

Prof. dr hab. inż. Robert Stala
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii

Kraków, 02.12.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej p.t.: „Series connection of silicon carbide MOSFETs in a medium voltage range”, mgr. inż. Przemysława Trochimiuka

WPLYNEŁO

2024 -12- 10

dn.....

Charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska pt.: „Series Connection of Silicon Carbide MOSFETs in a Medium Voltage Range”, której autorem jest mgr inż. Przemysław Trochimiuk została opracowana pod opieką promotora prof. dr. hab. inż. Jacka Rąbkowskiego. Tytuł rozprawy w języku polskim jest następujący: „Szeregowe łączenie tranzystorów MOSFET z węglika krzemu w zakresie średnich napięć”. Recenzja zrealizowana została po wyznaczeniu do pełnienia funkcji recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora, uchwałą Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej nr 873/II/2024.

Recenzowana rozprawa doktorska opracowana została w języku angielskim i zawiera również streszczenie i tytuł w języku polskim. Całkowita objętość rozprawy to 336 stron, na którą składają się cztery główne rozdziały, oraz rozdziały wprowadzające, wykaz bibliografii, wykazy oznaczeń, rysunków i tabel, a także podsumowanie i dodatki.

Obszar tematyczny rozprawy obejmuje analizę zjawisk występujących przy pracy przekształtnika energoelektronicznego z gałęzią o szeregowo połączonych tranzystorach MOSFET z węglika krzemu. Jest to tematyka o istotnym znaczeniu naukowym i technicznym, inicjowana rozwojem w obszarze przyrządów półprzewodnikowych mocy.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi wielowątkowe wprowadzenie i uzasadnienie podjęcia przez autora analizowanego tematu badawczego. W kontekście zagadnień badawczych, do których autor odnosi się tu ponad dziewięćdziesięciokrotnie, scharakteryzowano znaczenie energoelektroniki dla rozwoju systemów wytwarzania, przesyłu i magazynowania energii, a także aspekty techniczne i materiałowe związane z energoelektronicznymi przyrządami mocy i topologiami układów na przekształtników średnich napięć.

Przed sformułowaniem tezy, w rozdziale drugim, autor słusznie odnosi się do problematyki łączenia szeregowego elementów półprzewodnikowych, znanej i dogłębnie badanej w kontekście zastosowań elementów takich jak tranzystory IGBT. Istotne jest tu wskazanie przez autora podstawowych różnic dla stosowania wyrównywania napięć na szeregowo połączonych tranzystorach IGBT oraz SiC MOSFET wynikające z różnicy w procesie przełączania oraz szybkości przełączania, co uzasadnia prowadzenie badań nad metodami wyrównywania napięć w gałęziach z tranzystorami SiC MOSFET. W tezie jaką sformułowano w rozprawie stwierdzono, że „możliwy jest rozwój technik wyrównywania napięć dla szeregowo połączonych tranzystorów MOSFET z węglika krzemu w zakresie średnich napięć, umożliwiających niskie straty mocy i bezpieczną pracę w stanach dynamicznych i przy pracy ustalonej” (tłumaczenie recenzenta sformułowania: “it is possible to develop voltage balancing methods for the series-connected SiC MOSFETs operating at medium voltage range to enable low power losses and safe operation in static and dynamic conditions.”). Z treści rozdziału drugiego i zawartości kolejnych rozdziałów rozprawy wynika, że kandydat do stopnia naukowego doktora za cele w pracy postawił sobie uzasadnienie stawianej tezy, na podstawie uzyskanych wyników badań analitycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych dotyczących zjawisk zachodzących przy szeregowym połączeniu tranzystorów SiC MOSFET, znanych metod wyrównywania napięć na szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET, oraz własnych koncepcji aktywnego wyrównywania napięć i ich implementacji. Zagadnienie badawcze objęte rozprawą doktorską jest więc dostatecznie jasno sformułowane.

Opis badań przeprowadzonych w ramach rozprawy rozpoczęto rozdziale trzecim od analizy procesu przełączania szeregowo połączonych tranzystorów SiC MOSFET. Proces przełączania i wpływ parametrów obwodu badano w układzie półmostka z dwoma łącznikami o szeregowo połączonych dwóch tranzystorach i obciążeniem indukcyjnym. Poszczególne tranzystory modelowane są obwodowym schematem zastępczym bazującym sterowanym źródle prądu o wzmacnieniu zależnym od

współczynnika transkonduktancji tranzystora i napięcia bramki, z parametrami RC, diodą zwrotną i obwodem bramkowym. W rozdziale tym autor przeprowadza analizę procesu załączania i wyłączenia tranzystora z pominięciem przypadku załączania przez zerowym napięciu czyli gdy w momencie załączania tranzystora przewodzi jego dioda zwrotna. Modelowanie procesu załączania pozwoliło na wykazanie przez autora zależności określającej szybkość zmian napięcia na tranzystorze w funkcji parametrów tranzystora, obwodu bramkowego i obciążenia. Interesującym aspektem procesu załączania jest problem opóźnienia sterowania tranzystorów, co zademonstrowano w pracy, pomimo iż pojawia się tu przepięcie na tranzystorze w dłuższym odcinku czasu. Autor szczegółowo przedstawił model procesu załączania i wyłączenia pary tranzystorów połączonych szeregowo w układzie badawczym. Podkreślono tu znaczenie zjawisk w procesie wyłączenia tranzystora, które ze względu na długość czasu trwania wyłączenia mogą spowodować niebezpieczne przeciążenie napięciowe jednego z tranzystorów. W kolejnych podrozdziałach zamieszczono poszczególne przypadki analizy procesów wyłączenia tranzystorów przy niezgodności parametrów i warunków pracy w parze tranzystorów połączonych szeregowo, a w szczególności ich wpływ na czas opóźnienia wyłączenia i czas narastania napięcia skutkujący niezrównoważeniem napięć na tranzystorach. Autor przyjął do analizy parametry na podstawie dokumentacji seryjnie produkowanych elementów zakładając możliwy zakres ich rozbieżności, wykazując analitycznie istotny wpływ parametrów tranzystorów, takich jak rezystancja wewnętrzna bramki, napięcie progowe czy transkonduktancja. Istotne są tu również komentarze autora, co do uzyskanych wyników w kontekście możliwości wystąpienia rozbieżności parametrów w aplikacji tranzystorów, dotyczące, na przykład wpływu rezystancji bramkowej wewnętrznej, który może być istotny w przypadku, gdy zewnętrzny obwód bramkowy zawiera niewielką rezystancję. Dalsza dyskusja poszczególnych aspektów niezgodności parametrów tranzystorów szeregowych w procesie przełączania jest bardzo szczegółowa i pozwala na wskazanie ich wpływu na nierównomierny rozkład napięć na tranzystorach. Analogiczną analizę autor przeprowadził w odniesieniu do wpływu parametrów obwodu bramkowego, pojemności pasozytniczych obwodów i warunków pracy gałęzi z szeregowo połączonymi tranzystorami. Rozdział ten podsumowano w punkcie 3.6 rozprawy zestawiając analizowane parametry ze wskazaniem ich wpływu na rozkład napięć w połączeniu szeregowym tranzystorów SiC MOSFET. Wnioski z tego rozdziału oraz zestawienie znanych metod redukcji niezrównoważenia napięć przedstawione rozdziale czwartym z licznymi odniesieniami do literatury, stanowią rzetelne podstawy do badań koncepcji układów i metod kontroli podziału napięć na szeregowo połączonych tranzystorach. Autor przystępując do przeglądu metod kontroli napięć na szeregowo połączonych tranzystorach, w rozdziale czwartym słusznie odwołuje się do historii tych zagadnień znanych z technik wykorzystania szeregowo połączonych tranzystorów IGBT, a także tranzystorów krzemowych MOSFET. Autor ponownie uzasadnia tu badaną problematykę możliwością optymalizacji przekształtników elektronicznych przez zastosowanie tranzystorów SiC MOSFET i pracę z wyższą częstotliwością niż w przypadku tranzystorów IGBT. Pomimo analogicznych problemów dla tranzystorów SiC MOSFET poszukuje się nowych metod wyrównywania napięć na szeregowo połączonych elementach ze względu na szybkość zjawisk zachodzących w stanach łączeniowych. Zestawienie tych metod przedstawiono w rozdziale czwartym rozprawy, a dokładny opis wybranych przypadków metod pasywnych i aktywnych świadczy o dużej wiedzy autora i znajomości aktualnej literatury w obszarze prowadzonych badań. Autor zwraca tu uwagę zarówno na koncepcje proponowanych w literaturze metod, ale także ich implementację, tak jak w przypadku metody aktywnej wykorzystującej układ FPGA w systemie ze sprzężeniem zwrotnym do sterowania opóźnieniem sygnałów bramkowych tranzystorów SiC MOSFET. Podsumowujące porównanie analizowanych metod przeprowadzono przez scharakteryzowanie parametrów takich jak zakres napięcia, dodatkowe straty mocy, modularność, złożoność, koszt, trwałość, czy wymagana dodatkowa procedura startowa układy. W rozprawie doktorskiej właściwie wykorzystano stan wiedzy dostępny w literaturze naukowej i technicznej cytując 266 pozycji.

Rozprawa doktorska pana mgr. inż. Przemysława Trochimiuka zawiera także, w rozdziale 5, opis przeprowadzonych badań symulacyjnych zjawisk występujących przy szeregowym połączeniu tranzystorów SiC MOSFET. Badania prowadzono w programie Saber RD i wykorzystano do symulacji modele dwóch typów tranzystorów SiC MOSFET. Autor w rozprawie przedstawia metodę modelowania tranzystora i generowania jego parametrów dla dalszych symulacji. Zastosowane w badaniach symulacyjnych modele tranzystorów zawierają parametry dynamiczne umożliwiające badania zjawisk przełączania dla poszczególnych aspektów niezgodności parametrów pomiędzy szeregowo połączonymi elementami oraz metod kontroli rozkładu napięć na szeregowo połączonych

tranzystorach. W kolejnych podrozdziałach pracy zamieszczono wyniki takich badań związanych z wpływem wybranych parametrów w gałęzi szeregowo połączonych tranzystorów SiC MOSFET na rozkład napięcia dren-źródło po wyłączeniu tranzystora. W przypadku tych badań podano wartości liczbowe poszczególnych parametrów podczas symulacji, co jest bardzo istotne, ponieważ pozwala oszacować możliwość wystąpienia nierówności parametrów w rzeczywistej aplikacji tranzystorów. Zdefiniowano również wartości względne parametrów elementów oraz napięcia dren-źródło, co umożliwiło czytelne i łatwe do porównania przedstawienie wyników na wykresach. Wyniki symulacyjne potwierdziły wcześniejszą analizę teoretyczną wpływu parametrów na podział napięć na szeregowo połączonych tranzystorach, a ich zestawienie zamieszczono w podsumowaniu do rozdziału 5.2. Badania symulacyjne autor wykorzystał również do zweryfikowania metod wyrównywania napięć nas szeregowo połączonych tranzystorach. Obwód testowy stanowił układ półmostka z obciążeniem indukcyjnym, przy napięciu i prądzie dobranym do znamionowych wartości dla badanych elementów, jednak badania symulacyjne zostały rozszerzone w stosunku do teoretycznych przez zastosowanie dwóch oraz czterech połączonych szeregowo tranzystorów. W części tej przedstawiono wyniki symulacyjne poszczególnych przypadków rozpoczynając od wyidealizowanego układu, gdzie napięcia są równe, a następnie przedstawiając przypadki z czynnikami wywołującymi niezrównowagę napięć na szeregowo połączonych tranzystorach, takimi jak wewnętrzna rezystancja bramki, napięcie progowe i opóźnienie sygnału sterowania, oraz wprowadzonymi metodami kontroli rozkładu napięć. Demonstracja przebiegów napięcia dren-źródło tranzystorów w poszczególnych przypadkach jest bardzo czytelna i pokazuje skalę zjawiska niezrównowagi napięć i skuteczność metody jego wyrównywania. Istotne są tu również wyniki, czasu przełączania, szybkości zmian napięcia oraz energii przy załączaniu i wyłączaniu poszczególnych tranzystorów, a także ich różnica w stanie niezbalansowania napięć, co może wpływać na wzrost temperatury niektórych tranzystorów. Autor zaimplementował metody pasywne, bazujące na ograniczaniu napięcia przez elementy dołączone równolegle do tranzystorów oraz metody aktywne wpływające na przebieg sygnału bramkowego, które wymagały już na etapie symulacji opracowania koncepcji ich realizacji. Dla realizacji kontroli napięć na tranzystorach przez opóźnienie sygnału bramkowego przeprowadzono dobór parametrów dla zamkniętego układu regulacji. W przypadku gdy regulowane jest opóźnienie sterowania w więcej niż jednym szeregowo połączonym tranzystorze, jak w układzie przedstawionym na rys. 5.37, stany dynamiczne i dobór regulatorów mogą być bardziej złożone ze względu na wzajemne oddziaływanie napięć na poszczególnych tranzystorach. Dla wykorzystania możliwości wyrównywania napięć na szeregowo połączonych tranzystorach przez zmianę wartości napięcia bramki przy załączeniu, autor proponuje metodę opisaną w podrozdziale 5.3.6, gdzie wartość napięcia bramki wyliczana jest w zamkniętym systemie regulacji. Skuteczność tej metody przedstawiono z wykorzystaniem przebiegów i wartości parametrów dla przypadku dwóch i czterech tranzystorów połączonych szeregowo. Co również istotne, przeprowadzono dyskusję nad porównaniem obu metod aktywnych wskazując ich niewielkie różnice w osiąganych parametrach oraz różnice w realizacji praktycznej. Metody aktywne wykazują korzystne własności w porównaniu do metod pasywnych w aspekcie wyrównywania napięcia na tranzystorach i generowaniu dodatkowych strat energii. Ponieważ metody te działają z opóźnieniem pojawia się problem przejściowego niezbalansowania napięć na tranzystorach, który zaadresowano w ostatniej części rozdziału piątego prezentując metodę startu z obniżonym napięciem stałym przekształtnika i metodę wykorzystującą zabezpieczenie tranzystorów przez diody TVS.

Istotną częścią badań przeprowadzonych przez mgr. inż. Przemysława Trochimiuka w obszarze objętym ocenianą rozprawą doktorską są badania eksperymentalne zjawiska niezrównowagi napięć na szeregowo połączonych tranzystorach SiC wybranych przypadków oraz aktywnych metod wyrównywania napięcia na tranzystorach. Do dalszych badań wybrano metody bazujące na kontroli czasu impulsu sterowania oraz wartości napięcia bramkowego. Dla scharakteryzowania przeprowadzonych eksperymentów autor zawarł w rozprawie wiele szczegółów dotyczących budowy układu testowego, metod pomiaru i wyników. Z opisu tego wynika, że pomiary zostały przeprowadzone z właściwą dokładnością i dbałością o aspekty techniczne wpływające na jakość uzyskanych wyników. Pomiarów dokonano w układzie przekształtnika obniżającego napięcie o gałęzi tranzystorowej przerywającej połączenie obciążenia z ujemnym biegunem napięcia źródła zasilającego, przez co napięcie na jednym z aktywnych tranzystorów odniesione jest do potencjału ujemnego źródła, a oba zmierzone napięcia stanowią sygnały wejściowe dla układu regulacji dla aktywnego wyrównywania napięć na szeregowo połączonych tranzystorach. W rozprawie zademonstrowano eksperymentalny

wynik naturalnego niezrównoważenia napięć na dwóch szeregowo połączonych tranzystorach, a następnie przebiegi i wartości strat energii w tranzystorach przy zastosowaniu metod wyrównywania napięć na tranzystorach, a także działanie metody realizującej aktywne, przez kontrolę czasu generowania sygnału bramkowego, wyrównywanie napięć w zamkniętym układzie regulacji. Wyniki przedstawione dla układu testowego pokazują skuteczność metody aktywnej i w kolejnych etapach pracy zaprezentowano wyniki implementacji metod wyrównywania napięć w układzie półmostka z obciążeniem indukcyjnym i szeregowo połączonymi dwoma tranzystorami. Jest to interesujący przypadek, ponieważ w zamkniętym układzie regulacji wypracowywana jest korekta sterowania dla tranzystorów w obu gałęziach przekształtnika. W testach naturalnego niezbalansowania widoczna jest znaczna różnica napięć na szeregowo połączonych tranzystorach, która zostaje skutecznie zredukowana przez zastosowanie przez autora metody aktywnej kontroli czasu generowania impulsów sterujących. Bardzo istotnym zagadnieniem, które autor analizuje jest wpływ niezrównoważenia napięć na szeregowo połączonych tranzystorach oraz wprowadzenie metod redukcji niezrównoważenia na straty energii podczas przełączania. Badania takie przeprowadzono również w warunkach eksperymentalnych i wyniki zamieszczono w rozdziale 6. Redukcja niezrównoważenia napięć przedstawiana jest w stanach dynamicznych, w różnych warunkach opracowanych przez doktoranta. Widoczny jest wpływ parametrów obwodu na przebiegi w stanach dynamicznych, należałoby jednak bardziej wnikliwie wskazać przyczynę występowania oscylacji napięć na poszczególnych tranzystorach, pomimo że układ aktywnego wyrównywania napięć działa poprawnie.

Doktorant w ramach badań opisywanych w rozprawie podjął również bardzo istotny problem związany z implementacją metod aktywnego wyrównywania napięć na szeregowych tranzystorach z wykorzystaniem układów zaimplementowanych we wzmacniaczach bramkowych. Jest to związane z praktycznym zastosowaniem badanych metod aktywnych. Zaprojektowanie i przeprowadzenie eksperymentów z układami wzmacniaczy bramkowych z funkcją DSP realizującą wyrównywanie napięć na tranzystorach połączonych szeregowo można uznać za istotne osiągnięcie naukowe i inżynierskie zaprezentowane w rozprawie. Wyniki przedstawione dla takiej implementacji metody demonstrują jej skuteczność. Na uznanie zasługują komentarze autora związane ze szczegółową analizą uzyskanych przebiegów w warunkach eksperymentalnych z możliwym wpływem pojemności pasożytniczych na parametry obwodów. W rozdziale 6 zaprezentowano również oryginalne wyniki metody aktywnego wyrównywania napięć na szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET przez zmianę wartości napięcia zasilania układu bramkowego. Autor przeprowadził badania w sposób systematyczny demonstrując początkowo wartość naturalnego niezrównoważenia napięć, a następnie w układzie testowym, w otwartym systemie regulacji, przedstawił wpływ wartości napięcia obwodu bramkowego na różnice napięć dren-źródło tranzystorów połączonych szeregowo. Wyniki te pozwoliły na wyciągnięcie wniosków, co do korzystnych cech tej metody ze względu na jej skuteczność wyrównywania napięć stosu tranzystorów przy niepowiększonych stratach energii.

W rozdziale siódmym rozprawy dokonano podsumowania zrealizowanych badań i osiągniętych wyników na poszczególnych etapach. Niewątpliwie autor osiągnął założone cele badań potwierdzając stawianą tezę, która zakładała, że „możliwy jest rozwój technik wyrównywania napięć dla szeregowo połączonych tranzystorów MOSFET z węgla krzemu w zakresie średnich napięć, umożliwiających niskie straty mocy i bezpieczną pracę w stanach dynamicznych i przy pracy ustalonej”. Na kolejnych etapach badań osiągnięto oryginalne wyniki, które wnoszą istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Doktorant użył właściwych metod badawczych. Zarówno badania naukowe, jak i ich opis w przedstawionej do recenzji rozprawie doktorskiej, a także osiągnięcia inżynierskie autora związane z budową modeli eksperymentalnych i symulacyjnych należy ocenić bardzo wysoko. Pomimo bardzo obszernej zawartości rozprawy, autor przedstawił istotne zagadnienia do dalszych badań w obszarze aktywnego wyrównywania napięć na szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET, prezentując także rozpoczęte już prace eksperymentalne. Wartość rozprawy podnoszą również materiały zamieszczone w dodatkach prezentujące rozwiązania zastosowane do symulacji, pomiarów, sprzętowej implementacji algorytmów regulacji dla metod aktywnych, schematy i rozwiązania projektu PCB oraz elementów mechanicznych, a także stanowiska laboratoryjne, opis ich komponentów i aparatury pomiarowej. Oryginalność rozprawy polega na przedstawieniu metody aktywnego wyrównywania napięcia na szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET metodą aktywną wykorzystującą regulację napięcia bramki, a także metody aktywnej bazującej na kontroli przesunięcia czasowego sygnałów bramkowych

tranzystorów połączonych szeregowo w szerszym zakresie niż wyniki opublikowane przez kandydata do stopnia doktora jako współautora publikacji. Samodzielny i oryginalny dorobek autora widoczny jest szczególnie w obszarze badań metody aktywnej wykorzystującej regulację napięcia bramki. Doktorant jest współautorem opublikowanych wyników badań w obszarze metody aktywnej bazującej na kontroli przesunięcia czasowego sygnałów bramkowych tranzystorów połączonych szeregowo, a jego oryginalny dorobek obejmuje również dogłębną analizę zjawiska nierównego podziału napięć na tranzystorach SiC MOSFET połączonych szeregowo z wpływem parametrów tranzystorów na to zjawisko, weryfikację znanych metod z wykorzystaniem narzędzi analitycznych symulacyjnych i eksperymentalnych. W stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową pozycja rozprawy jest znacząca, o czym świadczą publikacje kandydata związane tematycznie z badanymi w ramach rozprawy zagadnieniami. Rozprawa jest ponadto bardzo starannie opracowana, posiada właściwy układ, a zamieszczone wyniki stanowią odpowiednią podstawę do sformułowania wniosków z przeprowadzonych badań. Przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych jest bardzo istotna, ponieważ adresuje problemy implementacji tranzystorów SiC MOSFET w szerszym obszarze zastosowań niż wynika to z ich parametrów, przez połączenie szeregowo w gałęziach przekształtników. Jest to czynnik rozwojowy w kontekście optymalizacji systemów przekształtnikowych.

Liczne aspekty poruszane w rozprawie umożliwiają sformułowanie zagadnień dyskusyjnych, które wymieniono w poniższych punktach:

1. W rozdziale trzecim pojawiają się przykłady wpływu rozbieżności parametrów tranzystorów na własności procesów wyłączania tranzystorów połączonych szeregowo. Ponieważ parametry szacowane są na podstawie dokumentacji elementów, dlatego interesujące byłoby rozpatrzenie przykładu z podaniem danych liczbowych wyników przedstawionych na rysunkach 3.19 lub 3.20.
2. W rozdziale 5.2.5 omówiono wyniki wpływu czasu opóźnienia sygnałów bramkowych na nierówny podział napięć na szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET w zakresie do 50 ns. Czy wprowadzenie takiego opóźnienia może mieć istotny wpływ na czas martwy i następnie na parametry napięcia wyjściowego falownika?
3. Autor na stronie 173 podaje, że prezentowane wyniki symulacyjne uzyskano z pominięciem niektórych elementów pasożytniczych w modelu, dla przejrzystości prezentacji z zachowaniem odpowiedniej dokładności. Można byłoby jednak zademonstrować wybrane przebiegi symulacyjne z uwzględnieniem indukcyjności pasożytniczych obwodów.
4. Interesujące byłoby przedstawienie czy stan naturalnego niezrównoważenia napięć na szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET zmienia się w dłuższym przedziale czasu odpowiadającym zmianie temperatury tranzystorów.
5. Istotne byłoby zademonstrowanie dynamiki stanu niezrównoważenia napięć, czyli wzrostu różnicy napięć na tranzystorach po wyłączeniu aktywnego ich wyrównywania.
6. Do wyników przedstawiających przebiegi podczas testów układu przedstawionego na rys. 6.6 korzystnie byłoby dołączyć przebiegi napięć na kondensatorach dzielnika napięcia oraz wyjaśnić przyczynę powstawania oscylacji w napięciach na tranzystorach.
7. Czy w ramach badań obejmujących zagadnienia rozprawy doktorskiej badano możliwość wykorzystania metody ograniczania wartości napięcia na szeregowo połączonych tranzystorach w gałęziach falownika przez zastosowanie diod TVS, ponieważ problematyczne w takim przypadku może być występowanie w napięciu stałym falownika składowej zmiennej o częstotliwości mocy wyjściowej.

Wniosek końcowy

Podsumowując zawartość przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej pana jest mgr. inż. Przemysława Trochimiuka p.t.: „Series connection of silicon carbide MOSFETs in a medium voltage range”, stwierdzam, że autor zrealizował badania naukowe osiągając znaczące wyniki dla rozwoju dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, a także dla optymalizacji przekształtników energoelektronicznych w warunkach przemysłowych. Kandydat do nadania stopnia naukowego doktora wykazał się ponadto bardzo dużym zaangażowaniem oraz dużą wiedzą niezbędną do realizacji poszczególnych etapów badań i ich przygotowania. Przeprowadzone badania zawierały wiele etapów, które zostały przez autora zaprezentowane we właściwej kolejności

prowadząc do wykazania prawdziwości stawianej w pracy tezy. Kandydat do nadania stopnia doktora zademonstrował umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz ogólną wiedzę teoretyczną w obszarze zagadnień dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska, której autorem jest mgr inż. Przemysław Trochimiuk pt. „Series connection of silicon carbide MOSFETs in a medium voltage range”, spełnia warunki określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższymi nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742), w odniesieniu do dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Przemysława Trochimiuka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Pracę można zakwalifikować jako wybitnie dobrą, zasługującą na wyróżnienie, ze względu na wysoki poziom przeprowadzonych badań naukowych, które obejmują również aspekty nowych koncepcji, popartych wysokiej jakości wynikami, w tym eksperymentalnymi. Zakres przeprowadzonych przez kandydata do stopnia doktora badań był szeroki i obejmował zjawiska podstawowe związane z powstawaniem nierównego podziału napięcia na szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET oraz metody redukcji stanu niezrównoważenia napięć. Tak szeroki zakres badań pozwolił jednak na odpowiednie scharakteryzowanie skuteczności metod aktywnych wyrównywania napięć na szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET. W czasie realizacji badań kandydat do stopnia naukowego doktora był współautorem publikacji w znaczących czasopismach i referatów konferencji, co świadczy o wysokim poziomie przeprowadzonych badań naukowych.

Robert Stala

