

Politechnika Warszawska

Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

DZIEKAN I RADA WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

zawiadamiają o

PUBLICZNEJ OBRONIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Marcin Góralczyk

która odbędzie się w trybie zdalnym w dniu 22 września 2020 r. o godz. 11.00

Tytuł rozprawy doktorskiej: „**A S-band Inverted 3-way Doherty Amplifier with GaN HEMT Transistors**”

promotor: dr hab. inż. Wojciech Wojtasiak, prof. uczelni, Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej

recenzenci: prof. dr hab. inż. Tomasz Kacprzak, Politechnika Łódzka,
Akademia Humanistyczno-Ekonomiczna w Łodzi

dr hab. inż. Zenon Szczepaniak, prof. uczelni, Wojskowa Akademia Techniczna.

Na stronie internetowej wydziału www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje znajdują się streszczenie rozprawy oraz recenzje, jak również dostęp do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Z treścią rozprawy można zapoznać się na stronie internetowej:
https://www.dropbox.com/s/0zxbjaulqx3sr69/Marcin%20G%C3%B3ralczyk%20-%20PhD%20Thesis_final.pdf?dl=0

Sposób uczestniczenia w publicznej obronie:

Pracownicy, doktoranci i studenci PW mogą wziąć udział w obronie na platformie Microsoft Teams podając kod dostępu: is40v1a

Osoby spoza Politechniki Warszawskiej mogą uczestniczyć w obronie po wcześniejszym zgłoszeniu takiej chęci do Sekretarza komisji doktorskiej wysyłając wiadomość na adres: (pkopyt@ire.pw.edu.pl) (dr hab. inż. Paweł Kopyt), który prześle zaproszenie wraz z linkiem do kanału MS Teams.

Dziekan

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Malinowski', is written over a faint, light blue grid background.

prof. dr hab. inż. Michał Malinowski

Mgr inż. Marcin Góralczyk

Promotor – dr hab. inż. Wojciech Wojtasiak, prof. uczelni

Tytuł rozprawy doktorskiej: ” A S-band Inverted 3-way Doherty amplifier with GaN HEMT transistors

STRESZCZENIE

W rozprawie przedstawiono wszechstronną analizę i proces projektowania wzmacniacza typu Doherty'ego ze stopniami składowymi pracującymi w klasach B i C. Autor postawił trzy tezy. Pierwsza: aby zwiększyć sprawność w zakresie dużych mocy oraz poprawić liniowość wzmacniacza, impedancja obciążenia powinna być zwiększona względem oryginalnego układu Doherty'ego, w którym wszystkie tranzystory pracują w klasie B. Druga: w trójstopniowym wzmacniaczu typu Doherty optymalizacji wymagają trzy impedancje w wyjściowym obwodzie sumowania, podczas gdy we wzmacniaczu trójdrożnym tylko jedna. Trzecia teza: wykorzystanie unikalnej konstrukcji trójdrożnego dzielnika mocy oraz tranzystorów GaN HEMT umożliwi konstrukcję trójdrożnego wzmacniacza typu Doherty w konfiguracji odwróconej, która nie wymaga dodatkowych linii fazowych, co umożliwia poszerzenie pasma pracy.

Działanie wzmacniacza Doherty'ego opisano równaniami analitycznymi, na podstawie których wskazano elementy wymagające optymalizacji. Przy pomocy opracowanego modelu symulacyjnego układu Autor dowodzi postawionych tez. Implementacja modelu w symulatorze ADS pozwala na wszechstronną analizę bardziej złożonych struktur w szerokim zakresie częstotliwości pracy wzmacniacza. Na koniec wykonano różne wersje wzmacniacza Doherty'ego, których wyniki pomiarów potwierdziły symulowane charakterystyki.

Samodzielny i oryginalny dorobek Autora stanowi sposób analizy pracy wzmacniacza typu Doherty ze stopniami składowymi pracującymi w klasach B i C. Wnioski z przeprowadzonej analizy prowadzą do sformułowania warunku na wartość impedancji obciążenia dla uzyskania jak największej sprawności bez redukcji poziomu mocy wyjściowej. Ponadto opracowany układ trójdrożnego wzmacniacza Doherty'ego w konfiguracji odwróconej z autorskim dzielnikiem mocy jest unikalnym rozwiązaniem w skali światowej. Zgłoszenie patentowe na wspomniany trójdrożny dzielnik mocy sygnału mikrofalowego zostało przyjęte w UP RP.

Warszawa, 27.06.2020

dr hab. inż. Zenon Szczepaniak, prof. WAT

Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego

ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2

00–908 Warszawa 46

**Recenzja rozprawy doktorskiej
dla Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
Politechniki Warszawskiej**

Tytuł rozprawy:

„A S-band inverted 3-way Doherty amplifier with GaN HEMT transistors”

Tytuł polski: “3-drożny wzmacniacz Doherty’ego w konfiguracji odwróconej na pasmo S z tranzystorami GaN HEMT”.

Autor rozprawy:

mgr inż. Marcin Góralczyk

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

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Marcina Góralczyka dotyczy tematyki projektowania i optymalizacji wzmacniaczy mocy w konfiguracji Doherty w klasach B i C w strukturze wielotranzystorowej. Charakter rozprawy można określić jako: teoretyczno-doświadczalny. Autor definiuje trzy tezy rozprawy:

Teza 1: Aby zwiększyć sprawność w zakresie dużych mocy oraz poprawić liniowość wzmacniacza, impedancja obciążenia powinna być zwiększona względem oryginalnego układu Doherty’ego, w którym wszystkie tranzystory pracują w klasie B.

Teza 2: W trójstopniowym wzmacniaczu typu Doherty optymalizacji wymagają trzy impedancje w wyjściowym obwodzie sumowania, podczas gdy we wzmacniaczu trójdrożnym tylko jedna.

Teza 3: Wykorzystanie unikalnej konstrukcji trójdrożnego dzielnika mocy oraz tranzystorów GaN HEMT umożliwia konstrukcję trójdrożnego wzmacniacza typu Doherty w konfiguracji odwróconej, która nie wymaga dodatkowych linii fazowych, co umożliwia poszerzenie pasma pracy.

Tezy rozprawy zostały sformułowane dostatecznie jasno.

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

Autor przedstawia 59 pozycji literaturowych, które uwzględnia w trakcie analiz i badań prowadzonych w pracy. Zakres tematyczny pozycji literaturowych pokrywa: dokumenty normatywne dotyczące nowych pasm częstotliwości, teoria, zastosowanie i przykładowe rozwiązania wzmacniaczy Doherty'ego, właściwości materiałów półprzewodnikowych, w szczególności GaN oraz tranzystory mikrofalowe wykonane w technologii GaN, modelowanie tranzystorów mikrofalowych, teoria i rozwiązania układowe mikrofalowych dzielników mocy. Zakres ten jest kompleksowy i odpowiada obszarom zagadnień, które autor opracowuje w rozprawie. Na liście pozycji literaturowych znajdują się opracowania fundamentalne dotyczące teorii wzmacniaczy mikrofalowych, w tym w układzie Doherty'ego, autorstwa znanych w branży naukowców i profesorów. Zdaniem recenzenta lista literatury mogła być nieco większa, niemniej mając na uwadze obszar tematyczny rozprawy, badania naukowe z zakresu wzmacniaczy z tranzystorami w technologii GaN są obecnie w fazie rozwoju i pozycje literaturowe powstają w sposób ciągły.

Analizę przedstawionych źródeł przeprowadzono w sposób właściwy. W opinii Recenzenta świadczy to o dostatecznej wiedzy autora a wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący.

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

Postawione w pracy zagadnienia w postaci tez wymagały, w celu udowodnienia, wykonania bardzo szerokiego zakresu prac takich jak:

- opis analityczny działania wzmacniacza typu Doherty,
- opracowanie rozszerzonej teorii działania wzmacniacza Doherty w klasach B/C,
- analiza właściwości tranzystorów na bazie GaN oraz metod projektowania wzmacniaczy mocy z użyciem tych tranzystorów,
- projekty i symulacje obwodowe różnych konfiguracji wzmacniaczy przy wykorzystaniu symulatora ADS firmy Keysight,

- opracowanie modeli wzmacniaczy oraz ich fizyczna realizacja,
- uruchomienie modeli wzmacniaczy oraz ich pomiary,
- analiza wyników pomiarów

Autor w opinii Recenzenta rozwiązał postawione zadania. Przyjęte założenia i użyte w trakcie realizacji zadań metody są uzasadnione i właściwe.

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?

Rozprawę cechuje kompleksowe podejście do postawionego problemu naukowego. W celu udowodnienia tezy autor opracowuje od podstaw własną wersję teorii opisującej działania wzmacniacza Doherty w klasach B/C. Na bazie tej teorii przeprowadza badania symulacyjne oraz tworzy projekty układów wzmacniaczy w różnych konfiguracjach. Następnie przygotowuje pliki produkcyjne, fizycznie realizuje układy oraz poddaje weryfikacji pomiarowej. Analiza wyników pomiarów potwierdza wyniki teoretyczne oraz pozwala finalnie dowieść tezy pracy.

Rozprawa zawiera oryginalne i stanowiące samodzielny dorobek autora składniki, do których należą:

- analiza pracy wzmacniacza typu Doherty ze stopniami składowymi pracującymi w klasach B i C,
- sformułowanie warunku na wartość impedancji obciążenia dla uzyskania największej sprawności bez redukcji poziomu mocy wyjściowej,
- projekt układu trójdrożnego wzmacniacza typu Doherty w konfiguracji odwróconej z oryginalnym dzielnikiem mocy.

Dodatkowo jako samodzielny dorobek autora można traktować:

- projekt i konstrukcję nowatorskiego dzielnika mocy,
- zgłoszenie patentowe dla w/w układu,
- niezwykle liczącą bazę wyników pomiarowych dla poszczególnych eksperymentów przeprowadzonych dla różnych konfiguracji wzmacniaczy mocy.

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

Autor wykazał w opinii recenzenta umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników. Rozprawę cechuje zwięzłość i jasność. Uwagę zwraca dbałość o szczegółowy opis prezentowanych wyników oraz przejrzystość rysunków prezentujących wyniki obliczeń symulacyjnych oraz pomiarów wykonanych układów.

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

Recenzent ocenia pracę jako bardzo przydatną dla nauk technicznych. Uzyskane wyniki, w postaci oryginalnej konstrukcji mikrofalowej zawierającej: strukturę, warunki obwodowe (w tym dopasowania), sposób polaryzacji i sposób dzielenia mocy są na poziomie światowym i stanowią znaczny wkład w obszar techniki mikrofalowej w zakresie wzmacniaczy mocy. Dodatkowo należy wspomnieć, że jednym z rezultatów pracy mgr. inż. Marcina Góralczyka jest zgłoszenie patentowe w UPRP na oryginalne rozwiązanie układu mikrofalowego dzielnika mocy.

Wyniki pracy można bezpośrednio komercjalizować i zastosować w praktyce inżynierskiej. Na bazie uzyskanych wyników pracy można przygotować rodzinę wzmacniaczy mocy jako gotowych podzespołów mikrofalowych do zastosowania w radiokomunikacji. Dodatkowo obszerna baza pomiarowa wraz z analizą wyników pomiarów może stanowić doskonały materiał do użycia w obszarze dydaktyki, np. do przygotowania serii eksperymentów laboratoryjnych, kursów szkolących inżynierów-projektantów z dziedziny radiokomunikacji oraz do opracowania podręcznika/skryptu akademickiego.

Wyniki pracy, w rozumieniu rozwoju metod badawczych wzmacniaczy mocy, nabierają szczególnego znaczenia w obecnej chwili, kiedy rozwój radiokomunikacji, telekomunikacji i technik sensorycznych przebiega w kierunku zminiaturyzowanych efektywnych nadajników i odbiorników oraz coraz większej liczby komunikujących się źródeł informacji przy zachowaniu zasilania autonomicznego.

Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Góralczyka pt: „A S-band inverted 3-way Doherty amplifier with GaN HEMT transistors” spełnia formalne wymagania zdefiniowane w art. 187 ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. Prezentuje ona ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego w postaci optymalizacji wzmacniaczy mocy w konfiguracji Doherty w klasach B i C w strukturze wielotranzystorowej. Rozprawa jest przygotowana w języku angielskim z dołączonym streszczeniem w języku polskim. Doktorant wykazał się znajomością metodyki badań naukowych i umiejętnością jej wykorzystania w praktyce, tutaj w rozprawie doktorskiej.

Pan mgr. inż. Marcin Góralczyk biegle porusza się w obszarze techniki mikrofalowej. Prawidłowo formułuje zagadnienia obwodowe i techniczne, prawidłowo używa aparatu matematycznego i opisowego związanego z teorią mikrofal. Wykazuje się umiejętnością projektowania układów mikrofalowych oraz umiejętnością korzystania z nowoczesnego środowiska programistycznego do symulacji mikrofalowych. Prawidłowo definiuje problemy

pomiarowe i rozwiązuje je poprzez prawidłowo przeprowadzone eksperymenty. Wyniki pomiarowe interpretuje w sposób właściwy.

Warsztat pomiarowy, drobiazgowo zaplanowana metodyka pomiarów i skrupulatność ich przeprowadzenia oraz analizy otrzymanych wyników zasługuje na szczególne podkreślenie i wyróżnienie.

Recenzent nie dostrzega wad bądź słabych stron rozprawy w sensie merytorycznym. Rozprawa pod względem redakcyjnym jest dobrze skonstruowana, warstwa graficzna jest atrakcyjna.

Dodatkowo należy zauważyć, że Doktorant podjął wysiłek napisania i edycji rozprawy w wersji anglojęzycznej.

Rysunki wyjaśniające i ilustrujące odpowiednie zagadnienia, w większości są przejrzyste i dobrze zaprojektowane.

Niemniej, można w rozprawie znaleźć szereg drobnych błędów edycyjno-drukarskich. Niektóre rysunki, w szczególności zawierające kopie złożonych układów symulowanych wprowadzonych w obszarach edycji schematów w symulatorze, po umieszczeniu na stronach rozprawy są praktycznie nieczytelne dla osób nie mających doświadczenia w symulacjach układów mikrofalowych przy użyciu specjalizowanego oprogramowania np. ADS, MWO. Należałoby tutaj przemyśleć bardziej czytelny sposób wizualizacji schematów symulacyjnych. Dodatkowo, Doktorant nie przedstawił w pracy konfiguracji stanowiska pomiarowego, na którym wykonywał badania opracowanych przez siebie modli wzmacniaczy mikrofalowych.

Uwagi te nie umniejszają całokształtu niniejszej pracy.

Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

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

Biorąc pod uwagę istotność proponowanej tematyki, zakres przeprowadzonych analiz, zgłoszenie patentowe, znaczenie praktyczne i możliwości bezpośredniej implementacji i komercjalizacji wyników pracy oraz spełnienie wszystkich warunków stawianych kandydatom do stopnia doktora, rozprawę zaliczam do kategorii e) „wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie”.



Aleksandrów Łódzki, dn. 5 lipca 2020 r.

prof. dr hab. inż. Tomasz Kacprzak
- Politechnika Łódzka (profesor emerytowany)
- Akademia Humanistyczno-Ekonomiczna w Łodzi
ul. Sterlinga 26, 90-212 Łódź

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Marcina Góralczyka

„A S-band Inverted 3-way Doherty Amplifier with GaN HEMT Transistors”

(“3-drożny wzmacniacz Doherty’ego w konfiguracji odwróconej
na pasmo S z tranzystorami GaN HEMT”)

promotor rozprawy: dr hab. inż. Wojciech Wojtasiak

Politechnika Warszawska

Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

Rozwój systemów komunikacji bezprzewodowej, tak w aspekcie funkcjonowania społeczeństwa informacyjnego jak również nowej gospodarki, wymaga zastosowania infrastruktury nadawczo-odbiorczej spełniającej rosnące wymagania jakościowe i funkcjonalne. Bardzo istotnymi elementami tej infrastruktury są stacje bazowe, rozmieszczone w systemach obejmujących tereny otwarte, środowiska miejskie, wiejskie, obszary zabudowań przemysłowych, wnętrza biur i budynków mieszkalnych, instytucji i wszędzie tam, gdzie przyjdzie człowiekowi żyć i pracować. W coraz większym stopniu systemy bezprzewodowe będzie charakteryzować duża gęstość posadowienia stacji bazowych, zatem ich funkcjonowanie w takim środowisku wymaga stosowania urządzeń optymalizowanych z punktu widzenia kompatybilności elektromagnetycznej, rozumianej szeroko jako zgodności z obowiązującymi normami emisji i podatności na zakłócenia. Jednym z kluczowych podsystemów jest blok interfejsu nadawczo-odbiorczego w postaci wzmacniacza wyjściowego, który ma zapewnić spełnienie liniowości transmisji sygnału informacyjnego dużej mocy, skierowanego do anteny. Zagadnienie to jest znane od wielu lat, ale nowe wyzwania wymagają rewizji dotychczasowych rozwiązań i poszukiwania nowych, lepiej dostosowanych do aktualnych potrzeb. Rozprawa doktorska Pana magistra inżyniera Marcina Góralczyka, wykonana pod opieką doktora habilitowanego Wojciecha Wojtasiaka zawiera ciekawe rozwiązania z tego obszaru poszukiwań. Jest pracą o charakterze teoretyczno-doświadczalnym i stanowi próbę pokazania nowych rozwiązań układowych tranzystorowych wzmacniaczy mocy bardzo wysokich częstotliwości ze wskazaniem na możliwości zastosowania w systemach komunikacji bezprzewodowej nowych generacji.

Rozprawa, napisana po angielsku, zawiera 138 stron tekstu i jest podzielona w spójny i logiczny sposób na trzy rozdziały dokumentujące badania, podsumowanie i spis literatury. Przedmiotem rozważań jest rozwinięcie podstaw teoretycznych i weryfikacja doświadczalna nowych rozwiązań wzmacniaczy mocy na zakres częstotliwości S (2.6 – 3.95 GHz) opartych na idei tzw. wzmacniacza Doherty’ego, z wykorzystaniem tranzystorów polowych złączowych typu HEMT (*High Elektron Mobility Transistor*) na bazie azotku galu GaN.

Koncepcja wzmacniacza Doherty'ego, znana od lat trzydziestych ubiegłego wieku, pierwotnie w postaci wzmacniacza lampowego, należy do klasy rozwiązań poprawiających istotnie liniowość wzmacniaczy pracujących w klasie B/C, w szerokim zakresie mocy sterującej (wejściowej). Połączenie tej koncepcji wraz z zastosowaniem tranzystorów polowych HEMT GaN, których własności w zakresie bardzo wysokich częstotliwości nadają się znakomicie do wykorzystania sprawia, że temat rozprawy jest aktualny i w pełni odpowiadający nowym wyzwaniom w obszarze radiokomunikacji.

Poniżej omawiam zawartość kolejnych rozdziałów od strony merytorycznej i jednocześnie podejmuję polemikę, w zakresie zagadnień wymagających dyskusji.

Rozdział 1

Zawiera skrótowe omówienie motywacji do podjęcia tematu i trzy tezy, stanowiące zasadniczy dorobek. Motywacja brzmi przekonująco a wynika z potrzeby zastosowania w stacjach bazowych sieci bezprzewodowych nowych wzmacniaczy mocy o większej sprawności, przy zapewnieniu wysokiej jakości transmisji danych. Długoletnia praktyka eksploatacji sieci bezprzewodowych na świecie pokazała, że typowy obraz czasowy transmisji jest scharakteryzowany dużym stosunkiem mocy szczytowej do mocy średniej. Zwykle moc szczytową należy kojarzyć z przesyłaniem informacji użytkowej pomiędzy odbiorcami końcowymi systemu, średnia zaś odzwierciedla stan utrzymania sieci. Dużym wyzwaniem jest zapewnienie jednakowej jakości transmisji zarówno dla mocy szczytowych jak i dla wartości mniejszych, co najmniej o 6 dB. Problem projektowania wzmacniaczy mocy nowej generacji, dostosowanych do współczesnych wyzwań należy do kluczowych. Doktorant wybrał układy pracujące w zakresie częstotliwości S, prawdopodobnie dlatego, że rozwój sieci komórkowych 5G w Polsce jest związany z tym zakresem. Właściwie wybrał również technologię wykonania opartą o tranzystory polowe złączowe HEMT na bazie azotku galu, która rozwija się dynamicznie i zapewnia szerokie zastosowania, a w konfrontacji z dotychczas wykorzystywanymi technologiami CMOS czy GaAs wypada znacznie korzystniej.

Tematem swych badań uczynił pogłębioną analizę wzmacniacza w układzie Doherty'ego, który wywodzi się z klasycznego rozwiązania lampowego wynalezione w latach trzydziestych ubiegłego wieku i który był stosowany skutecznie, również w aparaturze nadawczej. Przywołując ponownie rozważania teoretyczne w wersji układów półprzewodnikowych, Doktorant przeprowadza analizę różnych modyfikacji układowych badając szczególnie wpływ na parametry użytkowe w ramach ogólnie przyjętych założeń dotyczących ekonomiki rozwiązań i dochodzi do trzech hipotez, które wykazane metodą weryfikacji doświadczalnej stanowią tezy rozprawy. Tezy te, w brzmieniu zbliżonym do oryginalnego mówią, że:

1. w celu zwiększenia sprawności i liniowości wzmacniacza Doherty'ego ze stopniami pracującymi w klasie B i C, należy zwiększyć wartość impedancji obciążenia w porównaniu z rozwiązaniem klasycznym, w którym oba stopnie pracują w klasie B,
2. we wzmacniaczu trójstopniowym z sumowaniem mocy należy optymalizować trzy impedancje obciążenia, natomiast w rozwiązaniu tzw. trójdrożnym tylko jedną,
3. wykorzystanie dzielnika mocy we wzmacniaczu w konfiguracji odwróconej pozwala uprościć jego konstrukcję i uzyskać układ o szerszym zakresie częstotliwości użytkowych, w stosunku do rozwiązań dotychczasowych.

Tezy są sformułowane poprawnie i wskazują wartościowe kierunki poszukiwań badawczych, zmierzających do opracowania nowych metod projektowania wzmacniaczy mocy dla zakresu bardzo wysokich częstotliwości.

W dalszej części recenzji przeprowadzam ocenę uzyskanych rezultatów.



Rozdział 2

W rozdziale dokonano obszernej analizy klasycznego układu wzmacniacza Doherty'ego, dokonując jednocześnie licznych prób usprawnień w kierunku optymalizacji jego parametrów użytkowych z różnych punktów widzenia, w tym uproszczenia procesu projektowania i redukcji strat mocy. Ten schemat postępowania Doktorant przyjmuje w całej pracy. Treść rozdziału rozpoczyna przypomnieniem rozważań analitycznych, znanych w literaturze, z jednoczesnym przystosowaniem struktury danych do możliwości symulacyjnych narzędzia Keysight Advanced Design System. Narzędzie to umożliwia analizę układową metodą bilansu harmonicznego, jednak jest ograniczone do przypadków liniowych, czego Doktorant nie kryje. Przyjmuje bowiem założenie, że taka analiza jest wartościowa, choć bez wątpliwości – moim zdaniem - tylko na wstępnym etapie badań. Uwaga ta nabiera szczególnego znaczenia, gdy przychodzi zająć się rozwiązaniami poszczególnych podukładów w proponowanej realizacji z tranzystorami polowymi złączowymi HEMT z azotku galu. Tranzystory te, dziś już dostępne komercyjnie, charakteryzuje duża gęstość prądu wyjściowego drenu, uzyskanego w strukturze zbliżonej wymiarami do klasycznych tranzystorów mikrofalowych, co wpływa jednocześnie na bardzo istotny parametr jakim jest wysoka częstotliwość graniczna f_T , zwane również polem wzmocnienia. Jest to pożądana cecha elementu aktywnego i ma uzasadnienie, jednak nie należy zapominać o licznych efektach nieliniowych, które temu towarzyszą i mają destruktywny wpływ na uzyskiwane parametry użytkowe. Doktorant nie umniejsza znaczenia tego faktu, ale tematu nie podejmuje. Świadczy o tym choćby prosta konstatacja, że w rozprawie nie zamieszczono wielkosygnałowego modelu i charakterystyk statycznych tranzystora CG2H40010F (wyjściowych i przejściowych), na bazie którego zrealizowano szereg układów wzmacniaczy. Rysunek 2.49 na stronie 46 nie wyczerpuje tematu, brak jest bowiem interpretacji poszczególnych jego elementów wraz z podaniem typowych wartości. Wszystkie analizowane układy wzmacniaczy zostały przez Doktoranta wykonane i zweryfikowane doświadczalnie. Jednak ocenę pozytywną obniża duża oszczędność w opisie projektu aparatury pomiarowej i analizy uzyskanych dokładności. Ograniczenie się do weryfikacji jakościowej tylko, bez wyczerpujących analiz, w tym także statystycznych analiz niepewności utrudnia ewentualność powtórzenia eksperymentów przez innych badaczy, co – zgodnie z metodą naukową – jest postulatem obowiązkowym. Dbałość o możliwość potwierdzenia własnych osiągnięć przez innych badaczy jest gwarancją trwałości wkładu do nauki i powinna być stosowana od początku kariery naukowej.

Rozdział 3

W podobnym duchu są przedstawione badania w rozdziale 3, w którym Doktorant zajmuje się trzystopniowym i trójdrożnym wzmacniaczem mocy Doherty'ego. Podobnie jak poprzednio przeprowadza próby poprawienia liniowości i sprawności wzmacniaczy mocy, dochodząc do wniosków, potwierdzonych pomiarami. Wnioski te wspierają drugą tezę, o konieczności optymalizacji trzech impedancji w wyjściowym układzie sumowania mocy we wzmacniaczu trzystopniowym i podobnej optymalizacji jednej impedancji we wzmacniaczu trójdrożnym. Tym samym Doktorant wzbogacił zbiór rozwiązań o nowe, zmodyfikowane układy, których wybór w konkretnych zastosowaniach może być dobierany zależnie od postawionych wymagań użytkowych. Zaproponowane układy zostały zweryfikowane metodą symulacji na platformie Keysight Advanced Design System, wykonane w postaci układów prototypowych i pomierzone na zaprojektowanym stanowisku badawczym. Trudność w rzetelnej ocenie tej weryfikacji polega znów na tym, że Doktorant nie opisał szczegółów tego stanowiska pomiarowego, a wyniki pomiarowe nie zostały poddane analizie błędów.



Teza trzecia została wykazana poprzez zbadanie trójdrożnego wzmacniacza mocy Doherty'ego w konfiguracji odwróconej z nowym układem dzielnika mocy, którego koncepcja stanowi przedmiot ochrony w postaci zgłoszenia patentowego, przyjętego w UP RP w ubiegłym roku. Trudno się dziś wypowiedzieć co do zdolności patentowej tego rozwiązania, natomiast pomysł jest istotnym elementem wspierającym trzecią tezę rozprawy.

Rozdział 4

Jest to końcowy rozdział rozprawy, w którym Autor wylicza i podsumowuje swoje osiągnięcia badawcze i wskazuje, że poprawność trzech tez została udowodniona. W zakresie możliwości dalszego zgłębiania tematu wypowiada się ostrożnie, wskazując na ciekawy wątek badania wzmacniaczy N-stopniowych o N większym od 3 oraz postulując – i moim zdaniem jak najbardziej słusznie – uwzględnienie nieliniowych efektów tranzystorów HEMT GaN, w tym także efektów termicznych. W zakresie tego ostatniego postulatu warto spojrzeć na problem z perspektywy użycia programu Spice, który w uogólniony sposób umożliwia definiowanie funkcji elementów nieliniowych i wykonuje analizy w dziedzinie czasu. Można się spodziewać dodatkowych korzyści z porównania wyników otrzymanych dwiema metodami.

Konkluzja

Tematyka rozprawy jest aktualna, zwłaszcza w aspekcie rozwoju radiokomunikacji ruchomej, a w szczególności sieci 5G przewidywanej w rychłej przyszłości do wdrożenia w Polsce. Dotyczy nowych rozwiązań układowych wyjściowych wzmacniaczy mocy na pasmo częstotliwości S, charakteryzujących się lepszymi parametrami liniowości i sprawności, które podnoszą efektywność transmisji przy obniżeniu zapotrzebowania na energię zasilania.

Doktorant omówił zagadnienia ujęte w trzy tezy z uwzględnieniem obecnego stanu wiedzy, dobrał właściwe metody analizy teoretycznej i doświadczalnej, przeprowadził zaplanowane symulacje oraz zbudował stanowiska doświadczalne i na tej podstawie podsumował swoje badania wnioskami włącznie z dyskusją perspektyw rozwoju kolejnych prac. O posiadanym warsztacie naukowym świadczy również autorstwo i współautorstwo kilku artykułów i komunikatów konferencyjnych. Jednocześnie stwierdzam, że wykazane w pracy tezy pozostają słuszne tylko w ramach dość słabych założeń odnośnie idealności użytych tranzystorów i problem ten powinien być rozważony w dalszych pracach. Rozumiem, że wpływ nieliniowych efektów tranzystora mógł być nie zauważony przez Doktoranta w ramach przyjętych założeń odnoszących się do badań prototypowych podjętych w rozprawie, ale będzie miał znaczenie w zastosowaniach, zwłaszcza w sytuacji dużego natłoku ruchu teleinformatycznego w sieciach bezprzewodowych nowych generacji.

Biorąc pod uwagę krytyczną analizę tekstu rozprawy, przedstawioną powyżej uważam, że spełnione są wymagania *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora i na tej podstawie stawiam wniosek o przyjęcie tego opracowania jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie mgr. inż. Marcina Góralczyka do publicznej obrony.

Tomasz Kacprzak

