



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI



Katedra Systemów Mikroelektronicznych

prof. dr hab. inż. Stanisław Szczepański, prof. zw. PG
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Góreckiego
pt. „Modelowanie tranzystorów IGBT z uwzględnieniem zjawisk termicznych na potrzeby
komputerowej analizy układów elektronicznych w programie SPICE”**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Góreckiego pt. „Modelowanie tranzystorów IGBT z uwzględnieniem zjawisk termicznych na potrzeby komputerowej analizy układów elektronicznych w programie SPICE”. Promotorem tej rozprawy jest prof. dr hab. inż. Janusz Zarębski, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Jacek Dąbrowski. Podstawą formalną do opracowania recenzji jest pismo Prodziekana ds. Morskich i Nauki Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni z dnia 23 listopada 2018 roku.

Tranzystor bipolarny z izolowaną bramką ang. *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) został opracowany przed rokiem 1980. Ten typ przyrządów półprzewodnikowych jest dostępny na rynku od roku 1983. Od tego czasu jest też traktowany jako ważny element aktywny mocy i znajduje szerokie zastosowanie praktyczne, szczególnie w technice energoelektronicznej. Dzięki technicznym możliwościom łączenia równoległego przyrządów IGBT w celu zwiększenia prądu przewodzenia, realizowane są moduły IGBT mocy.

W wyniku stałego postępu w rozwoju technologii mikroelektronicznych pojawiają się ciągle nowe implementacje fizyczne tych przyrządów, również o innych nazwach komercyjnych, np. *Insulated Gate Rectifier* (IGR), *Conductivity-Modulated FET* (COMFET), *Gain-Enhanced MOSFET* (GEMFET) oraz *Bipolar FET* (BiFET). Z analizy opracowań dostępnych w literaturze naukowej wynika, że równoległe z realizacją nowych pod względem technologicznym odmian

tych przyrządów pojawia się pilna potrzeba opracowania nowych zunifikowanych modeli tranzystorów klasy IGBT, uwzględniających w pełnym zakresie pracy zjawiska termiczne.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska składa się z 10 rozdziałów i ma 122 strony. Rozdział 1 zawiera wprowadzenie, cele i tezę pracy. Kolejne rozdziały 2-8 poświęcone są rozważaniom teoretycznym, prezentacji zastosowanych metod pomiarowych i osiągniętych wyników. W głównym rozdziale 5 przedstawiono autorskie opracowanie elektrotermicznego modelu tranzystora IGBT. Doktorant w rozdziale 9 przedstawił wyniki weryfikacji poprawności elektrotermicznych modeli dyskretnego tranzystora IGBT i modułu IGBT. Rozdział 10 rozprawy stanowi podsumowanie. Praca kończy się wykazem literatury i załączeniem 3 dodatków.

1. Jaki jest problem naukowy (teza) i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

Autor rozprawy doktorskiej sformułował cel i tezę pracy w rozdziale pierwszym. Zasadniczym celem pracy były badania dotyczące modelowania właściwości dyskretnych tranzystorów IGBT i modułów IGBT oraz opracowanie i weryfikacja doświadczalna elektrotermicznego modelu tej klasy przyrządów półprzewodnikowych. W rozdziale pierwszym Doktorant dokonał ważnego przeglądu i porównania większości znanych z literatury modeli, które opracowano dla przyrządów półprzewodnikowych typu IGBT. W konkluzji przeprowadzonych rozważań stwierdza, że wiele z aktualnie prezentowanych w literaturze specjalistycznej modeli wykazuje poważne niedomagania i ograniczenia, w szczególności w zastosowaniach do analiz elektrotermicznych, np. szereg opracowanych modeli nie uwzględnia zjawiska samonagrzewania. Doktorant słusznie podkreśla, że istotne braki i pominięcia występują również w modelowaniu zjawisk cieplnych modułów IGBT, np. często pomijana jest nierównomierność rozkładu temperatury.

Uważam, że na tle tak zarysowanych problemów i ograniczeń w zakresie modelowania dyskretnych tranzystorów IGBT i bardziej złożonych struktur modułów IGBT Autor trafnie i jasno sformułował tezę swojej pracy doktorskiej w następującej postaci:

Możliwe jest sformułowanie skupionego modelu tranzystora IGBT w postaci implementowalnej w programie SPICE, uwzględniającego wpływ zjawisk cieplnych na charakterystyki tego przyrządu, a jednocześnie zapewniającego poprawę dokładności wyznaczania nieizotermicznych charakterystyk tych przyrządów w porównaniu z modelami literaturowymi i pozwalającego wyznaczyć temperaturę wnętrza rozważanego przyrządu w warunkach statycznych i dynamicznych.

W celu udowodnienia tak zdefiniowanej tezy Doktorant zrealizował następujące zadania:

- wykonał projekt i konstrukcję stanowisk pomiarowych do przeprowadzenia badań charakterystyk tranzystorów IGBT,
- wykonał pomiary wpływu temperatury na statyczne i dynamiczne charakterystyki tranzystorów i modułów IGBT,

- wykonał pomiary wpływu zjawisk cieplnych na charakterystyki statyczne i dynamiczne dyskretnych tranzystorów i modułów IGBT,
- opracował metody pomiaru parametrów cieplnych dyskretnych tranzystorów IGBT i modułów IGBT oraz dokonał oceny ich dokładności,
- sformułował elektrotermiczny model tranzystora IGBT i ocenił jego dokładności dla dyskretnych tranzystorów IGBT oraz dla modułów IGBT,
- wykonanie obliczeń w programie SPICE charakterystyk wybranych dyskretnych tranzystorów IGBT przy zastosowaniu modeli autorskich,
- przeprowadzenie oceny dokładności sformułowanych modeli.

2. Czy Autor rozwiązał postawione problemy i czy użył do tego właściwych metod, dowodząc, że posiada umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych?

Badania udawadniające postawioną tezę zostały szczegółowo opisane w merytorycznych rozdziałach rozprawy. Doktorant sumiennie i prawidłowo przeprowadził badania wpływu temperatury na charakterystyki (statyczne i dynamiczne) dyskretnego tranzystora IGBT oraz modułów IGBT. Szczegółowo opisał w rozprawie zastosowane metody pomiaru charakterystyk izotermicznych i nieizotermicznych. Podobnie scharakteryzował stosowane metody pomiaru rezystancji termicznych oraz przejściowych impedancji termicznych dla obu typów przyrządów półprzewodnikowych. Przydatność trzech modeli (modelu *International Rectifier*, modelu *Hefnera* oraz modelu autorskiego) ocenił przez porównanie wyników z obliczeń i pomiarów. Opracowany przez Autora elektrotermiczny model tranzystora IGBT ma formę podukładu dla programu SPICE i składa się z trzech części: modelu elektrycznego, modelu termicznego i modelu generacji ciepła. W celu weryfikacji poprawności modelu autorskiego tranzystora IGBT przeprowadzono szereg porównawczych obliczeń i pomiarów charakterystyk statycznych i dynamicznych dla wybranych tranzystorów. Otrzymane wyniki w dużej części zostały opublikowane w czasopiśmie specjalistycznych i na konferencjach naukowych.

Można zatem z całą pewnością stwierdzić, że Doktorant użył właściwych metod, dowodząc tym samym, że posiada umiejętności prowadzenia badań naukowych.

3. Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?

Jak wspomniano wcześniej, badania dotyczące modelowania właściwości tranzystorów IGBT z uwzględnieniem zjawisk cieplnych aplikacyjnie mieszczą się w głównym nurcie badań związanych z analizą i projektowaniem układów szerokiej grupy impulsowych przetworników energii elektrycznej. W chwili rozpoczęcia badań brakowało odpowiednio dokładnych modeli tranzystorów IGBT uwzględniających zjawiska termiczne, jednocześnie funkcjonalnie

kompatybilnych z profesjonalnym pakietem oprogramowania do analizy układów elektronicznych w programie SPICE. Zatem uważam, że tematyka rozprawy była i jest nadal aktualna. Doktorant postuluje kontynuację badań teoretycznych i eksperymentalnych w następujących kierunkach:

1. Sformułowanie i weryfikacja doświadczalna elektrotermicznego uśrednionego modelu klucza diodowo-tranzystorowego z elementem IGBT przeznaczonego do elektrotermicznej analizy przetwornic typu DC-DC.
 2. Sformułowanie skupionego, nieliniowego modelu termicznego modułu IGBT.
 3. Przeprowadzenie analizy wpływu samonagrzewania w tranzystorze IGBT lub module IGBT na charakterystyki wybranych przetwornic DC-DC.
- 4. Na czym polega oryginalny dorobek Autora i jakie jest jego znaczenie poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?**

Do oryginalnych osiągnięć Doktoranta przedstawionych w rozprawie można zaliczyć:

1. Wykazanie silnego wpływu temperatury na charakterystyki tranzystora IGBT.
2. Wykazanie silnego wpływu zjawiska samonagrzewania na przebiegi charakterystyki rozważanego tranzystora i występowanie zjawiska przebicia elektrotermicznego na tych charakterystykach.
3. Opracowanie metod pomiaru parametrów cieplnych dyskretnego tranzystora IGBT i modułu IGBT.
4. Sformułowanie elektrotermicznych modeli dyskretnego tranzystora IGBT oraz modułu IGBT.
5. Wykazanie istotnego wpływu wzajemnych sprzężeń cieplnych między komponentami modułu IGBT na ich charakterystyki.
6. Opracowanie sposobu estymacji parametrów sformułowanych modeli.

Doktorant opracowany elektrotermiczny model dyskretnego tranzystora IGBT oraz procedury estymacji jego parametrów zweryfikował doświadczalnie, uzyskując zadawalającą zgodność wyników obliczeń i pomiarów, zarówno charakterystyk statycznych jak i dynamicznych. Wykazał też praktyczną przydatność opracowanego modelu do elektrotermicznej analizy i projektowania układów impulsowego przetwarzania energii elektrycznej na przykładzie przetwornicy półmostkowej. Wymienione osiągnięcia mają znaczenie zarówno poznawcze, czego dowodem są publikacje naukowe w wysokiej rangi czasopismach indeksowanych w bazie *Journal Citation Reports* (JCR) (cytowane 54 razy wg. bazy *Web of Science* (WoS) oraz znaczenie praktyczne, ponieważ znajdują zastosowanie w projektowaniu ważnej w technice i nauce szerokiej klasy układów impulsowego przetwarzania energii elektrycznej. Uzyskane wyniki badań potwierdzają słuszność postawionej przez Doktoranta tezy pracy.

5. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy autora, wiedzy na zaawansowanym poziomie, o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk technicznych oraz o charakterze szczegółowym, odpowiadającej obszarowi prowadzonych badań naukowych?

W rozdziale 1 Autor wprowadza czytelnika w zagadnienia związane z problematyką modelowania tranzystorów IGBT, z uwzględnieniem zjawisk termicznych, na potrzeby komputerowej analizy układów elektronicznych w programie SPICE. Przedstawiając te zagadnienia Autor biegle posługuje się wiedzą specjalistyczną, poprawnie i rzetelnie na tle literatury przedstawia zagadnienia związane z wprowadzeniem czytelnika do tematyki swojej rozprawy doktorskiej. Uważam, że Autor na wymaganym poziomie dla prac doktorskich przygotował poszczególne rozdziały rozprawy. Potwierdzeniem doświadczenia w prowadzeniu badań naukowych, w tym posługiwania się wiedzą szczegółową na wysokim poziomie, jest opublikowanie licznych artykułów w czasopismach z listy JCR i na konferencjach naukowych o zasięgu międzynarodowym. W procesie publikowania tych prac naukowych Autor wielokrotnie wykazał ważne dla naukowca umiejętności opisu stanu wiedzy, realizacji badań teoretycznych i eksperymentalnych oraz przeprowadzenia szczegółowej analizy otrzymanych wyników.

6. Czy rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy?

Spis bibliografii rozprawy obejmuje 148 pozycji innych autorów oraz 34 prace naukowe opracowane z udziałem Doktoranta w latach 2012-2018, w tym 5 artykułów autorskich. W wykazie prezentowana jest praca z 1984 roku, której współautorem jest pomysłodawca i twórca tranzystora IGBT, B.J. Baliga. Ponad 120 przytoczonych w rozprawie prac naukowych było opublikowanych po 2000 roku. Świadczy to o prawidłowym ujęciu w pracy doktorskiej aktualnych doniesień literaturowych i potwierdza znajomość Autora współczesnej literatury związanej z tematyką rozprawy.

7. Jakie są wady i słabe strony rozprawy?

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Góreckiego została przygotowana poprawnie pod względem merytorycznym. W zdecydowanej większości tekstu strona edytorska pracy jest również poprawna. Obecne w rozprawie nieliczne określenia potoczne i literówki nie wpływają na ocenę rozprawy oraz ogólną wysoką staranność w przygotowaniu zarówno tekstu, jak i rysunków, np. żargonowe określenie „dioda antyrównoległa” jest tworem sztucznym.

Zdaniem recenzenta pewien niedosyt budzą fakty:

- a. W rozdziale 1 dla sformułowania tezy swojej pracy Doktorant dokonał ważnego wprowadzającego przeglądu i krytycznej analizy wybranych z literatury modeli elektrotermicznych tranzystorów IGBT oraz modułów IGBT mocy. Uważam jednak, że w przeprowadzonej na wstępie dyskusji nad głównymi ograniczeniami i trudnościami w opracowaniu udoskonalonych modeli elektrotermicznych przyrządów klasy IGBT zabrakło szerszych odniesień do podstaw teoretycznych.
- b. Uważam też, że Doktorant powinien szerzej przedstawić w rozprawie problematykę zjawisk zachodzących w tranzystorach IGBT w zakresie pracy podprogowej. Powinien też wyraźnie zarówno pod względem merytorycznym, jak i aplikacyjnym uzasadnić potrzebę opracowania modeli elektrotermicznych obejmujących zakres podprogowy dla tranzystorów IGBT, które głównie znajdują zastosowanie jako wysokonapięciowe elementy energoelektroniczne mocy.
- c. Jestem przekonany, że skrócenie zbyt długich opisów układów i technik pomiarowych lub przedstawienie w postaci odrębnych dodatków poprawiłoby przejrzystość i komfort w czytaniu przygotowanej rozprawy doktorskiej. Dotyczy to np. niektórych fragmentów i podrozdziałów z rozdziałów 2, 3 i 4.

8. Do której kategorii recenzent zalicza rozprawę: wyraźnie wykraczającą poza poziom przeciętny (spełniającą wymagania z nadmiarem).

Wnioski końcowe

Podsumowując stwierdzam, że opiniowana rozprawa prezentuje wymagany poziom naukowy, a przedstawione wyniki badań są oryginalnym dorobkiem Doktoranta. Mgr inż. Paweł Górecki samodzielnie rozwiązał postawione zadania i wykazał się wiedzą oraz umiejętnościami wymaganymi do uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektronika. Stwierdzam też, że rozprawa spełnia wymagania stawiane przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, z późniejszymi zmianami. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ponadto, na podstawie przedstawionych w recenzji osiągnięć oraz dorobku naukowego, wnioskuję o jej wyróżnienie. W uzasadnieniu mojego wniosku o wyróżnienie pragnę szczególnie podkreślić, że Doktorat do chwili obecnej opublikował 34 prace naukowe, w tym 7 artykułów w wysokiej rangi czasopismach indeksowanych w międzynarodowej bazie JCR.

Gdańsk, 12 lutego 2019 roku

