

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 Informacyjnych

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

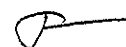
Zawiera skrótowe omówienie motywacji do podjęcia tematu i trzy tezy, stanowiące zasadniczy dorobek. Motywacja brzmi przekonująco a wynika z potrzeby zastosowania w stacjach bazowych sieci bezprzewodowych nowych wzmacniaczy mocy o większej sprawności, przy zapewnieniu wysokiej jakości transmisji danych. 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 wynalezioneego 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 warszacie 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 tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach 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

