

WPLYNEŁO

2024-12-04

dn.....

Gliwice, 2.12.2024 r.

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

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

Tytuł rozprawy: *Szeregowe łączenie tranzystorów MOSFET z węglika krzemu w zakresie średnich napięć*
(*Series connection of silicon carbide MOSFETs in a medium voltage range*)

Auto rozprawy: mgr inż. Przemysław TROCHIMIUK

Promotor: prof. dr hab. inż. Jacek RĄBKOWSKI

Rozprawa doktorska napisana została w języku angielskim. Liczy łącznie 336 stron i podzielona jest na 7 rozdziałów. Spis literatury zawiera 266 pozycji, w tym 1 pozycję autorską i 6 pozycji współautorskich Doktoranta. Ponadto rozprawa zawiera listę stosowanych skrótów i oznaczeń oraz listy 146 rysunków i 37 tabel. Do rozprawy dołączono 10 dodatków, obejmujących łącznie 49 stron, stanowiących jej istotne uzupełnienie w zakresie merytorycznym i technicznym.

Recenzowana rozprawa doktorska jest kompletna i nie wymaga uzupełnień – jej forma i zawarte informacje umożliwiają opracowanie recenzji zawierającej ocenę spełnienia warunków określonych w art. 187 ust. 1-2 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

Tematyka rozprawy doktorskiej jest bardzo ważna i aktualna. Koncentruje się na zagadnieniach związanych z łączeniem szeregowym tranzystorów mocy MOSFET wykonanych z węglika krzemu, w szczególności na zapewnieniu równomiernego rozkładu napięć na szeregowo łączonych tranzystorach w przekształtnikach energoelektronicznych średniego napięcia, zarówno w warunkach statycznych jak i dynamicznych. We wprowadzeniu do rozprawy doktorskiej Doktorant szczegółowo wyjaśnił i uzasadnił podjętą tematykę badań. Stosowanie tranzystorów wykonanych z węglika krzemu w przekształtnikach energoelektronicznych pozwala na podwyższenie ich częstotliwości pracy i zmniejszenie strat mocy, przy jednoczesnym zwiększeniu występujących napięć i uzyskiwanych gęstości mocy w porównaniu z osiąganymi tranzystorów krzemowych. Jest to niezmiernie istotne ze względu na powszechność wykorzystywania energii elektrycznej, jej efektywnego przekształcania i dokonującej się transformacji energetycznej. Potrzeba realizacji przekształtników średniego napięcia o jak najlepszych parametrach, wykorzystując wydajne podzespoły, wynika z ich szerokich zastosowań, przykładowo w instalacjach fotowoltaicznych, turbinach wiatrowych, systemach magazynowania energii, lokalnych mikro sieciach, systemach ładowania pojazdów elektrycznych i technice napędowej. Jednakże ze względu na aktualne ograniczenia z dostępem do odpowiednich tranzystorów MOSFET z węglika krzemu w aplikacjach średniego napięcia uzasadnione staje się ich szeregowo łączenie.

1/6

Możliwe jest wykorzystanie tańszych i łatwiej dostępnych tranzystorów o niższym napięciu blokowania w porównaniu z droższymi i trudniej dostępnymi tranzystorami średnionapięciowymi lub zastosowaniem przekształtników o bardziej złożonych topologiach wielopoziomowych. W rezultacie w zakresie średnich napięć mogą zostać użyte wydajne tranzystory o niższym napięciu blokowania, w prostych, dwupoziomowych topologiach przekształtników. Pozostaje jednak do rozwiązania problem ich bezpiecznej pracy poprzez zapewnienie równomiernego rozkładu napięć na szeregowo łączonych tranzystorach w warunkach statycznych i dynamicznych – podstawowe zagadnienie niniejszej rozprawy doktorskiej.

W rozprawie doktorskiej sformułowano następującą tezę: *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* (możliwe jest opracowanie metod równoważenia napięcia dla łączonych szeregowo tranzystorów SiC MOSFET działających w średnim zakresie napięć, zapewniając niskie straty mocy i bezpieczną pracę w warunkach statycznych i dynamicznych). W ten sposób właściwie zdefiniowano faktyczny i aktualny problem naukowo-badawczy, którego rozwiązanie ma duże znaczenie praktyczne. Został on wyczerpująco scharakteryzowany i uzasadniony przez Doktoranta. Jednocześnie należy podkreślić, że tematyka całej rozprawy doktorskiej i jej poszczególne części składowe zostały jasno sformułowane i przedstawione.

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

Doktorant dokonała bardzo szczegółowej i rzetelnej analizy źródeł literaturowych, ze szczególnym uwzględnieniem literatury światowej i w ten sposób określił aktualny stan wiedzy. Spis literatury rozprawy liczy łącznie 266 pozycji. Są one reprezentatywne dla podjętej tematyki badań. Dotyczą artykułów z renomowanych czasopism naukowych, materiałów konferencyjnych i istotnych not katalogowych oraz aplikacyjnych. Ich znacząca część dotyczy opracowań z ostatnich lat. W spisie literatury do rozprawy znajduje się również 1 pozycja autorska i 6 pozycji współautorskich Doktoranta.

Podsumowując, wybór i sposób wykorzystania źródeł literaturowych potwierdzają wysokie kompetencje Doktoranta i bardzo dobre rozeznanie w podjętej tematyce badań.

3. Ocena rozwiązania postawionego problemu oraz metod i przyjętych założeń

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi zamknięty i kompletny cykl badań, odzwierciedlony w kolejno zrealizowanych etapach. Rozprawa zawiera ustalenie stanu aktualnego problematyki, wnikliwą analizę teoretyczną, badania symulacyjne z wykorzystaniem możliwie dokładnych modeli oraz wyczerpujące i weryfikujące badania eksperymentalne. Ustalenie stanu aktualnego problematyki związanej z równoważeniem napięć na szeregowo łączonych tranzystorach MOSFET posłużyło do określenia kierunków i zakresów dalej prowadzonych badań. W kolejnym etapie przeprowadzono uproszczoną i szczegółową analizę procesu przełączania tranzystorów połączonych szeregowo ze względu na wpływ różnych przyczyn (parametrów) na powstawanie niezrównoważenia napięć szeregowych tranzystorów. Uwzględniono między innymi wpływ różniących się parametrów tranzystorów i sterowników bramkowych, pojemności pasożytniczych i warunków pracy, wskazując na najistotniejsze znaczenie niezgodności napięć progowych tranzystorów i czasów propagacji sygnałów sterujących. Kontynuując, dokonano przeglądu znanych z literatury metod równoważenia napięć, dzieląc je na metody pasywne, zatraskujące, aktywne i hybrydowe. Następnie przeprowadzono rozbudowaną analizę symulacyjną w programie Synopsys Saber, w celu potwierdzenia i dokładniejszego określenia właściwości różnych metod równoważenia napięć na szeregowo łączonych tranzystorach. Zastosowano zaawansowane modele tranzystorów mocy MOSFET będące częścią modułów typu CAS300M17BM2 i CAB450M12XM2, których odpowiednie parametry określono na podstawie danych katalogowych i identyfikacji pomiarowej. Badania symulacyjne odbyły się w topologii przekształtnika półmostkowego z dwoma i czterema szeregowo połączonymi tranzystorami. Ostatnim etapem badań były niezbędne badania laboratoryjne, podczas których wykorzystano tranzystory MOSFET wchodzące w skład modułu typu CAS300M17BM2, dokonując przede wszystkim

testów dwóch aktywnych metod równoważenia napięć na szeregowo łączonych tranzystorach – metody opóźniania sygnałów sterujących poszczególnymi tranzystorami i metody zmiany dodatnich wartości napięć zasilających ich sterowniki bramkowe. Jednocześnie opracowano w tym celu dedykowane sterowniki bramkowe ze zintegrowanymi metodami równoważenia napięć szeregowych tranzystorów. Badania laboratoryjne potwierdziły efektywne działanie tych metod, zarówno pod względem poprawnego równoważenia napięć jak i zachowania strat mocy szeregowo łączonych tranzystorów. Uzyskane wyniki stanowią ostateczne potwierdzenie poprawności przyjętych założeń, metod i rozwiązań. Na każdym etapie rozprawy Doktorant zamieszcza bardzo wyczerpujące podsumowania i porównania, wykorzystując użyteczne zestawienia parametrów w formie tabel.

W trakcie badań symulacyjnych Doktorant korzystał z programów Synopsys Saber i częściowo LTSpice. Niezbędne obliczenia numeryczne i optymalizacje wykonał w środowisku oprogramowania Matlab-Simulink. Podczas projektowania i konstruowania stanowisk badawczych użył między innymi programu Autodesk Eagle. Przeprowadzone badania laboratoryjne wymagały zastosowania odpowiednich metod i narzędzi pomiarowych, między innymi zasilaczy i oscyloskopu cyfrowego wyposażonego w różnicowe sondy napięciowe i specjalizowane sondy prądowe. Właściwa realizacja pomiarów z pewnością nie była zadaniem trywialnym i wymagała wiedzy eksperckiej. Przeprowadzone prace projektowe i konstrukcyjne były złożone ze względu na specyfikę wykorzystanych tranzystorów MOSFET z węgla krzemu i ich użycia w zakresie średnich napięć.

Przyjęte założenia, sposób rozwiązania postawionego problemu i zastosowane metody nie budzą zastrzeżeń. Wszystkie te elementy są poprawne i odpowiednie dla tematyki zrealizowanych badań.

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

Rozprawa doktorska zawiera szereg oryginalnych osiągnięć Doktoranta. Za najważniejsze z nich uważam:

- szczegółową analizę teoretyczną procesu przełączania szeregowo połączonych tranzystorów MOSFET, uzupełnioną porównaniami i wnioskami istotnymi ze względu na nierównoważenie napięć szeregowych tranzystorów,
- opracowanie rozszerzonych modeli symulacyjnych tranzystorów MOSFET w modułach mocy typu CAS300M17BM2 i CAB450M12XM3, wykorzystując wbudowane narzędzie PMT (Power MOSFET Tool) w programie Synopsys Saber,
- symulacyjne badania porównawcze skuteczności różnych metod równoważenia napięć na szeregowo połączonych tranzystorach MOSFET spowodowanych wybranymi przyczynami nierównoważenia dla dwóch i czterech tranzystorów połączonych szeregowo, w tym opracowanie zamkniętych układów sterowania dla dwóch aktywnych metod równoważenia napięć,
- realizację metody opóźnianie sygnałów sterujących w celu zrównoważenia napięć na szeregowo połączonych tranzystorach MOSFET i jej weryfikację eksperymentalną w różnych warunkach pracy,
- opracowanie i zweryfikowanie eksperymentalne sterowników bramkowych ze zintegrowanymi metodami równoważenia napięć szeregowych tranzystorów, w tym rozwój izolowanych obwodów pomiarowych napięć średniego napięcia o zminimalizowanych opóźnieniach, niezbędnych do realizacji sprzężenia zwrotnego w aktywnych metodach równoważenia napięć,
- zaproponowanie i częściowe zweryfikowanie eksperymentalne nowej metody aktywnego równoważenia napięć szeregowych tranzystorów poprzez zmianę dodatnich wartości napięć zasilających sterowniki bramkowe.

Istotnym potwierdzeniem oryginalności osiągnięć Doktoranta są również opracowane publikacje w czasopiśmie naukowych. Doktorant jest autorem 1 artykułu w *Przeglądzie Elektrotechnicznym* i pierwszym współautorem 3 artykułów (dwukrotnie *IEEE Access* i *European Conference on Power Electronics and Applications*).

Ocena oryginalności i samodzielności dorobku Doktoranta jest wysoka. Przeprowadzone badania naukowe wpisują się w aktualnie istotne zagadnienia związane z rozwojem nowoczesnych rozwiązań energoelektronicznych. Ich poziom w zakresie realizacji przekształtników średniego napięcia odpowiada najlepszym rozwiązaniom światowym.

5. Ocena umiejętności poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych wyników

Rozprawa doktorska została przygotowana w języku angielskim. Jej struktura jest logiczna. Analizy prowadzone są bardzo systematycznie, a ich wyniki są wartościowe i rzetelne. Dyplomant zadbał o właściwą stronę graficzną rozprawy. Prezentowane wyniki często przyjmują formę tabel, ułatwiając ich interpretację. Stronna redakcyjna, język i stosowana terminologia są na bardzo dobrym poziomie, w pełni odpowiadając standardom i opracowaniom technicznym.

Zauważone błędy i nieścisłości wyszczególnione zostały w pkt. 6.

6. Informacje o zauważonych nieprawidłowościach

Poniżej przedstawiono uwagi dotyczące zauważonych błędów i nieścisłości, w podziale na uwagi szczegółowe i o charakterze bardziej ogólnym. Odniesienie się do wybranych uwag może być początkiem interesującej dyskusji podczas publicznej obrony.

Uwagi szczegółowe:

1. Występują błędne (niezrozumiałe) oznaczenia w całym rozdz. 3 – np. zależność (3.4). Oznaczenie $v_{GS}(td(on))$ ma oznaczać zmianę napięcia w przedziale czasu od t_0 do t_1 (rys. 3.3). Tymczasem $td(on)$ odpowiada okresowi trwania tego przedziału (rys. 3.3 i (3.8)). Po prawej stronie równania (3.4) nie występuje $td(on)$. Zamiast $v_{GS}(td(on))$ powinno być $v_{GS}(t)$ lub tylko v_{GS} ,
2. Prądy tranzystorów i_{DT3} i i_{DT4} na rys. 3.9 są narysowane błędnie,
3. Zamieszczone w podrozdz. 3.3 wyjaśnienia: „The decrease of VGG- will mean values of VGG- closer to 0 V, and the increase of VGG- will be understood as higher absolute VGG- values”, “the increase of VGG- (its negative value)”, “the highest (negative) VGG-”, dotyczące zmiany napięcia VGG- są dyskusyjne. W szczególności powodują problem związany z niepoprawnością formalnej nierówności $V_{GG-T3} < V_{GG-T4}$ na rys. 3.25. W takim przypadku należałoby stosować konsekwentnie oznaczenia typu $|V_{GG-}|$. Postąpiono tak częściowo w opisie podanym na dole str. 163,
4. W rozprawie wielokrotnie występuje błąd edytorski związany z podaniem wartości i przeniesiemy odpowiedniej jednostki do następnej linii, np. „-5 V” na str. 74 lub „6 kV” u góry str. 120. Wartość i jednostka stanowią nierozłączną całość,
5. Użyte w zdaniu: „The values of passive components used for balancing voltages of stacked SiC MOSFETs have to be higher than those of Si devices because of the lower switching times of SiC transistors and higher voltage imbalance” (str. 102) określenie „higher” jest bardzo nieprecyzyjne,
6. W schemacie z rys. 4.6 powtórzono trzykrotnie te same oznaczenia „D1, C1, R1”,
7. Niezrozumiałe jest, dlaczego na charakterystykach z rys. 5.9-5.18 zaznaczono dla poszczególnych tranzystorów różne względne wartości napięć $V(BR)_{DSS}$, wynoszące 90 i 100%,
8. W tab. 5.8 (str. 175) podano błędnie wartość PSW – powinno być 460 W zamiast 470 W,
9. Stwierdzenie: „As analyzed above, the turn-off switching processes of T1 and T4 were speeded-up, while the turn-off of T2 and T3 were slowed down in reference to the idealized case...” (str. 180) jest nieprecyzyjne. Proces wyłączenia (np. rys. 3.10) składa się m.in. z sumy $td(off)$ i trv , co prowadzi do odwrotnego wniosku. W przypadku tranzystorów T1 i T4 faktycznemu przyspieszeniu ulega jedynie dv_{DS}/dt ,
10. W całej rozprawie stała całkowania regulatora PI podawana jest jako „50 u”, zamiast „50 us”,
11. W wyjaśnieniu: „...and VGG+T4 had to be increased by 3.58 V...” (str. 204) jest błąd. Zgodnie z rys. 5.38 zwiększeniu ulega napięcie VGG+T3.
12. Podana na str. 231 indukcyjność 110 uH cewki L nie zgadza się z indukcyjnością wskazaną w tab. C1,

13. Na str. 237 opisano badania eksperymentalne podczas skokowej zmiany częstotliwości przełączeń z 15 na 10 kHz. Przypadek ten nazwano jako „rapid load change”, co jest niejasne i uproszczone.

Uwagi ogólne:

1. Na wstępie rozprawy zamieszczono informację: “This thesis is a summary of my research achievements during my Ph.D. studies at the Institute of Control and Industrial Electronics at the Warsaw University of Technology, which was supported by the National Science Center, Poland project no. 017/27/B/ST7/00970.” Istotne byłoby uszczegółowienie tej informacji, poprzez podanie tytułu, okresu realizacji i zakresu przeprowadzonych badań,

2. W teoretycznej analizie w rozdz. 3 do badań połączenia szeregowego tranzystorów wybrano układ przekształtnika pólmostkowego, za pomocą którego podczas przeładowywania elementów biernych badano warunki przełączania i pracy tranzystorów. Użyto również uproszczonego modelu tranzystora, umożliwiającego wyróżnienie kolejnych etapów podczas przełączania. Można by jawniej i w jednym miejscu zamieścić przyjęte założenia upraszczające. Są one rozrzucone i nie do końca kompletne, przykładowo nie wyjaśniono założenia względem przeciwrównoległych diod górnych tranzystorów i nieliniowości pojemności pasożytniczych tranzystora. Ponieważ nieliniowości te są częściowo uwzględnione, dlatego występują zastrzeżenia co do poprawności niektórych zależności, np. (3.25). Nieliniowości pojemności pasożytniczych tranzystora pominięto dopiero w podrozdz. 3.2. Jednocześnie pomimo przyjęcia założeń upraszczających występują dodatkowe wtrącenia, odnoszące się do rzeczywistych właściwości elementów, które niepotrzebnie utrudniają zrozumienie prezentowanej analizy. Przykładowo wtrącenie: „However, the peak value of i_D may be slightly higher than I_L due to the reverse current of turning-off S_1 body or external diodes (it is omitted in the presented analysis)” (str. 38) zakłóca właściwą prezentację. Całą analizę należy uznać za bardzo wartościową, ale charakter jej wyników uznać jedynie za jakościowy. Nie umniejsza to znaczenia uzyskanych wyników i sformułowanych wniosków. Szkoda, że nie wyjaśniono sposobu przyjęcia konkretnych wartości parametrów modelu tranzystora do tej analizy,

3. Lista części publikacji autora powtórzona jest w rozprawie trzykrotnie – wykaz publikacji autora związany z rozprawą, wykaz wszystkich publikacji autora i zasadniczy wykaz publikacji wykorzystanych w rozprawie. Można by wydzielić jeden wykaz publikacji autorskich oraz odpowiednio go oznaczyć i wykorzystać,

4. W rozprawie znajduje się wyjaśnienie: „Subsequently, the optimization algorithm tries to find the best parameters of the DUT and circuit to match the performance of the modeled MOSFET to the entered data”. Wiąże się z nim bezpośrednio słabej jakości rys. 5.2. Nie zamieszczono dokładniejszego opisu tego algorytmu optymalizacji dla przyjętego doboru parametrów modeli tranzystorów,

5. Wyjaśnienia: „...non-linearities (Fig. 5.10b) of obtained characteristics may be caused by simulation errors of created transistor models under such operating conditions” (str. 155) i “The non-linearities of obtained characteristics, especially presented in Fig. 5.15b, resulted, most likely, from the inaccuracy of calculated transistor models for such an operating range” (str. 162) są niejasne i dyskusyjne. Dlaczego te zależności powinny być liniowe? Biorąc pod uwagę złożoność prezentowanej problematyki trudno uzasadnić takie jednoznaczne stwierdzenia. Co prawda dalej znajduje się odniesienie do przypadków znanych z literatury: „As depicted in Fig. 5.17, the relation between Δv_{DS} and Δt_{del} is highly linear, which is consistent with the experimental measurements presented in the literature [135], [210], [212]” (str. 165), ale dotyczy to innego parametru i konkretnych przypadków,

6. Dobór parametrów regulatora stosowanego do równoważenia napięć na szeregowo połączonych tranzystorach metodą zmiany opóźnienia sygnału sterującego wyjaśniono w podrozdz. 5.3.5. Wykorzystano do tego możliwości programu MATLAB-Simulink. Jednak uzyskane wyniki ostatecznie musiały zostać istotnie, empirycznie skorygowane podczas symulacji. Dodatkowo stwierdzenie: “Such discrepancies have been caused by differences between models of CAS300M17BM2 obtained in Matlab and Saber PMT” (str. 195) podważa sens przeprowadzonych obliczeń w programie MATLAB-Simulink. Czy do rozwiązania tego problemu można wykorzystać m.in. charakterystyki z rys. 5.17? Czy do potwierdzenia przyjętych parametrów układu regulacji, przykładowo wzmocnienia, można wykorzystać wyniki pomiarów eksperymentalnych w układzie otwartym? Ponieważ doboru

parametrów regulacji dokonano dla konkretnego typu tranzystorów, jak należałoby postąpić w ogólnym przypadku. Czy możliwe byłoby opracowanie w miarę prostego algorytmu identyfikowania nastaw regulatora podczas wstępnych badań eksperymentalnych?

7. W wyjaśnieniach w podrozdz. 6.1.1 i na rys. 6.1 zaznaczono, że przedmiotem pomiaru jest m.in. napięcie zasilające VDC. Czy uwzględniono / pominięto w tym przypadku wpływ spadków napięć na przewodzących diodach górnych tranzystorów?

8. Początkowe oscylacje niższej częstotliwości prądu wyjściowego widoczne na oscylogramach z rys. 6.7 i 6.8 związane są z parametrami L i C obwodu głównego. Jednak nie można tego potwierdzić bezpośrednio ze względu na niejednoznaczne przyjęcie parametrów tych elementów. Oscylacje te zostałyby wytlumione w przypadku wprowadzenia rezystora obciążenia, z którego w porównaniu z symulacjami zrezygnowano,

9. Ponieważ opracowano / skonstruowano dedykowane sterowniki bramkowe do współpracy z szeregowo łączonymi tranzystorami, bardzo interesujące byłoby choć przybliżone odniesienie się do ich kosztów w porównaniu z kosztami samych tranzystorów SiC MOSFET,

10. Na str. 243 wyjaśniono zauważalny wpływ pojemności pasożytnej C_p na proces przełączania tranzystorów. Czy starano się określić / zmierzyć tę pojemność?

11. Nie wyjaśniono, dlaczego weryfikację metody wykorzystującej zmianę napięcia VGG+ do równoważenia napięć na szeregowo połączonych tranzystorach przeprowadzono w układzie DPT, a nie jak podczas wcześniejszych eksperymentów i podczas symulacji w układzie przekształtnika półmostkowego,

12. Istotnym uzupełnieniem dodatku E byłby schemat blokowy ilustrujący opracowany algorytm równoważenia napięć. Zamieszczony opis samego programu realizującego ten algorytm jest trudny do zinterpretowania,

13. Czy uzasadniona byłaby wstępna selekcja tranzystorów przeznaczonych do łączenia szeregowego, ale nie tylko w ramach jednego typu, lecz pod względem faktycznych wartości poszczególnych parametrów dla różnych typów / różnych producentów tranzystorów? Jeżeli tak, to jak taka selekcja powinna przebiegać.

Przedstawione uwagi nie umniejszają mojej bardzo dobrej oceny wartości merytorycznej rozprawy doktorskiej.

7. Ocena przydatności rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych

Rozprawa doktorska stanowi kompendium informacji na temat zagadnień i metod stosowanych do zapewnienia równomiernego rozkładu napięć na szeregowo łączonych tranzystorach MOSFET, w szczególności wykonanych w technologii węgliku krzemu. Przedstawia szczegółowy i uporządkowany opis opracowań metod i całościowych rozwiązań tego typu, od analizy teoretycznej, poprzez symulacje komputerowe, aż po badania i weryfikację eksperymentalną.

Zawartość rozprawy ma duże znaczenie poznawcze, porządkujące i praktyczne dla nauk inżynierjno-technicznych, umożliwiając realizację nowoczesnych rozwiązań przekształtników energoelektronicznych średniego napięcia o zwiększonej gęstości mocy, wykorzystujących łączenie szeregowo tranzystorów mocy MOSFET w technologii węgliku krzemu.

Należy jednocześnie zauważyć wskazane przez Doktoranta, jako kontynuacja, dalsze kierunki badań o istotnym znaczeniu praktycznym. Do najważniejszych należy zaliczyć: zagadnienia bezpiecznego uruchamianie przekształtników z połączonymi szeregowo tranzystorami i zintegrowanymi metodami równoważenia ich napięć w różnych warunkach pracy oraz pełniejszą weryfikację eksperymentalną zaproponowanej metody modyfikacji dodatnich wartości napięć zasilających sterowniki bramkowe poszczególnych tranzystorów.

8. Podsumowanie

Pan mgr inż. Przemysław TROCHIMIUK w rozprawie doktorskiej pt. *Szeregowe łączenie tranzystorów MOSFET z węgliku krzemu w zakresie średnich napięć* zaprezentował bardzo wartościowe badania dotyczące warunków i metod realizacji równoważenia napięć na szeregowo łączonych tranzystorach. Recenzowana rozprawa stanowi potwierdzenie Jego ugruntowanych kompetencji w tematyce rozprawy, a także umiejętności planowania i samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Rozważane zagadnienia związane są w pełni z aspektami energoelektroniki, tym samym wpisują się w ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Na uwagę zasługuje również liczne publikacje Doktoranta związane z problematyką tranzystorów MOSFET z węgliku krzemu, odbiegające nieco tematycznie od bezpośredniego związku z niniejszą rozprawą. Doktorant jest autorem (1), pierwszym współautorem (9) i współautorem (16) łącznie 26 opracowań naukowych. Miejscami publikacji były między innymi następujące czasopisma naukowe: *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Energies* (trzykrotnie), *Applied Sciences-Basel, IEEE Transactions on Power Electronics* i *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.

Teza rozprawy doktorskiej została w pełni wykazana. Łączenie szeregowo tranzystorów MOSFET z węgliku krzemu może być z powodzeniem zastosowane w rozwiązaniach średniego napięcia w sposób bezpieczny i nie powodując istotnych dodatkowych strat mocy. Rozprawa spełnia wymagania zapisane 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.). Jej tematyka zawiera się w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Zamieszczone uwagi nie mają istotnego wpływu na wysoką ocenę wartości merytorycznej rozprawy. Rozprawę oceniam bardzo pozytywnie i zaliczam do kategorii wybitnie dobrej, zasługującej na wyróżnienie.

Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Przemysława TROCHIMIUKA do publicznej obrony.

Jednocześnie, ze względu na tematykę, sposób i rzetelność prezentacji wyników, oryginalność i zakres przeprowadzonych badań, ich znaczenie praktyczne i aktywność naukową mgr. inż. Przemysława TROCHIMIUKA, wnioskuje o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Zbigniew Kuczmanowicz

