

**Kwestionariusz - 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 Kuchta

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej, Prof. dr. hab. inż. Michała Malinowskiego. Wykonanie recenzji powierzyła mi Rada Naukowa Dyscypliny uchwałą z dn. 3.03.2020 r.

Przedstawiona recenzja zawiera ocenę rozprawy wg warunków określonych w art. 187 ust. 1-2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*.

Rozprawa składa się z 9 rozdziałów, z których pierwszy stanowi wprowadzenie, drugi przedstawia cel i tezę pracy, dziewiąty stanowi podsumowanie. Ponadto w rozprawie znajduje się bibliografia licząca 203 pozycje oraz dodatki zawierające uszczegółowienie wybranych punktów rozprawy.

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrzone w pracy (cel, teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

W Rozdziale 1. Autor opisał podłoże pracy opisanej w rozprawie. Współczesne systemy radarowe oraz systemy radiokomunikacyjne, n.p. typu LTE i 5G są złożonymi systemami teleinformatycznymi. Zasoby tych systemów są przeznaczone na obsługę ich działania (np. modulacja/demodulacja, sterowanie, kalibracja) i na transmisję użytecznych sygnałów wysokiej częstotliwości. W systemach tych transmitowane są sygnały wysokiej mocy, których obwiednie są zmienne w czasie z uwagi na złożone techniki modulacji stosowane przy przesyłaniu danych. Ostatnimi układami aktywnymi stojącymi przed antenami są wzmacniacze dużej mocy pracujące w zakresie wysokich częstotliwości. Wzmacniacze te odpowiadają za formowanie i emisję wiązek w torach nadawczych oraz za ich odbiór w torach odbiorczych. Zatem charakterystyki tych wzmacniaczy są kluczowe dla jakości transmisji danych. W przypadku systemów radarowych bardzo ważna jest stałość transmitancji wzmacniaczy mocy. Zmiany transmitancji muszą być korygowane przez kalibrację w warunkach roboczych, która konsumuje znaczną część zasobów systemu. W przypadku systemów radiokomunikacyjnych istotna jest liniowość wzmacniaczy, a w torach nadawczych także stałość transmitancji.

W zaawansowanych rozwiązaniach wzmacniaczy mocy w torach nadawczo-odbiorczych (N/O) systemów radarowych i radiokomunikacyjnych elementami aktywnymi są tranzystory GaAs MESFET lub GaN HEMT. Zjawiska fizyczne zachodzące w tranzystorze określają jego charakterystyki elektryczne statyczne, małosygnałowe i wielkosygnałowe, które są określane podczas pomiarów, trwających na ogół krótko i przy niedużej, ustalonej mocy wymuszeń. Charakterystyki te wraz z impedancjami obciążenia na

wejściu i wyjściu wzmacniacza określają nominalną transmitancję wzmacniacza. Natomiast podczas ciągłej pracy z sygnałami radarowymi i radiokomunikacyjnymi moc wydzielana w tranzystorze jest zmienna w czasie. Wynika ona z nakładania się fal zasilania i użytecznych impulsów o zmiennej obwiedni podczas nadawania/odbioru sygnału. Ciepło wydzielane w obszarze czynnym tranzystora jest częściowo magazynowane w tranzystorze, a częściowo odprowadzane do otoczenia. Szybkość transportu ciepła do otoczenia zależy od termicznych parametrów wielowarstwowej struktury tranzystora i obudowy oraz od sposobu chłodzenia, np. zastosowania radiatora lub wymuszonej konwekcji. Bilans energii cieplnej generowanej i odprowadzanej z tranzystora decyduje o jego chwilowej temperaturze, która podlega zatem ciągłym zmianom.

Zmiany temperatury w obszarze czynnym tranzystorów podczas ciągłej pracy z sygnałami impulsowymi są wraz z pułpkowaniem nośników przyczyną zmian ich charakterystyk, a zatem zmian transmitancji wzmacniaczy. Zjawiska pułpkowania związane są ściśle z problemem niezawodności tranzystorów. Natomiast zmiany charakterystyk będące skutkiem wydzielania ciepła w tranzystorach mocy są nieodłącznie związane z długotrwałą pracą i winny być brane pod uwagę przy projektowaniu wzmacniaczy. Biorąc pod uwagę znaczenie zapewnienia stałości transmitancji wzmacniaczy mocy w torach N/O rozważanych systemów Autor sformułował w Rozdziale 2 **cel pracy**. Było nim *opracowanie metody projektowania mikrofalowych wzmacniaczy mocy z wykorzystaniem tranzystorów GaN HEMT o możliwie jak najmniejszych zmianach transmitancji w trakcie wzmacniania sygnałów o zmiennej obwiedni w zadanym przedziale czasu np. w podczas impulsu radarowego*.

Osiągnięcie celu pracy umożliwi bardziej efektywne wykorzystanie zasobów systemów radarowych i radiokomunikacyjnych, które będą w mniejszym stopniu absorbowane przez potrzeby związane z eliminacją błędów transmisji, a w większym stopniu przeznaczone na transmisję.

Autor sformułował następujące **tezy rozprawy**:

- *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.*
- *Uwzględnienie w modelu wielosygnałowym 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.*
- *Istnieje optymalna impedancja obciążenia Z_{LT} tranzystora, dla której zmiany transmitancji wzmacniacza osiągają minimum bez istotnej redukcji poziomu mocy wyjściowej P_{out} i sprawności dodanej PAE.*

Zarówno cel jak i tezy zostały sformułowane bardzo przejrzysto. Rozprawa ma charakter doświadczalno-teoretyczny z silnie zaakcentowaną częścią obliczeniowo-symulacyjną.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczącej o dostatecznej wiedzy Autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Bibliografia jest aktualna i obszerna w zakresie teorii i zastosowań wzmacniaczy mikrofalowych na bazie tranzystorów mocy RF. Obejmuje 203 pozycje z różnych dziedzin, m.in. systemy i układy radarowe i radiokomunikacyjne, projektowanie wzmacniaczy RF z wykorzystaniem tranzystorów mocy, technologia, fizyka i zasady działania przyrządów półprzewodnikowych, w tym przyrządów na bazie półprzewodników z szeroką przerwą energetyczną, takich jak GaN, SiC. Rozległość tematyki ujętej w bibliografii świadczy o szerokich zainteresowaniach Autora. Zdecydowana większość pozycji bibliografii została zaczerpnięta z literatury światowej.

Literatura została użyta w rozprawie w sposób właściwy. Owszem, znalazłem w pracy kilka przypadków odniesień do literatury, co do których mam zastrzeżenia, ale nie wpływają one na ogólną

opinię. Są to:

- w Rozdz.1. w sformułowaniu "dlatego nad tym zagadnieniem obecnie skupiają się prace w wielu ośrodkach naukowych [1], [4], [13], [18]÷[24]" termin "obecnie" nie jest właściwy dla poz. [18,19];
- wykorzystanie prac [69-72] (w tym [69,70] z udziałem Autora) w Rozdz.3. jako odniesień dla metody ammonothermalnej wytwarzania półizolacyjnych monokrystalicznych podłoży GaN nie jest zasadne; są inne prace źródłowe dla tej techniki, jak choćby R. Dwiliński i in., "Excellent crystallinity of truly bulk ammonothermal GaN", Journal of Crystal Growth 310 (2008) 3911–3916 lub cytowana w innym miejscu tego rozdziału praca [88];
- również w Rozdz.6., w którym Autor przeprowadził teoretyczną analizę zależności transmitancji wzmacniacza od temperatury tranzystora, wykorzystane zostały podstawowe równania prądu i transkonduktancji dla zakresu nasycenia w tranzystorze z długim i krótkim kanałem; Autor podparł te równania niepotrzebnie odniesieniami do różnych prac [58, 79, 80, 174], co czyni pewne wrażenie nieuporządkowania;
- autorem pozycji [78] Bibliografii jest S.Tivari;
- pozycje [115], [120] to ta sama publikacja.

Wnioski z przeglądu źródeł zostały sformułowane w zdecydowanej większości przypadków w sposób jasny i przekonujący. Wydaje mi się, że jedynie rozważania Autora na temat pojemności w tranzystorach typu FET są niezupełnie ścisłe.

Bibliografia obejmuje 11 pozycji opracowanych z udziałem Autora rozprawy. Są wśród nich po 2 artykuły w recenzowanych czasopismach zagranicznych i polskich oraz 5 komunikatów na konferencjach zagranicznych i 2 na krajowych. Zostały one opracowane w ciągu ostatnich kilku lat, obrazują prace Autora w zakresie tematyki rozprawy i dobrze ją wspierają. Wydaje mi się, że w Rozdz.1. w sformułowaniu "obecnie stosowane, typowe metody projektowania wzmacniaczy mocy na potrzeby nowoczesnych systemów radarowych i łączności bezprzewodowej nie są wystarczające [4], [6], [8], [20]÷[23]" sam Autor ich nie docenił, ponieważ jest współautorem pozycji [6], [8], a artykuł [6] z roku 2020 przedstawia najnowsze prace Autora, będące przedmiotem rozprawy.

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

W kolejnych rozdziałach rozprawy przedstawił rozwiązanie postawionych zagadnień. Autor dowiódł słuszności tez, co doprowadziło do osiągnięcia celu rozprawy. Przeprowadził wywód w następujących krokach.

W Rozdziale 3. Autor scharakteryzował pokrótce technologię GaN HEMT. Porównał wybrane właściwości materiałów Si, 4H-SiC, GaAs, GaN pod kątem ich zastosowania do wytwarzania przyrządów mocy RF. Omówił warianty podłoży dla warstwy GaN pod kątem wielkości niedopasowania sieci, niedopasowania rozszerzalności cieplnej i przewodności cieplnej. Opisał podstawy konstrukcji tranzystora w projekcie PoIHEMT z uwzględnieniem roli poszczególnych warstw heterostruktury. Warto w tym miejscu odnotować aktywny udział Autora w projekcie PoIHEMT. Omówił działanie tranzystorów GaN HEMT z uwzględnieniem zjawisk takich jak polaryzacja spontaniczna i piezoelektryczna, formowanie dwuwymiarowego gazu elektronowego (2DEG) na granicy AlGaIn/GaN.

W Rozdziale 4. Autor omówił metody ograniczania zmienności transmitancji wzmacniaczy z tranzystorami GaN HEMT, takie jak kluczkowanie zasilania i termiczne impulsy korekcyjne dla ograniczenia zmian temperatury tranzystora podczas transmisji sygnału RF oraz kalibracja i korekcja cyfrowa dla właściwego działania anten aktywnych. Autor podkreślił, że metody kalibracji/korekcji generują dużą ilość danych, przez co ograniczają zasoby systemów transmisji. Ponadto Autor omówił zagadnienia związane z tzw. linearyzacją wzmacniaczy, która umożliwia kompensację zniekształceń AM-AM, AM-PM, ale nie uwzględnia samonagrzewania się tranzystorów i nie pozwala na korekcję chwilowych zmian amplitudy i fazy transmitancji. Wreszcie Autor omówił metody polegające na doborze

impedancji źródła i obciążenia wzmacniacza dla poprawy jego charakterystyk. To doprowadziło Autora do koncepcji opracowania metody minimalizacji zmian transmitancji poprzez zrealizowanie obciążeń we wrotach tranzystora za pomocą obwodów dopasowujących i polaryzacji.

W Rozdziale 5. Autor omówił pomiary zmian transmitancji testowych wzmacniaczy mocy różnych typów w dziedzinie czasu i w dziedzinie częstotliwości.

Celem pomiarów w dziedzinie czasu było zbadanie zniekształceń transmitancji i sprawdzenie ew. wpływu pułapkowania nośników na pracę wzmacniacza. Autor skonstruował złożone stanowisko pomiarowe umożliwiające zastosowanie różnych sygnałów treningowych, różnych odstępów czasowych pomiędzy spolaryzowaniem tranzystora i sygnałem oraz obserwację odpowiedzi wzmacniacza z wysoką częstotliwością próbkowania. Pomiary nie wykazały widocznych efektów pułapkowania lub pamięciowych. Pokazały natomiast spadek w czasie amplitudy sygnału na wyjściu, który jest spowodowany samonagrzewaniem się tranzystora. Autor wykazał, że zmiany fazy i amplitudy transmitancji zależą od częstotliwości, a zatem od impedancji obciążeń tranzystora we wzmacniaczu. Była to ważna przesłanka dla poszukiwania optymalnych impedancji, uzasadniająca cel rozprawy.

Pomiary transmitancji w dziedzinie częstotliwości były przeprowadzone jako uzupełnienie pomiarów w dziedzinie czasu. Zgodność przedziałów czasowych dla różnych częstotliwości, w których zachodzą zmiany fazy i amplitudy transmitancji, Autor zinterpretował jako argument za istotnym wpływem impedancji obciążenia na transmitancję.

W Rozdziale 6. Autor przedstawił wprowadzenie do modeli tranzystorów HEMT, wzmacniaczy z uwzględnieniem wpływu temperatury na parametry tranzystorów/wzmacniaczy. Autor podjął próbę zidentyfikowania i dyskusji pierwotnych źródeł zmian transmitancji wzmacniaczy mocy RF, które są nie tylko skutkiem krótkotrwałych efektów pamięciowych (stałe czasowe rzędu ns), ale także efektów termicznych o znacznie dłuższym czasie trwania (stałe czasowe rzędu 10 μ s i większe). Dla potrzeb analizy Autor wykorzystał w pierwszej kolejności trójzaczynowy model małosygnałowy tranzystora FET dla wyższych częstotliwości. Następnie Autor rozwinął analityczne zależności opisujące na różnych poziomach szczegółowości transmitancję wzmacniacza mocy RF. Przy wyprowadzeniu tych zależności wykorzystał twierdzenie Millera. Modele te zostały zaimplementowane w środowisku obliczeniowym ADS i zastosowane do wyznaczenia zależności transmitancji od częstotliwości. Wreszcie Autor przeprowadził teoretyczną analizę zależności transmitancji wzmacniacza od temperatury tranzystora, która zależy od mocy deponowanej w tranzystorze. Jednym z parametrów decydujących o transmitancji jest konduktancja tranzystora, która jest określona m.in. przez ruchliwość nośników w kanale. Punktem wyjścia do analizy było zatem słuszne założenie, że główną przyczyną zmian transmitancji przy zmianach temperatury są zmiany ruchliwości nośników.

W Rozdziale 7. Autor przedstawił wprowadzenie do modelowania obwodowego wzmacniaczy mocy z uwzględnieniem efektów termicznych. Wprowadził pojęcia rezystancji i pojemności cieplnej oraz termicznych stałych czasowych charakteryzujących szybkość przepływu ciepła pomiędzy różnymi obszarami tranzystorów mocy. Przedstawił zastępczy schemat termiczny tranzystora, reprezentowany przez impedancję termiczną i wymienił metody pomiaru tej charakterystyki. Parametry elementów tego schematu zostały określone przez Autora na podstawie aproksymacji zmierzonych impedancji termicznych.

Następnie Autor omówił metody analizy wielkosygnałowej układów mikrofalowych ze szczególnym uwzględnieniem metody Envelope, która jest predestynowana do symulacji układów nieliniowych pobudzanych sygnałami o złożonych schematach modulacji. W środowisku ADS metoda ta została zastosowana przez Autora do symulacji wzmacniacza, w którym tranzystor GaN HEMT był reprezentowany przez opracowany model elektrotermiczny. Jest to nowatorskie podejście do symulacji transmitancji wzmacniaczy w czasie trwania sygnału. Opracowane narzędzie umożliwia szczegółową analizę wpływu parametrów wzmacniacza, np. impedancji obciążających, na jego transmitancję, a po wykorzystaniu dostępnych w ADS procedur optymalizacji umożliwia impedancji optymalnej wg przyjętego kryterium. W celu weryfikacji opracowanego modelu wzmacniacza Autor przeprowadził serię

pomiarów wielko- i małosygnalowych wzmacniacza z tranzystorem GaN HEMT NTP2018. Uzyskał zadowalającą zgodność charakterystyk $|S_{11}|$, $|S_{21}|$ w funkcji częstotliwości f . Następnie Autor wykonał symulacje zmian transmitancji (parametr S_{21}) wzmacniacza w czasie trwania impulsów RF. Uzyskał zgodność z wynikami pomiarów. Na bazie tych wyników Autor sformułował wniosek, że opracowane, zweryfikowane narzędzie symulacyjne może być użyte do wyznaczania impedancji obciążeń minimalizujących zmiany transmitancji w czasie trwania impulsu na skutek zmian temperatury i może być stosowane do projektowania radarowych i radiokomunikacyjnych wzmacniaczy mocy RF.

W Rozdziale 8. Autor przedstawił opracowaną metody minimalizacji zmienności transmitancji wzmacniaczy mocy RF poprzez wyznaczenie impedancji obciążeń bez istotnej redukcji mocy wyjściowej i sprawności dodanej. Zatem jest to finalna część rozprawy pokazujące realizację celu pracy. Autor opracował w środowisku ADS schemat symulacji transmitancji w funkcji zmian impedancji obciążenia. Uzyskane rozkłady zmian amplitudy i fazy transmitancji wzmacniacza z tranzystorem GaN HEMT NTP2018 w funkcji części rzeczywistej i urojonej impedancji obciążenia wyznaczone dla trzech częstotliwości pokazały zgodność impedancji minimalizujących zarówno zmiany amplitudy jak i fazy transmitancji. Podobny rezultat został uzyskany dla innych wzmacniaczy testowych. Na bazie tego zachęcającego wyniku Autor zaproponował algorytm metody optymalizacji konstrukcji wzmacniaczy. Zastosował go do wzmacniacza z tranzystorem GaN HEMT NTP2018, uzyskując znaczącą redukcję zmian modułu i fazy transmitancji. Procedurę tę Autor zastosował z dobrym wynikiem dla wzmacniaczy z innymi tranzystorami GaN HEMT. Warto podkreślić, że we wszystkich wypadkach zanotowano niewielki tylko spadek mocy wyjściowej i sprawności dodanej oraz zadowalające wartości współczynników $|S_{11}|$ i $|S_{21}|$.

Tym samym uważam, że cel pracy został osiągnięty. W pracy zostały przyjęte właściwe założenia i użyte właściwe metody.

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

Autor zaprezentował w rozprawie kilka oryginalnych rozwiązań:

- Skonstruował kilka systemów pomiarowych w dziedzinie RF, w tym złożony system do pomiarów czasowych; przeprowadził pomiary testowych wzmacniaczy;
- Skonstruował model impedancji termicznej dołączony do empirycznego modelu Angelova tranzystorów HEMT; umożliwiający symulację efektu samonagrzewania środowisko Keysight ADS;
- Opracował w środowisku ADS narzędzie do symulacji wielkosygnalowej wzmacniaczy mocy RF z uwzględnieniem samonagrzewania się tranzystorów;
- Opracował metodę minimalizacji zmienności transmitancji wzmacniaczy mocy RF poprzez wyznaczenie impedancji obciążeń bez istotnej redukcji mocy wyjściowej i sprawności dodanej.

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

Autor przekonująco przedstawił uzyskane przez siebie wyniki. Praca jest zwięzła. Jej styl sprawia, że czytałem ją z przyjemnością. Owszem, są w pracy pewne nieścisłości m.in. w opisie modeli kompaktowych tranzystorów GaN HEMT, ale nie wpływają one na logiczny tok pracy, która w części modelowania oparta jest na schematach zastępczych. Zaliczam do nich:

- w Rozdz.1. sformułowanie "charakterystyka rozpraszanej mocy w elemencie jest funkcją rozkładu gęstości prawdopodobieństwa określonego dla konkretnego standardu" jest niejasne i moim zdaniem wymaga uściślenia;
- w Rozdz.2. Autor użył sformułowania "powodem braku stałości transmitancji, nawet w warunkach małosygnalowej pracy, są wahania czasu transferu ładunku w kanale tranzystora GaN HEMT.

Małosygnalowy model tranzystora wprost ujawnia taką zależność"; analiza małosygnalowa oparta jest na linearyzacji modelu w danym punkcie polaryzacji; czy za wspomniane zmiany czasu transferu ładunku odpowiadają nieliniowe ch-ki $C(V)$ tranzystora określone dla danej polaryzacji DC ?

- w zależności (6.1) powinna być uwzględniona szerokość kanału;
- w Rozdz.6. w sformułowaniu "Pojemności zewnętrzne ($C_{gs,ext}$, $C_{gd,ext}$) modelują pozostałe pasożytnicze pojemności obecne w strukturze" dla ścisłości należałoby dodać, że chodzi tu o pasożytnicze pojemności bramki; uważam także, że warto byłoby zasygnalizować w tym miejscu, że pojemność $C_{gd,ext}$ jest ściśle związana z efektem tzw. "wydłużenia kanału" występującym w tranzystorach HEMT w zakresie nasycenia, tj. dla dużego napięcia dren-źródło; wówczas bowiem poza metalurgiczną bramką w kierunku kontaktu drenu indukowany jest obszar o stałej w przybliżeniu, niezerowej gęstości ładunku ruchomego, znacznie niższej niż w 2DEG na złączu AlGaIn/GaN; w obszarze tym elektrony poruszają się z prędkością nasycenia v_{sat} ; ten mechanizm odpowiada za dodatkowe opóźnienie transferu ładunku (ang. *drain delay*) i jest opisany m.in. w pracy [159]; uważam, że bez tego typu krótkiego wyjaśnienia sformułowanie w dalszej części Rozdziału 6. "Zwiększanie napięcia U_{DS} powoduje powstawanie warstwy zubożonej od strony drenu i następuje zwiększenie efektywnej długości kanału [159]. W efekcie rośnie opóźnienie τ i wartość pojemności bramka-źródło. Opisany mechanizm jest główną przyczyną wahań opóźnienia czasowego jako reakcji na zmiany amplitudy sygnału." zakończone istotną uwagą nie było dla mnie czytelne i wymagało sięgnięcia do literatury;
- w Rozdz.6. opis 3-zaciskowego modelu tranzystora FET zawiera nieściśności; C_{ds} jest to pojemność dren-źródło, a nie pojemność całkowita, R_i jest to reprezentacja rozłożonej rezystancji bramka-źródło, a nie rezystancji kanału; istotnie, jest ona skorelowana z rezystancją kanału; konduktancja wyjściowa g_o zdefiniowana przez (6.2), nie jest związana tylko z upływnością i efektem krótkiego kanału, ale uwzględnia wszystkie składowe prądu kanału tranzystora; ponadto nie jest jasny dla mnie fragment, w którym Autor wprowadził parametr C_m (transcapacitance) równoważny transkonduktancji g_m ; nie znalazłem jego wyjaśnienia w cytowanej pracy [153]; parametr C_m nie jest wyrażony w jednostkach pojemności elektrycznej; z drugiej strony, w quasi-statycznych modelach małosygnalowych elementów wielozaciskowych występują powszechnie pojemności będące pochodnymi ładunków (przypisanych do) zacisków względem potencjałów zacisków, a w modelach nie-quasi-statycznych będące składowymi części urojonych wyrazów uogólnionej macierzy admitancji; np. w rozpatrywanym modelu są obecne pojemności C_{gs} , C_{gd} , C_{ds} ; ich definicje (6.5-7) nie są jednak ścisłe; wg książki Y.Tsividisa "Operation and Modeling of the MOS Transistor" pojemności międzyelektrodowe są zdefiniowane następująco: $C_{xy} = -\partial Q_x / \partial V_y$ dla $x \neq y$, $C_{xx} = \partial Q_x / \partial V_x$; zatem można wykazać, że $C_{gs} = \partial Q_G / \partial V_{GS} + \partial Q_G / \partial V_{DS}$, $C_{gd} = -\partial Q_G / \partial V_{DS}$, $C_{ds} = \partial Q_D / \partial V_{GS} + \partial Q_D / \partial V_{DS}$;
- sformułowanie w Rozdz.6. "transkonduktancja g_m oraz pojemności C_{gs} oraz C_{gd} zależą od całkowitego opóźnienia τ tranzystorów GaN HEMT" jest moim zdaniem nieściśłe; małosygnalowe parametry g_m , C_{gs} , C_{gd} są określane na podstawie quasi-statycznych charakterystyk I-V i Q V; czas transferu ładunku τ jest parametrem wielosygnalowym określonym zależnościami (6.9), (6.16); istnieje także związek (6.8) między czasem τ a częstotliwością graniczną f_T ; natomiast Autor posłużył się małosygnalowym schematem zastępczym tranzystora do wyznaczenia f_T , a zatem do wyznaczeniu czasu τ za pomocą parametrów małosygnalowych, w tym g_m , C_{gs} , C_{gd} (6.12), (6.13); uważam zatem, że ściślej było by stwierdzenie "parametry g_m , C_{gs} , C_{gd} oraz czas opóźnienia τ są skorelowane";
- sformułowanie w Rozdz.6. "Znaczące rozbieżności pomiędzy wartościami obliczonymi przy użyciu modelu małosygnalowego i korzystając z podanych powyżej zależności pojawiają się dla wysokich częstotliwości, gdy przyjęte założenia (6.26) i (6.27) przestają obowiązywać" jest niezrozumiałe, ponieważ dla wyższych częstotliwości warunek (6.26) jest lepiej spełniony;

Zauważyłem w pracy także pewną liczbę usterek redakcyjnych, ale nie mają one wpływu na końcowy wynik. Część z nich dotyczy wzorów. Zapewne są one wynikiem pomyłek przy redakcji tekstu

Zaliczam do nich:

- kilka przypadków powtórzeń, np. ostatni akapit na s.20 jest w dużej mierze powtórzeniem akapitu na s.13; występują powtórzenia w Rozdz.3., w Rozdz.6.;
- w Rozdz.1. użyty jest termin "stałość transmitancji" jako parametr; parametrem jest transmitancja, a stałość jest jej cechą/wartością;
- używanie oznaczeń niezdefiniowanych lub różnych oznaczeń dla tego samego pojęcia, np. na s.10 dla terminu "nadajniki stacji bazowych" jest użyty skrót BTS, a na s.17 BST, na s.19 i 20 występują terminy "płaszczyzna I-Q" i "płaszczyzna Q-I", użyty jest niezdefiniowany skrót MTBF
- sformułowania w Rozdz.3.:
 - "charakteryzuje się znacznie niższą koncentracją samoistną wśród powszechnie stosowanych materiałów"; propozycja: "charakteryzuje się znacznie niższą koncentracją samoistną niż inne powszechnie stosowane materiały";
 - "Dodatnia polaryzacja interfejsu kompensowana jest przez warstwę swobodnych elektronów"; propozycja: "Dodatnia polaryzacja interfejsu indukuje warstwę swobodnych elektronów";
 - "uszykuje się przepływ prądu o dużej gęstości w kanale"; propozycja: "możliwy jest przepływ prądu o dużej gęstości w kanale";
 - "warstwa domieszkowanego GaN zwana cap'em"; propozycja: "warstwa domieszkowanego GaN (ang. *cap*)";
- parametr P_{max} zdefiniowany na tle wykresu na rys.8 nie ma wymiaru mocy (W);
- sformułowania w Rozdz.4.:
 - "z nieliniowości tranzystora"; propozycja: "z nieliniowości charakterystyk elektrycznych tranzystora";
 - "Ze względu na wielotysięczną ilość wzmacniaczy";
- sformułowanie w Rozdz.5. "Efekt samonagrzewania NPT2018 widoczny jest ... pokazano na Rys. 23" ma niepoprawną składnię
- rys.31 zawiera "wiszące" impedancje;
- niepoprawne są sformułowania w Rozdz.6.:
 - " ϵ - przenikalność elektryczna heterostruktury AlGaIn/GaN"; poprawny termin "przenikalność dielektryczna"; ponadto przenikalność dielektryczna jest parametrem materiału, a nie wieloskładnikowej struktury;
 - "Ze względu na strukturę obwodu wyjściowego tranzystora, równoległe połączenie C_{ds} i R_{ds} stosuje się warunek admitancyjny w płaszczyźnie źródła prądowego"; zdanie jest niejasne, prawdopodobnie z powodu niewłaściwej składni;
 - "Pochodna funkcji $\arctan(x)$ maleje jak $1/(1+x^2)$ i przyjmuje wartość maksymalną, gdy argument jest bliski zeru"; winno być: "pochodna zmienia się", "argument wynosi zero";
 - "na potrzeby nowoczesnych radiowych bloków Front-Endów" (s.72); winno być: "Front-End";
 - "fluktuuje", "fluktuacje" oznaczają zmiany przypadkowe; lepiej użyć "zmienia się", "zmiany";
- na rys.50 oś odciętych powinna być opisana $T_{c,max}$ (°C);
- w zależnościach (6.23), (6.24), (6.25), (6.33), (6.36) są błędy, zapewne natury redakcyjnej;
- w podpisie rys.78 jest błędnie podany typ tranzystora;

Uważam, że byłoby pożyteczne wprowadzić w rozprawie sekcję z wykazem oznaczeń i skrótów, które Autor stosuje w wielu miejscach tekstu. Włączenie takiego wykazu mogłoby zapobiec użyciu niejednoznacznych lub niezdefiniowanych oznaczeń, które wymieniłem powyżej.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Merytoryczna strona rozprawy jest bez zarzutu. Autor wykazał duże umiejętności w zakresie projektowania złożonych, skomputeryzowanych stanowisk pomiarowych w dziedzinie wysokich częstotliwości i mikrofal, w zakresie pomiarów mikrofalowych, w zakresie implementacji modeli elektrotermicznych tranzystorów mocy GaN HEMT, GaAs HEMT i ich symulacji w dziedzinie wysokich

częstotliwości w środowisku Keysight ADS i wreszcie w zakresie zastosowania w tym środowisku metod optymalizacji dla określenia optymalnej impedancji obciążenia we wzmacniaczach, minimalizujących zmiany transmitancji pod wpływem energii wydzielanej w tranzystorach.

Uważam, że słabszą stroną rozprawy są rozważania dotyczące modeli kompaktowych tranzystorów GaN HEMT. Zawierają one kilka nieścisłości. Niektóre zależności opisujące modele zawierają usterki.

Wreszcie strona redakcyjna rozprawy pozostawia nieco do życzenia. W rozprawie występują powtórzenia, nieprecyzyjne lub niewłaściwe sformułowania.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Praca ma duże znaczenie praktyczne. Opracowanie metody optymalizacji konstrukcji wzmacniaczy mocy RF dla uzyskania minimalnych zmian transmitancji umożliwi projektowanie systemów radarowych i radiokomunikacyjnych, których zasoby będą efektywniej wykorzystane.

Uważam także, że doświadczenia zebrane przez Autora w dziedzinie miernictwa i charakteryzacji półprzewodnikowych przyrządów mikrofalowych oraz układów mikrofalowych będą użyteczne dla zespołu, w którym praca była wykonana.

8. 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
- c) spełniająca wymagania
- d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

9. Podsumowanie

Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa Pana mgr. inż. Dawida Kuchty p.t.: "Zastosowanie mikrofalowych tranzystorów GaN HEMT we wzmacniaczach mocy dla radarowych modułów N/O" spełnia wymagania Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o przedstawione opracowanie projektowe, konstrukcyjne i technologiczne, wykazuje dobrą wiedzę teoretyczną i umiejętności praktyczne kandydata w dziedzinie projektowania i miernictwa układów elektronicznych mocy RF oraz ilustruje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedstawione osiągnięcia rozprawy lokują ją w pełni w dyscyplinie **Elektronika**, a tym bardziej w dyscyplinie **Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika** (wg nowej klasyfikacji). Rozprawa uzasadnia wniosek Doktoranta o nadanie stopnia doktora nauk technicznych. Wnioskuje o dopuszczenie Pana mgr. inż. Dawida Kuchty do publicznej obrony rozprawy przed Radą Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej.

Powyższe pytania mają charakter pomocniczy. Wskazane jest takie formułowanie treści recenzji, by można ją było odczytywać bez przeczytania pytań.

Daniel Tamarszewski

podpis