

Warszawa, dnia 31.07.2017 r.

prof. dr hab. inż. Ryszard Romaniuk

Politechnika Warszawska

Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

Instytut Systemów Elektronicznych

***KWESTIONARIUSZ – RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTROTECHNIKI, ELEKTRONIKI, INFORMATYKI  
I AUTOMATYKI POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ***

**Tytuł rozprawy: Design and optimization of photonic systems**

**Autor rozprawy: mgr inż. Mariusz Owczarek**

Podstawą recenzji jest uchwała Rady Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej z dnia 4 lipca 2017 r., oraz pismo Pana dziekana prof. M. Strzeleckiego w tej sprawie z dnia 05 lipca 2017 r.

Autor rozprawy, mgr inż. Mariusz Owczarek posiada kilka osobistych zapisów bibliograficznych w naukowo – technicznej sieci Internet. Na przykład, w Scopusie zapis obejmuje 5 publikacji współautorskich z lat 2004-2007, cytowanych kilka razy.

Praca doktorska ma dwóch promotorów i była wykonywana we współpracy Katedry Prządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych Politechniki Łódzkiej z Instytutem Nanotechnologii w prestiżowej szkole wyższej w Lyonie specjalizującej się w naukach ścisłych i należącej do elitarnej grupy Grandes ecoles. Warto tutaj podkreślić ten aspekt realizacji recenzowanej pracy doktorskiej. Laboratorium Elektroniki, Optoelektroniki i Mikrosystemów LEOM w Lyonie jest wspólnym przedsięwzięciem ECL i CNRS, oraz posiada unikalną infrastrukturę technologiczną zgrupowaną wokół trzech obszarów tematycznych: materiały elektroniczne i fotoniczne, mikrosystemy III-V i optoelektroniczne, oraz technologie projektowania układów scalonych. Bez takiego unikalnego zaplecza technologicznego realizacja tak zdefiniowanej tematyki pracy doktorskiej byłaby bardzo trudna lub wręcz niemożliwa. Doktorant przebywał na terenie tego laboratorium, gdzie realizował znaczne części pracy. Wykorzystał swoją znakomitą szansę międzynarodowej współpracy badawczej w jednym z najlepszych na świecie laboratoriów uczelniano – rządowych i zrealizował bardzo dobrą pracę doktorską. Praca mieści się w głównym nurcie działań LEOM, to znaczy badań podstawowych z obszarze przyszłych zastosowań w telekomunikacji oraz następnej generacji czujników i mikrosystemów. Praca była w naturalny sposób częścią większego projektu prowadzonego przez LEOM i doktorant musiał dostosować swoje szczegółowe kierunki badań do wymogów wspólnych działań. Tak więc, jak to bywa w przypadku takich projektów wiele z działań doktoranta było narzucanych z góry. Nie ma w tym nic złego

że doktorant korzysta ze znacznego doświadczenia znanego laboratorium, które ma konkretne cele realizacyjne. Wręcz przeciwnie dobrze ukierunkowana praca dokładająca się do dużego projektu gwarantuje sukces, pod warunkiem znacznego zaangażowania doktoranta we wspólne prace. I taką sytuację tutaj obserwujemy. Takie prace doktorskie są wykonywane często przy dużych eksperymentach i szerszych projektach badawczych.

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

Tytuł rozprawy jest bardzo ogólny. Rozprawa nie dotyczy z oczywistych względów rozwiązania całości zagadnień określonych przez tytuł, czyli projektowania i optymalizacji systemów fonicznych. Rozprawa dotyczy rozwiązania kilku szczegółowych wybranych, wąskich zagadnień z obszaru tematyki określonej przez tytuł. Ogólnie, zagadnienie naukowe dotyczy problematyki ograniczenia pasma transmisyjnego w lokalnych połączeniach wewnętrznych na różnych poziomach optoelektronicznego i fonicznego systemu lokalnego i układu scalonego. Poziom lokalny jest tu rozumiany jako połączenia sygnałowe między płytami funkcjonalnymi np. w ramach jednej magistrali, na pojedynczej płycie funkcjonalnej, w modułach wieloukładowych, itp. To zagadnienie, rozwiązywane w różny sposób, jest przedmiotem ciągłych prac badawczych od kilkudziesięciu lat. Poszukiwane ogólnie cechy sieci połączeń są następujące: szerokie pasmo, małe opóźnienie, mała moc, wielokanałowość, małe przesłuchy międzykanałowe, niskie straty, dobre właściwości optyczne, odporność elektromagnetyczna, izolacja elektryczna, niskie koszty realizacji, wysoka efektywność technologiczna, kompatybilne materiały, możliwość integracji z obsługiwanym systemem, możliwość wykonania architektury 3D, nieblokowanie kanałów, architektura i topologia połączeń i jej ewentualna optymalizacja, łatwość wykonania, współpraca z multiplekserami i demultiplekserami, współpraca ze źródłami i detektorami optycznymi, możliwość transferu do przemysłu, i wiele innych. Ze zrozumiałych względów rozprawa nie może poruszać większości z tych zagadnień. Doktorant musiał dokonać stosowanego wyboru, tak jednak aby dołożyć się naukowo i technicznie do przybliżenia rozwiązania któregoś z wymienionych zagadnień. Skupia się głównie na trzech parametrach: mocy rozproszonej, pasmie i wzmocnieniu transimpedancyjnym przedwzmacniacza optoelektronicznego. W technice światowej dotyczącej rozwiązań topologii fonicznych układów scalonych mówi się o klasie rozwiązań generycznych, to znaczy takich które są uzgodnione pomiędzy wieloma laboratoriami i w ten sposób mają szansę stać się w przyszłości standardem. Wydaje się, że doktorant w porozumieniu z współpracującym zespołem badawczym, podąża właśnie tą drogą. W kraju nad rozwiązaniami generycznymi fonicznych układów scalonych i komponentów dla nich pracuje zaledwie kilka wyspecjalizowanych laboratoriów jak np. IMiO PW, ITE, w przyszłości ma pracować Cezamat PW.

Głównym obszarem realizacji pracy doktorskiej są krótkie połączenia optyczne realizowane na potrzeby budowy systemów fonicznych. Szczegółowym obszarem realizacji badań własnych przez doktoranta jest komponent odbiornika optoelektronicznego współpracujący z fotodiodą, czyli optymalizowany przedwzmacniacz realizowany w postaci dedykowanego układu scalonego. Przedwzmacniacz formuje wyjściowy sygnał napięciowy w zależności od potrzeb układu zewnętrznego – innego dla zastosowań telekomunikacyjnych, a innego dla np. sieci czujnikowych i mikrosystemów.

Zagadnieniem naukowym rozpatrzonym w pracy jest wieloparametrowa optymalizacja procedury projektowania przedwzmacniacza z takimi wskaźnikami jakości jak wymieniono powyżej, a w szczególności minimum zużycia mocy i optymalne dopasowanie do zewnętrznych układów aplikacyjnych. Projekt i optymalizację układu scalonego wykonywano z użyciem autorskich kodów i środowiska programistycznego Cadence.

Praca ma charakter teoretyczny i doświadczalny. Część teoretyczna polegała na analizie układu i projekcie układu scalonego. Część doświadczalna polegała na testach niektórych wybranych wykonanych modeli zaprojektowanych układów scalonych. Część doświadczalną wykonano z wykorzystaniem możliwości oferowanych w środowisku akademickim przez agencję Europractice. Teza rozprawy dotyczy możliwości praktycznego wykonania wieloparametrowej optymalizacji procedury projektowej przedwzmacniacza odbiornika optycznego przeznaczonego do współpracy z linią transmisyjną o krótkim zasięgu, oraz pokazania realizowalności adekwatnej struktury ASIC. Dowodem tezy są pomiary kilku wersji zaprojektowanego i wykonanego układu. Teza pracy jest sformułowana dostatecznie jasno przez autora.

Podsumowując, tematyka pracy doktorskiej jest z punktu widzenia naukowo – technicznego aktualna i posiada odpowiedni składnik naukowy, teoretyczny i doświadczalny, stosowny dla poziomu prac doktorskich z obszaru nauk technicznych.

**2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle /świadczą o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonywujący?**

Praca zawiera 96 pozycji bibliograficznych. W tym kilkanaście pozycji w autorstwie członków zespołu w którym autor realizował pracę doktorską, oraz 7 prac w autorstwie i współautorstwie doktoranta. Prace współautorskie doktoranta są z lat 2006-2010. Nie ma prac bardziej aktualnych. Prace zostały opublikowane na konferencjach krajowych i międzynarodowych oraz w miesięczniku Elektronika. Zakres opublikowanych prac doktoranta jest spójny z tematyką pracy doktorskiej. W szczególności prace dotyczą wielokryterialnej optymalizacji odbiorników optoelektronicznych także integrowanych w układach scalonych. Być może brak prac bardziej aktualnych wynika z polityki zespołu badawczego w którym działa doktorant. To jest często typowa polityka przy realizacji niektórych projektów badawczych.

Do wyróżnienia rozprawy brak jest recenzentowi nieco większej liczby publikacji, w tym samodzielnej, związanych z tematyką realizowanych własnych prac projektowych i technologicznych. Być może wynika to z ograniczeń nałożonych przez warunki realizacji współpracy z laboratorium LEOM. Zwyczajowo takie laboratoria uczelniano – rządowe publikują prace dojrzałe, a nie częściowe wyniki laboratoryjne. Te ostatnie są publikowane z kolei przez wiele innych laboratoriów nie posiadających ograniczeń umownych. Mimo relatywnie skromnej liczby własnych publikacji doktoranta praca doktorska broni się w pełni jako pełnowartościowa rozprawa rozwiązująca nietrywialną tezę badawczą.

Prace cytowane ogólne są adekwatne do obszaru badań doktoranta i dotyczą głównie następującej tematyki: ocena rozwiązań polioptymalnych w technice, połączenia

sygnałowe pomiędzy modułami i układami i wewnątrz modułów i układów, połączenia optoelektroniczne wewnątrz układów scalonych, rozwiązania wybranych mikroprocesorów, integracja optoelektroniczna hybrydowa i monolityczna, topologie odbiorników optycznych, projektowanie odbiorników optycznych, niskomocowe subsystemy VLSI, itp. W pracy są liczne cytowania adekwatnych źródeł internetowych, w tym not aplikacyjnych optoelektronicznych układów scalonych, itp.

Podsumowując, w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł włączając w to literaturę światową oraz stan wiedzy aplikacyjnej i praktycznej. Zgodnie z opinią recenzenta stan wiedzy autora w zakresie projektowania optoelektronicznych układów scalonych jest odpowiedni do zrealizowania postawionej w rozprawie tezy doktorskiej. Wnioski z przeglądu źródeł są sformułowane w sposób jasny i przekonujący. Wnioski te były podstawą sformułowania tezy rozprawy.

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

Rozprawa składa się z dziewięciu rozdziałów. We wstępie autor określa obszar badawczy rozprawy, przedstawia szerzej zagadnienie do rozwiązania, zawiąza je do konkretnego przedmiotu prac i formułuje tezę do opracowania. Wspomina że praca powstała w wyniku współpracy międzynarodowej.

Rozdział 2 dotyczy przeglądu połączeń elektrycznych w systemach zintegrowanych. Dzieli połączenia na wielowarstwowe on-chip i off-chip – czyli między modułowe. Definiuje zagadnienie związane z tak zwanym kryzysem połączeń on-chip w dość podstawowym ujęciu historycznym. Na podstawie przeglądu literatury pokazuje problemy ograniczeń związanych ze zmianą materiałów np. Al/Cu, elektromigracją Cu, ograniczeń termicznych i kwantowych ograniczeń wymiarowych. Pokazuje jak rozwiązywano problem połączeń stosując materiały o małej wartości stałej dielektrycznej, nowe materiały jak nanorurki węglowe, jak próbowano poprawić transmisję sygnału i wprowadzono architekturę 3D. Inne rozwiązania były związane z radykalnym obniżeniem napięcia, zastosowaniem połączeń bezprzewodowych i optycznych.

Tych ostatnich połączeń optycznych dotyczy rozdział 3, który autor rozpoczyna dość podstawowym wstępem o ograniczonej przestrzennie transmisji optycznej i zagadnieniu nierównomiernych opóźnień. Następnie dokonuje przeglądu podstawowych metod dystrybucji np. zegara optycznego na układzie scalonym i w układzie wielomodułowym, w tym rozwiązania poprzednie opracowane kilkanaście lat temu na Politechnice Łódzkiej również we współpracy międzynarodowej. Pokazuje dalsze problemy do rozwiązania w obszarze krótkodystansowej transmisji optycznej. Rozdziały 2 i 3 są głównym miejscem przeglądu literatury.

W rozdziale 4 autor rozpatruje odbiornik optyczny w następujących aspektach: projektu całości, wyboru fotodetektora półprzewodnikowego, przeglądu projektów przedwzmacniaczy także w aspekcie wyboru technologii CMOS i bipolarnych, oraz przeglądu podstawowych topologii jak układy HBT jedno i wielo-stopniowe i inwertery MOS-fast i CMOS jedno i wielo-stopniowe. W wyniku dokonanego przeglądu dokonuje wyboru wzmacniacza trans-impedancyjnego z fotodiodą pin.

W rozdziale 5 autor przedstawia algorytmy optymalizacji wybranych układów przedwzmacniaczy. Do optymalizacji stosuje program symulacyjny RENE opracowany w

laboratorium LEOM. Opisuje podstawowe cechy środowiska a następnie parametry procesu symulacji i algorytmy optymalizacji genetycznej wykorzystujące metodę Pareto. Wykorzystuje specjalne cechy zaimplementowane w RUNE takie jak przekrycie i mutacje. Proces optymalizacji wzmacniaczy trans-impedancyjnych dotyczył takich parametrów jak rozpraszanie mocy, pasmo i wzmocnienie. Wskaźnik jakości stanowił iloczyn wzmocnienia i pasma podzielony przez rozpraszaną moc. Wskaźnik jakości wykorzystano do implementacji mechanizmu preselekcji.

Rozdział 6 opisuje proces optymalizacji odbiornika optycznego spełniającego określone projektem wymagania. Podczas symulacji fotodiody zastąpiono układem zastępczym. Proces optymalizacji dotyczył układów wybranych w rozdziale 4. Optymalizowano topologie układów a następnie ich layout. Dla poziomu mocy otrzymano wartość znacznie poniżej 1 mW, oraz wartości odpowiadających elementów dla każdej topologii. Porównano wartości wskaźnika jakości dla wszystkich topologii.

Producentem układu scalonego ASIC wykonanego dla wybranych topologii i layoutów była Niemiecka firma IHP Innovations for High Performance. Wybrano układy o najwyższej wartości wskaźnika jakości i najszerszym pasmie, czyli układ HBT jedno i trzystopniowy. Zastosowano typowe procedury produkcyjne narzucone przez producenta ASIC z wykorzystaniem środowiska Cadence, modułu Virtuoso Layout, a w tym takie etapy jak DRC, ERC, LVS, symulacje post-layout, z możliwością zmiany layoutu ze względu na wpływ parametrów pasożytniczych. Określano infrastrukturę układu a następnie maski dla podłoża krzemowego. Ostatecznie generowane były pliki wejściowe dla foundry. Rozdział 6 autor kończy projektem layoutu dla dwóch wybranych układów wzmacniaczy. We wnioskach z tego rozdziału podkreśla uzyskane znaczne obniżenie poziomu mocy rozpraszanej przez projektowane układy.

Rozdział 7 dotyczy charakteryzacji wyprodukowanych struktur ASIC. Autor rozpoczyna ten rozdział fotografiami dwóch układów wykonanych w 6 sztukach każdy, otrzymanych z firmy IHP. Struktury były nie pakowane, oraz pakowane w dwie różne obudowy DIL24 i SOIC24. Do badań układów obudowanych dostępne były tylko narożne struktury ze względu na ograniczenia bondingu i koszty bardziej złożonych obudów. Autor prezentuje układy pomiarowe AC i DC i wykonuje podstawowe pomiary. Każdy relatywnie prosty układ posiadał cztery pola kontaktowe, zasilanie, uziemienie oraz wejście i wyjście sygnałowe. Struktury nie obudowane mierzono w zestawie mikroskopowym z kontaktami igłowymi. Autor przedstawia schemat blokowy i cechy sygnałowe relatywnie prostych zestawów pomiarowych układów. Do układów obudowanych dorabia głowice pomiarowe. Wykonuje pomiary DC i AC. Przedstawia wyniki napięciowe, prądowe i mocowe. Dla pomiarów AC przedstawia wzmocnienie transimpedancyjne, oraz pasmo dla różnych warunków zasilania. Określa minimalną wartość napięcia zasilania pracy układów w różnych obudowach. Wyciąga wnioski dotyczące optymalnych punktów pracy układów. Zauważa znaczny wpływ rodzaju układu pomiarowego oraz odbudowy na parametry funkcjonalne badanych układów, w tym mocy rozpraszanej a w szczególności pasma. W podsumowaniu części pomiarowej stwierdza, że celem pracy nie było uzyskanie serii produkcyjnej badanych układów a praca badawcza nad wybranym, relatywnie niewielkim fragmentem złożonego całościowego procesu optymalizacji testowanych struktur. Pomiary rozpraszanej mocy, pasma i wzmocnienia dowodzą tezy pracy, jednak nie do końca pokazują potencjał optymalizowanych układów. Podaje konkretne wartości pomiarowe i wartości oczekiwane: na pasmo 1,2 GHz oraz 2,09 GHz, i na wzmocnienie transimpedancyjne 0,7 kOm oraz 2,1 kOm. Wyjaśnia rozbieżności danych między innymi uproszczonymi warunkami pomiarowymi. Najlepsze rezultaty zbieżności pomiędzy

symulacją przy pomocy oprogramowania Spectra, i pomiarem uzyskuje dla mocy rozpraszanej.

W rozdziale 8 autor podsumowuje całość pracy. Dokonuje krótkiego przeglądu pracy przedstawiając najważniejszą zawartość kolejnych rozdziałów. Zaznacza, że główny ładunek pracy własnej zawierają rozdziały 5 i 6 dotyczące procesów optymalizacyjnych.

Podsumowując, autor rozwiązał postawione zagadnienia i użył do ich rozwiązania właściwych metod. Przyjęte przez autora założenia projektowe i teoretyczne były uzasadnione.

**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?**

Oryginalność rozprawy polega na samodzielnym przeprowadzeniu pełnego cyklu projektowania specjalizowanego funkcjonalnego układu scalonego, następnie wykonania układu na podstawie projektu w IHP foundry i przeprowadzenie jego charakteryzacji.

Oryginalnym i samodzielnym dorobkiem autora jest optymalizacja struktur oraz przeprowadzanie „dowodu” jakości tej optymalizacji.

Pozycja rozprawy wobec stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanej przez literaturę światową jest aktualna. Rozprawa jest częścią szerszych prac zespołowych nad układami fonicznymi dystrybucji sygnałów na poziomie układu scalonego i układów wielomodułowych.

Podsumowując, praca posiada wystarczający udokumentowany oryginalny dorobek własny autora aby można było ocenić ją jako bardzo dobrą rozprawę doktorską.

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

Praca w wyczerpujący sposób opisuje kolejność działań autora prowadzących do dowiedzenia postawionej tezy, która zakładała znaczne poprawienie parametrów eksploatacyjnych przedwzmacniaczy w wyniku optymalizacji wielokryterialnej. Taką poprawę parametrów autor pokazuje praktycznie poprzez projekt, optymalizację, wykonanie i pomiary struktur. Analogiczny układ wykonany z elementów dyskretnych ma nieporównywalnie gorsze parametry. Praca, wykonywana jak fragment w szerszym zespole badawczym pokazuje samodzielność doktoranta, dojrzałość do wykonywania złożonych zadań badawczych, a jednocześnie umiejętność działania w zespole.

Podsumowując, autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników pracy. Do formy pracy, a w tym zwięzłości, jasności przekazu i poprawności redakcyjnej nie mam zasadniczych zarzutów. Struktura rozdziałów jest logiczna i prowadzi od opisu obszaru badawczego, i kolejno zawężenia tego obszaru do przedmiotu prac własnych, a następnie opisu prac własnych wykonanych w ramach szerszego projektu. Te prace własne są dobrze zdefiniowane i pokazują wkład doktoranta

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

Niemożliwe jest napisanie rozprawy doktorskiej bez pewnych słabszych stron i niektórych wad. Niektóre uwagi krytyczne dotyczące struktury pracy mogą wynikać np. z lokalnych zwyczajów redakcji prac doktorskich. Recenzent np. wolałby wszelkie załączniki i listy na końcu pracy a nie na początku. Wiele z fotografii i rysunków a pracy nie jest najwyższej jakości, wyglądają jakby zrobiono proces kopiuj – wklej, zamiast zrobić porządne rysunki w skali takiej aby wszystko było czytelne. Na niektórych opisy są prawie w ogóle nieczytelne, np. rys.7.9. Bardzo szeroki tytuł rozprawy jest nieco mylący, ale przypuszczam, że został doktorantowi narzucony przez zespół badawczy.

Podsumowując, słabsze strony rozprawy doktorskiej posiadają raczej charakter techniczny niż merytoryczny i nie umniejszają jej znacznej wartości poznawczej.

## 7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Przydatność rozprawy dla nauk technicznych jest znaczna. Można wymienić kilka czynników wspierających tą opinię. Praca ma wiele aspektów praktycznych i jej poziom jest współmierny z poziomem prac światowych. Tematyka pracy jest ciągle aktualna, szczególnie w zakresie tak zwanych rozwiązań generycznych topologii scalonych układów fotonicznych. Postęp z zakresie uzgodnionych na poziomie międzynarodowym wspólnych znormalizowanych rozwiązań generycznych będzie najszybciej prowadził do aplikacji przemysłowych.

Podsumowując, praca doktorska spełnia kryterium odpowiedniej przydatności dla nauk technicznych. Uzyskane wyniki dokładają się potencjalnie do postępu w obszarze praktycznych zastosowań zaproponowanych rozwiązań.

## 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 nadmiarem**
- e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Wnioskuje o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów procesu doktryzowania.

prof. dr hab. inż. Ryszard Romaniuk



