WPŁYNĘŁO
2024 -01- 11

Białystok, 04 stycznia 2024 r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Sikorski
Zakład Energoelektroniki i Napędu Elektrycznego
Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok

Ocena rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Kopacza pt.:

" Przekształtniki energoelektroniczne średniego napięcia z elementami z węglika krzemu"
(„Medium Voltage Power Converters with SiC Power Devices")

(zlecenie z dnia 24.10.2023 r., na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 17.10.2023 r.)

1. Ogólna charakterystyka rozprawy, przedmiot i cel rozprawy

Tematem opiniowanej rozprawy jest omówienie i rozwiązanie problemów występujących w przekształtnikach energoelektronicznych pracujących w zakresie średnich napięć wykorzystujących półprzewodnikowe elementy mocy z węglika krzemu. Wybór średniego napięcia zasilającego w przypadku zasilaczy energoelektronicznych dużej mocy wiąże się głównie z chęcią obniżenia wartości prądu w porównaniu do systemu niskiego napięcia. Mniejsze prądy prowadzą do znacznego zmniejszenia strat mocy przewodzenia, co prowadzi do lepszej sprawności przetwarzania energii, a także zmniejszenia objętości i masy przewodników (przewodów, szyn zbiorczych) oraz układów chłodzenia. Zainteresowanie energoelektroniką średniego napięcia zyskuje coraz większą popularność ze względu na potrzeby rosnących mocy i energii pozyskiwanych z OZE. Globalne cele w zakresie dekarbonizacji społeczeństwa i przemysłu powodują intensywny wzrost mocy odnawialnych źródeł energii, takich jak elektrownie wiatrowe, słoneczne i wodne, eliminując konwencjonalne źródła wytwarzania energii, takie jak elektrownie węglowe, które są źródłem zanieczyszczeń i nie odpowiadają polityce proekologicznej. Wymagania w stosunku do pracy przekształtników energoelektronicznych stawiane przez dwa najpopularniejsze OZE – energetyka wiatrowa i słoneczna, dochodzą do setek kV w odniesieniu do turbin wiatrowych i pojedynczych kilowoltów w stosunku do PV. Co więcej, tendencja do pracy przy coraz wyższych napięciach dotyczy także innych systemów współpracujących z OZE np. akumulatorowych magazynów energii. Odnawialne źródła energii to nie jedyne zastosowania przekształtników energoelektronicznych średniego napięcia. Taki zakres napięcia wykorzystuje się w elektromobilności (szybkie ładowarki dużej mocy) i trakcji elektrycznej, a także w napędach dużej mocy oraz inteligentnych sieciach elektroenergetycznych. Biorąc pod uwagę wielkie ilości przetwarzanej energii

w powyższych zastosowaniach, sprawność jej przetwarzania jest istotnym czynnikiem jej oszczędzania. Można to osiągnąć stosując przekształtniki na średnie napięcie z tranzystorami SiC. Dlatego też istnieje duże zapotrzebowanie na wydajne i niezawodnie przekształtniki energoelektroniczne średniego napięcia o dużej gęstości upakowania i niewielkim wpływie na otoczenie, np. poprzez emisję pola elektromagnetycznego lub zakłócenia akustyczne.

Aktualne i przyszłe wymienione wyżej zastosowania wymagają więc przede wszystkim wysokosprawnych przekształtników energoelektronicznych średniego napięcia, pracujących przy wysokich częstotliwościach przełączeń. Jak udowadnia Autor w swojej pracy najlepszym łącznikiem, będącym podstawą każdego przekształtnika jest łącznik zbudowany w technologii SiC. Pomimo, że elementy półprzewodnikowe z węglika krzemu badane są już od wielu lat, to nadal występują istotne problemy, takie jak nieprecyzyjne modelowanie półprzewodników, niedokładne określanie strat mocy czy wybór odpowiedniej topologii przekształtnika. Budowa przekształtnika z łączników średniego napięcia SiC, choć możliwa, jest dużo droższa niż wykonanie przekształtnika ze złożenia różnych konfiguracji łączników SiC niskiego napięcia. Zagadnienie doboru odpowiedniej topologii z wykorzystaniem elementów SiC na niskie napięcie zależy od wymagań stawianych przekształtnikowi. Gęstość upakowania, a więc i gabaryty urządzenia, zależą od stworzenia poprawnego schematu zastępczego tranzystora SiC oraz jego sterownika. Od tych zagadnień rozpoczynają się prace Autora. Na początki zajmuje się On opisem modelowania przyrządów mocy pracujących w przekształtnikach średniego napięcia z elementami z węglika krzemu. Proponuje metodę charakteryzacji pojemności wyjściowej tranzystora niezbędnej do dokładnego określania strat łączeniowych oraz estymacji strat mocy w elementach przekształtnika, w prostym układzie eksperymentalnym.

Kolejny problem to estymacja strat mocy przekształtnika. Generalnie noty katalogowe pozwalają policzyć straty mocy i zaprojektować przekształtnik, ale nie jest to optymalne. Zaproponowano metodę mieszaną eksperymentalno-obliczeniowa w celu dokładnego obliczenia straty mocy w układzie nie budując całego, kosztownego układu dużej mocy. W tym celu wykorzystano układ półmostkowy przekształtnika, gdzie w zasadzie wymagana energia zasilania jest energią strat, które występują w układzie przy pracy z mocą kilkuset kilowatów.

Następnie przeprowadzono badania porównawcze różnych rozwiązań układów przekształtnikowych średniego napięcia obejmujące układy dwu- i trójpoziomowe. Autor uwzględnia wykorzystanie tranzystorów mocy SN, a także złożone struktury łączników NN połączone szeregowo, pracujące w strukturach trójpoziomowych w tym sterowanych metodą quasi-dwupoziomową. Autor porównuje rozwiązania przekształtników DC/DC sterowanych różnymi metodami w tym proponowaną metodą Q2L. Dodatkowo wzbogaca topologię o dodatkowe pojemności połączone równolegle z tranzystorami przekształtnika, umożliwiające w pełni miękkie przełączanie i pozwalające osiągnąć sprawności przetwarzania energii do 99,5%.

Autor postawił sobie za cel rozprawy opracowanie i przebadanie możliwości efektywnego przetwarzania energii w zakresie średnich napięć z wykorzystaniem przyrządów mocy z węglika krzemu. Szczegółowe cele sformułowane przez doktoranta to:

- opracowanie metody precyzyjnego charakteryzowania pojemności wyjściowej SiC MOSFETów, pozwalającej na dokładne oszacowanie strat mocy na podstawie badania prostych układów laboratoryjnych,

- dokładne szacowanie straty mocy przyrządów SiC w przekształtnikach z wykorzystaniem prostych układów testowych,
- ocena topologii przekształtników, które umożliwiają efektywne wykorzystanie przyrządów mocy SiC w przekształtnikach energoelektronicznych średniego napięcia,
- sprawdzenie struktury i sterowania układu quasi-dwupoziomowego do tworzenia przekształtników SN na bazie SiC,
- adaptacja metody TCM-Q2L do budowy wysokowydajnych przekształtników DC/DC SN pracujących przy wysokiej częstotliwości,
- zastosowanie techniki fali quasi-prostokątnej, do uzyskania w pełni miękkiego przełączanie tranzystorów SiC MOSFET.

Można więc stwierdzić, że w recenzowanej rozprawie Autor podjął aktualny, niebanalny z poznawczego punktu widzenia problem badawczy, który ma istotne znaczenie praktyczne i który nie został dotychczas rozwiązany w sposób ostateczny i jednoznaczny.

Mgr inż. Rafał Kopacz zrealizował rozprawę doktorska w formie opisu swojego wkładu naukowego w powstanie 5 współautorskich artykułów naukowych opublikowanych w renomowanych czasopismach z listy JCR. Autor w dwóch publikacjach występuje na pierwszym miejscu, w jednej - na drugim i w dwóch na trzeciej pozycji.

Rozprawa zawiera 143 strony i została zredagowana w 4 rozdziałach. Zdaniem recenzenta przyjęty przez Autora układ treści rozprawy jest wystarczająco jasny i klarowny, podział rozprawy na rozdziały - prawidłowy, a rozdział wstępny i końcowy zawierają właściwe treści. Bibliografia zamieszczona na końcu pracy zawiera 162 pozycje literatury światowej, właściwie dobranej i wykorzystanej do opisu aktualnych osiągnięć istotnych z punktu widzenia treści rozprawy Autora.

Rozdział 1 recenzowanej rozprawy (Wstęp), oprócz opisu motywacji do podjęcia badań zawiera również przegląd tematyki badawczej, w której są umiejscowione problemy podjęte przez Autora i opisane w rozprawie. W pierwszej części Autor, po krótkim wprowadzeniu, pokazującym znaczenie przekształtników SN, przedstawił ich aplikacje w praktyce przemysłowej. Określił wymagania dotyczące łączników mocy stosowanych w przekształtnikach średniego napięcia tj: wysokie napięcie przebicia, szybkie przełączanie – niska energia przełączania, niskie straty mocy przewodzenia, możliwość pracy w wysokich temperaturach, wysoka niezawodność, niska cena. Następnie, na podstawie szerokiego przeglądu literatury, Autor omówił właściwości półprzewodnikowych elementów mocy z węglika krzemu oraz ich specyficzne problemy w porównaniu z technologią Si, zwłaszcza w zastosowaniach w przekształtnikach średniego napięcia. Przedstawił stosowane sposoby realizacji łączników wysokonapięciowych w przekształtnikach SN. Pierwsza część rozprawy kończy się uzasadnieniem realizacji pracy doktorskiej oraz określeniem jej szczegółowych celów. Pierwsza część rozprawy kończy się przedstawieniem 5 współautorskich publikacji (w dwóch na pierwszym miejscu), które stanowią merytoryczną część opiniowanej rozprawy:

[P1] J. Rąbkowski, M. Zdanowski, R. Kopacz, F. Gonzalez-Hernando, I. Villar and U. Larrañaga, "From the Measurement of COSS–VDS Characteristic to the Estimation

of the Channel Current in Medium Voltage SiC MOSFET Power Modules," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 72, pp. 1-10, 2023, Punktacja MNiSW: 100, Impact Factor: 5.332. Wkład Autora rozprawy doktorskiej: 25%.

[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. Punktacja MNiSW: 140, Impact Factor: 3.252. Wkład Autor rozprawy doktorskiej: 25%.

[P3] P. Trochimiuk, R. Kopacz, K. Fr ¸ac and J. Rąbkowski, "Medium Voltage Power Switch in Silicon Carbide—A Comparative Study," in IEEE Access, vol. 10, pp. 26849- 26858, 2022. Punktacja MNiSW: 100, Impact Factor: 3.476. Wkład Autora rozprawy doktorskiej: 40%.

[P4] R. Kopacz, M. Harasimczuk, P. Trochimiuk, G. Wrona and J. Rąbkowski, "Medium Voltage Flying Capacitor DC–DC Converter With High-Frequency TCM-Q2L Control," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 4, pp. 4233-4248, April 2022. Punktacja MNiSW: 200, Impact Factor: 5.967. Wkład Autora rozprawy doktorskiej: 40%.

[P5] R. Kopacz, M. Harasimczuk, P. Trochimiuk and J. Rąbkowski, "Investigation of Soft Switching QSW Technique in DC/DC SiC-Based Flying Capacitor Converter With Q2L Control," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 70, no. 9, pp. 9035-9045, Sept. 2023. Punktacja MNiSW: 200, Impact Factor: 8.162. Wkład Autora rozprawy doktorskiej: 50%.

Dane naukometryczne tych publikacji: Impact Factor - 26,189, punktacja MNiSW – 740. Ponadto Autor jest współautorem kilkunastu publikacji blisko związanych z tematyką rozprawy w tym 5 publikacji w czasopismach i 9 artykułów na konferencjach (w 5 publikacjach Autor rozprawy jest na pierwszym miejscu).

W drugiej części rozprawy Autor przedstawił swój wkład w zakresie poszczególnych zagadnień w tematyce przekształtników SN zbudowanych na bazie łączników SiC przedstawionych w publikacjach [P1-P5]. Pierwszym obszarem zainteresowań jest modelowanie elementów przełączających średniego napięcia na bazie SiC, w tym oszacowanie strat mocy. Problemy te przedstawiono w dwóch artykułach. Następnie na podstawie publikacji poruszono temat koncepcji topologii przekształtników energoelektronicznych SN i pokazano je uwzględniając kilka różnych podejść.

W kolejnej części przedstawiono przykładową przetwornicę DC/DC średniego napięcia o nowatorskiej topologii i sterowaniu, wykorzystującą wiele zalet półprzewodnikowych urządzeń mocy SiC. Ten obszar tematyczny opisany został w kolejnych dwóch artykułach.

Merytoryczną część kończy prezentacja zastosowania półprzewodnikowych elementów mocy na bazie SiC w konstruowaniu wysokowydajnych systemów energoelektronicznych średniego napięcia, zwłaszcza pod względem wydajności i gęstości mocy, które zdecydowanie przewyższają swoje odpowiedniki wykonane w technologii Si.

Wnioski i podsumowanie do tej pracy znajdują się w rozdziale 4. Autor stwierdził, że praca zawiera badania przetworników mocy średniego napięcia na bazie SiC na podstawie pięciu publikacji. Rozważane tematy obejmują modelowanie

i charakteryzacje MOSFET-ów SiC, głównie modułów o dużej mocy. Ponadto, rozważano temat szacowania strat i eksperymentalnej emulacji MOSFET-u SiC. Nastepnie zaprezentowano i porównano kilka różnych technik projektowania przekształtników SN na podstawie oceny badań eksperymentalnych, począwszy od topologii dwupoziomowych z jednym łącznikiem poprzez szeregowe połączenie tranzystorów, konwencjonalne podejście wielopoziomowe (przekształtnik FC), jak również technikę quasi-dwupoziomową. Ponadto, rozprawa dotyczy nowatorskiego, wysokosprawnego i kompaktowego, nieizolowanego przekształtnika DC/DC z miękkim przełączaniem jako przykładem układu, w którym wykorzystano doświadczenia wynikające z zaproponowanej charakteryzacji łącznika oraz wyznaczania strat mocy w przekształtniku zaproponowanym algorytmem.

2. Ocena merytoryczna i wykaz najważniejszych osiągnięć Autora

Rozprawa stanowi oryginalne i kompletne rozwiązanie zagadnień badawczych, projektowych i konstrukcyjnych związanych z realizacją przekształtników średniego napięcia z łącznikami na bazie SiC. Należy podkreślić, że praca została wykonana w pełnym cyklu badawczym, tj. od opracowania teoretycznego, poprzez analizę i testy symulacyjne, do zbudowania stanowiska laboratoryjnego.

Zagadnienia dotyczące modelowania i charakteryzacji, omówione w [P1], wykorzystując zaproponowaną nowatorską koncepcję, pozwalają scharakteryzować pojemności wyjściowe modułu mocy SiC MOSFET, co jest niezbędne do ustalenia strat mocy łącznika. Metoda ta jest szczególnie istotna w procesie projektowania przekształtników dużych mocy SN. Nawet niewielkie błędy w szacowaniu strat (1%) przy mocach rzędu kilkuset kW prowadzić może do nieefektywności konstrukcji zarówno pod względem strat jak i warunków chłodzenia. Ponadto, należy podkreślić, że zaproponowana metoda jest szczególnie użyteczna, gdy brak jest danych katalogowych charakterystyk pojemnościowych łącznika lub dane są niepełne.

Algorytm szacowania strat mocy, omawiany w [P2], w którym przedstawiono nową metodę emulacji strat mocy w celu dokładnego ich określenia, można zastosować w procesie projektowania przekształtnika dużej mocy SN. Zaproponowane podejście jest rozwiązaniem prostym i tanim. Pracę przekształtnika o mocy kilkuset kilowatów może emulować przy użyciu zaledwie kilku kilowatów pobieranych ze źródła.

W artykule [P3] zaprezentowano eksperymentalne porównanie właściwości różnych rozwiązań pojedynczej gałęzi falownika obejmującą: topologię dwupoziomową z pojedynczymi łącznikiem SN, z tranzystorami połączonymi szeregowo i aktywnym równoważeniem napięcia, konwencjonalną topologie trójpoziomową na przykładzie struktury FC oraz technikę quasi-dwupoziomową (Q2L) rozumianą jako sposób sterowania struktury 3-poziomowej do pracy 2-poziomowej. Na podstawie badania modeli przy napięciu do 1,5 kV i prądzie 300 A ustalono najważniejsze parametry praktyczne, tj. sposób i czasy wyłączania oraz straty mocy (energii) w zależności od parametrów sterowników i sposobu sterowania przekształtnikiem. Ponadto oceniana była również niezawodność i koszt. Wyniki badań można wykorzystać do projektantów przekształtników średniego napięcia na etapie poszukiwania najbardziej odpowiedniej topologii dla konkretnego zastosowania.

W artykułach [P4] i [P5] zaprezentowano przykłady realizacji przekształtników SiC średniego napięcia z wykorzystaniem dotychczasowych wyników prac. Nowatorskie rozwiązanie przekształtnika DC/DC oparte jest na nowej metodzie TCM-Q2L (*triangular current mode quasi-two level*). Łączy ona sterowanie Q2L, w celu wykorzystania łączników na niskie napięcie, z prostym, bezstratnym równoważeniem napięcia na kondensatorze i podejściem TCM, który umożliwia miękkie przełączanie przy włączeniu, minimalizując straty przełączania. Umożliwia to pracę przekształtnika przy wysokich częstotliwościach łączeń, minimalizując jego gabaryty, co w końcowym efekcie prowadzi do większej gęstości przetwarzanej mocy. Zaproponowana w [P4] przekształtnik został dodatkowo udoskonalony w [P5] poprzez dodanie dodatkowych, kondensatorów równolegle do każdego tranzystora, umożliwiając jeszcze wyższą sprawność dzięki miękkiemu przełączanie przy wyłączaniu. Oprócz zmniejszenia strat mocy proponowana technika minimalizuje również stromość napięcia du/dt na tranzystorze, co zmniejsza negatywne skutki elementów pasożytniczych łącznika i pozwala w pełni wykorzystać walory łączników SiC w zastosowaniach na średnim napięciu. Zaproponowany przekształtnik DC/DC SN charakteryzuje się wyjątkowo wysoką sprawnością (aż do 99,5%) i gęstością mocy. Przekształtnik testowano przy napięciu do 1,5 kV, mocy 15 kW i częstotliwości przełączania do 250 kHz (w zależności od punktu pracy). Takie nowatorskie podejście może być konkurencyjnym wyborem w zakresie przetwarzania DC/DC na średnim napięciu, wyraźnie przewyższającym dotychczasowe rozwiązania w zastosowaniach energoelektroniki takich jak trakcja, elektromobilność, fotowoltaika i akumulatorowe magazyny energii.

Reasumując, za oryginalne i cenne własne osiągnięcia o charakterze naukowym uważam następujące wyniki rozprawy:

1) zaproponowanie nowatorskich koncepcji przekształtników mocy średniego napięcia TCM-Q2L,
2) wykonanie zaawansowanych analiz teoretycznych oraz symulacyjnych w zakresie energoelektroniki średniego napięcia,
3) zaprojektowanie i budowa układów eksperymentalnych i przekształtników pracujących przy zasilaniu średnim napięciem,
4) przeprowadzenie badań eksperymentalnych prototypów przekształtników średniego napięcia,

Ponadto doktorant dokonał przeglądu metod budowy przekształtników średniego napięcia i możliwości ich zastosowań. Przygotował publikacje w czołowych czasopismach o światowym zasięgu (IF= 26,189, suma punktów wg MNiSW – 740), a także zaprezentował wyniki na kilku konferencjach międzynarodowych.

Autor szczegółowo opisał w rozdziale 2 oraz w dokumencie „Zestawienie publikacji z oświadczeniami o merytorycznym wkładzie Rafała Kopacza", swój udział merytoryczny w powstanie artykułów, co znalazło potwierdzenie w opisie udziału wszystkich współautorów potwierdzone ich podpisami w domumencie „Substantive contribution and percentage share of authors in the disertation in the form of a series publications"

Podsumowując, należy uznać, że cel pracy doktorskiej, wraz z jego szczegółowym rozwinięciem, został w pełni zrealizowany.

Ogólna ocena sposobu i jakości rozwiązania sformułowanych zadań badawczych jest niewątpliwie pozytywna. Na uwagę zasługuje również fakt, że analizy

teoretyczne i zaproponowany algorytm zostały poparte wszechstronnymi, dobrze udokumentowanymi w rozprawie, testami laboratoryjnymi. Jednakże, jak w każdej pracy naukowej, niektóre problemy i wątki nie zostały w rozprawie opisane w sposób dostatecznie dogłębny, przejrzysty i wyczerpujący. Szczegółowa lista fragmentów, które budzą pewne wątpliwości i komentarze recenzenta, została przedstawiona w kolejnym rozdziale recenzji.

3. Uwagi dyskusyjne i komentarze do rozprawy

Lektura rozprawy nasunęła szereg wątpliwości nie umniejszającym osiągnięciom Autora, przedstawionych poniżej i wymagających ustosunkowania się do nich Autora.

1. Na rysunku 3, artykułu P2, straty mocy w zależności od częstotliwości przełączania i tej samej przetwarzanej mocy, mają inne wartości dla pracy prostownikowej i falownikowej. Proszę wyjaśnić przyczynę.
2. Artykuł P2 rys. 4 dotyczy pracy na indukcyjność L i prąd ma charakter trójkątny. Straty mocy odwzorowywane są na podstawie takiego testu. Jednakże ten sposób pracy nie odwzorowuje np. pracy przekształtnika DC/DC z ciągłym prądem dodatnim lub pracy przekształtnika DC/AC z prądem qusi-sinusioidalnym na wyjściu. Wystąpią tam twarde przełączenia dioda-tranzystor, których nie ma w cyklu pracy przedstawionym na rys. 4b. Jak Autor dowiedzie słuszność wykorzystania zaprezentowanego cyklu przełączeń w ocenie prac przekształtnika w pełni obciążonego nie tylko przez L?
3. Artykuł P3 dotyczy doświadczanego porównania właściwości 4 przekształtników w tym trzech 2-poziomowych i jednego 3-poziomowego. Porównanie nie jest do końca uprawnione, gdyż przekształtnik 2-poziomowy z tranzystorem na SN zbudowany jest z innego łącznika niż pozostałe 3 przekształtniki. Jak Autor uzasadni swój sposób widzenia i oceny 4 konfiguracji?
4. Przedstawione na rysunku 7 artykułu P3 porównanie wskazuje wyższe straty wyłączania w układzie 3-poziomowym niż w pozostałych dwóch konfiguracjach zbudowanych z tych samych tranzystorów. Z czego wynika ta różnica w stosunku do przekształtnika 2LFC, skoro konstrukcja przekształtnika jest identyczna, a jedynie sterowanie się różni, ale wydaje się, że przechodzimy przez ten sam cykl przełączeń tylko z innym czasem „przebywania" na położeniach pośrednich?
5. Wydaje się, że Autor optuje za konfiguracją Q2L. Jednakże należy pamiętać, że konfiguracja 3LFC posiada dodatkowe, bardzo istotne zalety to jest np. niższe THD prądu, ze względu na więcej poziomów/wektorów napięcia, czy też niższe prądy CM i zalety z tym związane. Konstrukcja części silnoprądowej jest identyczna więc trochę szkoda nie wykorzystać walorów przekształtnika 3-poziomowego. Jakie jest zdanie Autora w tej kwestii?
6. Czy koncepcja kontroli napięcia na kondensatorze o zmiennym potencjale (art. P4) może być stosowana w topologii wykorzystanej jako przekształtnik DC/AC?
7. Czy technika miękkiego przełączania zaprezentowana w artykule P5 (z dodatkowym kondensatorem dołączonym równolegle do łącznika) ma jakieś ograniczenia w działaniu związane z wartością prądu obciążenia?

4. Podsumowanie oceny rozprawy doktorskiej

Doktorant podjął problem o niewątpliwie istotnym znaczeniu praktycznym i wnosi oryginalny wkład intelektualny w formie ciągu działań o charakterze teoretycznym i eksperymentalnym pozwalającym na znacznie wyższym poziomie od spotykanych w doniesieniach naukowych w kraju i za granicą zaprojektować i wykonać przekształtnik energoelektroniczny średniego napięcia na bazie z łączników SiC. Wychodząc od rozpoznania, zaproponowanymi w rozprawie metodami, dokładnych właściwości elementów przełączających, przez ocenę strat i konstrukcję układów chłodzących Autor buduje przekształtniki o bardzo wysokim stopniu upakowania. Ponadto proponuje modyfikacje części silnoprądowej przekształtnika DC/DC prowadzące do w pełni miękkiego przełączania tranzystorów, co pozwala osiągnąć sprawności do 99,5%. Prace Autora mają kluczowe znaczenie dla rozwoju zastosowań elementów SiC w energoelektronice, a tym samym wskazują na przydatność w naukach inżynieryjno-technicznych.

Zdaniem recenzenta, opiniowana rozprawa mgr. inż. Rafała Kopacza pt. "Przekształtniki energoelektroniczne średniego napięcia z elementami z węglika krzemu" („Medium Voltage Power Converters with SiC Power Devices") stanowi oryginalne rozwiązanie technicznie nietrywialnego problemu badawczego. Świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Autora w zakresie elektroniki, energoelektroniki i sterowania. Na szczególne podkreślenie zasługuje dorobek publikacyjny Autora, na który składa się 10 artykułów w czasopismach (w większości z bazy JCR) oraz 9 wystąpień na konferencjach krajowych i zagranicznych. Przekłada się to na 36 cytowań w bazie WoS (IH=4).

Stwierdzam, że opiniowana **rozprawa jest wybitnie dobra i zasługuje na wyróżnienie** oraz spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 13 ust. 1 Ustawy w zakresie dyscypliny *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*.

Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Rafała Kopacza do publicznej obrony przed Komisją Doktorską powołaną przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej.

Andrzej Sikorski