

Kraków 07.01.2025r.

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Wincza
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Instytut Elektroniki
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

**KWESTIONARIUSZ – RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY NAUKOWEJ DYSCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA**

Tytuł rozprawy: Accurate Methods of Characterization of Conductive Layers and Dielectric Samples at Millimeter-Wave and THz Frequencies

Autor rozprawy: Jerzy Cuper

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy / cel i teza rozprawy/ i czy zostało dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Praca mgr. inż. Jerzego Cupra zatytułowana „Accurate methods of characterization of conductive layers and dielectric samples at millimeter-wave and THz frequencies” dotyczy zagadnienia zastosowania wnęk Fabryego-Perota do pomiarów niskostratnych metali w paśmie fal milimetrowych oraz materiałów dielektrycznych w paśmie fal terahercowych. Zagadnienie pomiarów przenikalności elektrycznej, w tym tangensa kąta strat w przypadku materiałów dielektrycznych oraz przewodności przewodników jest niezwykle ważne z punktu widzenia wciąż rozwijających się systemów telekomunikacyjnych. Pomimo faktu, że metody te są już dobrze rozwinięte i stosowane w zakresie niższych częstotliwości mikrofalowych, pomiar własności materiałów w zakresie fal milimetrowych i subterahercowych jest niezwykle istotny z punktu widzenia dalszego rozwoju systemów telekomunikacyjnych, które wykorzystują coraz wyższe częstotliwości. Z tego względu należy uznać, że tematyka podejmowana w ramach rozprawy doktorskiej jest ważna i aktualna. Praca stawia sobie dwa główne cele: opracowanie metod wykorzystujących rezonator Fabry-Perot do pomiarów przewodności metali w paśmie fal milimetrowych oraz metod wykorzystujących ten rezonator do pomiarów zespolonej przenikalności elektrycznej materiałów dielektrycznych. Praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny, przy czym należy podkreślić znaczącą liczbę wykonanych pomiarów, i składa się z siedmiu rozdziałów włączając w to wstęp i podsumowanie oraz pięciu dodatków. Rozdział 2 stanowi wprowadzenie do zagadnień pomiarów przewodności i przenikalności elektrycznej materiałów, opisuje znane metody rezonansowe, przedstawia wnękę Fabry-Perot oraz stan wiedzy na temat spektroskopii materiałowej w paśmie terahercowym, a kończy się przedstawieniem potencjalnych problemów związanych z wykorzystaniem rezonatora Fabry-Perot w zakresie fal terahercowych. Rozdział 3 poświęcony jest zagadnieniu pomiarów przewodności metali w paśmie fal milimetrowych z wykorzystaniem wnęki Fabry-Perot, a także przedstawia źródła niepewności pomiaru z wykorzystaniem tej metody. Rozdział 4 podejmuje analogiczny problem w odniesieniu do pomiarów zespolonej przenikalności elektrycznej materiałów dielektrycznych w zakresie fal terahercowych. Rozdział 5 opisuje wykorzystane stanowisko pomiarowe i prezentuje krok po kroku zastosowane metody pomiaru zarówno przewodności jak i zespolonej przenikalności elektrycznej. W rozdziale 6 zebrane są wyniki pomiarów wzbogacone o charakterystyki spektralne pustych wnęk wykorzystywanych w obu



metodach. Rozdział ten przedstawia również nową metodę sprzęgania z wnęką Fabry-Perot oraz wyniki pomiarów popularnych materiałów niskostratnych, tj. metali i folii dielektrycznych. Rozprawa uzupełniona jest dodatkami przedstawiającymi m.in. metody referencyjne wykorzystane do porównania otrzymanych wyników pomiarów.

Cel pracy został jasno postawiony, a zagadnienie naukowe będące przedmiotem rozprawy dobrze sformułowane i nakreślone na tle literatury światowej. Na uwagę zasługuje również duża liczba pracochłonnych pomiarów, w tym pomiarów wykonanych znanymi metodami w celu porównania otrzymanych wyników.

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

Bibliografia obejmuje 142 pozycje, w znacznej części obejmujące artykuły naukowe opublikowane na przestrzeni ostatnich lat w uznanych czasopismach naukowych. Świadczy to o dobrej znajomości stanu wiedzy w tematyce rozprawy. Autor rozprawy odnosi się również do poprzednich prac opublikowanych w zespole naukowym, w którym prowadzi badania, wskazując wyraźnie, które rozwiązania wykorzystuje w swojej pracy, a które są jego autorskimi osiągnięciami. W wielu przypadkach prezentujących wyniki pomiarów Autor odnosi się do znanych metod, przedstawia porównanie otrzymanych wyników z wynikami prezentowanymi w innych pracach, wyciągając odpowiednie wnioski. Podsumowując: analiza źródeł literaturowych oraz przedstawiony w rozprawie stan wiedzy nie budzi żadnych zastrzeżeń.

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

Celem pracy było opracowanie metod pomiaru przewodności metali oraz zespolonej przenikalności elektrycznej materiałów dielektrycznych z wykorzystaniem wnęki Fabry-Perot w zakresie fal milimetrowych oraz subterahercowych. Zagadnienie to zostało postawione we wstępie rozprawy i jasno zdefiniowane. Przedstawione w rozprawie wyniki pomiarów otrzymane z wykorzystaniem opracowanych metod wraz z przedstawioną analizą niepewności otrzymanych wyników oraz porównanie ich z wynikami opublikowanymi w literaturze światowej świadczą o tym, że Autor rozwiązał postawione zagadnienie naukowe oraz użył właściwych do tego celu metod. Dodatkowo należy podkreślić, że uzyskane wyniki są unikatowe nie tylko ze względu na zakres częstotliwości, w którym zostały wykonane pomiary, ale także ze względu na uzyskaną dokładność pomiaru uzyskaną z wykorzystaniem opracowanych metod pomiarowych.

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?

Do autorskich i oryginalnych osiągnięć rozprawy, należy zaliczyć przede wszystkim:

- opracowanie metody pomiaru przewodności metali z wykorzystaniem rezonatora Fabry-Perot pozwalającej na pomiar przewodności w zakresie fal milimetrowych,
- wyznaczenie i scharakteryzowanie źródeł niepewności pomiaru opracowanej metody pomiaru przewodności zapewniającej dokładność 7,5% oraz 5% dla przewodników o odpowiednio wyższej i niższej przewodności,

V.12

- opracowanie stanowiska pomiarowego i wnęki rezonansowej zapewniającej dobroć rzędu 140k w zakresie fal milimetrowych, co pozwoliło na powtarzalny pomiar przewodności o dużej dokładności,
- opracowanie wnęki pracującej w paśmie 500 GHz o dużej dobroci i pomijalnie małych stratach promieniowania do zastosowań w pomiarach przenikalności elektrycznej,
- wyznaczenie i scharakteryzowanie źródeł niepewności pomiaru opracowanej metody pomiaru przenikalności elektrycznej oraz źródeł pogarszania się dobroci rezonatora z uwzględnieniem wpływu mechanizmu sprzężenia z wnęką oraz tłumienia atmosferycznego,
- opracowanie procesu pomiaru zespolonej przenikalności elektrycznej niskostratnych materiałów dielektrycznych w paśmie terahercowym,
- opracowanie metody sprzężenia z rezonatorem Fabry-Perot z wykorzystaniem promieniowania przez antenę,
- przeprowadzenie pomiarów niskostratnych materiałów dielektrycznych i porównanie ich z wynikami otrzymanymi metodą spektrometrii wykazując zwiększenie dokładności pomiarów o rząd w paśmie subterahercowym.

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

Rozprawa napisana jest w języku angielskim w sposób jasny i przejrzysty. Zaletą przedstawionego opisu i prezentacji otrzymanych wyników jest krótkie i zwięzłe wprowadzenie w tematykę rozprawy oraz zestawienie otrzymanych wyników pomiarów z innymi metodami znanymi w literaturze światowej. W pracy można doszukać się dość dużej ilości drobnych błędów redakcyjnych, literówek, etc. Szata graficzna i prezentacja wyników pomiarów nie budzi większych zastrzeżeń, niektóre opisy osi lub rysunki mogłyby być większe, co zwiększyłoby ich czytelność.

6. Jakie są słabe strony i jej główne wady?

Praca dotyczy zagadnień związanych z pomiarem przewodności metali i przenikalności elektrycznej materiałów dielektrycznych w zakresie fal milimetrowych i subterahercowych. Rozprawa doktorska ma jasno zdefiniowany cel, napisana jest w sposób zwięzły i przejrzysty i zasadniczo nie posiada znaczących słabych stron. Można wskazać jedynie drobne uchybienia oraz zadać dodatkowe pytania, które uzupełnią treść zagadnień prezentowanych w rozprawie:

- Praca zawiera dość znaczną liczbę drobnych błędów redakcyjnych i literówek, których można się doszukać czytając rozprawę. Nie wpływa to jednakże na przejrzystość prezentowanych treści, więc nie ma potrzeby ich cytowania.
- Prezentacja niektórych rysunków powinna być bardziej czytelna szczególnie w rozdziale 6, zwłaszcza w momencie, gdy prezentowanych jest więcej krzywych/wyników pomiarów na jednym wykresie.
- W pracy przedstawiona jest metoda pomiaru przewodności w zakresie fal milimetrowych oraz przenikalności elektrycznej w zakresie subterahercowym. Czy możliwy jest pomiar przewodności w paśmie subterahercowym i jakie problemy wiązałyby się z tym pomiarem oraz jakiej dokładności pomiaru można by oczekiwać?

- W jaki sposób zwiększenie mocy źródeł fal terahercowych może poprawić dokładność mierzonych wartości w tym zakresie częstotliwości? W jakim stopniu zakres dynamiki pomiaru (moc źródła, czułość detektorów) ogranicza możliwości pomiarowe?
- Na końcu rozdziału 6 Autor wymienia dwie możliwości poprawy dokładności pomiaru przenikalności elektrycznej w zakresie fal terahercowych: zwiększenie dynamiki (odnoszące się do pytania wyżej) oraz zmniejszenie tłumienia atmosferycznego. Czy wpływ tłumienia atmosferycznego mógłby być zminimalizowany poprzez zwiększenie dynamiki pomiaru? Czy Autor widzi inne możliwości poprawy niż te wymienione, które mogą poprawić dokładność pomiaru?

Przedstawione wyżej uwagi edytorskie nie mają jednakże wpływu na zawartość merytoryczną pracy, a postawione pytania mają jedynie charakter dyskusyjny i również nie obniżają wartości rozprawy i prezentowanych wyników badań. Zebrane wyniki badań stały się przedmiotem publikacji, wśród których wyróżnia się publikacja w czasopiśmie *Measurement*, która jest ściśle związana z tematem rozprawy, a Autor rozprawy jest pierwszym jej autorem, co dodatkowo podnosi wartość prezentowanych wyników i całej rozprawy.

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

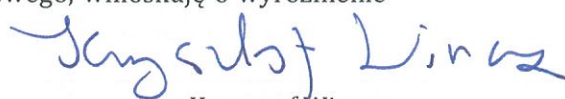
Przedstawiona rozprawa doktorska i otrzymane wyniki są cenne z punktu widzenia wciąż rozwijających się systemów telekomunikacyjnych, które wykorzystują coraz wyższe zakresy częstotliwości. Opracowane metody pomiaru przewodności metali w zakresie fal milimetrowych oraz zespolonej przenikalności elektrycznej w zakresie fal subterahercowych są istotne z punktu widzenia projektowania układów i urządzeń pracujących w tych zakresach częstotliwości, gdyż wartości przewodności i stałej dielektrycznej stanowią punkt wyjścia przy projektowaniu takich urządzeń i systemów. Z tego względu należy uznać, że praca stanowi istotny wkład w rozwój nauk inżynieryjno-technicznych, a opracowane metody pomiaru mają duże praktyczne zastosowanie.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

Pracę niewątpliwie można zaliczyć jako spełniającą wymagania z wyraźnym nadmiarem.

9. Wniosek końcowy:

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana praca doktorska mgr. inż. Jerzego Cupra stanowi oryginalny wkład w rozwój dyscypliny elektronika. Autor osiągnął założone cele pracy, wykazał się niezbędną wiedzą i warsztatem naukowym wymagany do stopnia doktora nauk technicznych. Otrzymane wyniki pomiarów są właściwie przedstawione i skomentowane. Rozprawa doktorska z nadmiarem spełnia wymagania stawiane przez odpowiednią ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym i z tego względu wnioskuję o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora. Biorąc pod uwagę oryginalność proponowanego rozwiązania, ilość przedstawionych analiz i wniosków oraz przede wszystkim złożoność zagadnienia, którego rozwiązanie wymagało bardzo dużej liczby pracochłonnych pomiarów i finalnie całokształt dorobku naukowego, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.


Krzysztof Wincza