

Łódź, 30 sierpnia 2024 r.

Prof. dr hab. inż. Bogusław Więcek  
Politechnika Łódzka  
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki  
Instytut Elektroniki

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

**1. Uwagi ogólne**

Recenzja rozprawy doktorskiej kpt. mgra inż. Krzysztofa Achtenberga została przygotowana dla Rady Dyscypliny Naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.

Recenzję wykonano na podstawie przedłożonej rozprawy doktorskiej pt. „**Układy oraz metody do pomiaru charakterystyk szumowych detektorów podczerwieni o małych impedancjach**” zgodnie z wymogami ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U. 2023 poz. 742 z póź. zm.)*. Rozprawa została wykonana w dyscyplinie naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Dysertacja mgra inż. Krzysztofa Achtenberga dotyczy analizy i projektowania analogowych systemów elektronicznych do pomiaru szumów detektorów podczerwieni, w szczególności o małej impedancji poniżej 1 kΩ. Rozprawa liczy 157 stron i składa się z 7 rozdziałów oraz bibliografii. Ponadto, Autor zamieścił listę współautorskich publikacji dotyczących rozprawy doktorskiej wraz z udzielonym patentem. Dysertacja zawiera w części początkowej wstęp uzasadniający podjęcie tematyki badawczej oraz obszerny i niezmiernie ciekawy rozdział nr 2, w którym przedstawiono metody i wybrane układy do pomiaru szumów w systemach elektronicznych z odnośnikami do literatury. Bibliografia zawiera 146 pozycji, w tym prace innych badaczy z ostatnich lat, które przekonywująco uzasadniają cel rozprawy oraz aktualny charakter podjętych badań. Należy podkreślić, że pomiar szumów detektorów podczerwieni jest ważnym problemem naukowym i inżynierskim. Ze względu na postęp technologii wytwarzania sensorów promieniowania termicznego, charakteryzują się one coraz mniejszym poziomem szumów własnych, co zwiększa wymagania techniczne stawiane systemom pomiarowym w obszarze wyznaczania charakterystyk szumowych.

W części badawczej rozprawy Autor szczegółowo przedstawił elementy składowe autorskiego systemu do pomiaru gęstości widmowej szumów napięciowych i prądowych detektorów podczerwieni przewodzących i fotowoltaicznych o małej impedancji. W kolejnych rozdziałach zaprezentowano zintegrowany system pomiarowy, jego charakterystyki szumowe oraz wyniki pomiarów szumów termicznych i 1/f rezystorów referencyjnych. Ostatnia część rozprawy doktorskiej poświęcona jest pomiarom 6. wybranych fotonowych detektorów o wykrywalności znormalizowanej  $D^* = 1,6 \cdot 10^8 - 4,92 \cdot 10^9 \text{ cmHz}^{-1/2}\text{W}^{-1}$ , różnej powierzchni aktywnej i różnym paśmie detekcji w zakresie promieniowania MWIR/LWIR – (5 – 15) μm.

Rozprawa napisana jest w sposób jasny, wyczerpujący i poprawny. Dysertacja zawiera wiele wykresów gęstości widmowej i charakterystyk wartości średniokwadratowej szumów prądowych i napięciowych rozważanych elementów i układów elektronicznych, które dobrze korelują z opisem i ułatwiają zrozumienie treści oraz ocenę przedstawionych wniosków. Systematyczny i logiczny układ rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Achtenberga sprawia, że może ona stanowić materiał źródłowy dla innych badaczy, w tym przede wszystkim dla doktorantów i dyplomantów zajmujących się szeroko rozumianą techniką podczerwieni.

## 2. Ocena tematyki, tezy oraz celu rozprawy

Tematyka naukowa rozwijana przez Doktoranta i przedstawiona w rozprawie doktorskiej jest aktualna i ważna, głównie z praktycznego punktu widzenia. Pomiar szumów systemów elektronicznych, a szczególnie sensorów podczerwieni jest dziś dominującym problemem badawczym i technicznym. Obecnie obserwuje się bardzo dynamiczny rozwój sensoryki multispektralnej do różnych zastosowań cywilnych i wojskowych. Ze względu na różnorodność oferowanych detektorów oraz coraz rosnącą liczbę producentów, problem szumów staje się jednym z podstawowych kryteriów oceny i wyboru detektora do danej aplikacji.

Autor dysertacji sformułował jedną tezę o brzmieniu: „**Zastosowanie zaawansowanych układów i metod korekcji wzajemnej sygnałów umożliwia istotną redukcję szumów własnych systemu do pomiaru napięcia i prądu szumów detektorów podczerwieni**”. Należy wspomnieć, że teza rozprawy doktorskiej powinna być oryginalna i nieoczywista. O ile pierwszy aspekt tezy, tj. jej oryginalność jest w pełni spełniony, to drugi może rodzić pewien niedosyt, szczególnie wśród specjalistów zajmujących się teorią i pomiarami szumów. Wydaje się, że uszczegółowienie tezy rozwiałoby wszelkie wątpliwości. Należy jednak podkreślić, że udowodnienie tezy w formie postawionej w rozprawie, jest bez wątpienia znaczącym osiągnięciem naukowym o dużej wartości praktycznej.

Autor dysertacji sformułował cele badawcze, które prowadzą do rozwiązania postawionego problemu, czyli opracowania, wykonania i przebadania niskoszumowego systemu pomiarowego fotonowych detektorów podczerwieni MWIR/LWIR o małej impedancji poniżej 1 k $\Omega$ . Bez wątpienia, osiągnięcie postawionych celów prowadzi do udowodnienia tezy i potwierdzenia, że mgr inż. Krzysztof Achtenberg jest specjalistą w dziedzinie technik szumowych elementów i systemów elektronicznych, w szczególności sensorów podczerwieni.

## 3. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Achtenberga jest wartościową pracą eksperymentalną i dotyczy analizy, projektowania i testowania niskoszumowych systemów pomiarowych do badań detektorów podczerwieni o małej wartości impedancji. Rozprawa ma dużą wartość praktyczną i może być podstawą do projektowania systemów pomiarowych współczesnych detektorów promieniowania i to nie tylko w zakresie podczerwieni.

Dobrym uzasadnieniem badawczego charakteru rozprawy są rozważania przedstawione w rozdziale 2.8, które ilustrują wpływ rezystancji detektora na całkowite szumy wejściowego toru analogowego i to zarówno dla pomiaru szumu napięciowego, jak i prądowego. Wydaje się, że problem szumów jest szczególnie wyraźny w układach detektorów fotoprzewodzących ze wzmacniaczami transimpedancyjnymi. Na podstawie wykresów na rys. 2.13, uważny czytelnik zauważy, że w układach transimpedancyjnych można optymalizować współczynnik szumów dobierając właściwie impedancję detektora dla stosowanego wzmacniacza. Pewne zdziwienie może budzić fakt, że wraz ze wzrostem transimpedancji, współczynnik szumów NF maleje. Sądzę, że problem ten byłby dobrym tematem do dyskusji podczas obrony.

Jako główne osiągnięcie naukowo-badawcze Doktoranta, uważam analizę szumową i badania eksperymentalne wybranych autorskich układów systemu pomiaru szumów, które przedstawiono w rozdziale 4. Omówiono i przedstawiono wyniki pomiarów funkcji gęstości widmowej szumów zasilacza programowalnego, dwukanałowych wzmacniaczy napięciowych i transimpedancyjnych oraz, co wydaje się ciekawym i innowacyjnym rozwiązaniem, dwukanałowego modułu wzmacniaczy ze sprzężeniami transformatorowymi dla detektorów

o impedancji na poziomie 10  $\Omega$ . Sprzężenia transformatorowe zapewniają skuteczną multiplikację impedancji źródła i dopasowują jej wartość do wzmacniacza. Niestety stosowanie transformatorów wymaga eliminacji składowej stałej, co najczęściej rozwiązuje się poprzez zastosowanie mostka Wheatstone'a. Ze względu na swoją strukturę mostek Wheatstone'a jest źródłem dodatkowych szumów. Doktorant zaproponował zastąpienie mostka pojemnością o dużej wartości w postaci supekondensatora, co uprościło budowę stopnia wejściowego układu pomiarowego, przy zachowaniu poprawnych charakterystyk szumowych toru pomiarowego.

Opracowany system wykonano i przebadano przy zastosowaniu referencyjnych źródeł szumu. Budowę systemu oraz wyniki przedstawiono w rozdziale 5, co jest niewątpliwie ważnym praktycznym osiągnięciem Doktoranta. Imponujące jest konfigurowalne stanowisko pomiarowe, które umożliwia prowadzenie badań w 5. trybach pracy. Można mierzyć szum napięciowy ze sprzężeniem pojemnościowym detektora z układem wejściowym. Dla detektorów o bardzo małej impedancji przewidziano pracę w trybie sprzężenia transformatorowego z mostkiem Wheatstone'a lub superkondensatorem. System umożliwia pomiary gęstości widmowej szumu prądowego w układzie dwukanałowego wzmacniacza transimpedancyjnego i z parą tranzystorów JFET na wejściu o sprzężeniu bezpośrednim bez stosowania metody korelacji wzajemnej. Przedstawione wyniki badań ilustrują ogrom prac, jakie wykonał Doktorant i potwierdzają jego umiejętności w zakresie przygotowania i prowadzenia prac eksperymentalnych. Niektóre z pomiarów trwały kilkadziesiąt minut. Ponadto, należy wspomnieć, że w celu osiągnięcia ostatecznego celu, czyli wyznaczenia funkcji gęstości widmowej sygnałów szumu, Kandydat opracował programy analizy widmowej w środowisku Matlab. Bardzo ważne, choć skrótowe dane konstrukcyjne stanowiska badawczego, które dotyczą ekranowania i redukcji zakłóceń radiowych i pochodzących od pola elektrycznego

i magnetycznego, przedstawiono na wstępie rozdziału 5. Autor zastosował innowacyjne rozwiązanie z ekranem o bardzo dużej wartości przenikalności magnetycznej. Bez tych środków ochrony nie byłby możliwy pomiar sygnałów szumów na poziomie nV i fA.

Na podkreślenie zasługują osiągnięcia publikacyjne Doktoranta, które przedstawił w bibliografii rozprawy. Mgr inż. Krzysztof Achtenberg jest współautorem 7. publikacji w czasopiśmie z listy JCR bezpośrednio związanych z tematyką rozprawy doktorskiej oraz 5. w innych czasopiśmie i materiałach konferencyjnych. Liczba 16. publikacji z obszaru optoelektroniki jest indeksowana w bazie WoS, a wskaźnik Hirscha Kandydata do stopnia naukowego wynosi 5. Łączna liczba cytowań (bez autocytowań) to 52 (WoS). Bez wątplenia można stwierdzić, że wskaźniki bibliometryczne mgr inż. Krzysztofa Achtenberga – Kandydata do stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych, są ponadprzeciętne.

Resumując, za najważniejsze osiągnięcie naukowe Doktoranta uważam opracowanie, wykonanie i przebadanie autorskiego systemu do pomiaru gęstości widmowej i wartości średniokwadratowej szumów współczesnych, fotonowych detektorów podczerwieni o impedancji poniżej 1 k $\Omega$ . Przedstawiona do oceny rozprawa i zawarte w niej wyniki badań potwierdzają, że Autor samodzielnie rozwiązał postawiony problem naukowy oraz posiada szeroką wiedzę i umiejętności do prowadzenia eksperymentów w obszarze miernictwa szumów detektorów podczerwieni.

#### 4. Uwagi ogólne i dyskusyjne

Rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Achtenberga napisana jest niemal bezbłędnie. Drobne i nieliczne pomyłki spowodowane były zapewne pośpiechem lub niedokładną autokorektą rozprawy.

1. Proszę o krótką dyskusję i potwierdzenie lub zaprzeczenie wraz z uzasadnieniem stwierdzenia, że wraz ze wzrostem transimpedancji, własne szumy prądowe wzmacniacza maleją. Taki wniosek można sformułować na podstawie rys. 2.13 na str. 32 w rozdziale 2.8.
2. Autor rozprawy często stosuje stwierdzenie „odejmowanie szumów” (np. na str. 34), co jest skrótem myślowym, gdyż w istocie chodzi o odejmowanie funkcji gęstości widmowych mocy lub wartości średniokwadratowych szumu. Z definicji, gęstości widmowe mocy są funkcjami o wartościach dodatnich. W kilku miejscach rozprawy pojawiają się znaki minus przy gęstościach widmowych mocy, np. w równaniach (2.37), (2.38), (4.9) i (4.10), co budzi wątpliwość, czy uzyskane wyniki są poprawne. Proszę Doktoranta o dodatkowy komentarz, jak wyznaczone były charakterystyki widmowe szumów metodą korelacji wzajemnej sygnałów w układach dwukanałowych i czy zaproponowane metody szacowania poziomu szumów nie prowadziły do błędnych wyników.
3. W równaniu (2.32) zapewne chodzi o gęstość widmową mocy szumu prądowego  $S_{i12}$ , a nie szumu napięciowego  $S_{u12}$ .
4. W równaniach (4.3) i (4.4), które pozwalają wyznaczyć wartości skuteczne prądu i napięcia szumów na podstawie odpowiednich funkcji gęstości widmowych mocy zabrakło pasma częstotliwości  $\Delta f$ , dla którego określono wartości RMS.

Przedstawione uwagi i komentarze do dyskusji podczas obrony nie wpływają na moją pozytywną i wysoką ocenę recenzowanej rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Achtenberga.

#### 5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Achtenberga pt. „**Układy oraz metody do pomiaru charakterystyk szumowych detektorów podczerwieni o małych impedancjach**” zawiera oryginalne wyniki prac badawczych i stanowi potwierdzenie samodzielnego rozwiązania ważnego problemu naukowego, jakim jest opracowanie i praktyczna walidacja nowych metod redukcji szumów systemów do wyznaczania charakterystyk szumowych detektorów podczerwieni. Autor wykazał się dużą wiedzą w tematyce rozprawy, znajomością literatury naukowej oraz umiejętnościami projektowania systemów pomiarowych o niskim poziomie szumów własnych. Należy podkreślić, że rozprawa doktorska ma duże znaczenie praktyczne i może być przewodnikiem dla innych badaczy przy projektowaniu systemów pomiarowych dla najnowszych detektorów podczerwieni.

Tematyka rozprawy mgr inż. Krzysztofa Achtenberga oraz uzyskane wyniki prac badawczych pozwalają zakwalifikować ją jako dysertację wykonaną w Dyscyplinie Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim zawarte w aktualnych przepisach prawa i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Krzysztofa Achtenberga do publicznej obrony.

Rozprawa doktorska mgra inż. Krzysztofa Achtenberga spełnia z nadmiarem kryteria kwalifikujące do wyróżnienia.

Kandydat:

- przedstawił rozprawę doktorską, w której rozwiązał ważny problem naukowy dotyczący pomiaru szumów fotonowych detektorów podczerwieni pracujących w różnych konfiguracjach,
- jest współautorem 7. publikacji w czasopismach z listy JCR związanych z dysertacją,
- jest współautorem udzielonego patentu, w którym zaproponowano m.in. zastosowanie detektora podczerwieni w systemach komunikacji optycznej w otwartej przestrzeni,
- opracował, wykonał i zweryfikował w praktycznym działaniu autorskie stanowisko badawcze do pomiaru szumów detektorów fotonowych, które stanowi unikatowe rozwiązanie techniczne i może być stosowane w różnych pracach badawczych związanych z detekcją promieniowania podczerwonego.

W przypadku wyróżniającego się przebiegu obrony oraz jednomyślnej decyzji Komisji doktorskiej o nadaniu stopnia naukowego, proponuję Wysokiej Radzie rozważyć możliwość wyróżnienia rozprawy doktorskiej mgra inż. Krzysztofa Achtenberga.

*Roguski Marek*