

Prof. dr hab. inż. Andrzej Kolek  
Katedra Podstaw Elektroniki  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza  
al. Powstańców Warszawy 12  
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 16 lipca 2024 r.

### **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej kpt. mgr. inż. Krzysztofa Achtenberga  
pt. „Układy oraz metody do pomiaru charakterystyk szumowych detektorów  
podczerwieni o małych impedancjach”**

Podstawę formalną opracowania niniejszej recenzji stanowi uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego (RDN AEEiTK WAT) z dnia 19 czerwca 2024 r. oraz nawiązujące do tej uchwały pismo Dyrektora Instytutu Optoelektroniki WAT – dr. hab. inż. Krzysztofa Kopczyńskiego, prof. WAT z dnia 24 czerwca 2024 r.

Podstawę prawną opracowania recenzji, zgodnie z otrzymanym pismem Dyrektora Instytutu Optoelektroniki WAT, stanowią:

- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023 r. poz. 742 z późn. zm.),
- Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego nr 13/RDN AEEiTK/2024 z dnia 19 czerwca 2024 r.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska kpt. mgr. inż. Krzysztofa Achtenberga została zrealizowana w Instytucie Optoelektroniki WAT pod kierunkiem promotora – prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Bieleckiego oraz promotora pomocniczego – płk. dr. inż. Janusza Mikołajczyka. Praca ta bardzo dobrze wpisuje się w zakres badań eksperymentalnych realizowanych z sukcesami przez Zespół Detekcji Sygnałów Optycznych WAT. Manuskrypt, zawierający 157 stron maszynopisu, jest podzielony na 7 rozdziałów, a część z nich (rozdziały 2 oraz 4÷6) zakończono zwięzłym podsumowaniem. Rozprawę kończy spis cytowanej literatury obejmujący 146 pozycji oraz wykaz najważniejszych osiągnięć.

Cel rozprawy został określony w rozdziale trzecim, na stronie 49. Jest nim „osiągnięcie zdolności pomiaru szumów najnowszych fotonowych detektorów promieniowania podczerwonego charakteryzujących się małą impedancją w zakresie małych częstotliwości”. Realizacja tego celu wymagała od Autora znajomości zagadnień z zakresu metrologii sygnałów elektrycznych, projektowania układów elektronicznych, przetwarzania sygnałów metodami analogowymi i cyfrowymi oraz tematyki badanych obiektów, tj. różnego rodzaju detektorów promieniowania podczerwonego. Nakład pracy potrzebny do realizacji przyjętego celu i wykazania postawionej tezy był znaczny i wymagał nie tylko wnikliwego przeglądu najnowszej literatury oraz propozycji rozwiązań teoretycznych, lecz także sprawdzenia poprawności i skuteczności ich działania, co wiązało się ze znacznym zakresem prac prowadzących do budowy fizycznych urządzeń zaprojektowanych przez Doktoranta. Wymagało to Jego wszechstronnej wiedzy nie tylko z zakresu wymienionych wcześniej dziedzin, lecz także umiejętności ich implementacji w praktyce. W wielu przypadkach zaproponowane metody, modele i techniki pomiarowe mają charakter oryginalny. Uważam zatem, że przedmiotem rozprawy doktorskiej kpt. mgr. inż. Krzysztofa Achtenberga jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a ponadto praca ta prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia naukowego doktora w zakresie metod pomiaru szumów m.cz., a także umiejętność jej wykorzystania. Tematyka rozprawy jest niezwykle aktualna. Wynika to z bardzo szerokiego zastosowania detektorów podczerwieni w wielu dziedzinach życia, wśród których są tak ważne jak: ochrona zdrowia, bezpieczeństwo i obronność. Problematyka szumów detektorów jest tu niezwykle ważna, gdyż określają one podstawowe parametry detektora determinujące jego zastosowania. Bardzo często są one określane w odniesieniu do teoretycznych estymatorów, gdyż określenie rzeczywistego poziomu szumów jest trudne. Rozwiązania przedstawione w pracy doktorskiej kpt. mgr. inż. Krzysztofa Achtenberga pozwalają wyznaczyć poziom szumów na drodze eksperymentalnej, przez co parametry detektorów mogą mieć rangę wartości „rzeczywistych”, a nie „teoretycznych”. Uważam także, iż tematyka rozprawy mieści się w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne (AEEiTK) ze względu na jej bezpośredni związek z tematyką szumów elektrycznych, pomiarami wielkości elektrycznych, przetwarzaniem sygnałów oraz przyrządami półprzewodnikowymi i optoelektroniką.

Tytuł rozprawy w zasadzie odpowiada jej treści oraz zakresowi przeprowadzonych badań. Być może należałoby go uszczegółowić dodając, że rozprawa dotyczy wyłącznie szumów m.cz. Cel pracy i teza zostały określone dopiero w rozdziale trzecim. W tym samym

rozdziale przedstawiono także główne zadania naukowo-badawcze, które zrealizowano w ramach rozprawy oraz dokonano krótkiego streszczenia całości pracy.

Rozdziały pierwszy i drugi to rozdziały wprowadzające czytelnika w problematykę rozprawy, mające ułatwić mu rozumienie zagadnień omawianych w dalszych częściach pracy. Umieszczenie ich w rozprawie uważam za uzasadnione. W rozdziale pierwszym Doktorant zawarł krótką charakterystykę tematyki pracy wraz z krótką motywacją jej podjęcia. Szczegółowe uzasadnienia dla podjęcia tych badań przedstawione zostały w obszernym rozdziale drugim. Autor omówił w nim podstawowe pojęcia dotyczące szumów oraz główne parametry detektorów podczerwieni. Przedstawił też analizę standardowych układów oraz metod pomiarów szumów oraz wskazał, jakie są ich ograniczenia. Identyfikacja tych ograniczeń stała się podstawą dla podjęcia badań, określenia celu pracy i postawienia tezy. U ich źródeł leży zaobserwowany przez Autora brak „systemów, które zapewniałyby wymagany poziom szumów własnych w przypadku pomiaru szumów detektorów o impedancji poniżej  $1\text{ k}\Omega$ ”. Generalnie zgadzam się z tą oceną; uważam jednak, że bardziej odpowiednie byłoby stwierdzenie, iż brak jest „uniwersalnych systemów”, gdyż w literaturze opisywane są przypadki pomiaru szumów tego typu detektorów zakończone sukcesem, np. w pracy Ł. Ciury i in. [IEEE Transactions on Electron Devices (2020), 67 (8), 3205].

Odnosząc się do szczegółowych treści zawartych w rozdziale drugim, chcę wskazać na pewne mankamenty, których nie ustrzegł się Autor. Najważniejszy z nich dotyczy błędu w równaniu (2.23). Błędnie został oszacowany składnik szumu pochodzący od źródła napięcia zasilającego detektor. Niewłaściwy zapis pojawił się także w równaniu (2.18). W tym przypadku składnik  $S_{inW}$  powinien być pomnożony przez czynnik  $[R_w + n^2(R_p + R_s)]^2/n^2$ , który nie upraszcza się do postaci przedstawionej w tym równaniu. Za błędne uważam także włączenie argumentu czasu we wzorach definiujących średniokwadratowe wartości napięcia i prądu szumów w równaniu (2.1). Podobna sytuacja ma miejsce na stronie 13, w nienumerowanej zależności definiującej impedancję detektora  $Z_d$ . Uważam ponadto, że stwierdzenie, iż podstawową rolą rezystora separującego  $R_b$  jest ograniczenie maksymalnej wartości prądu jest niewłaściwe. Podstawową rolą tego rezystora jest zapewnienie warunków rozwarcia dla pracy mierzonego elementu, w jakich należy dokonywać pomiaru napięciowych źródeł szumów. Mimo tych mankamentów uważam, że rozdział drugi jest jednym z ważniejszych rozdziałów rozprawy, a przedstawione w nim zagadnienia w jasny sposób prezentują motywację Autora oraz opisują tematyczny zakres rozprawy. Dla praktyka zagadnienia szczególną wartość mają przedstawione w tabelach 2.1÷2.3 zestawienia



właściwości szumowych współczesnych wzmacniaczy niskoszumowych napięciowych i prądowych oraz źródeł napięć polaryzujących.

W rozdziale czwartym Doktorant opisał kluczowe komponenty autorskiego systemu do pomiaru szumów detektorów o małych impedancjach. Najważniejszym zadaniem Kandydata było opracowanie układów o znacznie lepszych parametrach szumowych, w odniesieniu do stosowanych rozwiązań komercyjnych, oraz ich dalsza integracja w zaawansowanym systemie pomiarowym – LIDNMS. W tym celu opracował On niskoszumowe programowalne źródło napięcia (LNVS), charakteryzujące się napięciem szumów poniżej  $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  (dla  $f > 10 \text{ Hz}$ ), które zostało zastosowane do zasilania detektorów fotoprzewodzących lub polaryzacji detektorów fotowoltaicznych. W podrozdziale 4.2 przedstawione zostało największe moim zdaniem osiągnięcie Doktoranta. Jest nim zaprojektowany, wykonany i poddany wielostronnym testom niskoszumowy wzmacniacz napięciowy. Równoważne wejściowe napięcie szumów tego wzmacniacza przyjmuje rekordową wartość  $0,55 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ , co znacznie rozszerza możliwości pomiaru szumów, szczególnie ze źródeł o niskiej impedancji. Proces projektowania tego urządzenia wymagał wyboru odpowiedniej topologii, wyselekcjonowania odpowiednich elementów aktywnych oraz optymalnego doboru ich punktu pracy. Elementy te zostały szczegółowo opisane i potwierdzają umiejętności Autora w tym zakresie.

Kolejnym komponentem budowanego systemu pomiarowego jest autorski wzmacniacz transimpedancyjny wykorzystujący technikę korelacji do eliminacji szumów napięciowych wzmacniaczy operacyjnych zastosowanych w tym rozwiązaniu. Niestety, opis teoretyczny zawiera błędnie wyznaczone składniki całkowitego szumu prądowego określonego w równaniach (4.7) i (4.8). W efekcie rezultat końcowy określony równaniem (4.10) jest także błędny. Można jednak przypuszczać, że prawidłowa analiza pokaże, iż w zaproponowanym układzie szumy napięciowe wzmacniaczy nie są kompletnie wyeliminowane, lecz znacznie stłumione. Oznacza to, że przydatność zaproponowanego wzmacniacza korelacyjnego jest znaczna, zwłaszcza z punktu widzenia pomiaru szumów ze źródeł o małej impedancji. Kolejnym komponentem budowanego systemu jest opisany w podrozdziale 4.4 niskoszumowy wzmacniacz transimpedancyjny. Podobnie jak wzmacniacz napięciowy, został on zbudowany wg autorskiego projektu i posiada bardzo dobre parametry szumowe, m.in. nadzwyczaj niskie szumy napięciowe na poziomie  $0,9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Na koniec należy wspomnieć o nowatorskiej koncepcji pomiaru szumów z użyciem transformatora pomiarowego oraz superkondensatora. Rolą tego ostatniego jest

separacja składowej stałej, co umożliwia pomiar w warunkach polaryzacji badanego elementu.

Zaproponowane przez Autora układy i metody, opisane w rozdziale czwartym, zintegrowano do postaci pięciu konfiguracji systemu pomiarowego LIDNMS, który umożliwia zarówno pomiary napięcia, jak i prądu szumów. W rozdziale piątym Doktorant omówił każdą z tych konfiguracji, przedstawił wyniki przeprowadzonych pomiarów, które potwierdziły efektywność metod korelacyjnych w połączeniu z niskoszumowymi układami w wersjach dwukanałowych oraz zaproponował w formie nomogramu sposób doboru konfiguracji systemu w zależności od impedancji detektora. Ważnym elementem tego rozdziału jest przedstawienie charakterystyk i określenie parametrów szumowych zbudowanych układów.

W rozdziale szóstym Autor przedstawił wyniki pomiarów detektorów podczerwieni o małych impedancjach. Opisał w nim również sposób doboru metody pomiarowej w zależności od wartości modułu impedancji detektora. Pomiary wykonał zarówno dla detektorów fotowoltaicznych, jak i fotoprzewodzących. Autor zawarł w tym rozdziale również wyniki pomiarów charakterystyk prądowo-napięciowych, rezystancji dynamicznych, modułu impedancji zespolonej oraz gęstości widmowej mocy napięcia lub prądu szumów badanych detektorów. Jak wspomniałem, ich przeprowadzenie wymagało działań integrujących wiele technik oraz opracowania układów pomiarowych dedykowanych dla poszczególnych przyrządów. Uważam, że przedstawione w tym rozdziale wyniki są znaczącym osiągnięciem Doktoranta. Przeprowadzone eksperymenty szumowe są złożone, lecz prowadzą do uzyskania rzetelnych estymatorów g.w.m. szumów. Znaczenie tego typu wyników polega na tym, iż umożliwiają one nie tylko określenie rzeczywistych parametrów szumowych detektorów, lecz także fizyczną interpretację źródeł szumów w badanych przyrządach. Znajomość tych źródeł jest nie do przecenienia, gdyż warunkują one postęp w tej ważnej dziedzinie techniki.

Autor kończy rozprawę rozdziałem siódmym zatytułowanym *Podsumowanie i wnioski końcowe*, w którym zwięźle przedstawił zrealizowane badania i swe osiągnięcia. W swojej recenzji wymieniłem je omawiając poszczególne rozdziały pracy. Uważam, że są one poparte wartościowym materiałem doświadczalnym i solidną argumentacją teoretyczną. Przedstawiony materiał ma w głównej mierze charakter eksperymentalny. Podstawowym osiągnięciem Doktoranta jest uzyskanie założonego celu, jakim było „osiągnięcie zdolności pomiaru szumów najnowszych fotonowych detektorów promieniowania podczerwonego charakteryzujących się małą impedancją w zakresie małych częstotliwości”. Nie było



to zadanie łatwe, gdyż wymagało ono zarówno dogłębnej znajomości zagadnień metrologicznych, jak i wiedzy dotyczącej układów i elementów elektronicznych oraz detektorów podczerwieni. Szczególnie dużą wartość posiadają kompetencje Autora dotyczące zagadnień metrologicznych. W swej pracy przeprowadził On pomiary metodami o znacznym stopniu złożoności. Kandydat udowodnił, że posiada niezbędne kompetencje, co jest ważne nie tylko z punktu widzenia dyscypliny, w której ubiega się o stopień naukowy, lecz również kontynuacji Jego kariery naukowej.

Metodyka badań przeprowadzonych przez Doktoranta w celu rozwiązania problemu jest odpowiednia. Podstawowe metody stosowane w rozprawie to badania eksperymentalne, włączając w to prace o charakterze projektowania i analizy układów elektronicznych. W zakresie eksperymentu Autor nie ograniczył się do standardowych metod pomiaru istotnych wielkości, takich jak: napięcie, prąd czy rezystancja, lecz przeprowadził zaawansowane pomiary technikami korelacyjnymi.

Podstawą wniosków, zaproponowanych rozwiązań i postawionej tezy, oprócz zastosowanych technik metrologicznych, są także rozważania teoretyczne. Autor zastosował je w celu weryfikacji proponowanych koncepcji systemów pomiarów oraz pogłębienia rozumienia mechanizmów określających wpływ poszczególnych źródeł szumów na obserwowane charakterystyki spektralne. Wytknięte przeze mnie niedostatki opisu teoretycznego nie mają charakteru błędu głównego i nie obniżają wartości rozprawy ani postawionej w niej tezy. Uznałem za stosowne wspomnieć o nich, mając na uwadze przyszłe prace Doktoranta oraz jego dalszy rozwój naukowy.

Wracając do metod stosowanych przez Doktoranta należy zauważyć, że posiadał On umiejętność wykorzystania współczesnych programów komputerowych do estymacji charakterystyk procesów losowych. Należy też zauważyć, że rozważania Autora zostały uzupełnione o bardzo obszerny przegląd literaturowy. Uważam ponadto, że różnorodność zagadnień rozwiązanych przez Doktoranta potwierdza Jego znaczną wiedzę i zaangażowanie w jej stosowaniu. Jest to dobry prognostyk dla Jego przyszłej kariery naukowej.

Na szczególną uwagę zasługuje dorobek naukowy Kandydata. Jest On współautorem 8 publikacji naukowych w prestiżowych, wysoko punktowanych czasopismach indeksowanych w Journal Citation Reports, m.in.: *Measurement* (2021, 2022), *Applied Sciences-Basel* (2023), *Electronics* (2020, 2022), które są bezpośrednio związane z ocenianą rozprawą doktorską. Według baz Web of Science i Scopus na dzień 3 lipca 2024 r. prace Doktoranta były cytowane odpowiednio 56 i 49 razy (bez autocytowań); indeks Hirscha wynosi 5. Jest to bardzo dobry wynik jak na tak wczesny etap kariery naukowej. Rezultaty

swojej pracy Doktorant prezentował także na 4 konferencjach naukowych, m.in. na Konferencji Naukowej „Technologia Elektronowa” (ELTE 2023). Kandydat jest także współautorem 1 patentu krajowego.

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska kpt. mgr. inż. Krzysztofa Achtenberga zatytułowana „Układy oraz metody do pomiaru charakterystyk szumowych detektorów podczerwieni o małych impedancjach” spełnia kryteria określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2023 r. poz. 742 z późn. zm.). Na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie, biorąc pod uwagę wysoki poziom recenzowanej rozprawy oraz znaczny dorobek naukowy Autora, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Kolek



