryfikacja laboratoryjna. Weryfikacja odbywa się w docelowych warunkach znamionowych lub w uproszczeniu, dokonując odpowiedniego przeskalowania. Pozytywne wyniki badań laboratoryjnych stanowią ostateczne potwierdzenie poprawności przyjętych metod i założeń.

Do przeprowadzeń badań symulacyjnych Doktorant użył przeznaczone do tego oprogramowania Synopsys Saber. Z kolei do pośrednich obliczeń i analiz wyników zastosował znane środowisko Matlab'a. Należy zwrócić uwagę na złożoność przeprowadzonych prac projektowych i konstrukcyjnych ze względu na specyfikę wykorzystanej technologii SiC i aplikacje w zakresie średnich napięć. Wymagały one uwzględnienia i rozwiązania szeregu problemów związanych przykładowo z prawidłowym doбором typów i rozmieszczaniem elementów, ich połączeniem zapewniającym minimalizację parametrów pasożytniczych oraz zagwarantowaniem odpowiedniego chłodzenia. Przeprowadzając badania laboratoryjne, Doktorant korzystał z zasilaczy i analizatorów mocy oraz oscyloskopów cyfrowych wyposażonych w różnicowe sondy napięciowe i specjalizowane sondy prądowe, w tym cewki Rogowskiego. Poprawna realizacja badań z pewnością nie była zadaniem trywialnym.

Uzyskane w ramach artykułów naukowych (rozprawy doktorskiej) wyniki badań laboratoryjnych są odpowiednio zgodne z wynikami obliczeń teoretycznych i symulacji komputerowych. Stanowi to wiarygodne potwierdzenie rozwiązania postawionych problemów, poprawności przyjętych założeń i zastosowania właściwych metod.

4. Ocena oryginalności rozprawy, samodzielnego dorobku autora oraz pozycji rozprawy w stosunku do aktualnego stanu wiedzy i poziomu techniki

Główną częścią rozprawy doktorskiej jest pięć, powiązanych tematycznie współautorskich artykułów naukowych [1]-[5] z istotnym udziałem Doktoranta. Średnia punktacja tych artykułów, zgodnie z obowiązującym wykazem ministerialnym czasopism naukowych, jest równa 148 pkt., ich średni współczynnik wpływu to 5,24, a średni udział Doktoranta wynosi 36%. W dwóch najważniejszych artykułach [4] i [5] Doktorant jest pierwszym autorem, a jego udział wynosi odpowiednio 40 i 50%. W załączonych do pracy wyjaśnieniach Doktorant wyszczególnił własny wkład merytoryczny w poszczególne opracowania naukowe. W skrócie polegał on każdorazowo na dokonaniu badań literaturowych problemu, projekcie i konstrukcji stanowiska laboratoryjnego oraz badanych układów, uczestniczeniu w badaniach laboratoryjnych, dyskusji uzyskanych wyników oraz opracowaniu publikacji. Dodatkowo w przypadku najważniejszych publikacji [4] i [5], za autorskie, oryginalne oraz stanowiące rdzeń tych publikacji, uznaję następujące osiągnięcia Doktoranta:

- zaproponowanie nowej koncepcji metody sterowania TCM-Q2L w celu realizacji kompaktowego przekształtnika DC/DC o wysokiej sprawności na bazie tranzystorów SiC MOSFET [4],
- na bazie koncepcji skonstruowanie prototypu – 1500 V, 10 kW, 99,1% [4],
- zaproponowanie nowej koncepcji polegającej na dołączeniu niewielkich kondensatorów równolegle do tranzystorów SiC MOSFET i dostosowanie metody sterowania TCM-Q2L w celu uzyskania miękkiego przełączania tranzystorów, a w rezultacie zminimalizowanie strat mocy oraz zmniejszenie stromości zboczy napięć tranzystorów [5],
- na bazie koncepcji skonstruowanie prototypu – 1200 V, 15 kW, 99,5%, [5],
- teoretyczne analizy tych koncepcji, przygotowanie modeli i przeprowadzenie symulacji [4] i [5].

Rozprawa doktorska zawiera oryginalne wyniki badań, w szczególności prezentuje opracowane prototypy przekształtników DC/DC średniego napięcia [4] i [5] z nowoczesnymi tranzystorami (modułami) mocy SiC MOSFET o parametrach na poziomie najlepszych rozwiązań światowych. Świadczy o tym również zaakceptowanie odpowiednich wyników badań w postaci publikacji w renomowanych czasopismach naukowych.

Doktorant jest również współautorem 5 artykułów naukowych w czasopismach (m.in. Applied Sciences – 100 pkt., z udziałem 15%; IEEE Access – 100 pkt., z udziałem 30%; Energies – 140 pkt., z udziałem 40%, pierwszy autor; Przegląd Elektrotechniczny – 70 pkt., z udziałem 55%, pierwszy autor) oraz 9 referatów na konferencjach międzynarodowych. Ponadto jako student oraz jako młody naukowiec uzyskał stypendia Ministra Edukacji i Nauki za znaczące osiągnięcia naukowe, odpowiednio w roku 2019 i 2023.

5. Ocena umiejętności poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników

Rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim. Ze względu na przyjętą formę jej struktura jest zrozumiała i logiczna. Stronna redakcyjna, zastosowany język i terminologia są na bardzo dobrym poziomie, właściwym dla opracowań naukowo-technicznych. Rozprawa została starannie zredagowana i zilustrowana. Przedstawione założenia, ilustracje, wyjaśnienia oraz dyskusje wyników badań są w pełni zrozumiałe.

Przygotowując recenzję zauważyłem pewne nieistotne błędy i nieścisłości, które wyszczególniłem w kolejnym punkcie.



6. Informacje o zauważonych nieprawidłowościach

Poniżej zamieszczono uwagi dotyczące zauważonych błędów i nieścisłości. Część z nich ma charakter dyskusyjny, z kolei rozwinięcie niektórych informacji byłoby interesujące i mogłoby zapoczątkować dyskusję podczas publicznej obrony.

1. Określenie „średnie napięcie” odnosi się do napięć przemiennych, międzyfazowych z zakresu od 1 do 60 kV. Jest ono również stosowane do napięć stałych o wartościach od 1,5 do 3 kV. W rozprawie nie wyjaśniono dokładniej jaki zakres napięć jest przedmiotem tych konkretnych rozważań. Podawane są wielokrotnie wartości z tego zakresu, ale odpowiednie wyjaśnienie wstępne uporządkowałoby tę kwestię.
2. Pewne skróty wprowadzone zostały bez wyjaśnień, np. RES (str. 9), DFIG i PMSG (str. 13), ESS (str. 14), MMC (str. 17). Na początku zamieszczono listę stosowanych skrótów, ale przy pierwszym ich użyciu zwyczajowo dodawane jest wyjaśnienie.
3. Czy faktycznie przeładowanie pojemności wyjściowej tranzystora C_{oss} jest bezstratne – praca [1]? W falownikach rezonansowych pracujących z częstotliwościami rzędu megaherców, gdy pojemność ta jest przeładowywana znaczącym prądem, w sposób ciągły można zaobserwować towarzyszące temu procesowi istotne straty mocy.
4. Dlaczego prezentując charakterystyki tranzystora MSM900FS17ALT (rys. 6) odwołano się do danych katalogowych tranzystora CAB425M12MX3 – praca [1]? Dotyczy to również zamieszczonego wniosku: „The test for the 1.2-kV/425-A module has shown very good agreement with the COSS – VDS characteristic provided by the manufacturer, and the method was also applied to the 1.7-kV/900-A module, for which the datasheet is unavailable”.
5. Na ile dla opracowanej metody identyfikacji pojemności wyjściowej tranzystora istotna jest dokładność zastosowanej metody pomiarowej – praca [1]? Biorąc pod uwagę tor pomiarowy, złożony z dwóch sond (napięciowej i prądowej) oraz oscyloskopu, problem ten wydaje się istotny.
6. Tematyka artykuł [2] jest nieco odbiegająca od pozostałych. W przedstawionym dorobku znajduje się również inny wartościowy artykuł Doktoranta (P. Trochimiuk, R. Kopacz, G. Wrona and J. Rąbkowski: *Active Voltage Balancing of Series-Connected 1.7 kV/325 A SiC MOSFETs Enabling Continuous Operation at Medium Voltage, IEEE Access*, 2021), który moim zdaniem mógłby nawet zastąpić [2]. Jakie jest uzasadnienie dokonanego wyboru?
7. Czy w tabeli 3 poprawnie użyto określenia „complex” w odniesieniu do parametru „gate drivers” i topologii 2LMV – praca [3]?
8. Czy podczas łączenia szeregowego tranzystorów (modułów) SiC MOSFET wskazane jest ich wstępne selekcjonowanie pod względem wybranych parametrów – prace [3], [4] i [5]?
9. Analizowane przekształtniki umożliwiają pracę dwukierunkową. W ramach artykułów [4] i [5] rozważany jest jedynie tryb buck. Czy badano również właściwości przekształtników ze sterowaniem w trybie boost? Czy uzyskano równie korzystne wyniki?
10. W jaki sposób przyjęto stałą pojemność jako odpowiadającą nieliniowej pojemności wyjściowej tranzystora C_{oss} – praca [4]? Przykładowo uproszczenie to może mieć wpływ na działanie przekształtnika przy znacznie obniżonym napięciu pracy. Czy zaobserwowano takie przypadki?
11. Najważniejsza uwaga ma związek z realizacją sterowania rozważanych przekształtników w artykułach [4] i [5]. Dla danego przypadku pracy przekształtnika sterowanie bazuje na wyznaczonej współzależności pomiędzy współczynnikiem wzmocnienia, współczynnikiem wypełnienia, częstotliwością pracy i rezystancją obciążenia. Czyli zadając współczynnik wzmocnienia i rezystancję obciążenia wyznaczone są częstotliwość pracy i współczynnik wypełnienia dla zapewnienia miękkiego przełączania tranzystorów. W jaki sposób zostało to zrealizowane w prototypach, w trybie on-line (na bieżąco w sposób ciągły), czy w trybie off-line (z ręki dla danego przypadku)?
12. Należałoby wyjaśnić tak dużą rozbieżność tytułów artykułów (*Medium Voltage Flying Capacitor DC-DC Converter with High-Frequency TCM-Q2L Control* – [4] oraz *Investigation of Soft-Switching QSW*

Technique in DC/DC SiC-Based Flying Capacitor Converter with Q2L Control – [5]). Ich tematyka jest bardzo zbliżona, przy czym w tym drugim nieznacznie zmodyfikowano obwód przekształtnika oraz sterowanie.

13. Interesujące byłoby krótkie wyjaśnienie, na ile analiza działania i realizacja sterowania podobne są w przypadkach przedstawionych w artykułach [4] i [5].

Zamieszczone uwagi nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy doktorskiej i nie wpływają na jej bardzo dobrą ocenę.

7. Ocena przydatności rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych

Rozprawa doktorska zawiera szereg bardzo istotnych informacji związanych z właściwościami i metodami wyznaczania parametrów przyrządów półprzewodnikowych mocy wykonanych w technologii SiC, opracowaniem ich modeli, analizą, projektowaniem i konstrukcją przekształtników energoelektronicznych średniego napięcia z wykorzystaniem tych przyrządów, badaniami laboratoryjnymi i pomiarami, w tym wyznaczaniem strat mocy poszczególnych podzespołów. Podjęta tematyka ma duże znaczenie praktyczne. Wszystkie rozważane zagadnienia kończą się wyczerpującymi badaniami i weryfikacją laboratoryjną. Wysoki poziom badań jest również potwierdzony przez ich upowszechnienie w formie publikacji w renomowanych czasopismach. Skonstruowane dwa prototypy przekształtników DC/DC średniego napięcia z tranzystorami SiC MOSFET z pewnością przyczynią się do opracowania bardziej niezawodnych, wysokosprawnych i kompaktowych urządzeń. Wszystko to świadczy o istotnej przydatności rozprawy doktorskiej dla nauk inżynieryjno-technicznych.

8. Podsumowanie

Pan mgr inż. Rafał KOPACZ w rozprawie doktorskiej pt. *Przekształtniki energoelektroniczne średniego napięcia z przyrządami mocy z węgla krzemu* zaprezentował wartościowe i oryginalne wyniki, o istotnych aspektach praktycznych, które upowszechnione zostały poprzez publikacje o szerokim zasięgu międzynarodowym.

Jednocześnie mgr inż. Rafał KOPACZ potwierdził swoje bardzo dobre kompetencje w zakresie podjętej tematyki oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Z pewnością zaprezentował również ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Cele rozprawy zostały konsekwentnie zrealizowane. Rozprawa jest kompletna i nie wymaga uzupełnień. Spełnia wymagania formalne zapisane w art. 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm.). Jej tematyka zawiera się w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Zamieszczone w pkt. 6 uwagi nie mają istotnego wpływu na wartość merytoryczną rozprawy. Rozprawę oceniam bardzo pozytywnie i zaliczam do kategorii spełniającej wymagania z wyraźnym nadmiarem.

Wniosuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała KOPACZA do publicznej obrony.

Zbigniew Kabanowicz