

Łódź, 21 stycznia 2019

Dr hab. inż. Ewa Raj
Politechnika Łódzka
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych
ul. Wólczańska 211/215
90-924 Łódź

tel.: 42 631 26 47
email: ewa.raj@p.lodz.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni

Tytuł rozprawy: „Modelowanie tranzystorów IGBT z uwzględnieniem zjawisk termicznych na potrzeby komputerowej analizy układów elektronicznych w programie SPICE”

Autor rozprawy: mgr inż. Paweł Górecki

Promotor rozprawy: prof. dr hab. Janusz Zarębski

Promotor pomocniczy: dr inż. Jacek Dąbrowski

Ocena pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska poświęcona jest modelowaniu tranzystorów i modułów IGBT z uwzględnieniem zjawisk cieplnych i ich wpływu na pracę układową tych elementów elektronicznych. Tranzystory z izolowaną bramką łączą w sobie zalety tranzystorów typu MOS oraz tranzystorów bipolarnych i są jednymi z podstawowych elementów półprzewodnikowych mocy wykorzystywanych w energoelektronice. Dzięki coraz to lepszym parametrom tych przyrządów obserwujemy nieustanny wzrost oraz zakres ich aplikacji, a w konsekwencji intensyfikację badań nad tego typu strukturami. Liczne prace poświęcone są konstrukcji pojedynczych przyrządów, całych modułów energoelektronicznych, czy też technologiom ich wytwarzania. Istotną ich częścią są zagadnienia związane z modelowaniem począwszy od symulacji zjawisk zachodzących w strukturach półprzewodnikowych, a skończywszy na numerycznych analizach pracy układów elektronicznych z wykorzystaniem modeli skupionych. Wraz z rozwojem tranzystorów IGBT niezbędne są coraz dokładniejsze opisy pozwalające na przeprowadzanie symulacji lepiej oddających zachowanie rzeczywistych przyrządów. W związku z powyższym podejmowany w dysertacji problem badawczy obejmujący opracowanie elektrotermicznych modeli tranzystorów IGBT w wykonaniu dyskretnym i zawartego w modułach mocy należy uznać za ważny i aktualny.

Rozprawa licząca 122 strony ma charakter teoretyczno-eksperymentalny. Obejmuje dziesięć rozdziałów, w tym wstęp i podsumowanie, oraz spis treści, spis literatury i trzy dodatki przedstawiające opis tekstowy modeli tranzystorów i modułów IGBT dla programu SPICE, z których dwa są rozwiązaniami autorskimi. Rozprawa została przygotowana w sposób przejrzysty, a pojawiające się drobne błędy językowe, raczej o charakterze edytorskim, nie wpływają na jej zrozumienie. Niestety brak jest zestawienia wykorzystywanych w pracy symboli i oznaczeń, co nieznacznie utrudnia lekturę. Z kolei, oddzielenie prac autorskich i współautorskich ze wspólnego spisu literatury obejmującego łącznie 182 pozycje znacząco poprawia czytelność rozprawy jednoznacznie wskazując materiał, który już został opublikowany przy współudziale Doktoranta. Warto podkreślić, że w 19 z 34 publikacji autorskich, mgr inż. Paweł Górecki jest pierwszym autorem. Ponadto, 5 artykułów ukazało się w czasopismach indeksowanych w bazie JCR, a ich łączny współczynnik wpływu wynosi 5,165.

W pierwszym rozdziale będącym wprowadzeniem, Autor przedstawia aktualny stan wiedzy dotyczący tranzystorów i modułów IGBT oraz ich modeli elektrycznych i elektrotermicznych w postaci modeli skupionych. Odwołuje się do licznej bibliografii obejmującej monografię oraz artykuły opublikowane w materiałach konferencyjnych oraz w czasopismach krajowych i zagranicznych. Prawie 50% pozycji to publikacje z ostatnich 10 lat, co potwierdza dobre i aktualne rozeznanie tematu przez Autora. Należy jednak podkreślić, iż rozdział ten jest wyjątkowo krótki i w wielu miejscach odsyła czytelnika do literatury. W rezultacie, można zauważyć brak głębszej analizy stanu wiedzy i odczuć niedosyt, choć biorąc pod uwagę objętość całej pracy ten zabieg jest zrozumiały. W tym samym rozdziale, Autor przedstawia także motywację do podjęcia badań oraz nakreśla cele i zadania oraz formułuje tezę naukową.

Rozdział drugi rozpoczyna właściwą część rozprawy przedstawiającą wyniki autorskie. W rozdziale tym i następnym, omówiono układy do pomiaru charakterystyk statycznych i dynamicznych tranzystorów IGBT odpowiednio bez uwzględnienia zjawiska samonagrzewania (izotermiczne) oraz z uwzględnieniem zjawisk termicznych i wzajemnych sprzężeń cieplnych mających istotne znaczenie w modułach mocy. Weryfikację doświadczalną stanowisk pomiarowych przeprowadzono z wykorzystaniem kilku wytypowanych elementów półprzewodnikowych mocy. Przykładowe wyniki w postaci różnych rodzajów charakterystyk dla tranzystora firmy International Rectifier (IRG4PC40UD) oraz modułu IGBT firmy PowerSem (PSI 2/06) zamieszczono w pracy. Warto podkreślić, iż w warunkach nieizotermicznych badaniom poddano tranzystor bez i z zamontowanym radiatorem. Bardzo ciekawe są także wyniki obrazujące wzajemne sprzężenia cieplne w module, który zawiera dwa tranzystory IGBT, dwie diody oraz wbudowany termistor.

W rozdziale czwartym przedstawiono pomiary parametrów termicznych tranzystora IGBT w wykonaniu dyskretnym oraz w module mocy. W celu wyznaczenia rezystancji cieplnej wykorzystano metodę stałoprądową (opatentowana rozwiązanie współautorstwa Doktoranta) i impulsową należące do grupy metod elektrycznych oraz metodę optyczną. Z kolei, pomiar przejściowej impedancji cieplnej oraz w przypadku

modułu IGBT własnej i wzajemnej przejściowej impedancji cieplnej został zrealizowany jedynie z wykorzystaniem metod elektrycznych przy użyciu krzywej chłodzenia. Przykładowe otrzymane wyniki dla stanu cieplnie ustalonego oraz charakterystyki dla stanu przejściowego potwierdzają możliwość wykorzystania przedstawionych metod dla potrzeb badania parametrów termicznych tranzystorów i modułów IGBT, jednakże w mojej opinii przeprowadzona przez Autora ocena dokładności pomiaru całkowicie dyskredytuje metodę optyczną do badania tranzystora na radiatorze (błąd pomiaru w całym badanym zakresie przekracza 30%). Co ważne, Autor ma świadomość, że „właściwy dobór prądu pomiarowego oraz wydzielanej w badanym elemencie mocy grzejnej” pozwoli utrzymać błąd pomiaru na poziomie kilku procent i tym samym zapewni zadawalającą dokładność.

W rozdziale piątym, Doktorant porównuje izotermiczny model tranzystora IGBT w wersji klasycznej (model Hefnera), który jest wbudowany w program SPICE, model producenta testowanego tranzystora w wersji dyskretnej oraz model autorski. Przedstawione w pracy wyniki badań potwierdzają, że najlepsze dopasowanie pomiarów i symulacji w badanym zakresie temperatury zapewnia rozwiązanie zaproponowane przez Autora. Wniosek ten dotyczy zarówno charakterystyk statycznych jak i dynamicznych i jest poprawny w szerokim zakresie zmian temperatury, sygnału sterującego oraz rezystancji obciążenia.

Samonagrzewanie tranzystora IGBT oraz zjawiska związane z wzajemnymi sprzężeniami cieplnymi występującymi w modułach mocy uwzględnione są w skupionym modelu termicznym zaprezentowanym w rozdziale szóstym. Nowością w proponowanym rozwiązaniu jest uwzględnienie wpływu temperatury wnętrza elementu półprzewodnikowego na wartości rezystancji termicznych toru przepływu ciepła. Porównanie wyników obliczeń z wykorzystaniem nowego nieliniowego modelu z podejściem liniowym oraz podejściem nieliniowym (dostępnym w literaturze) uwzględniającym wpływ wydzielanej mocy z wynikami pomiarów potwierdza wyższość nowego rozwiązania. Zaproponowany model autorski charakteryzuje się prostotą przy jednoczesnym uwzględnieniu zmian efektywności procesu chłodzenia wywołanych zmianą temperatury struktury półprzewodnikowej.

W rozdziałach siedem, osiem i dziewięć przedstawiono odpowiednio sposób formułowania, estymację parametrów oraz weryfikację autorskiego modelu elektrotermicznego tranzystora IGBT oraz modułu mocy w postaci dedykowanej dla programu SPICE. Weryfikację przeprowadzono w oparciu o badanie tranzystora IGBT w wykonaniu dyskretnym oraz przetwornicy półmostkowej z modułem IGBT w różnych warunkach chłodzenia. Badania objęły zarówno stany statyczne jak i stany dynamiczne, a zadawalająca zgodność wyników symulacji i pomiarów potwierdziła możliwości wykorzystania nowo opracowanego skupionego modelu elektrotermicznego do analizy obwodowej.

Rozdział dziesiąty stanowi podsumowanie rozprawy doktorskiej. Autor wskazał w nim swoje najważniejsze osiągnięcia oraz zaproponował dalsze kierunki prac badawczych

związanych z rozwojem modeli elektrotermicznych tranzystorów IGBT oraz ich weryfikacji doświadczalnej.

Przedstawiony w rozprawie zakres badań jest bardzo szeroki. Autor brał czynny udział zarówno w badaniach eksperymentalnych (od strony realizacji doświadczeń i opracowania technik pomiarowych), jak i analizach teoretycznych i pracach symulacyjnych. Potwierdzeniem wysokiego poziomu badań są publikacje w znaczących czasopismach, a na uwagę zasługuje ponadto aplikacyjny charakter zaprezentowanych wyników. Do najważniejszych osiągnięć Autora zaliczam:

1. Przedstawienie wpływu temperatury na charakterystyki tranzystora IGBT, ze szczególnym uwzględnieniem obszaru podprogowego.
2. Zbadanie zjawiska samonagrzewania oraz sprzężeń termicznych w module mocy z tranzystorem IGBT.
3. Opracowanie metod pomiaru parametrów termicznych testowanych przyrządów półprzewodnikowych, a w szczególności współudział w opracowaniu opatentowanej metody stałoprądowej wyznaczenia rezystancji cieplnej tranzystora IGBT.
4. Opracowanie modeli termicznych oraz modeli elektrotermicznych tranzystora IGBT w postaci dyskretnej oraz w module mocy uwzględniających wpływ temperatury złącza na pracę elementu w układzie.
5. Przeprowadzenie weryfikacji doświadczalnej opracowanych modeli.

Uwagi o charakterze ogólnym i szczegółowym

W trakcie lektury rozprawy, nasunęło mi się także kilka uwag, przy czym w recenzji pragnę przedstawić jedynie najistotniejsze z nich. Mają one charakter dyskusyjny i nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę rozprawy.

1. W podrozdziale „Charakterystyki termometryczne dyskretnego tranzystora IGBT”, Autor przedstawił sposób wyboru oraz charakterystyki parametru termoczułego. Zamieszczony opis sugeruje, że wykorzystano do tego celu metodę stałoprądową, choć impulsowa wydawałaby się być dużo bardziej zasadna. Pojawia się tutaj także pytanie czy efekt samonagrzewania nie zmieni znacząco temperatury złącza względem mierzonej temperatury otoczenia.
2. W opracowanym przez Autora modelu termicznym, temperatura złącza wyznaczana jest względem temperatury otoczenia. Uważam, że model zyskałby większą uniwersalność gdyby składał się z członów związanych z przejściową impedancją cieplną złącze-obudowa oraz obudowa-otoczenie lub nawet obudowa-układ chłodzenia i układ chłodzenia-otoczenie.
3. Moje zastrzeżenia budzi sposób przedstawienia danych na rys. 4.9 i rys. 4.10, na których nie zaznaczono punktów pomiarowych ale przedstawiono wygładzone linie łączące te punkty. W rezultacie pokazane krzywe mogą nawet nie oddawać rzeczywistego charakteru zmian (rys. 4.10).
4. Nie zgadzam się ze stwierdzeniem Autora (str. 75) sformułowanym w oparciu o pracę [68], że „podstawowym mechanizmem odprowadzania ciepła z przyrządu półprzewodnikowego jest konwekcja”. W wielu przypadkach

konwekcja będzie dominującym mechanizmem wymiany ciepła, ale bez problemu można wskazać rozwiązania, w których transfer ciepła odbywa się głównie w wyniku radiacji termicznej.

5. Za niefortunne uważam także sformułowanie „modele izotermiczne, czyli takie, w których pomijany jest wpływ zjawisk cieplnych na charakterystyki elementu” (str. 6). Izotermiczny oznacza bez zmiany temperatury. W rezultacie, w modelach izotermicznych zakładamy, że przepływ ciepła nie ma wpływu na temperaturę złącza, ale już sama temperatura złącza będzie miała wpływ na charakterystyki elementu półprzewodnikowego.
6. W trakcie badania charakterystyk dynamicznych dyskretnego tranzystora IGBT dla potrzeb weryfikacji eksperymentalnej modelu elektrotermicznego, Autor porównuje obliczoną wartość temperatury złącza ze zmierzoną wartością temperatury obudowy. Zabieg ten nie budziłby moich większych zastrzeżeń gdyby nie fakt, iż Autor obliczył błąd względny i bezwzględny posługując się wartościami temperatury w dwóch różnych miejscach.

Mimo, iż praca przygotowana została bardzo starannie, to jednak Autor nie ustrzegł się pewnych usterek, głównie o charakterze edytorskim:

- W kilku miejscach, czytelnik odsyłany jest do niewłaściwych rysunków (np. na str. 42 pojawia się rys. 3.2 zamiast rys. 3.1) czy równań (np. na str. 85 zamiast wzór (5.11) powinno być (5.10)).
- Podpisy pod rysunkami czy nagłówki tabeli znajdują się nie na tej samej stronie (np. Rys 4.8 na stronie 48 i podpis na str. 49 czy nagłówek Tabeli 4.1 na str. 53, a sama tabela już na str. 54)
- W pracy pojawiają się także pojedyncze literówki czy też zdania nie skończone (np. pierwsze zdanie w ostatnim akapicie na str. 81).

Wnioski końcowe

Podsumowując, przedstawiona do oceny rozprawa doktorska zawiera oryginalne rozwiązanie poprawnie sformułowanego problemu naukowego. Biorąc pod uwagę dobór tematu rozprawy, sposób zdefiniowania zadań badawczych, jak również wykorzystane metody i narzędzia badawcze, uważam, że Autor dysertacji jest przygotowany do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W mojej ocenie rozprawa z nadmiarem spełnia wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim, a dodatkowo biorąc pod uwagę zakres przedstawionych prac oraz ich aplikacyjny charakter wnoszę o jej wyróżnienie. Jednocześnie, zgłaszam wniosek do Rady Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni o dopuszczenie mgr inż. Pawła Góreckiego do publicznej obrony.