

Gdynia, 2024-12-10

dr hab. inż. Kalina Detka, prof. UMG  
Katedra Energoelektroniki  
Wydział Elektryczny  
Uniwersytet Morski w Gdyni

WPLYNĘŁO  
2024 -12- 20  
dn.....

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
**mgr inż. Przemysława Trochimiuka**

**nt. „Series Connection of Silicon Carbide MOSFETs in a Medium Voltage Range”**

**1. Uwagi ogólne**

Recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Trochimiuka przygotowano na podstawie otrzymanego powołania do pełnienia funkcji recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia naukowego doktora wydanego przez Przewodniczącą Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego. Celem niniejszej rozprawy doktorskiej było zbadanie zjawisk fizycznych zachodzących podczas pracy szeregowo połączonych tranzystorów MOSFET wykonanych z węglika krzemu.

Badania te obejmowały analizę procesu łączeniowego szeregowo połączonych tranzystorów MOSFET wykonanych z węglika krzemu. W szczególności zbadano wpływ różnych czynników powodujących nierównomierny rozkład napięcia pomiędzy wspomnianymi tranzystorami takich jak: różne parametry zastosowanych tranzystorów i obwodów sterowników bramkowych, różne warunki pracy oraz pojemności pasożytnicze. Dodatkowo przeprowadzono analizę różnych technik wyrównywania napięć na szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET w tym zaproponowanej autorskiej metody aktywnego wyrównywania napięć oraz metod umożliwiających bezpieczny start przekształtników energoelektronicznych. Na podstawie uzyskanych wyników badań możliwe było opracowanie metod równoważenia napięć w procesie wysoko sprawnego przekształcania energii elektrycznej średniego napięcia.

Podjęta przez Doktoranta tematyka i poruszane zagadnienia są bardzo istotne z punktu widzenia wyzwań stawianych współczesnej energoelektronice, związanych między innymi z transformacją energetyczną i powstawaniem rozproszonych systemów energetycznych, które są systemami złożonymi i wymagają odpowiedniej kontroli i zarządzania zachowując wysoką

sprawność przekształcania energii elektrycznej. Dodatkowo aktualności podjętej tematyki dowodzą liczne prace naukowe publikowane w renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym z zakresu tematycznego rozprawy. Takie prace zostały także dobrze przeanalizowane przez Doktoranta, co świadczy o jego szerokiej wiedzy w zakresie energoelektroniki.

Na uwagę zasługuje także fakt, że Doktorant przedstawił wyniki swoich badań w 26 recenzowanych pracach opublikowanych w czasopismach o zasięgu krajowym i międzynarodowym oraz materiałach konferencyjnych. Zaprezentowane wyniki badań mogą być ważne dla projektantów rozproszonych sieci energetycznych łączących np. różne odnawialne źródła energii elektrycznej. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska oraz zaprezentowane w niej wyniki badań są bardzo czytelne, dobrze uporządkowane, przemyślane i poparte właściwym aparatem matematycznym. Dowodzą one wyróżniających się kompetencji Doktoranta w zakresie analizy zjawisk fizycznych zachodzących w elementach półprzewodnikowych i układach energoelektronicznych, technik metrologicznych, matematycznego modelowania i analizy właściwości rozważanych elementów i układów.

## **2. Ocena merytoryczna pracy**

Praca składa się z 7 rozdziałów. Zawiera streszczenie napisane w języku angielskim oraz w języku polskim, listę zastosowanych symboli, wykaz głównych skrótów, wykaz cytowanej literatury, zestawienie tabel i rysunków oraz 10 załączników zawierających kod przygotowany w programie Matlab do wyznaczania wzmocnienia tranzystorów, procedurę doboru i projektowania układu pomiarowego, opis stanowiska pomiarowego do aktywnego sterowania parametrami impulsu bramkowego w przetwornicy obniżającej napięcie i przetwornicy półmostkowej, kod do aktywnego sterowania tymi parametrami, opis stanowiska laboratoryjnego do realizacji aktywnego sterowania czasem impulsu bramkowego w układzie półmostka z niezależnymi sterownikami bramkowymi, projekt niezależnego sterownika bramkowego z kontrolą impulsu bramkowego, opis stanowiska laboratoryjnego do realizacji aktywnej kontroli dodatniego napięcia sterującego bramką w układzie testowym DPT, projekt sterownika bramkowego z kontrolą dodatniego napięcia sterującego bramką, wykaz prac z udziałem Doktoranta. Razem z załącznikami i spisem tabel i rysunków praca liczy 336 stron.

Celem pracy było zbadanie zjawisk fizycznych zachodzących podczas pracy szeregowo połączonych tranzystorów MOSFET wykonanych z węgliku krzemu i zaproponowanie

metod wyrównywania napięć na tych tranzystorach. Sformułowano tezę pracy, która brzmi „Możliwe jest opracowanie metod równoważenia napięć dla szeregowo połączonych tranzystorów MOSFET SiC pracujących w zakresie średniego napięcia, co umożliwi niskie straty mocy i bezpieczną pracę w warunkach statycznych i dynamicznych”.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do podjętej tematyki badawczej. Autor zwrócił uwagę, że po drugiej rewolucji przemysłowej, która miała miejsce w drugiej połowie XIX wieku obserwuje się rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną. Energia ta niestety pozyskiwana jest ze źródeł konwencjonalnych tj. paliw kopalnych, co prowadzi do zwiększającej się emisji szkodliwych substancji do środowiska i globalnego ocieplenia. Autor przywołując liczne raporty klimatyczne wskazuje, że osiągnięcie neutralności klimatycznej wymaga natychmiastowego działania obejmującego między innymi wzrost znaczenia odnawialnych źródeł energii. Autor jednak słusznie zauważył, że transformacja energetyczna wymaga także modernizacji sieci energetycznej. Wynika to z faktu, że pozyskiwanie energii z różnych źródeł OZE odbywa się w sposób rozproszony czyli fizyczne źródła te znajdują się w wielu lokalizacjach. Dodatkowo jak słusznie wskazał Autor, w świetle ostatnich wydarzeń związanych z wojnami i przerwaniem łańcucha dostaw paliw kopalnych, takie podejście wydaje się być bardziej atrakcyjne, bezpieczne i ekologiczne. Rozproszony system energetyczny, inteligentne sieci i mikro sieci zyskują na popularności jednak wymagają odpowiedniego sterowania i zarządzania by mogły pracować z możliwie niskimi stratami. Autor zwrócił także uwagę, że przyszłością sieci energetycznej jest prąd stały (DC), zamiast lub przynajmniej w połączeniu z dzisiejszym rozwiązaniem prądu przemiennego (AC), przede wszystkim ze względu na niższe straty mocy oraz niższe koszty budowy takich sieci w porównaniu do sieci AC. Jednocześnie pojawienie się urządzeń o szerokiej przerwie energetycznej otworzyło nowe perspektywy i możliwości w zakresie niskostratnego przekształcania energii elektrycznej, które dostrzegł Autor. Zwrócił także uwagę, że w ostatnim czasie coraz większym zainteresowaniem cieszy się stosowanie szeregowego połączenia tranzystorów SiC MOSFET w układach przekształcania energii elektrycznej. Zaznaczył jednak, przywołując aktualną literaturę, że głównym wyzwaniem takiego rozwiązania jest nierównomierny podział napięcia pomiędzy tak połączonymi tranzystorami zarówno w warunkach statycznych, jak i dynamicznych.

W związku z powyższym właściwie sformułowano tezę rozprawy doktorskiej, która została wcześniej przytoczona.

W rozdziale 2 przedstawiono cel i tezę pracy przytoczone wcześniej oraz zaprezentowano zakres pracy, który obejmował analizę procesu przełączania, opis metod wyrównywania

mocy, opis środowiska symulacyjnego i podejścia do wykonywanych symulacji komputerowych, przeprowadzone badania eksperymentalne oraz wnioski z prowadzonych badań i kierunek dalszych działań.

Rozdział 3 poświęcony jest analizie procesu przełączania szeregowo połączonych tranzystorów SiC MOSFET. W skład tego rozdziału wchodzi 5 podrozdziałów, w których szczegółowo omówiono i rozważono wpływ różnych czynników na nierównomierny rozkład napięcia na szeregowo połączonych tranzystorach. Rozpatrzono odpowiednio analizę idealizowanego procesu przełączania szeregowego połączenia tranzystorów SiC MOSFET, proces wyłączenia tych tranzystorów z niedopasowaniem ich parametrów, proces wyłączenia rozważanych tranzystorów z niedopasowaniem parametrów obwodu sterowania bramką, proces wyłączenia szeregowo połączonych tranzystorów SiC MOSFET uwzględniający pasożytnicze pojemności obwodu oraz proces wyłączenia tych tranzystorów w różnych warunkach pracy.

Na podstawie analizy przeprowadzonych badań Autor zauważył, że proces wyłączenia szeregowo połączonych tranzystorów SiC MOSFET istotnie zależy od niedopasowania rezystancji wewnętrznej bramki tranzystora, niedopasowania napięcia progowego, niedopasowania transkonduktancji, różnic w czasach propagacji, pojemności pasożytniczych bramki i drenu. Zwrócono uwagę, że jednym z głównych czynników wpływających na nierównomierny rozkład napięcia zarówno podczas procesu wyłączenia, jak i w stanie blokowania wpływa niedopasowanie napięcia progowego. Autor zwrócił także uwagę, że niedopasowanie parametrów obwodów sterujących bramką, wpływa na wartości zewnętrznej rezystancji bramki i napięcia sterującego bramką, jednak odchyłki te są niewielkie w porównaniu z ich typowymi wartościami. Autor zaznaczył także, że takie niedopasowania można łatwo skompensować na etapie projektowania i podstawowych testów. Natomiast wyzwaniem jest kompensacja różnic w czasach propagacji w sterowniku głównym, liniach transmisyjnych i sterownikach bramki dlatego, że zależą one od wielu parametrów komponentów i mogą się zmieniać w różnych warunkach pracy. Autor zauważył także, że pojemności pasożytnicze bramki i drenu wpływają na proces wyłączenia jedynie podczas fazy narastania napięcia, gdzie obserwuje spowalnianie tranzystorów znajdujących się najbliższej szyny DC oraz przyspieszenie tranzystorów znajdujących się na początku szeregu.

W rozdziale 4 Autor dokonał przeglądu metod wyrównywania napięcia na szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET w zakresie średnich napięć. Zastosował klasyfikację tych metod obejmującą odpowiednio metody pasywne, aktywne, zaciskowe, hybrydowe i naturalnie samobalansujące. Autor ogólnie omówił metody hybrydowe oraz samobalansujące

wskazując, że stosowanie tych metod dedykowane jest dla specyficznych układów i modułów tranzystorów. Natomiast bardziej szczegółowo opisał zasady działania oraz schematy najpopularniejszych metod pasywnych, zaciskowych i aktywnych metod wyrównywania napięcia w szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET. Uwzględnił ich zalety oraz problemy, jakie mogą wystąpić w przekształtnikach opartych na szeregowych połączeniach rozważanych tranzystorów. Autor dokonując analizy i porównania zaproponowanych metod wyrównywania napięcia zwrócił uwagę, że metody aktywne, które charakteryzują się najlepszymi właściwościami i najlepszą skutecznością w eliminacji nierównomierności podziału napięcia. Są idealnym wyborem dla aplikacji wymagających precyzyjnego wyrównywania napięcia w szerokim zakresie pracy. Z kolei techniki pasywne zapewniają jedynie satysfakcjonujący podział napięcia pomiędzy rozważanymi tranzystorami. Dodatkowo metody pasywne spowalniają proces przełączania (tłumiki) lub wymuszają dłuższą pracę najszybszych tranzystorów podczas wyłączania, co ogranicza korzyści płynące z zastosowania tranzystorów mocy SiC.

Rozdział 5 Autor poświęcił badaniom symulacyjnym szeregowo połączonych tranzystorów SiC MOSFET, które obejmowały analizę procesu przełączania tych tranzystorów i wpływu różnych czynników na ich właściwości. Dodatkowo Autor przeprowadził walidację różnych metod balansowania napięcia między szeregowo połączonymi tranzystorami.

Do badań symulacyjnych Autor zastosował program Saber RD firmy Synopsys. W poszczególnych podrozdziałach tego rozdziału Autor zawarł informacje o zastosowanych i badanych modelach tranzystorów SiC MOSFET, zaprezentował układ do wyznaczenia parametrów dynamicznych rozważanych tranzystorów oraz właściwe układy symulacyjne do analizy wpływu wybranych czynników na napięcie na szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET. Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły prowadzone rozważania teoretyczne. Przykładowo Autor zwrócił uwagę, że zgodnie z informacjami zawartymi w rozdziale 4 zarówno metody pasywne, jak i zaciskowe są proste w implementacji. Jednak ich skuteczność w wyrównywaniu napięcia i wydajność energetyczna są gorsze w porównaniu z metodami aktywnymi. Dodatkowo Autor potwierdził przewagę metod aktywnych, zarówno pod względem wyrównywania napięcia, jak i strat mocy oraz wskazał, że autorska metoda aktywnego wyrównywania napięcia realizowana poprzez sterowanie napięciem bramki poszczególnych tranzystorów zapewnia porównywalną lub nawet lepszą sprawność niż standardowa metoda sterowania czasem trwania impulsów bramkowych. Uzyskane wyniki i

wnioski wyciągnięte z badań symulacyjnych dowodzą biegłości Autora w zakresie modelowania i analizy elementów i układów energoelektronicznych.

Rozdział 6 zawiera eksperymentalną weryfikację rozważań teoretycznych i symulacyjnych prowadzonych we wcześniejszych rozdziałach. Jak wspomniał Autor wcześniej, metody aktywne do balansowania napięcia charakteryzują się wyższą sprawnością i bezpieczną pracą przekształtników średniego napięcia zawierającego szeregowo połączenie tranzystorów SiC MOSFET. Dlatego w tym rozdziale ograniczył się właśnie do tej metody skupiając się na technice sterowania czasem trwania impulsów bramkowych oraz zmianą dodatniego napięcia sterowania bramką. Autor przeprowadził badania stosując metodę sterowania czasem trwania impulsów bramkowych w przekształtniku obniżającym napięcie oraz półmostkowym zawierającym szeregowo połączone tranzystory SiC MOSFET typu CAS300M17BM2. Wykonał także badania eksperymentalne w układzi przekształtnika półmostkowego wykorzystując komercyjne sterowniki bramki z funkcją aktywnego wyrównywania napięcia działające w trybie autonomicznym. W tym wypadku zastosował szeregowo połączenie tranzystorów SiC MOSFET zawartych w modułach CAB450M12XM3.

Autor przeprowadził także weryfikację eksperymentalną autorskiej metody wyrównywania napięcia.

Przeprowadzone przez Autora badania laboratoryjne potwierdziły prowadzone i przedstawione w rozdziałach 3-5 rozważania teoretyczne i symulacyjne. Obie badane metody zapewniały równomierny rozkład napięcia pomiędzy szeregowo połączonymi tranzystorami SiC MOSFET zarówno w stanach dynamicznych, jak i ustalonych.

W rozdziale 7 Doktorant zawarł podsumowanie. Wyselekcjonował najważniejsze osiągnięcia naukowe opisane w rozprawie, stwierdził, że cel pracy został osiągnięty, a teza pracy udowodniona. Wskazał także na dalsze kierunki badań związane z tematyką podjętą w pracy doktorskiej.

### 3. Uwagi ogólne

Praca napisana jest w języku angielskim w sposób bardzo przejrzysty i staranny, przez co pracę czyta się bardzo przyjemnie. Praca zawiera dużo rysunków zawierających schematy elektryczne, wykresy różnych zależności oraz tabele, co bardzo ułatwia zrozumienie tematyki podejmowanej przez Doktoranta. Rozważania teoretyczne zawarte w pracy poparte są także odpowiednim aparatem matematycznym.

W pracy przedstawiono wyniki badań Autora dotyczące wpływu wybranych czynników na napięcie na szeregowo połączonych tranzystorach SiC MOSFET oraz metody wyrównywania tego napięcia, w tym metodę autorską.

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

- Rozbudowaną analizę teoretyczną procesu przełączania szeregowo połączonych tranzystorów SiC MOSFET, a następnie analizę wpływu różnych czynników na proces wyłączania tych tranzystorów SiC MOSFET oraz ocenę ich wpływu na wprowadzanie nierównego rozkładu napięcia pomiędzy tranzystorami w kontekście przekształcania energii w zakresie średniego napięcia,
- Opracowanie modeli tranzystorów SiC MOSFET zawartych w modułach mocy CAS300M17BM2 i CAB450M12XM3 dedykowanych dla programu Saber RD,
- Porównanie symulacyjne sprawności szeregowo połączonych tranzystorów SiC MOSFET z różnymi źródłami powodującymi nierównomierny rozkład napięcia, zaimplementowanymi w dwóch układach półmostkowych – z dwoma i czterema szeregowo połączonymi tranzystorami,
- Przeprowadzona z sukcesem implementacja metody sterowania czasem trwania impulsów bramkowych dla dwóch szeregowo połączonych tranzystorów SiC MOSFET z modułów CAS300M17BM2 oraz CAB450M12XM3, w przekształtniku obniżającym napięcie oraz w układzie półmostkowym, zweryfikowana eksperymentalnie w różnych warunkach pracy oraz przy nagłych zmianach obciążenia,
- Projekt i pozytywna walidacja eksperymentalna autonomicznych sterowników bramki z wbudowaną metodą sterowania czasem trwania impulsów bramkowych, zaimplementowaną w układzie DSP z modułem HRPWM, dla

przełączników opartych na szeregowo połączonych dwóch tranzystorach SiC MOSFET z modułów CAB450M12XM3 w układzie półmostkowym. Projekt obejmował również opracowanie izolowanych układów pomiarowych dla sygnałów średniego napięcia i wysokiej częstotliwości, wykorzystywanych jako sprzężenie zwrotne w zaimplementowanych systemach aktywnego wyrównywania napięcia.

- Zapropionowanie autorskiej aktywnej metody wyrównywania napięcia

Wykazane osiągnięcia dowodzą, że Doktorant rozwiązał postawione zagadnienie badawcze, opanował umiejętność stosowania odpowiednich metod naukowych oraz prezentacji uzyskanych wyników badań. Doktorant opanował zaawansowaną wiedzę z zakresu elementów półprzewodnikowych, sposobów ich sterowania oraz ich aplikacji w złożonych systemach energoelektronicznych. Wykazał się także bardzo dobrą znajomością narzędzi wspomagających proces projektowania i analizy układów energoelektronicznych oraz potrafi twórczo ją wzbogacać.

Podczas lektury tej interesującej pracy nasunęło mi się kilka pytań ogólnych:

- a) Czym kierował się Doktorant podczas wyboru środowiska symulacyjnego?
- b) Czy Doktorant mierzył rozkład temperatury na tranzystorach w ich szeregowym połączeniu?
- c) Jaka jest istotna przewaga zaproponowanej autorskiej metody aktywnego wyrównywania napięcia w porównaniu do innych znanych metod aktywnych?

#### **4. Uwagi szczegółowe**

Jak wspomiano wcześniej oceniana praca napisana jest w sposób bardzo przejrzysty i staranny, ale Autor nie ustrzegł się pewnych uchybień, które jednak nie wpływają w istotny sposób na pozytywną ocenę pracy.

- a) W załączniku J zawierającym wykaz publikacji, w których Doktorant jest autorem lub współautorem mógłby być ponumerowany.
- b) Warto było we wspomnianym wykazie (Załącznik J) zachować format cytowań jaki użyto w wykazie literatury (References).
- c) Na stronie 294, rysunek G.3 zawiera polskie komentarze, które zważywszy na język pracy powinny być zapisane w języku angielskim.



d) Na niektórych rysunkach i wykresach zastosowana czcionka jest na tyle mała, lub kolor niefortunnie dobrany, że ciężko odczytać czego dotyczy opis. Przykładowo Rys. G.3, Rys. I.5, Rys. 5.42

## 5. Wniosek końcowy

Rozprawę doktorską mgr inż. Przemysława Trochimiuka oceniam bardzo wysoko. Podjęta tematyka jest niezwykle aktualna, a recenzowana praca zawiera oryginalne i ważne wyniki stanowiące istotny wkład Doktoranta w badania związane z właściwościami przyrządów półprzewodnikowych mocy pracujących w różnych konfiguracjach np. w szeregowym połączeniu tranzystorów i w różnych układach energoelektronicznych średniego napięcia. Badania te obejmowały formułowanie modeli przyrządów półprzewodnikowych mocy, sposoby wyznaczania wartości parametrów tych modeli, symulacje komputerowe, projektowanie i konstrukcję układów energoelektronicznych i pomiary oraz analizę uzyskanych wyników. Doktorant wniósł istotny wkład w rozwiązanie ważnych zagadnień badawczych i wykazał się znajomością aktualnej literatury naukowej w zakresie tematyki pracy. Przedstawione i omówione przez Doktoranta wyniki badań dowodzą, że założony cel pracy został osiągnięty a sformułowana teza udowodniona. Doktorant udowodnił także, że posiada kompetencje w zakresie sposobu przeprowadzenia badań i przedstawienia ich wyników. Imponujący dorobek doktoranta oraz miejsca publikacji wyników badań potwierdzają aktualność i ważność poruszanych zagadnień.

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

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

*Karina Deltko*