

Dr hab. inż. Paweł Szcześniak

Zielona Góra, 10.07.2019

Uniwersytet Zielonogórski

Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki

Instytut Inżynierii Elektrycznej

ul. prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA
RADY WYDZIAŁU ELEKTRYCZNEGO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Tytuł rozprawy:

Analiza i badania wysokoczęstotliwościowych falowników klasy DE z tranzystorami MOSFET na bazie SiC i GaN

Autor rozprawy:

Mgr inż. Krzysztof Przybyła

1. Tematyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa została przygotowana pod kierownictwem dr hab. inż. Marcina Kasprzaka, prof. PŚ. Promotorem pomocniczym był dr inż. Marcin Zygmantowski. Rozprawa dotyczy analizy możliwości wykorzystania tranzystorów MOSFET na bazie SiC i GaN, cechujących się wysokimi częstotliwościami przełączeń, w falownikach klasy DE. Cechą charakterystyczną tych falowników jest możliwość uzyskania komutacji miękkich ZVS i ZCS, przez co mogą być stosowane w układach wysokiej częstotliwości. Tematyka ta związana jest z dynamicznym rozwojem tranzystorów z tzw. szerokim pasmem zabronionym (z ang. wide band-gap) wykonanych z węgla krzemu (SiC) oraz azotku galu (GaN) i powszechnym ich zastosowaniem w przekształtnikach energoelektronicznych. Szerokie pasmo zabronione w tych półprzewodnikach ma wpływ na zwiększenie maksymalnego napięcia blokowania tranzystorów oraz na zmniejszenie wpływu temperatury na parametry tranzystora. Dodatkowo możliwa jest do osiągnięcia około dziesięciokrotnie wyższa wartość krytyczna natężenia pola elektrycznego w porównaniu do półprzewodników krzemowych (Si), co również ma wpływ na maksymalne napięcie blokowania. Te dwa korzystne parametry materiałowe pozwalają na budowę tranzystorów mocy o mniejszych gabarytach, a co za tym idzie o mniejszych wartościach pojemności wewnętrznych (C_{GS} , C_{GD} , C_{DS}) oraz rezystancji w stanie załączenia $R_{DS(on)}$ niż dla odpowiedników krzemowych. Parametry te są krytyczne przy przełączaniu tranzystorów z wielką częstotliwością. Dlatego wybór tematyki rozprawy uważam za oryginalny i aktualny a podjęcie badań w tym temacie za zasadne.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Celem rozprawy doktorskiej było zbadanie możliwości skonstruowania falowników klasy DE o częstotliwości z pasma 13,56 MHz, zbudowanych z tranzystorów MOSFET na bazie tranzystorów SiC oraz GaN. W rozprawie zaprojektowano i przebadano cztery falowniki klasy DE (dwa na bazie tranzystorów SiC oraz dwa na bazie tranzystorów GaN). Projekt falowników poprzedzony był wnikliwą analizą teoretyczną poszczególnych elementów składowych systemu. Dodatkowo, ważnym osiągnięciem było również opracowanie i weryfikacja komputerowego modelu falownika klasy DE z użytymi w projekcie eksperymentalnym tranzystorami.

Rozprawa liczy 143 strony i składa się z 11 rozdziałów, w skład których wchodzi literatura oraz dodatki. W początkowej części pracy, po *Spisie treści*, *Zestawieniu ważniejszych oznaczeń* oraz *Zestawieniu określeń i terminów*, Autor zamieścił *Wstęp*. Zawiera on krótkie wprowadzenie, motywację, cel rozprawy, założenia badawcze oraz przedstawia strukturę rozprawy.

W rozdziale drugim dokonano przeglądu literatury w tematyce falowników rezonansowych wielkiej częstotliwości, drajwerów tranzystorów MOSFET wielkiej częstotliwości oraz modeli falowników rezonansowych. Na końcu tego rozdziału Autor formułuje następującą tezę pracy: *„Możliwe jest skonstruowanie falowników klasy DE, pasma 13,56 MHz, z zastosowaniem współczesnych tranzystorów MOSFET na bazie SiC/GaN. Falowniki mogą pracować z mocą ciągłą do 500 W, a tranzystory sterowane są napięciem bipolarnym.”*

W trzecim rozdziale omówiono właściwości tranzystorów MOSFET SiC oraz GaN. Dodatkowo zestawiono parametry katalogowe wybranych tranzystorów dostępnych w sprzedaży i omówiono ich podstawowe parametry. Na podstawie tego przeglądu wybrane zostały tranzystory do budowy czterech prototypów falowników klasy DE.

W kolejnym czwartym rozdziale dokonano przeglądu drajwerów tranzystorów MOSFET oraz analizy ich parametrów użytkowych i strat mocy. Na podstawie tego przeglądu wybrany został drajwer, bipolarny twardo-przełączalny, który został użyty we wszystkich czterech prototypach falowników klasy DE.

Rozdział piąty poświęcony jest omówieniu struktur falowników klasy DE oraz obwodu rezonansowego. Omówione zostały podstawowe topologie falowników klasy DE, procesy komutacyjne oraz sposoby regulacji mocy wyjściowej falownika. Na końcu rozdziału wybrano topologię do dalszego badania w ramach rozprawy ze szczegółowym omówieniem kryteriów wyboru. Wybrano falownik klasy DE o strukturze półmostka z pojemnościowym dzielnikiem napięcia zasilania i obwodem rezonansowym typu RLCC oraz z metodą AM regulacji mocy wyjściowej falownika.

Rozdział szósty to omówienie procesu modelowania falowników klasy DC ze szczególnym uwzględnieniem parametrów tranzystorów i drajwerów. W przedstawionej analizie doktorant zdefiniował i opisał parametry obwodu ze względu na modelowanie strat przewodzenia oraz strat związanych z przełączaniem tranzystorów. Ponadto zostały podane sposoby wyliczania bądź pomiarów omówionych parametrów.

W rozdziale siódmym przedstawione zostały wyniki badań eksperymentalnych prototypów falowników DE zbudowanych na podstawie wcześniej wybranych drajwerów i tranzystorów SiC (dwie topologie) oraz GaN (dwie topologie). Jest to rozdział najdłuższy a zarazem kluczowy pod względem uzyskanych wyników badań w kontekście realizacji tezy rozprawy. W pierwszych podrozdziałach omówiona została budowa układu sterowania, układu drajwerów oraz obwodów dopasowania i obciążenia. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono konstrukcje falowników z poszczególnymi tranzystorami oraz wyniki ich badań. Dodatkowo w pracy omówiono konstrukcję falownika nazwaną SiC-IMS zbudowaną na laminacie typu IMS w celu poprawy chłodzenia tranzystora. Konstrukcja ta niestety nie działała poprawnie ze względu na pojemności pasożytnicze pomiędzy warstwami laminatu. Następnie doktorant przeprowadził analizę przyczyn niezadziałania układu. Dla czterech działających układów wyznaczone zostały podstawowe zależności czasowe oraz charakterystyki współczynnika sprawności w funkcji napięcia zasilania. W końcowej części rozdziału wyznaczone zostały parametry tranzystorów oraz falownika potrzebne do modelu symulacyjnego, które zostały omówione w rozdziale szóstym. Wszystkie uzyskane w tym rozdziale wyniki badań są wartościowe w kontekście postawionej tezy rozprawy i wskazują na możliwość budowy falowników klasy DE pasma 13,56 MHz, z zastosowaniem współczesnych tranzystorów MOSFET na bazie SiC oraz GaN z wyjściową mocą ciągłą do 500 W.

Uzyskane parametry modeli eksperymentalnych tranzystorów oraz falownika, zostały następnie w rozdziale ósmym zaimplementowane w modelach symulacyjnych oraz porównane z modelami dostarczonymi przez producentów tranzystorów. Modele falowników uwzględniają wpływ temperatury tranzystorów oraz czas zaniku prądu tranzystorów.

Rozdział dziesiąty podejmuje dyskusję wyników, podsumowuje i formuje najważniejsze osiągnięcia Autora. Ponadto wskazane zostały propozycje dalszych badań w kontekście poruszanych w rozprawie zagadnień naukowych.

Przedostatnim, numerowanym rozdziałem jest wykaz literatury zawierający 118 pozycji, wykaz 36 not aplikacyjnych i kart katalogowych, wykaz źródeł internetowych (dwie pozycje) oraz publikacji autora (również dwie pozycje).

Rozprawę kończy dodatek zawierający opis modelu symulacyjnego falownika w programie LTSpice, spis przyrządów pomiarowych, wyznaczenie niepewności pomiarowych oraz dorobek naukowy doktoranta.

Redakcja pracy jest w większości prawidłowa. Występuje prawidłowy ciąg wnioskowania od definicji problemu przez opisanie rozwiązania po praktyczną lub symulacyjną weryfikację.

3. Uwagi ogólne

- 1) W rozdziale 4 doktorant omawia drajwery tranzystorów MOSFET i analizuje ich straty mocy. Wskazuje, że największe znaczenie mają straty mocy w rezystancji wyjściowej drajwera R_{DRO} (zależność 4.4). Następnie wskazuje, że drajwery scalone mają często różne rezystancje w stanie wysokim R_{DROH} i niskim R_{DROL} . Wówczas straty mocy w rezystancji wyjściowej drajwera są określone zależnością 4.8. Wydaje się, że w tym wzorze jest błąd, w części dotyczącej pracy w stanie niskim, w mianowniku powinna być wartość R_{DROL} zamiast R_{DROH} . W celu weryfikacji poprawności wzoru należy zdefiniować model zastępczy układu dla stanu niskiego i wysokiego.
- 2) W rozdziale 6 rozwijany jest model falownika DE, z dokładną analizą parametrów tranzystorów. Jednym z analizowanych parametrów jest rezystancja $R_{DS(on)}$. Autor rozprawy proponuje wyznaczenie efektywnej rezystancji drenu R_{DSeff} korzystając z twierdzenia Parsewala rozwijając prąd i_{DS} w szereg Fouriera i stosuje dość rozbudowaną zależność (6.20) do jej obliczenia. Następnie Doktorant stwierdza, że w tak obliczonej wartości R_{DSeff} największy wpływ ma rezystancja przy prądzie stałym $R_{DS(on)DC}$. Warto oszacować jaki procent rezystancji efektywnej R_{DSeff} stanowi składnik od prądu stałego, a jaki od części związanej z harmonicznymi. Ponadto istotne wydaje się określenie o ile wyniki w zaproponowanej metodzie pomiaru za pomocą analizatora impedancji różnią się od wyników otrzymanych za pomocą zależności (6.20).
- 3) Nasuwają się również następujące pytania do rozdziału 6: Jaka jest dokładność pomiarowa oraz moc pomiarowa stosowanego analizatora impedancji? Czy pomiary dokonywane za pomocą sygnałów niskonapięciowych i o małej mocy dobrze odzwierciedlają rzeczywiste parametry badanych tranzystorów w warunkach pracy z obciążeniem? Czy doktorant porównywał wyniki wyznaczania parametrów zastępczych tranzystora dokonanych metodą techniczną oraz analizatorem impedancji?
- 4) Na stronie 41 doktorant stwierdza, że „Warto zaznaczyć, że praca w trybie optymalnym nie oznacza koniecznie punktu maksymalnej sprawności falownika”. Warto zatem odpowiedzieć na pytanie jakie warunki muszą być spełnione aby falownik klasy DE pracował w punkcie maksymalnej sprawności?

- 5) Na stronie 79 doktorant opisuje zalety dodatkowego wyprowadzenia sterującego źródła, zmniejszające wpływ prądu drenu na proces przełączania tranzystora. Wskazane jest szersze wyjaśnienie i komentarz tego zjawiska, gdyż z przedstawionych wyjaśnień z Rys. 7.19 nie wynika jednoznacznie niekorzystny wpływ wspólnej indukcyjności źródła na proces przełączeń tranzystora.
- 6) Szerszego komentarza wymagają również wyniki uzyskane dla falowników z tranzystorami GaN, które zostały przedstawione na Rys. 7.32 oraz Rys. 7.39. W falownikach tych przy obciążonych drajwerach widoczne jest znaczne zniekształcenie sygnału sterującego w stosunku do drajwera nieobciążonego. Ponadto występuje ograniczenie mocy wyjściowej falownika. Autor rozprawy twierdzi, że „Jest to najprawdopodobniej spowodowane za słabą wydajnością prądową drajwera scalonego UCC27526 oraz możliwym tworzeniem się rezonansu równoległego w obwodzie bramka-dren. Malejąca wartość mocy P_{DRT} ma również związek z wychodzeniem tranzystorów z obszaru rezystancyjnego”. Wskazane jest wyjaśnienie na podstawie modelu zastępczego w jakim obwodzie będzie dochodziło do rezonansu równoległego. Czy doktorant przy obecnym stanie wiedzy potrafi wskazać propozycje poprawy tego niekorzystnego zjawiska? Czy zastosowanie drajwera zbudowanego z elementów dyskretnych lub o większej wydajności prądowej polepszyłyby działanie falownika?

4. Uwagi szczegółowe

Praca pomimo ogólnej poprawności pod względem edytorskim zawiera niewielką liczbę błędów edycyjnych. Ponadto, doktorant popełnił bardzo dużo błędów interpunkcyjnych i tzw. „literówek”. O skali problemu niech świadczy fakt, że na stronie 63 autor rozprawy popełnił 6 błędów interpunkcyjnych nie stawiając przecinka przed słowem *który*. Dodatkowo wskazać można jeszcze 36 błędów interpunkcyjnych w całej pracy. W tekście rozprawy brak jest cytowania i omówienia Rysunków 3.2, 3.3, 8.4 oraz 8.5. W tabeli poniżej przedstawiono najbardziej znaczące błędy edytorskie i stylistyczne.

Błędy literowe	Str. 3: z <i>izolowana bramką</i> - z <i>izolowaną bramką</i> ; Str. 6: z <i>mocą ciągłą</i> – z <i>mocą ciągłą</i> ; Str. 31: <i>rożne</i> – <i>różne</i> ; Str. 45: <i>walny</i> – <i>wolny</i> ; Str. 46: <i>Do zalet metody IPDM należy:</i> – <i>Do zalet metody IPDM należą:</i> ; Str. 47: <i>Głowna</i> -: <i>Główna</i> ; Str. 54: <i>składowej stałe napięcia</i> – <i>składowej stałej napięcia</i> ; Str. 59: <i>ze składową stała</i> – <i>ze składową stałą</i> ; Str. 101: <i>Czasu zaniku</i> – <i>Czas zaniku</i> ; Str. 104: <i>głownie</i> – <i>głównie</i> ; Str. 108: <i>rożna</i> –
----------------	---

	różna; Str. 113: <i>około 3 punktów procentowych</i> – <i>około 3 punkty procentowe</i> .
Pominięcie wyrazu:	Str. 40: <i>wyników optymalnych podstawie zależności</i> - <i>wyników optymalnych na podstawie zależności</i> ; Str. 44: <i>Ze względu trudność</i> - <i>Ze względu na trudność</i> ; Str. 66: <i>zbudowany w oparciu drajwery</i> – <i>zbudowany w oparciu o drajwery</i> .
Niepotrzebny zwrot	Podpis rysunku 5.9: <i>wybrane struktury</i> .
Błąd edycyjny	Str. 4: <i>po-dowod</i> błąd przy przenoszeniu wyrazu, powinno być: <i>pod-obwodu</i> .
Niewyjaśnione skróty	Str. 6: IDPM; Str.34: NZVS; Str. 74: IMS.
Błąd edycyjny	Str. 37: Tekst w podrozdziale 4.4.3 zaczyna się z małej litery.
Błąd edycyjny	Str. 42: Występują nazwy kondensatorów C_1 , C_2 , a powinny być C_{r1} , C_{r2} .
Błąd edycyjny	Str. 51: <i>Po korekcie temperaturowej 6.1</i> zła numeracja wzoru, powinno być <i>po korekcie temperaturowej 6.9</i> .
Błąd stylistyczny	Str. 51: Dwa razy występuje prawie identyczne zdania, z których nie wynika o jakim parametrze jest mowa. Czytelnik może się domyślić z nazwy podrozdziału i podpisu Rys. 6.3, że jest to czas T_f . <i>Na rysunku 6.3 przedstawiono przebiegi prądu i_{DS} obrazujące efekt tego paramentu.</i> <i>Na rysunku 6.3 przedstawiono przebiegi prądu i_{DS} oraz napięcia u_{DS} obrazujące efekt zmiany tego paramentu.</i> Dodatkowo wystąpiła literówka w obu tych zdaniach: <i>paramentu</i> – powinno być <i>parametru</i> .
Błąd edycyjny	Str. 81: <i>rysunek 7.22</i> złe cytowanie, powinno być <i>rysunek 7.21</i> .
Błąd edycyjny	W podrozdziale <i>Struktura rozprawy</i> przedstawiony jest opis od rozdziału trzeciego zamiast od pierwszego.

5. Ocena rozprawy

Opiniowana praca zawiera część analityczną, eksperymentalną oraz symulacyjną i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością energoelektroniki, elektroniki, technik symulacyjnych układów elektronicznych oraz metod pomiarowych. Pozytywnie należy również ocenić zdolności konstrukcyjne i projektowe

układów elektronicznych i obwodów drukowanych z uwzględnieniem parametrów pasożytniczych elementów i obwodów.

Do najważniejszych osiągnięć doktoranta należy zaliczyć:

- opracowanie i budowa czterech falowników klasy DE o częstotliwości z pasma 13,56 MHz z wykorzystaniem tranzystorów SiC (dwa prototypy) oraz tranzystorów GaN (dwa prototypy);
- przeprowadzenie szczegółowych badań i analiz właściwości skonstruowanych prototypów;
- opracowanie modeli symulacyjnych falowników klasy DE z tranzystorami SiC i GaN, na podstawie parametrów zmierzonych w układzie eksperymentalnym;
- opracowanie analiz porównawczych właściwości falowników z różnymi tranzystorami SiC oraz GaN na podstawie badań eksperymentalnych i symulacyjnych.

6. Wnioski końcowe

Biorąc pod uwagę powyższą opinię stwierdzam, że rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w punkcie 13 pkt. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 27 września 2017 r. Poz. 1789). Stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej.

Szarejniek Paweł