

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY NAUKOWEJ DYSCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

**Tytuł rozprawy: Zastosowanie mikrofalowych tranzystorów GaN HEMT
we wzmacniaczach mocy dla radarowych modułów N/O**

Autor rozprawy: mgr inż. Dawid Łukasz Kuchta

Promotor rozprawy: dr. hab. inż. Wojciech Wojtasiak prof. PW

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrzone w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Rozwój systemów radarowych, głównie z anteną aktywną, z elektronicznie sterowaną wiązką AESA (ang. Active Electronically Scanned Array) narzuca określone wymagania na moduły nadawczo-odbiorcze których jednym z najważniejszych podzespołów jest wzmacniacz dużej mocy HPA (ang. High-Power Amplifier) stanowiący istotny element tej anteny.

Rozprawa doktorska dotyczy zagadnień związanych z mikrofalowymi wzmacniaczami mocy wykorzystującymi tranzystory typu GaN HEMT o minimalnych zmianach transmitancji w zadanym przedziale czasu wzmacniania sygnałów o zmiennej obwiedni, co wymaga rozwiązania istotnych problemów związanych z nowymi technikami projektowania wzmacniaczy przy uwzględnieniu przede wszystkim problemu utrzymania na stałym poziomie jego transmitancji. W systemach radiolokacyjnych z fazowanymi szycami antenowymi zniekształcenia transmitancji powodowane przez wzmacniacze mocy w modułach nadawczo-odbiorczych powinny

być jak najmniejsze, ponieważ przekroczenie dopuszczalnego zakresu zmian transmitancji powoduje wzrost poziomu listków bocznych w charakterystyce antenowej, co z kolei skutkuje w przypadku systemów radarowych pogorszeniem parametrów radaru. Specyficzne właściwości tranzystorów GaN HEMT wynikające z własności fizycznych azotku galu i heterostruktury AlGaIn/GaN sprawiają, że technologia GaN HEMT może być zastosowana do wzmacniaczy mocy na potrzeby systemów radiolokacyjnych oraz radiokomunikacyjnych.

Bazując na aktualnych doniesieniach literaturowych w zakresie tematycznym pracy oraz własnych doświadczeniach Doktorant podjął badania związane z opracowaniem metody projektowania mikrofalowych wzmacniaczy mocy z wykorzystaniem tranzystorów GaN HEMT.

Rozwiązanie problemów badawczych podjętych przez Autora rozprawy związanych z mikrofalowymi wzmacniaczami mocy jest szczególnie ważne dla nowoczesnych systemów radiolokacyjnych i radiokomunikacyjnych. Nowe konstrukcje wzmacniaczy z wykorzystaniem nowych technologii, a w szczególności wykorzystania tranzystorów GaN HEMT umożliwiają osiągnięcie wymaganych w praktyce parametrów, które są kluczowe w technologii anten z elektronicznie sterowaną wiązką (AESA).

Dlatego zasadniczym celem rozprawy było opracowanie metody projektowania mikrofalowych wzmacniaczy mocy z wykorzystaniem tranzystorów GaN HEMT o możliwie jak najmniejszych zmianach transmitancji przy wzmacnianiu sygnałów o zmiennej obwiedni w zadanym przedziale czasu, z czym mamy do czynienia zwykle w systemach radiolokacyjnych.

Cel rozprawy jest zatem określony właściwie, tematyka jest aktualna i potrzebna szczególnie w przypadku systemów wykorzystujących anteny aktywne z elektronicznie sterowaną wiązką.

Doktorant przyjął trzy tezy:

1. Wahania czasu transferu ładunku spowodowane zmianami temperatury w kanale tranzystora GaN HEMT są jednym z najważniejszych źródeł zmian transmitancji wzmacniacza w warunkach pracy z sygnałami o zmiennej obwiedni w zadanym i odpowiednio długim przedziale czasu;
2. Uwzględnienie w modelu wielkosygnałowym tranzystora GaN HEMT efektu samonagrzewania w połączeniu z metodą symulacji typu *Envelope* pozwala na skuteczne modelowanie zmian transmitancji wzmacniacza w zadanym i odpowiednio długim przedziale czasu dla pobudzenia o zmiennej obwiedni;

3. Istnieje impedancja obciążenia Z_{LT} tranzystora optymalna, dla której zmiany transmitancji wzmacniacza osiągają minimum bez istotnej redukcji poziomu mocy wyjściowej P_{out} i sprawności PAE.

Recenzowana rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny.

Rozprawa składa się z dziewięciu rozdziałów, trzech dodatków oraz literatury. We wprowadzeniu Autor przedstawił motywację podjęcia badań dotyczących przedmiotu rozprawy. Zwrócił szczególną uwagę na stałość transmitancji wzmacniacza oraz przedstawił charakterystykę zmian transmitancji, z czego wynikał cel i przyjęte tezy rozprawy. W rozdziale 3. skoncentrował się na przeglądzie stanu technologii GaN HEMT i jego istoty w zastosowaniach do wzmacniaczy mocy zaznaczając, że tranzystory GaN HEMT spełniają wymienione wymagania i już obecnie są szeroko wykorzystywane w stopniach mocy we współczesnych systemach radarowych i radiokomunikacyjnych, co stanowi wartość dodaną rozprawy ze względu na analizę zasadniczych problemów, głównie niestabilności transmitancji omawianych układów. W rozdziale 4. Doktorant przedstawił metody ograniczania zmian transmitancji wzmacniaczy. Na uwagę zasługuje prezentacja ograniczania zmian transmitancji wzmacniaczy mocy wywołanych oddziaływaniem termicznym w radarowych modułach nadawczo-odbiorczych, co pozwoliło na minimalizację zmian transmitancji mikrofalowych wzmacniaczy mocy.

Rozdział 5. zawiera wyniki badań eksperymentalnych wpływu technologii wykonania tranzystora na zmiany transmitancji wzmacniaczy testowych w dziedzinie czasu i częstotliwości. Podkreślenia wymaga oryginalny układ pomiarowy wykorzystany przez Doktoranta do pomiarów transmitancji. Z analizy wyników pomiarowych wynika, że wzmacniacz z tranzystorem GaN HEMT charakteryzował się mniejszymi wahaniami transmitancji niż wzmacniacz z GaAs MESFET, co oznacza, że technologia GaN HEMT lepiej nadaje się do zastosowań w radarowych modułach nadawczo-odbiorczych. Na uwagę zasługuje również sposób prezentacji i interpretacji danych pomiarowych.

W rozdziale 6. Doktorant szczegółowo omówił czynniki wpływające na zmiany transmitancji wzmacniacza odnosząc się również do literatury, co należy uznać za wartościową część rozprawy. Wykazał, że przyczyną zmian fazy transmitancji wzmacniacza jest zmiana czasu transferu ładunku w tranzystorze oraz dokonał analizy stopnia mocy z tranzystorem GaN HEMT. Ponadto Autor udowodnił, że

parametry tranzystora oraz obwodów dopasowujących wpływają na moduł i fazę transmitancji. Dodatkowo przedstawił analizę zagadnienia termicznego związanego z odpowiedzią temperaturową na pobudzenie tranzystora mocą o dużej dynamice i zmienności. Zagadnienia obszernie opisane w tym rozdziale należy uznać za bardzo wartościową część rozprawy, również z powodu przedstawionych przez Doktoranta interpretacji bazujących na elementach fizyki półprzewodników.

Rozdział 7. Poświęcony jest modelowaniu obwodowemu ze szczególnym uwzględnieniem symulacji zmian transmitancji wzmacniacza. Symulacje przeprowadzono z zastosowaniem dostępnego programu *ADS Keysight* z wykorzystaniem metody *Envelope* i elektryczno-termicznych modeli nieliniowych tranzystorów GaN HEMT, co nie zostało dotychczas opisane w dostępnych publikacjach. W rozdziale 8. rozprawy Doktorant przedstawił autorski algorytm projektowania wzmacniaczy optymalnych ze względu na minimalne zmiany transmitancji. W celu potwierdzenia zaproponowanej metody projektowania wzmacniaczy Autor porównał otrzymane wyniki badań dla innych wzmacniaczy z tranzystorami GaN HEMT, co jest potwierdzeniem poprawy stabilności transmitancji wzmacniacza poprzez stosowny dobór wartości impedancji źródła i obciążenia tranzystora.

Zasadnicze wnioski Doktorant przedstawił w podsumowaniu rozprawy (rozdział dziewiąty), gdzie również skoncentrował się na istotnych kierunkach dalszych badań, które powinny dotyczyć wykorzystaniu autorskiej metody w projektowaniu wzmacniaczy dla modułów nadawczo-odbiorczych i nadajników stacji bazowych.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle.

W przedstawionej do recenzji rozprawie Doktorant uwzględnił 203 pozycje literaturowe, których w ośmiu jest pierwszym autorem a w dwóch współautorem. Literatura przedmiotu, zawiera pozycje książkowe, ale również aktualną literaturę czołowych czasopism światowych.

Bazując na dostępnych pracach Autor przeprowadził analizę stanu wiedzy w zakresie tematyki rozprawy. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł odpowiada potrzebom rozprawy i należy uznać go za właściwy. Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością problematyki związanej z tematyką rozprawy. Autor przedstawił

w rozprawie znane rozwiązania w dziedzinie wzmacniaczy mikrofalowych. Rozpatrzył również istotne elementy wpływające na zmianę transmitancji wzmacniacza.

Analiza źródeł literaturowych z odpowiednim wnioskowaniem pozwoliła na sformułowanie celu pracy, zadań badawczych oraz tez rozprawy.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Udowodnienie tez rozprawy wymagało przede wszystkim rozwiązania kilku istotnych problemów badawczych. W szczególności dla ich udowodnienia Autor opracował nową metodę projektowania mikrofalowych wzmacniaczy mocy z wykorzystaniem tranzystorów GaN HEMT. Doktorant opisał wyczerpująco wymagane do rozwiązania zadania, przedstawił analizę wpływu czynników na zmiany transmitancji wzmacniaczy mocy, wykonał stosowne analizy i pracochłonne badania eksperymentalne, które pozwoliły wyselekcjonować źródła braku stałości transmitancji wzmacniacza oraz udowodnił stawiane na wstępie rozprawy tezy.

Uważam że Autor wykazał się bardzo szeroką znajomością trudnych zagadnień jakie zostały zaprezentowane w rozprawie. Poprawnie posługuje się specjalistycznym aparatem matematycznym do rozwiązania konkretnego problemu. Potrafi formułować wnioski i trafnie wskazuje możliwe rozwiązania.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Praca stanowi oryginalny wkład Autora do problematyki metod projektowania mikrofalowych wzmacniaczy mocy.

Opracowane i wyprowadzone przez Autora analityczne zależności zmiany fazy i modułu transmitancji w funkcji parametrów tranzystora oraz impedancji obciążenia są istotne dla projektowania wzmacniaczy zoptymalizowanych pod względem stałości transmitancji. Dodatkowo należy podkreślić, że Doktorant opracował metodę projektowania wzmacniaczy dla modułów nadawczo-odbiorczych. Uzyskane rozwiązania nie są dotąd znane w literaturze przedmiotu. Dodatkowo weryfikacja eksperymentalna zaproponowanej przez Doktoranta metody pomiarowej wykonanych wzmacniaczy zasługuje na podkreślenie, co jest istotne również dla

projektowania struktury i topografii tranzystorów GaN HEMT dla zastosowań praktycznych w systemach radiolokacyjnych i radiokomunikacyjnych.

Autor wykazał wpływ parametrów tranzystora jak i obwodów dopasowujących na zmiany transmitancji wzmacniacza oraz wyprowadził istotne zależności analityczne, które umożliwiają ocenę tych parametrów. Na potrzeby badań symulacyjnych Doktorant uwzględnił efekt samonagrzewania.

Opracowana przez Autora metoda nie była dotychczas wykorzystywana i pozwala na efektywne projektowanie mikrofalowych wzmacniaczy mocy o dużej stałości transmitancji w szczególności na zastosowania w systemach radiolokacyjnych i radiokomunikacyjnych, co jest oryginalnym dorobkiem Doktoranta.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Rozprawa zredagowana jest w sposób bardzo staranny, napisana jasnym językiem i posiada logiczny układ. Szata graficzna przy prezentacji uzyskanych rezultatów jest przejrzysta i logiczna. Wyniki analiz zostały przedstawione w rozprawie w sposób jasny i zwięzły. Rozprawa zawiera ponadto trzy dodatki, które dokumentują wyprowadzenia istotnych wzorów analitycznych oraz wyniki pomiarów tranzystora GaN HEMT NPT2018, co jest słuszne z punktu widzenia prezentacji wyników rozprawy i pozwala w bardzo czytelny sposób uwypuklić zasadnicze osiągnięcia Doktoranta. W rozprawie trudno doszukiwać się słabych stron pod kątem redakcyjnym. Nie znalazłem zasadniczych błędów edycyjnych. Występują jednak niewielkie błędy związane z zapisem wzorów np. str. 43 wzór (5.3) oraz str. 79 wzór (7.1). Brakuje również wykazu oznaczeń wykorzystywanych w pracy.

Uwagi te nie pomniejszają wartości rozprawy, bowiem przedstawiona do recenzji rozprawa stanowi nowatorskie, szerokie i wnikliwe opracowanie potwierdzone precyzyjnie zaplanowanymi badaniami eksperymentalnymi.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych?

Bardzo wysoko oceniam przydatność recenzowanej rozprawy dla zastosowań technicznych. Praca jest szczególnie przydatna w projektowaniu systemów radiolokacyjnych w zakresie modułów nadawczo-odbiorczych anten AESA.

Autor opracował metodę pozwalającą na szybkie i efektywne projektowanie mikrofalowych wzmacniaczy mocy z tranzystorami typu GaN HEMT o dużej stałości transmitancji.

Na podstawie szczegółowych badań możliwe było zidentyfikowanie przyczyny powstawania zmian transmitancji wzmacniacza. Doktorant wyprowadził zależności analityczne zmian modułu i fazy transmitancji wzmacniacza od parametrów obwodowych i impedancji obciążeń tranzystora, co było zasadniczą podstawą opracowania środowiska symulacyjnego oraz metody projektowania mikrofalowych wzmacniaczy mocy zoptymalizowanych dla uzyskania jak najmniejszych zmian transmitancji.

Opracowana przez Doktoranta metoda stanowi unikalne narzędzie do projektowania i badania mikrofalowych wzmacniaczy mocy z tranzystorami typu GaN HEMT.

Wybrane wyniki i metody można wykorzystać również w innych pracach naukowych i badawczo-rozwojowych, w szczególności w systemach radiolokacyjnych oraz radiokomunikacyjnych.

Podsumowanie:

Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę?

- a) *nie spełniająca wymagań stawianym rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,*
- b) *wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,*
- c) *spełniająca wymagania,*
- d) *spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,*
- e) *wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.*

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska zawiera ważne i oryginalne wyniki badań naukowych i spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim sformułowane w ustawie o tytułach naukowych i stopniach naukowych.

Wnioskuje zatem o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

