

Białystok, 17 grudnia 2024 r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Sikorski
Zakład Energoelektroniki i Napędu Elektrycznego
Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok

Ocena rozprawy doktorskiej mgr. inż. Dawida Zięby pt.:

***”Zaawansowane metody pomiaru strat mocy w
półprzewodnikowych elementach mocy SiC”
(„Advanced methods of power losses measurements
in SiC semiconductor power devices”)***

(zlecenie na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 15.10.2024 r.)

1. Ogólna charakterystyka rozprawy, przedmiot i cel rozprawy

Tematem opiniowanej rozprawy są przedsięwzięcia prowadzące do umożliwienia pomiaru strat mocy oraz charakterystyk dynamicznych szybko przełączających się łączników energoelektronicznych z węgla krzemu ze szczególnym uwzględnieniem modułów mocy SiC MOSFET nowej generacji. Rozprawa doktorska realizowana była w ramach programu doktoratu wdrożeniowego.

Jednym z głównych problemów, istotnych w procesach projektowania przekształtników energoelektronicznych, jest dokładne określenie strat mocy w łącznikach energoelektronicznych. Jest to wymagane szczególnie na etapach projektowania i prototypowania, ponieważ poziom strat mocy bezpośrednio determinuje parametry przetwarzanej mocy (prądów) i wymagania dotyczące chłodzenia. Dlatego też opracowanie niezawodnych stanowisk testowych i modeli, które umożliwiają dokładny pomiar strat mocy i oszacowanie wydajności nowoczesnych przekształtników energoelektronicznych, można uznać za bardzo dobry kierunek badań naukowych. Dostępność niezawodnych stanowisk testowych i modeli umożliwia optymalizację projektowanych urządzeń i optymalizację procesów projektowania.

Powszechnie stosowane metody pomiaru strat mocy można podzielić na metody wykorzystujące pomiary elektryczne oraz metody pomiaru kalorymetrycznego. Chociaż zarówno metody pomiaru elektrycznego, jak i kalorymetrycznego umożliwiają określenie strat mocy testowanego urządzenia, różnią się one znacząco pod wieloma względami, przy czym każda z nich oferuje inne zalety, wady i ograniczenia. Metody pomiaru strat mocy oparte na pomiarach elektrycznych umożliwiają obserwację dynamicznego zachowania testowanego urządzenia poprzez pomiary chwilowych wartości napięć i prądu, przy użyciu sprzętu pomiarowego w



postaci oscyloskopu oraz sond napięciowych i prądowych. Metody te można uznać za stosunkowo szybkie w wykonaniu, ponieważ poszczególne testy można wykonać w czasie rzędu sekund. Z kolei metody pomiaru strat mocy oparte na pomiarach kalorymetrycznych można uznać za stosunkowo wolne, ponieważ poszczególne testy mogą trwać nawet godziny, aby uzyskać pojedynczy wynik pomiaru. Jednakże metody pomiaru strat mocy oparte na pomiarach kalorymetrycznych mają charakter kompletny, gdyż umożliwiają pomiar wszystkich strat w urządzeniu co jest istotne dla określenia jego sprawności nawet przy częstotliwości przełączania w zakresie megaherców niezależnie od skomplikowania układu przekształtnika (układy rezonansowe, quasi-rezonansowe, miękko-przełączalne). W przypadku skomplikowanych układów przełączania i wysokich częstotliwości metody pomiaru strat na podstawie pomiarów elektrycznych są mało użyteczne ze względu na ograniczone pasmo przenoszenia sprzętu pomiarowego. Natomiast metody z pomiarem wielkości elektrycznych są bardziej przydatne do określania strat w wybranych częściach układów przekształtnika np. w tranzystorach mocy. Rozważając działanie przekształtnika energoelektronicznego zbudowanego z łączników MOSFET SiC, straty mocy w nim wydzielone można podzielić na dwa główne składniki. Pierwszy składnik odpowiada za straty mocy wydzielone na części rezystancyjnej urządzenia w stanie ustalonym związane z przewodzeniem prądu, gdy tranzystor jest włączony. Drugi składnik odpowiada za łączeniowe straty mocy związane z procesami przełączania tranzystora. Określenie tych strat pozwala na określenie wielkości radiatorów, na których montowane są tranzystory.

Autor postawił sobie za cel rozprawy opracowanie i przebadanie dwóch stanowisk testowych opartych na pomiarach elektrycznych dedykowanych do pomiarów strat mocy w szybko przełączających się półprzewodnikowych łącznikach mocy z węglík krzemu, wraz z niezbędnym oprogramowaniem i algorytmami do określania charakterystyk dynamicznych przy uwzględnieniu wpływu parametrów pasożytniczych. Szczegółowe cele sformułowane przez doktoranta to:

- projekt, rozwój i wdrożenie stanowiska testowego opartego na pomiarach elektrycznych poświęconego pomiarowi strat mocy w szybko przełączających się półprzewodnikowych urządzeniach mocy SiC, wraz z niezbędnym oprogramowaniem i algorytmami do określania wydajności dynamicznej wybranych urządzeń, przy jednoczesnym uwzględnieniu wpływu parametrów pasożytniczych (indukcyjności pasożytniczych i pojemności) w pętlach mocy, na szybkie procesy przełączania,
- projekt, rozwój i wdrożenie stanowiska testowego opartego na pomiarach kalorymetrycznych poświęconego pomiarowi strat mocy w szybko przełączających się półprzewodnikowych urządzeniach mocy SiC, wraz z oprogramowaniem i algorytmami potrzebnymi do dokładnego określenia całkowitych strat mocy rozproszonych przez pętlę mocy na bazie wybranych szybko przełączających się półprzewodnikowych urządzeń mocy SiC,
- synteza, ocena i wdrożenie modelu pętli mocy przełączającej opartej na szybkim module mocy MOSFET SiC

Można więc stwierdzić, że w recenzowanej rozprawie Autor podjął aktualny, niebanalny z poznawczego punktu widzenia problem badawczy, który ma istotne znaczenie praktyczne i który nie został dotychczas rozwiązany w sposób ostateczny i jednoznaczny.

Rozprawa zawiera 158 strony i została zredagowana w 5 rozdziałach. Zdaniem recenzenta przyjęty przez Autora układ treści rozprawy jest wystarczająco jasny i klarowny, podział rozprawy na rozdziały - prawidłowy, a rozdział wstępny i końcowy

 2

zawierają właściwe treści. Bibliografia zamieszczona na końcu pracy zawiera 299 pozycje literatury światowej, właściwie dobranej i wykorzystanej do opisu aktualnych osiągnięć istotnych z punktu widzenia treści rozprawy Autora.

Rozdział 1 recenzowanej rozprawy (Wstęp), oprócz opisu motywacji do podjęcia badań, zawiera również przegląd tematyki badawczej, w której są umiejscowione problemy podjęte przez Autora i opisane w rozprawie. W pierwszej części Autor, po krótkim wprowadzeniu, przedstawił metody pomiaru strat mocy oraz potrzeby modelowania szybko przełączalnych łączników mocy SiC. Następnie przedstawił cel i strukturę pracy. Spis literatury zawiera 299 pozycji, na podstawie którego Autor szczegółowo zaprezentował swoje pole badawcze. Należy podkreślić ogromną wiedzę Autora m.in. pochodzącą z literatury, która Autor przytacza nie tylko w rozdziale z przeglądem literatury, ale w całej pracy przy szczegółowej analizie rozważanych zagadnień.

W rozdziale drugim Autor przedstawił porównanie właściwości łączników wykonanych w technologii Si i SiC, a także opisał procesy przełączania MOSFET-ów SiC i wpływu parametrów pasożytniczych obwodu na procesy określania energii przełączania.

Trzeci rozdział poświęcono omówieniu budowy 2 stanowisk: do badania stanów przejściowych podczas przełączania łączników SiC oraz do określania sprawności urządzeń energoelektronicznych. W pierwszej części Autor opisuje projektowanie, konstrukcję i dobór poszczególnych części oraz sprzętu pomiarowego stanowiska testowego do określania strat mocy półprzewodnikowych łączników mocy SiC, metodą opartą na pomiarach elektrycznych. W drugiej części rozdziału przedstawiono projekt, opracowanie, kalibrację i wdrożenie dwupłaszczyznowego systemu opartego na kalorymetrze, przeznaczonego do dokładnego (błąd do 2%) określania całkowitych strat mocy w pętłach mocy opartych na półprzewodnikowych urządzeniach mocy SiC, przetwornikach elektroniki mocy i elementach pasywnych.

W rozdziale czwartym opisano i porównano metody modelowania MOSFET-ów. Szczegółowo opisano metodę modelowania behawioralnego pętli mocy opartą na szybko przełączającym się module mocy SiC MOSFET, a także opracowano przykładowy model PSpice.

Wnioski i podsumowanie przedstawiono w rozdziale piątym.

Rozważane tematy obejmują problemy przygotowania „narzędzi” do projektowania i testowania przekształtników energoelektronicznych, głównie ich części silnoprądowych. Te „narzędzia” obejmują stanowisko rejestracji stanów przejściowych na tranzystorach podczas procesów przełączania i podczas stanów ustalonych. Przebiegi te mogą posłużyć wyznaczaniu strat mocy w tranzystorach oraz do określania dopuszczalnych parametrów prądowo-napięciowych podczas pracy w określonych konfiguracjach. Szkoda, że Autor nie zaprezentował możliwości określania całkowitych strat mocy podczas pracy tranzystorów. Ponadto Autor przedstawił zasady kompletowania stanowiska do przeprowadzania takich prób. Drugim stanowiskiem, istotnym z punktu widzenia testowania przekształtnika, jest zaprojektowane i wykonane stanowisko do badań kalorymetrycznych całkowitych strat mocy przekształtnika. Urządzenie może służyć do badania sprawności



kompletnego przekształtnika lub jego części. Zostało skalibrowane i pozwala osiągać błąd pomiaru nie większy niż 2%. Szkoda, że Autor nie przedstawił wyników badań np. części przekształtnika wykorzystywanej do testów dwu-impulsowych i porównał wyników uzyskanych drogą oscylograficzną.

Stworzone „narzędzia” stanowią jednak duże osiągnięcia Doktoranta.

2. Ocena merytoryczna i wykaz najważniejszych osiągnięć Autora

Rozprawa stanowi oryginalne i kompletne rozwiązanie zagadnień badawczych, projektowych i konstrukcyjnych związanych z badaniem strat mocy w szybko przełączających się łącznikach energoelektronicznych SiC MOSFET. Należy podkreślić, że praca została wykonana w pełnym cyklu badawczym, tj. od opracowania teoretycznego, poprzez analizę i testy symulacyjne, do zbudowania stanowiska laboratoryjnego. Autor użył właściwych metod rozwiązania problemów naukowych, a przyjęte założenia są uzasadnione.

W firmie, w której realizowano doktorat wdrożeniowy zaprojektowano, opracowano i wdrożono stanowisko testowe oparte na pomiarach elektrycznych, przeznaczone do oceny stanów przejściowych w szybko przełączających się półprzewodnikowych elementach mocy SiC, wraz z dedykowanym oprogramowaniem i algorytmami. Dzięki modułowej konstrukcji mechanicznej pętli mocy stanowisko testowe umożliwia testowanie różnych półprzewodnikowych elementów mocy SiC w różnych obudowach, przy jednoczesnym zachowaniu minimalizacji indukcyjności pasożytniczej. Oprócz wysokiej jakości sprzętu pomiarowego, stanowisko testowe zapewnia niezbędne dane do dalszej dogłębnej analizy i porównania dynamicznego zachowania półprzewodnikowych elementów mocy SiC w zakresie zainteresowania firmy. Opracowane oprogramowanie i algorytmy pozwalają na określenie energii przełączania elementów mocy SiC MOSFET zgodnie z normą IEC 60747-8:2010 na podstawie przebiegów napięcia i prądu uzyskanych podczas testów dwuimpulsowych. Ponadto pozwalają one również na oszacowanie prądu kanału i napięcia dren-źródło na chipie testowanego przełącznika SiC MOSFET wykorzystując zaproponowaną w pracy metodę. Możliwe jest również określenie wartości energii przełączania, biorąc pod uwagę wpływ pasożytniczych parametrów pętli mocy na szybkie procesy przełączania. Przedstawiono nieadekwatność metody określania energii przełączania opisanej w normie (IEC 60747-8:2100 dla szybko przełączających się urządzeń mocy SiC MOSFET) do rzeczywistej energii wydzielanej w tranzystorze. Prowadziło to w niedoszacowania maksymalnych parametrów prądu (mocy) tranzystora.

Stanowisko testowe oparte na pomiarach kalorymetrycznych, przeznaczone do dokładnego określania całkowitych strat mocy pętli mocy przy użyciu szybko przełączających półprzewodnikowych elementów mocy SiC, zostało zaprojektowane, opracowane i wdrożone w firmie wraz z wymaganym oprogramowaniem i algorytmami. Stanowisko testowe w postaci dwupłaszczyznowego kalorymetru, zapewnia dokładne informacje dotyczące całkowitych strat mocy rozpraszania pętli mocy w pracy, w tym szybko przełączających półprzewodnikowych elementów mocy SiC. Konstrukcja dwupłaszczyznowa została zaprojektowana i opracowana przy użyciu wzmocnionego polistyrenu ekstrudowanego, który charakteryzuje się niską

 4

przewodnością cieplną i wysoką trwałością mechaniczną. Właściwości te są niezbędne do testowania całej pętli mocy lub nawet całego przekształtnika. Wybrano i wdrożono sprzęt pomiarowy oparty na wysoce precyzyjnych czujnikach temperatury PT100 oraz precyzyjnym przepływomierzu chłodziwa. Oprogramowanie sterujące i monitorujące zostało opracowane w celu częściowego zautomatyzowania procesu pomiaru oraz utrzymania kalorymetru dwupłaszczowego w stanie równowagi poprzez utrzymywanie podobnej temperatury powietrza zarówno w komorze pomiarowej jak i w komorze pośredniej. Stanowisko testowe zostało skalibrowane i sprawdzone, aby zapewnić względny błąd pomiaru strat mocy poniżej 2% wartości zmierzonych strat mocy, w pełnym zakresie mocy roboczej (od 50 W do 1200 W). Ponadto, oprócz pętli mocy opartych na półprzewodnikowych urządzeniach mocy SiC, stanowisko testowe może być również używane do określania strat mocy w elementach pasywnych. Opracowano i weryfikowano behawioralny model zaimplementowanej pętli mocy stanowiska testowego z podwójnym impulsem z szybko przełączającym się modulem mocy SiC MOSFET. Model pozwala na szybką ocenę zachowania dynamicznego pętli mocy w wybranym punkcie pracy bez konieczności przeprowadzania badań eksperymentalnych. Model umożliwia również między innymi oszacowanie przebiegów napięcia i prądu w całej pętli mocy oraz oszacowanie częstotliwości oscylacji (co powinno pomóc rozwiązać potencjalne problemy z kompatybilnością elektromagnetyczną). Uzyskane wyniki dowodzą poprawności opracowanego modelu, ponieważ naśladuje on zachowanie rzeczywistego systemu z zadowalającą dokładnością z punktu widzenia potrzeb wdrażającej firmy. Dokładne odtworzenie nieliniowych pasożytniczych pojemności międzyelektrodowych i ich zależność od napięcia dren-źródło okazało się kluczowym elementem w uzyskaniu zadowalających wyników.

Wszystkie założone cele pracy zostały osiągnięte. W rezultacie, zaawansowane metody pomiaru strat mocy w półprzewodnikowych przyrządach mocy SiC oraz opracowany model zostały wdrożone w firmie zgodnie z programem doktoratu wdrożeniowego.

Reasumując, za oryginalne i cenne własne osiągnięcia o charakterze naukowym uważam następujące wyniki rozprawy:

- opracowanie metody szacowania prądu kanału przełączającego MOSFET SiC i szacowania napięcia dren-źródło na poziomie układu scalonego, co skutkuje dokładniejszym określeniem energii przełączania urządzeń mocy MOSFET SiC i podkreśla nieadekwatność metody opisanej w obowiązującej normie (IEC 60747-8:2010) do szybko przełączających się urządzeń mocy MOSFET SiC,
- projekt i wdrożenie stanowiska testowego dedykowanego do oceny dynamiki w szybko przełączających się półprzewodnikowych urządzeniach mocy SiC, charakteryzującego się zminimalizowaną indukcyjnością pasożytniczą i modułową konstrukcją, co zapewnia możliwość oceny półprzewodnikowych urządzeń mocy w różnych obudowach,
- opracowanie metody kompensacji różnych opóźnień czasowych sygnałów napięciowych i prądowych sond oscyloskopu,

 5

- opracowanie modelu behawioralnego pętli mocy opartego na szybko przełączającym się module mocy MOSFET SiC w środowisku PSpice,
- opracowanie oprogramowania i algorytmów dedykowanych do przyspieszonej analizy wyników testów dwuimpulsowych,
- projekt, opracowanie, kalibracja i wdrożenie dwupłaszczyznowego systemu opartego na kalorymetrze, przeznaczonego do dokładnego (błąd do 2%) określania całkowitych strat mocy w pętlach mocy opartych na półprzewodnikowych urządzeniach mocy SiC, przetwornikach elektroniki mocy i elementach pasywnych,
- opracowanie oprogramowania sterującego i monitorującego dla dwupłaszczyznowego systemu opartego na kalorymetrze.

Podsumowując, należy uznać, że cel pracy doktorskiej, wraz z jego szczegółowym rozwinięciem, został w pełni zrealizowany.

Ogólna ocena sposobu i jakości rozwiązania sformułowanych zadań badawczych jest niewątpliwie pozytywna. Na uwagę zasługuje również fakt, że analizy teoretyczne i zaproponowany algorytm zostały poparte wszechstronnymi, dobrze udokumentowanymi w rozprawie, testami laboratoryjnymi. Jednakże, jak w każdej pracy naukowej, niektóre problemy i wątki nie zostały w rozprawie opisane w sposób dostatecznie dogłębny, przejrzysty i wyczerpujący. Szczegółowa lista fragmentów, które budzą pewne wątpliwości i komentarze recenzenta, została przedstawiona w kolejnym rozdziale recenzji.

3. Uwagi dyskusyjne i komentarze do rozprawy

Lektura rozprawy nasunęła szereg wątpliwości nie umniejszającym osiągnięciom Autora, przedstawionych poniżej i wymagających ustosunkowania się do nich Autora.

1. Na czym polega wyrównanie czasowe (*time alignment*) przebiegów napięcia i prądu, zaobserwowanych za pomocą sond pomiarowych, niejasno opisane na stronie 50 i na podstawie czego Autor stwierdza, że wykonana korekta jest prawidłowa?
2. Dlaczego Autor nie wykonał przykładowego porównania strat mocy badanego układu w czasie testu dwuimpulsowego na podstawie pomierzonych przebiegów, modelu behawioralnego i testów w kalorymetrze?
3. Istotne znaczenie w określaniu przebiegów prądów i napięć mają parametry pasożytnicze połączeń. Jak więc podejść do projektowania określonego układu przekształtnika skoro nie znamy tych parametrów na etapie projektowania (wyniki testu dwuimpulsowego to wynik badania układu po jego zaprojektowaniu i wykonaniu)?
4. Model behawioralny, jak sama nazwa wskazuje, powstał na podstawie pomiarów (co potwierdzają działania Autora). Następnie ten model jest porównywany z wynikami pomiarów (rys. 4.11 - 4.18). Trudno się dziwić, że są zbieżne!!!. Jaki sens ma takie działanie i wykresy przedstawione na rys. 4.23 – 4.26?
5. Jak zarejestrowano charakterystyki dynamiczne przedstawione na rys. 4.8?

 6

6. Proszę przedstawić, np. w formie grafu, jak Autor widzi wykorzystanie utworzonych modeli i stanowisk pomiarowych do projektowania przekształtnika z wykorzystaniem łączników SiC?

4. Podsumowanie oceny rozprawy doktorskiej

Doktorant podjął problem o niewątpliwie istotnym znaczeniu praktycznym i wnosi oryginalny wkład intelektualny w formie ciągu działań o charakterze teoretycznym i eksperymentalnym pozwalającym na znacznie wyższym poziomie, od spotykanych w doniesieniach naukowych w kraju i za granicą, zaprojektować oraz przetestować symulacyjnie i praktycznie przekształtnik energoelektroniczny na bazie z łączników SiC MOSFET. Powstały dwa stanowiska testowe umożliwiające określanie strat mocy szybko przełączających się urządzeń mocy SiC, wraz z wymaganym oprogramowaniem i algorytmami. Prace Autora mają kluczowe znaczenie dla rozwoju zastosowań elementów SiC MOSFET w energoelektronice, a tym samym wskazują na przydatność w naukach inżynierjno-technicznych.

Zdaniem recenzenta, opiniowana rozprawa mgr. inż. Dawida Zięby pt. "Zaawansowane metody pomiaru strat mocy w półprzewodnikowych elementach mocy SiC" („Advanced methods of power losses measurements in SiC semiconductor power devices”) stanowi oryginalne rozwiązanie naukowo-technicznie nietrywialnego problemu badawczego. Świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Autora w zakresie elektroniki, energoelektroniki i sterowania.

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa **spełnia wymagania** stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 13 ust. 1 Ustawy w zakresie dyscypliny *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*.

Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Dawida Zięby do publicznej obrony przed Komisją Doktorską powołaną przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej.