

1 sierpnia 2022

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: Optymalizacja połączeń fotodiod HgCdTe z torem wzmacniania modułu detekcyjnego promieniowania podczerwonego

Autor rozprawy: mgr inż. Mateusz Żbik

Recenzję przygotowano na podstawie Uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej, z dnia 26 czerwca 2022 r. oraz pisma z dnia 8 lipca 2022 r. tejże Rady. Recenzja została sporządzona wg zaleceń przekazanych przez Politechnikę Warszawską. W szczególności ocenia ona spełnienie przez rozprawę doktorską warunków określonych w art. 187 ust. 1–2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r.

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

Rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Żbika dotyczy zagadnień optymalizacji elektrycznych właściwości modułów detekcyjnych dla zakresu średniej podczerwieni, produkowanych przez firmę VIGO System S.A., w której zatrudniony jest Doktorant. Głównym celem rozprawy była optymalizacja połączeń fotodiody z torem wzmacniania modułu detekcyjnego aby móc szybko i powtarzalnie wytwarzać serie urządzeń charakteryzujących się pasmem przenoszenia powyżej 1 GHz. Aby to osiągnąć Autor zaproponował schematy zastępcze badanych fotodetektorów i opisał sposób eksperymentalnej identyfikacji takich schematów.

Autor sformułował pięć tez:

- Należy udoskonalić dotychczasową metodę kalibracji głowicy pomiarowej (opracowanej przez promotora recenzowanej pracy i innych) za pomocą metody samokalibracji w celu wyeliminowania niespójności związanych z niepowtarzalnością parametrów stosowanych wzorców kalibracyjnych.
- „Poszukiwany schemat zastępczy pozwoli dostatecznie dokładnie odwzorować wpływ najważniejszych zjawisk zachodzących w detektorze oraz wewnątrz jego obudowy, jakie są obserwowane w szerokim zakresie częstotliwości.”
- „Analiza poprawności skonstruowanego schematu zastępczego może być przeprowadzona na drodze symulacji numerycznych (SPICE lub MO) oraz pomiarów w eksperymentalnym systemie nieliniowego VNA, aby móc zmierzyć odpowiedź impulsową rzeczywistego fotodetektora, pobudzanego krótkim impulsem laserowym.”
- „Typ struktury detekcyjnej opracowanej w [11,31] charakteryzuje się pasmem przenoszenia co najmniej 2 GHz. Natomiast, aby móc osiągnąć podobne pasmo w połączeniu ze wzmacniaczem,

należy udoskonalić konstrukcję połączeń drutowych.”

- o „Dzięki wdrożeniu standardowych procedur pomiarowych oraz wsparciu procesu narzędziami CAD, parametry modułów detekcyjnych o szerokim pasmie przenoszenia będzie można dostatecznie dokładnie określić jeszcze na etapie ich projektowania natomiast sam proces seryjnej produkcji tych urządzeń zostanie przyspieszony.”

Sformułowanie tezy jest logiczne i racjonalne. Są one jasne i precyzyjne.

Praca składa się z wprowadzenia oraz pięciu rozdziałów. We wprowadzeniu Autor przedstawił cel, tezy i zakres pracy oraz motywy podjęcia badań związanych z tematyką rozprawy. Rozdział pierwszy traktuje o konstrukcji fotodiod średniej podczerwieni oraz o ich modelowaniu. W tym rozdziale Doktorant przedstawia małosygnalowy schemat zastępczy fotodetektora, na elementach o stałych skupionych, modelujący wpływ zjawisk pasożytniczych związanych z obudową, takich jak straty i opóźnienia wprowadzane przez układ połączeń drutowych oraz sprzężenia z układem chłodzenia. W rozdziale drugim zawarte są podstawy analizy i pomiarów układów pracujących z sygnałami wysokich częstotliwości, modele błędów dwuwrotowego wektorowego analizatora sieci oraz sposoby kalibracji. W rozdziale trzecim przedstawiona jest autorska metoda kalibracji SOLR16 dedykowanej głowicy pomiarowej wraz z konstrukcją użytych wzorców kalibracyjnych. W rozdziale czwartym Autor przedstawia uzyskane wyniki eksperymentalne z procesu kalibracji wraz z jego oceną ilościową i jakościową, a także wyniki modelowania fotodetektorów w obudowach TO-8 i eksperymentalnej weryfikacji zaproponowanego wcześniej modelu małosygnalowego. W podsumowaniu tego rozdziału Autor potwierdza trzy pierwsze tezy pracy. W rozdziale piątym Autor opisuje proces wdrożenia opracowanych metod i procedur do produkcji i potwierdza kolejne tezy pracy.

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

Bibliografia rozprawy składa się ze 195 pozycji literaturowych, z czego Doktorant jest współautorem 6 pozycji. Autor powołuje się zarówno na starsze prace z tematyki poruszanej w pracy jak i na najnowsze pozycje literaturowe, zarówno książkowe jak i artykuły konferencyjne, czy w czasopismach branżowych. Pierwsza część bibliografii dotyczy szeroko pojętej fotodetekcji traktującej o metodach analizy, modelowania i pomiaru tych detektorów. Druga część związana jest z technikami opisu i pomiaru układów elektronicznych pracującymi z sygnałami wysokich częstotliwości. Dobór literatury, jak i przedstawiony przegląd rozwiązań zarówno z zakresu modelowania fotodetektorów jak i sposobie pomiarów układów wysokoczęstotliwościowych świadczy o dobrym rozpoznaniu tematyki przez Autora i dowodzi o jego dostatecznej wiedzy w tym zakresie. Przegląd literaturowy jest zatem jasny i przejrzysty a dobór źródeł prawidłowy.

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

Celem rozprawy było opracowanie obwodowego modelu zastępczego fotodetektora oraz metody kalibracji głowicy pomiarowej, która pozwoli na eksperymentalną identyfikację elementów schematu zastępczego. Autor po zapoznaniu się z istniejącymi modelami badanych układów i przeanalizowaniu ich wad przedstawił własne rozwiązanie. W pierwszej kolejności dokonał analizy teoretycznej fotodetektora, biorąc pod uwagę strukturę fotodiody, wpływ obudowy, połączeń drutowych oraz zjawiska fizyczne występujące podczas transmisji sygnałów wysokich częstotliwości i zaproponował obwodowy model zastępczy. Następnie dokonał analizy znanych metod kalibracji wektorowego analizatora sieci i zaproponował własny sposób kalibracji głowicy pomiarowej uwzględniając efekty sprzężeń sygnałów, który następnie posłużył mu do eksperymentalnej identyfikacji elementów schematu. Autor zastosował właściwe metody badawcze, opierając się na znanych metodach analizy obwodowej, symulacji elek-

tromagnetycznej i pomiaru układów wysokich częstotliwości. Przedstawione wyniki teoretyczne jak i pomiarowe dowodzą prawidłowości wykonanych obliczeń i użytych metod pomiarowych. W związku z powyższym przyjęte w pracy założenia są uzasadnione i poprawne.

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?

Rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Żbika jest rozprawą oryginalną. Do oryginalnych osiągnięć Autora zaliczyć można przede wszystkim:

- Opracowanie nowej metody kalibracji (SOLR16) wektorowego analizatora sieci z dedykowaną głowicą pomiarową opartej na pomiarze trzech par wzorców odbiciowych i jednego wzorca transmisyjnego o częściowo znanych parametrach, która wykorzystuje nadmiar informacji otrzymanych z pomiarów wzorców do dookreślenia parametrów wzorca transmisyjnego.
- Przeprowadzenie jakościowej i ilościowej analizy w celu potwierdzenia dokładności i powtarzalności opracowanej metody SOLR16.
- Opracowanie małosygnałowego schematu zastępczego na elementach skupionych, opisującego działanie fotodetektora, modelującego wpływ zjawisk pasożytniczych związanych z obudową, takich jak straty i opóźnienia wprowadzane przez układ połączeń drutowych oraz sprzężenia z układem chłodzenia.
- Opracowanie i wykorzystanie metody pomiarowo-obliczeniowego charakteryzowania właściwości detektorów w zakresie częstotliwości do 3 GHz.

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

Rozprawa doktorska zawiera streszczenie, wprowadzenie, pięć rozdziałów, zakończenie, bibliografię, wykaz symboli i spisy rysunków, tablic i algorytmów oraz osiem dodatków. Praca napisana jest w języku polskim w sposób jasny i przejrzysty i ma objętość 190 stron. Układ pracy, jak i kolejność oraz kompletność poszczególnych rozdziałów jest dostosowany do poruszanej tematyki i zakresu badań. Autor w zwięzły sposób opisuje badany problem i komentuje otrzymane wyniki. Autor nie ustrzegł się drobnych błędów literowych i redakcyjnych (więcej w punkcie 6 niniejszej recenzji), jednakże nie umniejszają one wartości merytorycznej pracy.

6. Jakie są słabe strony i główne wady rozprawy?

Pewien niedosyt w recenzowanej pracy stanowi niewielka liczba publikacji Autora, w czasopismach branżowych, z tematyki związanej ściśle z uzyskanymi wynikami. Doktorant jest autorem lub współautorem ośmiu publikacji naukowych, z czego sześć jest powiązanych z pracą i cytowanych w rozprawie. Wśród publikacji związanych z pracą trzy zostały opublikowane w czasopismach punktowanych oraz trzy stanowią wystąpienia konferencyjne. Jednakże, jedynie w dwóch publikacjach konferencyjnych [104, 179] znaleźć można wyniki związane bezpośrednio z recenzowaną rozprawą.

Poniżej przedstawiam moje uwagi i komentarze dotyczące dostrzeżonych błędów lub niejasności w rozprawie (w kolejności występowania):

- Strona 6, Rysunek 1: w opisie rysunku zamiast a) i b) jest odpowiednio b) i c).
- Strona 11: „intentowi rzeczy” zamiast „internetowi rzeczy”.
- Strona 19: Autor pisze: „Dlatego przy rozwiązywaniu problemów współczesnej elektroniki w.cz. znacznie wygodniejsze w użyciu są symulacje obwodowe, tworzone w oparciu o schematy zastępcze...”. Jest to oczywiście prawda, lecz warto podkreślić, że każdy model obwodowy ma swoje ograniczenia

związane z dokładnością jego wyznaczenia i może lub powinien być wykorzystywany jedynie do wyznaczenia wstępnych parametrów struktury, np. w drodze optymalizacji, a dopiero wyniki analizy pełnofalowej można uznawać, za dokładne.

- Strona 31, wzory (1.8) i (1.11): brak indeksu dolnego przy parametrze ζ lub zbędny indeks dolny przy parametrze ζ_f .
- Strona 31: „...na podstawie opublikowanych wyników badań VIGO i ISE.” - brak odnośników do publikacji.
- Strona 33, Rysunek 1.6: brak zaznaczonej osi symetrii układu, do której nawiązuje Autor w tekście powyżej rysunku.
- Strona 36: „schemat zastępczy, ukazany na rys. 1.9, jest słuszny w zakresie częstotliwości kilku GHz” - mało precyzyjne stwierdzenie.
- Strona 36: „Jenak...” zamiast „Jednak...”.
- Rozdział 2 zawiera treści z podstawowego kursu elektroniki wysokich częstotliwości nauczanego na pierwszym i drugim stopniu studiów na kierunku elektroniki, dlatego są one tu nadmiarowe i nie mają znaczącego wkładu w treść pracy. Dodatkowo, występuje tu szereg uproszczeń, niedomówień i błędów, które nie pomogą w zrozumieniu treści potencjalnemu czytelnikowi niezaznajomionemu z tematyką elektroniki wysokich częstotliwości. Poniżej przytaczam przykłady.
- Strona 41: „To nowoczesne podejście oparte na numerycznym przetwarzaniu wyników...” - określenie „nowoczesne” kłóci się z cytowanym przez Autora, w poprzednim zdaniu, opracowaniem z lat 70 ubiegłego wieku.
- Strona 43, wzór (2.2): Autor korzysta w pracy oraz mierzy sygnały a i b lecz ich nie definiuje, ani nie podaje ich jednostki oraz ich związku z falami napięciowymi i prądowymi.
- Strona 42, wzór (2.3): Brak definicji elementów macierzy rozproszenia, która ma istotny związek ze sposobem ich pomiaru.
- Strona 42, Rysunek 2.2: Błędnie oznaczone fale wchodzące a_3 , a_N i wychodzące b_3 i b_N .
- Strona 47, druga linijka: „współczynnika” zamiast „współczynnik”.
- Strona 47: Autor pisze: „...aby móc określić współczynnik odbicia lub elementy macierzy S badanego układu, należy jego pojedyncze wrota pobudzić sygnałem o znanych parametrach i obserwować zespolone parametry fal padających i odbitych w poszczególnych płaszczyznach odniesienia.” Zdanie to zawiera błąd dotyczący obserwacji fal padających na poszczególne płaszczyzny odniesienia. Z definicji elementów macierzy S wynika, że:

$$S_{ij} = \left. \frac{b_i}{a_j} \right|_{a_i=0} \quad i \neq j$$

czyli jest to stosunek fali wychodzącej w i -tych wrotach do fali padającej w j -tych wrotach przy warunku braku fal padających na pozostałe wrota. Stąd, konieczność dopasowania wrót niemierzonych oraz konieczność wyboru odpowiedniej metody kalibracji analizatorów sieci w zależności od ich konstrukcji.

- Strona 48: „Sieć transformująca płaszczyzny odniesienia dwuwrotnika do płaszczyzn obserwacji określa się mianem tzw. modelu błędu (ang. error model) systemu.” Zdanie jest nieprecyzyjne i niejasne, gdyż płaszczyzna odniesienia jest płaszczyzną obserwacji i ustala się ją w wyniku przeprowadzenia procesu kalibracji.
- Strona 48: Autor wprowadza wybrane, wieloczynnikowe modele błędu wektorowego analizatora sieci bez odniesienia do konstrukcji analizatorów. Jedyna wzmianka jest w dopisku na str. 48 która mówi o „VNA z niekompletnym układem reflektometrycznym”. W mojej opinii wprowadzanie modeli błędu bez odniesienia do budowy i wytłumaczenia z czego te błędy wynikają jest zbyt dużym uproszczeniem i niedopowiedzeniem.
- Strona 48, wzór (2.19): Wzór niezgodny z przyjętą wyżej notacją i definicją wektorów a i b .
- Strona 51: „Dzięki udoskonalonej konstrukcji nowoczesnych systemów pomiarowych wpływ pas-

- żytnicznych sprzężeń wewnątrz analizatora wektorowego można pominąć.” Zadanie to jest mało precyzyjne w kontekście omawianych metod kalibracji, będących jednym z głównych tematów rozprawy.
- Strona 51, wzory (2.29) i (2.30): Definicje niezgodne z przyjętym kierunkiem fal padających i odbitych z rysunku 2.4.
 - Strona 53: „...kalibracja [...] polega na mierzeniu określonego zestawu dwuwrotowych układów o dokładnie...”. W skład zestawów kalibracyjnych wchodzi zarówno układy jedno jak i dwuwrotowe. Fakt grupowania układów jednowrotowych w pary, dodatkowo w pary elementów o jednakowych charakterach jest podyktowane jedynie wyborem Autora jak i specyficzną konstrukcją mierzonych układów o czym jest mowa w rozdziale 3.
 - Strona 55: „...nieodpowiednie w przypadku wystąpienia przesłuchów międzykanałowych w systemie VNA...” brak odniesienia do konstrukcji i źródła przesłuchów.
 - Strona 58: „...analizator jest wyposażony w układy przełączników, będących przyczyną błędów przełączania, które nie są reprezentowane przez omawiane tu modele - patrz dodatek D.2.” oraz „...należy uprzednio skalibrować system VNA np. rutynową metodą TRL/TRM, która usuwa m.in. błędy przełączania.” - podane informacje w tych zdaniach wykluczają się wzajemnie. Proszę Doktoranta o wyjaśnienie o jakie błędy przełączania chodzi i w jaki sposób metoda TRL/TRM te błędy usuwa. Również proszę wyjaśnienie to odnieść w stosunku do analizatorów, których Doktorant używał podczas realizacji pracy, czyli Agilent E5061B i Rohde&Schwarz ZVA-50.
 - Strona 69, wzór (3.18): jest det Q_m - powinno być det Q_r .
 - Strona 72: W podsumowaniu rozdziału Autor wspomina, że wykorzystał symulator pola elektromagnetycznego Ansys HFSS, jednakże w pracy nie zaprezentowano wyników symulacji ani nie podano danych dotyczących symulowanych struktur.
 - Strona 75, Rysunek 4.1: Błędnie oznaczono parametry macierzy rozproszenia na wykresach a) i b) - wykresy powinny dotyczyć elementów S_{13} oraz S_{24} .
 - Strona 92: Błędne odwołanie do rysunku: jest „rys. 4.1”, powinno być „rys. 4.9”.
 - Strona 93: Podane wyrażenia na fale fotoprądu są niepoprawne, jeżeli założy się ogólnie przyjętą definicję fal padających a i odbitych b . Fale a i b mają jednostkę \sqrt{W} , więc podzielenie ich przez Ω nie da jednostki prądu.
 - Strona 162: „...na podstawie wyników symulacji, określono wartości pojemności...” - brak zaprezentowanych wyników symulacji.
 - Strona 164: „Rozważania ograniczono wyłącznie do nowoczesnych systemów wyposażonych w cztery tory przetwarzania sygnału (sprzęgacze kierunkowe).” Sprzęgacze są tylko jedną z możliwych implementacji elementu kierunkowego, który jest częścią składową każdego wrót analizatora. Ich zastosowanie uzależnione jest od częstotliwości pracy urządzenia. Przy niższych częstotliwościach używa się mostków VSWR. Niezależnie od tego, wspomniane w przytoczonym zdaniu tory przetwarzania sygnału powinny odnosić się do odbiorników pomiarowych i referencyjnych.
 - Strona 167: „spróbować” zamiast „spróbkować”.

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

Tematyka poruszana w rozprawie jest aktualna i ważna zarówno w zastosowaniach w przemyśle, medycynie jak i w wojsku. Potwierdza to wdrożeniowy charakter pracy doktorskiej oraz szybko rozwijający się rynek optoelektroniczny na świecie.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- niespełniająca wymagań,
- wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- **spełnia wymagania,**
- spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,
- wybitnie dobra zasługująca na wyróżnienie.

W mojej opinii recenzowana rozprawa opisuje samodzielne rozwiązanie problemu badawczego i stanowi oryginalny wkład w rozwój dziedziny elektronika. Treść i poziom merytoryczny pracy świadczy o zadowalającym poziomie wiedzy Autora w tej dziedzinie. Mgr inż. Mateusz Żbik rozwiązał postawiony cel naukowy i dowiódł postawionych tez. Tym samym wykazał się wiedzą i umiejętnościami wymaganymi dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez odpowiednią ustawę o stopniach i tytule naukowym. Jednocześnie wnioskuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Żbika do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej.



dr hab. inż. Rafał Lech, prof. PG