

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

DZIEKAN I RADA WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

zawiadamiają o

PUBLICZNEJ OBRONIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Tomasza Karpisza

która odbędzie się w trybie zdalnym w dniu 21 września 2020 r. o godz. 10.00

Tytuł rozprawy doktorskiej: „**Novel Methods for Characterization of Dielectric Materials at Microwave and Millimeter-wave Frequencies**”

promotor: dr hab. inż. Bartłomiej Salski, prof. uczelni, Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej

recenzenci: prof. dr hab. inż. Krzysztof Wincza, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
prof. dr hab. inż. Michał Mrozowski, Politechnika Gdańska.

Na stronie internetowej wydziału www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje znajdują się streszczenie rozprawy oraz recenzje, jak również dostęp do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Z treścią rozprawy można zapoznać się na stronie internetowej:

<https://drive.google.com/file/d/1X-oSmBKmanrA4i6pT3EWwb0zCMGglpks/view?usp=sharing>

Sposób uczestniczenia w publicznej obronie:

YouTube:

<https://youtu.be/AMP8iC5Ik7w> (główne)

<https://youtu.be/K5m2FjiLUks> (zapasowe #1) <https://youtu.be/gQRJaKdGVkw> (zapasowe #2)

<https://youtu.be/n5Q9dDjnnTw> (zapasowe #3)

Dziekan



prof. dr hab. inż. Michał Malinowski

Rodzaj pracy: rozprawa doktorska

Mgr inż. Tomasz Karpisz

Promotor to dr hab. inż. Bartłomiej Salski

Tytuł w języku polskim:

Nowe metody charakteryzacji materiałów dielektrycznych w zakresie mikrofalowym oraz fal milimetrowych

Streszczenie

Rozprawa poświęcona jest rozwojowi jednowymiarowego, skalarnego, wielowarstwowego, elektromagnetycznego modelu otwartego rezonatora Fabry-Perot wykorzystanego do pomiarów własności elektromagnetycznych elektrycznie cienkich warstw dielektryków na częstotliwości od 20 do 50 GHz.

W rozdziale 2 opisane zostały elektromagnetyczne własności dielektryków oraz najczęściej używane metody stosowane do ich charakteryzacji. W szczególności opisane zostały dwie metody używane do otwartych rezonatorów Fabry-Perota. Dokładniejsza metoda użyta będzie jako porównanie dla metody opisanej w tej pracy. Została także opisana teoria wiązki Gaussowskiej ponieważ posłuży ona do stworzenia nowego modelu Otwartego rezonatora Fabry-Perot.

Rozdział 3 został poświęcony na opisanie wkładu własnego rozprawy. Jako pierwszy przedstawiony został koncept transformacji konforemnej z kartezjańskiego do gaussowskiego układu współrzędnych, pozwalającego na stworzenie modelu elektromagnetycznego otwartego rezonatora Fabry-Perot z płaskimi lustrami. Następnie, opisano redukcję do jednowymiarowego skalarnego modelu wraz z omówieniem dyskretyzacji przestrzennej. Model ten zostanie użyty do obliczenia spektrum impedancji falowej dla rezonatora. Charakterystyka impedancji określa częstotliwości rezonansowe rodzajów z poprzecznym polem elektrycznym i magnetycznym. Rozdział zakończony jest opisem procedury wyznaczania przenikalności elektrycznej oraz tangensa konta strat próbki w rezonatorze za pomocą stworzonego modelu.

W rozdziale 4 przedstawiono weryfikację eksperymentalną zaproponowanego modelu rezonatora oraz zaproponowanej metody charakteryzacji. Jako pierwsza zaprezentowana została konstrukcja mechaniczna rezonatora oraz układ pomiarowy. Następnie przedstawiono pomiary pięciu próbek, na podstawie czego określono dokładność metody. Jednocześnie przeanalizowano kilka własności układu pomiarowego takich jak powtarzalność, wpływ niepewności pomiaru grubości próbki oraz zróżnicowanie grubości na niepewność pomiarową, możliwość pomiaru anizotropii w płaszczyźnie próbki, oraz możliwość wykorzystania układu pomiarowego na częstotliwościach do 110 GHz. Praca kończy się opisem ograniczeń zaproponowanej metody.

Tytuł po angielsku: "Novel methods for characterization of dielectric materials at microwave and millimeter-wave frequencies"

Streszczenie po angielsku:

This dissertation is focused on the development of a one-dimensional scalar multi-layer electromagnetic model of a Fabry-Perot open resonator (FPOR) and its use in the measurement of electromagnetic (EM) properties of electrically thin dielectric sheet materials in frequencies from 20 to 50 GHz. In Chapter 2, the electromagnetic properties of dielectrics and the methods commonly used in their characterization are described. In particular, two techniques that have been used for FPOR are addressed and the more accurate one will be used later as a reference to the results obtained with the aid of the method developed in this dissertation. The Gaussian beam theory is also described in details in this Chapter as it will be used later in this dissertation to develop a new EM model of the FPOR. In Chapter 3, the original contribution of the study presented in this dissertation is described. Firstly, the concept of conformal transformation from Cartesian to Gaussian coordinate system that allows to develop an EM model of the FPOR with planar mirrors is explained. Secondly, the reduction of the model to a one-dimensional (1D) scalar problem is proposed and its discretization is presented in details. Subsequently, the model is used to compute the spectrum of a chosen figure of merit for the FPOR, which is wave impedance, in order to determine the resonance frequencies of selected transverse EM (TEM) modes. The chapter ends with a description of the procedure of using the proposed EM model in the extraction of the dielectric constant and loss tangent of a sample inserted in the FPOR.

In Chapter 4, the proposed EM model and the corresponding characterization method are validated experimentally. Firstly, the mechanical construction of the resonator and the measurement setup are described in details. Next, the measurement results of five samples are presented and the accuracy of the method is evaluated. Subsequently, several properties of the proposed measurement system are investigated, such as repeatability, the impact of the thickness variation of a sample and the uncertainty of the measurement results, the capability of measuring in-plane anisotropy, and the possibility of extending measurement up to 110 GHz. Finally, the limitations of the proposed method are discussed.

Kraków 26.06.2020r.

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

**KWESTIONARIUSZ - RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY NAUKOWEJ DISCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA**

**Tytuł rozprawy: Novel Methods for Characterization of Dielectric Materials
at Microwave and Milimeter-wave Frequencies**

Autor rozprawy: Tomasz Karpisz

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

Praca mgr. inż. Tomasza Karpisza zatytułowana „Novel Methods for Characterization of Dielectric Materials at Microwave and Milimeter-wave Frequencies” poświęcona jest opracowaniu jednowymiarowego, skalarne i wielowarstwowego modelu elektromagnetycznego otwartego rezonatora Fabry-Perot do zastosowania w pomiarach przenikalności elektrycznej oraz stratności cienkich materiałów dielektrycznych w zakresie fal milimetrovych. Zagadnienie pomiarów własności elektrycznych, a w szczególności pomiaru stałej dielektrycznej oraz tangensa kąta strat jest zagadnieniem złożonym zwłaszcza w kontekście bardzo cienkich niskostratnych laminatów mikrofalowych. Należy również podkreślić, że problem podejmowany w rozprawie doktorskiej jest aktualny i ważny zwłaszcza w kontekście wciąż rozwijanych systemów telekomunikacyjnych i radarowych, dla których alokowane są coraz wyższe zakresy częstotliwości, tj. w zakresie fal milimetrovych i subterahercowych. Główna teza rozprawy została sformułowana we wstępie pracy i stawia hipotezę, że transformacja konforemna pozwala na opracowanie jednowymiarowego, skalarne i wielowarstwowego modelu elektromagnetycznego otwartego rezonatora Fabry-Perot. Teza ta jest wsparta trzema stwierdzeniami, których prawdziwość jest dowodzona w treści rozprawy.

Praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny i składa się z 5 rozdziałów włączając w to wstęp oraz podsumowania. Rozdział drugi stanowi wprowadzenie do tematyki metod pomiaru własności elektrycznych materiałów dielektrycznych, krótko charakteryzując znane w literaturze techniki pomiarowe. Rozdziały trzeci i czwarty stanowią zasadniczą część rozprawy. W rozdziale trzecim przedstawiony jest proponowany model otwartego rezonatora Fabry-Perot opracowany poprzez zastosowanie transformacji konforemnej z kraterzańskiego do Gaussowskiego układu współrzędnych, co pozwala na uproszczenie modelu rezonatora z

trójwymiarowego do warstwowego jednowymiarowego. W rozdziale tym przedstawiona jest również koncepcja geometrii opracowywanego rezonatora przeznaczanego do pomiarów cienkich materiałów dielektrycznych. Rozdział kończy prezentacja metody wyznaczania stałej dielektrycznej oraz tangensa kąta strat na podstawie pomiarów. W rozdziale czwartym przedstawione są wyniki badań eksperymentalnych. Przedstawiony jest opis konstrukcji wykonanego rezonatora oraz wyniki pomiarów pięciu próbek, na podstawie których wyznaczono dokładność proponowanej metody. Dodatkowo, w rozdziale tym dokonano analizy wpływu dokładności pomiaru grubości próbki oraz zróżnicowania grubości na uzyskiwaną niepewność pomiarową. Dodatkowo, przedstawiona jest możliwość pomiaru anizotropii w płaszczyźnie próbki, a także wykorzystanie układów pomiarowego w zakresie wyższych fal milimetrowych. Rozdział kończy opis ograniczeń proponowanej metody. Rozprawę kończy podsumowanie, w który zarysowane są najważniejsze osiągnięcia rozprawy dowodzące prawdziwości postawionej tezy oraz prawdziwości postawionych w wstępie pracy stwierdzeń pomocniczych.

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

Rozprawa doktorska została dobrze zarysowana na tle literatury światowej w kontekście znanych metod pomiarowych wykorzystywanych do wyznaczania parametrów elektrycznych dielektryków. Wykaz literatury zawiera 111 pozycji, wśród których znajdują się zarówno starsze fundamentalne prace dotyczące tematyki rozprawy opisujące podstawowe techniki pomiarów parametrów elektrycznych, jak również aktualne artykuły opisujące najnowsze proponowane metody i rozwiązania układowe systemów opracowanych dla celów pomiarów przenikalności elektrycznej i tangensa kąta strat. Załączony przegląd literatury potwierdza dobrą znajomość stanu wiedzy w tematyce rozprawy. Zaletą rozprawy jest również krótkie, jasne i przejrzyste wprowadzenie w tematykę poruszana w rozprawie.

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

Celem pracy było opracowanie jednowymiarowego, skalarne i wielowarstwowego modelu elektromagnetycznego otwartego rezonatora Fabry-Perot do zastosowania w pomiarach przenikalności elektrycznej oraz stratności cienkich materiałów dielektrycznych w zakresie fal milimetrowych. Cel ten został osiągnięty, zaproponowany model został szczegółowo opisany w rozdziale trzecim. Przedstawiony model oraz wyniki analiz teoretycznych pokazują, że Autor bardzo dobrze opanował niezbędny aparat matematyczny, który został wykorzystany do stworzenia odpowiedniego modelu teoretycznego rezonatora. Dodatkowo, przedstawione w rozdziale czwartym wyniki badań eksperymentalnych

potwierdzają słuszność opracowanego modelu, potwierdzają umiejętności Autora w zakresie wykonywania układów i systemów mikrofalowych i dowodzą prawidłowości wykonanych obliczeń i analiz.

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 oryginalnych osiągnięć Autora rozprawy, można zaliczyć przede wszystkim:

- Zaproponowanie jednowymiarowego, skalarnego, wielowarstwowego modelu otwartego rezonatora Fabry-Perot, w którym dzięki zastosowaniu transformacji konforemnej uzyskuje się znaczne uproszczenie obliczeń, a przez to znaczne skrócenie czasu obliczeniowego.
- Wykorzystanie opracowanego modelu otwartego rezonatora Fabry-Perot do wyznaczania własności elektrycznych, tj. przenikalności elektrycznej oraz tangensa kąta strat cienkich warstw dielektrycznych w zakresie fal milimetrowych.
- Opracowanie zautomatyzowanego systemu, umożliwiającego identyfikację rodzajów fal oraz precyzyjne pozycjonowanie próbek dielektrycznych, do zastosowań w pomiarach własności elektrycznych cienkich dielektryków.
- Wykonanie badań eksperymentalnych, które potwierdzają prawdziwość postawionych tez oraz słuszność opracowanego modelu.
- Wykonanie analizy niepewności mierzonych parametrów elektrycznych próbek dielektrycznych, powtarzalności oraz wskazanie ograniczeń opracowanej metody na podstawie przeprowadzonych pomiarów.

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 bardzo zwięzły i przejrzysty prezentując najważniejsze osiągnięcia i wnioski. Zawiera krótkie wprowadzenie w tematykę badawczą prezentując obecny stan wiedzy oraz najważniejsze rozwiązania dotyczące technik wykonywania pomiarów parametrów elektrycznych. Uwagę zwraca niewielka ilość drobnych literówek oraz przejrzystość rysunków prezentujących poszczególne wyniki analiz teoretycznych i pomiarów wykonanych układów.

6. Jakie są słabe strony i jej główne wady?

Praca poświęcona jest opracowaniu jednowymiarowego, skalarnego i wielowarstwowego modelu elektromagnetycznego otwartego rezonatora Fabry-Perot do zastosowania w pomiarach przenikalności elektrycznej oraz stratności cienkich materiałów dielektrycznych w zakresie fal milimetrycznych. Rozprawa doktorska nie zawiera zasadniczych wad, gdyż w zwięzły sposób formułuje cel, prezentuje otrzymane wyniki i jest starannie zredagowana. Jednakże można wskazać dodatkowe pytania, których wyjaśnienie uzupełni treść prezentowaną w rozprawie, a mianowicie:

- W pracy przedstawiona jest zmierzona zależność dobroci rezonatora od częstotliwości. Dla wyższego zakresu częstotliwości dobroć jest mniejsza, a powody tego spadku są podane w pracy. Czy można zaprojektować tak rezonator, żeby zwiększyć dobroć dla wyższego zakresu fal milimetrycznych (70-110 GHz), czy raczej należałoby zaprojektować dedykowany rezonator dla tego zakresu częstotliwości?
- W rozdziale 4.3.5 Autor stwierdza, że mieralne wartości tangensa kąta strat próbek dla zakresu częstotliwości 50-110 GHz wynosi 10^{-4} i wartość ta może zostać poprawiona. W jaki sposób można osiągnąć niższe poziomy mieralnych wartości?
- Mierzalna wartość tangensa kąta strat zależy od grubości i względnej przenikalności elektrycznej próbki. Czy można te dwie wartości powiązać i wyznaczyć zakres mieralnych wartości tangensa kąta strat? Podobnie ja to zostało zrobione w przypadku przenikalności elektrycznej (rys. 63).

Przedstawione wyżej uwagi mają charakter jedynie dyskusyjny i nie można ich traktować jako słabe strony rozprawy doktorskiej, których nie znajdują. Należy podkreślić, że zagadnienia będące przedmiotem rozprawy były przedmiotem dobrych publikacji w tym publikacji w czasopiśmie IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, co dodatkowo podnosi wartość naukową rozprawy.

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

Przedstawiona praca stanowi istotny wkład w rozwój metod pomiarowych parametrów elektrycznych takich jak stała dielektryczna i tangens kąta strat. Stanowi istotne uzupełnienie znanych metod pomiarowych zwłaszcza w kontekście potrzeby pomiarów cienkich dielektryków w zakresie fal milimetrycznych. Opracowany model otwartego rezonatora Fabry-Perot został z powodzeniem zastosowany w zautomatyzowanym stanowisku pozwalającym na wyznaczenie parametrów elektrycznych dielektryków, a otrzymane wyniki pomiarów są zgodne z pomiarami referencyjnymi i charakteryzują się stosunkowo małą niepewnością pomiarów. Z tego względu należy uznać, że przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych jest duża, a opracowane systemy mają potencjał wdrożeniowy.

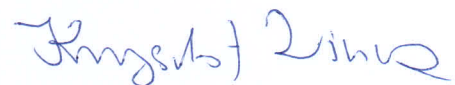
8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

Pracę niewątpliwie można zaliczyć jako: wybitnie dobra zasługująca na wyróżnienie.

9. Wniosek końcowy:

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca stanowi oryginalny wkład w rozwój dyscypliny elektronika. Mgr inż. Tomasz Karpisz dowiódł postawionej we wstępie rozprawy tezy, osiągnął zamierzony cel rozprawy i wykazał się niezbędną wiedzą wymaganą dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych. 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 nadania stopnia doktora. Biorąc pod uwagę staranność przygotowania rozprawy, oryginalność proponowanego rozwiązania oraz całokształt dorobku naukowego wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

Krzysztof Wincza



Gdańsk, 5.08.2020

prof. dr hab. inż. Michał Mrozowski
Katedra Inżynierii Mikrofalowej i Antenowej
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Karpisza
pt.: „Novel methods for characterization of dielectric materials
at microwave and millimeter-wave frequencies”

Charakterystyka rozprawy

Rozprawa dotyczy pomiarów własności dielektrycznych materiałów w pasmie milimetrowym z wykorzystaniem rezonatora Fabry-Perot (F-P). Podstawowym celem rozprawy było stworzenie nowego, prostego, lecz równocześnie bardziej dokładnego elektrodynamicznego modelu matematycznego pozwalającego wyznaczyć częstotliwości rezonansowe rezonatora F-P obciążonego próbką dielektryczną oraz weryfikacja tego modelu w praktycznym nowym układzie pomiarowym zaprojektowanym i skonstruowanym zgodnie z założeniami modelu. Drugim celem było opracowanie procedur kalibracji, justowania i pomiarów umożliwiających daleko posuniętą automatyzację pomiarów własności dielektrycznych materiałów w szerokim pasmie częstotliwości (20-50GHz z możliwością rozszerzenia pasma do 110 GHz).

Doktorant zaproponował nowe podejście do analizy problemu pozwalające uzyskać proste równanie charakterystyczne dla układu pomiarowego złożonego z otwartego rezonatora F-P, w którym umieszczona została cienka warstwa materiału dielektrycznego. Złożony wektorowy trójwymiarowy problem brzegowy został w pomysłowy sposób sprowadzony do skalarnego zagadnienia jednowymiarowego, co stanowi znakomite uproszczenie i przy tym, jeśli tylko warstwa mierzonego materiału jest dostatecznie cienka, nie odbywa się kosztem dokładności.

Doktorant stawia następującą tezę:

1. Zastosowanie transformacji konforemnej pozwala utworzyć model elektromagnetyczny rezonatora F-P zawierającego cienkie warstwy materiału w postaci jednowymiarowego skalarnego równania charakterystycznego.

Dodatkowo sformułowane są następujące tezy pomocnicze:

1. Zaproponowany model można zastosować do badania właściwości cienkich warstw materiałów w zakresie od 20 do 50 GHz.
2. System pomiarowy skonstruowany w tym celu może dokonywać pomiarów automatycznie dzięki połączeniu wiedzy o właściwościach rezonatora F-P z adaptacyjnym systemem identyfikacji i śledzenia rezonansu.
3. Zmiana profilu zwierciadeł ze sferycznego na gaussowski pozwala uzyskać większą zgodność pomiaru z przewidywaniami zaproponowanego modelu elektromagnetycznego.

Tezy uważam za prawidłowe i nietrywialne, odpowiednie dla pracy naukowej na poziomie doktorskim.

Rozprawa składa się pięciu rozdziałów i jednego dodatku. Wprowadzenie, bardzo krótkie, określa cel pracy i podaje przyczyny, dla których temat został podjęty – co prawda rezonator F-P jest systemem pomiarowym znanym od dziesięcioleci, jednak niezbyt często stosowanym rozwiązaniem w pomiarach własności fizycznych materiałów. Doktorant zauważa, że jest kilka przyczyn tego stanu rzeczy, m.in. ograniczona dokładność istniejących modeli matematycznych, wielorodzajowa praca rezonatora i trudność w identyfikacji rodzajów pola, a także złożoność oraz czasochłonność samego procesu pomiarowego, równocześnie zwracając uwagę na unikatową dla rezonatora F-P możliwość dokonania szerokopasmowych pomiarów w zakresie fal milimetrowych i submilimetrowych podłoży dla układów mikrofalowych. W tej części sformułowane są też cele i tezy rozprawy.

Rozdział drugi przedstawia analizę stanu wiedzy w zakresie pomiarów własności dielektrycznych materiałów z podziałem na metody nierezonansowe (pomiar zespolonego współczynnika odbicia/transmisji) i rezonansowe (pomiar częstotliwości rezonansowej i dobroci) w różnych zakresach częstotliwości oraz dyskusję zalet i ograniczeń poszczególnych metod. Szerzej omówiona została metoda z wykorzystaniem otwartego rezonatora F-P, jako szczególnie nadającego się do pomiaru materiałów o niskich stratach w zakresie fal milimetrowych i poruszone zostało zagadnienie modeli matematycznych stosowanych obecnie do charakteryzacji zjawisk elektromagnetycznych w nim występujących, bazujących na zastosowaniu przybliżenia przyosiowego dla równania falowego. Treść tego rozdziału świadczy o tym, że doktorant dobrze orientuje się w światowej literaturze naukowej i prawidłowo umieszcza swoje badania w kontekście stanu wiedzy na świecie.

Rozdział trzeci przedstawia proponowany model elektromagnetyczny i stanowi oryginalny wkład autora dysertacji w rozwój metod analizy matematycznej rezonatora F-P. Doktorant zauważył, że uzyskiwane w przybliżeniu przyosiowym rozwiązanie analityczne równania falowego opisuje wiązkę gaussowską, dla której istnieje analityczna postać równania powierzchni stałej fazy. Dzięki temu możliwe jest dokonanie konformnej transformacji kartezjańskiego układu współrzędnych, tak aby w nowym gaussowskim układzie współrzędnych równanie falowe dawało rozwiązanie w postaci fali płaskiej, przy czym ośrodek, w którym fala się rozchodzi staje się na skutek transformacji niejednorodny i anizotropowy. Parametry tego ośrodka dane są w postaci analitycznej na postawie Jakobianu przekształcenia. Inna ważna obserwacja poczyniona przy tej okazji dotyczy stwierdzenia faktu, że w gaussowskim układzie współrzędnych powierzchnia lustra sferycznego nie pokrywa się z powierzchnią stałej fazy, co prowadzi do konkluzji, że zmiana kształtu lustra ze sferycznego na gaussowski powinna przynieść poprawę dokładności rozwiązania. Pomimo że w gaussowskim układzie współrzędnych ośrodek, w rzeczywistości jednorodny i izotropowy, staje się niejednorodny i anizotropowy, analiza jest prostsza. Jest to możliwe dzięki temu, że niejednorodności w kierunku propagacji można uwzględnić zamieniając continuum materii na dyskretny układ wielowarstwowy, przy czym dla każdej z warstw wyznacza się równoważną, zależną od położenia warstwy, lecz stałą w jej wnętrzu przenikalność elektryczną i magnetyczną. Prowadzi to do bardzo ważnej konsekwencji, tj. możliwości zastąpienia złożonego oryginalnego trójwymiarowego problemu brzegowego przez wielowarstwowy problem jednowymiarowy, dla którego dalej łatwo można zastosować

metodę rezonansu poprzecznego. Dzięki temu równanie charakterystyczne określające częstotliwości rezonansowe jest skalarnie i łatwe do rozwiązania. Uzyskuje się też interpretację fizyczną pomocną w późniejszej identyfikacji rodzajów pola w układzie pomiarowym. Doktorant dokonuje ilościowego oszacowania błędów wynikających z różnego rodzaju możliwych uproszczeń i przedstawia sposób eliminacji ich wpływu. Zaproponowana jest także technika uwzględniająca deformację próbki w nowym gaussowskim układzie współrzędnych. Rozdział trzeci zawiera też rozważania dotyczące kwestii praktycznych, takich jak dobór wymiarów rezonatora, dobór parametrów obliczeniowych i sposób wyznaczenia przenikalności i strat na podstawie zmierzonej częstotliwości rezonansowej i grubości próbki.

Rozdział czwarty poświęcony jest kwestiom dotyczącym układu pomiarowego i pomiarów weryfikujących stworzony model elektromagnetyczny oraz całej metodyki. Doktorant opisał konstrukcję rezonatora, proces jego kalibracji i justowania elementów, w tym ustawienia jarzma próbki dokładnie w połowie rezonatora, co jest niezbędne dla uzyskania najwyższej czułości i identyfikacji właściwego rodzaju. Na podstawie analizy wrażliwości układu wybrano rozwiązanie z nieruchomymi zwierciadłami i próbką przesuwaną w pionie za pomocą silnika krokowego. To rozwiązanie nie tylko pozwala uzyskać lepszą dokładność, ale także ułatwia identyfikację rodzaju pola. Jako sprzężenie zastosowano linię współosiową zakończoną pętlą magnetyczną. Doktorant opisuje całą procedurę pomiarową, w tym oznaczania rodzajów i wyznaczanie dobroci nieobciążonej dla pustego rezonatora z jarzmem bez próbki, a także automatyczny proces określania i śledzenia rodzaju TEM_{00q} po włożeniu próbki w jarzmo. Rozdział czwarty zawiera też wyniki serii eksperymentów, które mają na celu potwierdzić prawidłowość modelu matematycznego, dokładność i powtarzalność pomiarów, porównać parametry materiałów uzyskiwane za pomocą rezonatora F-P z rezultatami wyznaczonymi innymi metodami, czy w końcu zilustrować zastosowanie opracowanego układu do pomiaru parametrów materiałów dielektrycznych (w tym anizotropowych) w zakresie 20-50 GHz, a także 50-110 GHz. Doktorant analizuje wpływ nierównej grubości próbek na dokładność pomiaru oraz analizuje ograniczenia opracowanej metody. W szczególności wskazane jest organicznie związane ze sprzężeniem z wyższym rodzajem pojawiające się przy grubych próbkach.

Rozdział piąty miał być w zamierzeniu autora podsumowaniem i wskazywać dalsze kierunki badań. W istocie jest jednak jednostronicowym streszczeniem z końcowym akapitem odnoszącym się do tezy rozprawy.

Bibliografia liczy 111 pozycji. Doktorant umiejętnie powołuje się na nie w całym tekście rozprawy, co świadczy o tym, że opanował warsztat naukowy.

Ocena merytoryczna

Zagadnienie analizowane w pracy jest ważne z naukowego oraz praktycznego punktu widzenia. Praktyczne znaczenie jest nie do przecenienia. Wobec rozwoju technologii 5G obejmującej pasma fal milimetrowych możliwość charakteryzacji materiałów podłożowych dla układów elektronicznych ma znaczenie pierwszorzędne, a problem jak do tej pory nie miał satysfakcjonującego rozwiązania technicznego.

Praca wnosi nowe wątki w zakresie elektrodynamiki obliczeniowej i metodyki szerokopasmowych pomiarów materiałów dielektrycznych w zakresie pasm milimetrowych. Elektrodynamika obliczeniowa jest intensywnie rozwijaną dziedziną wiedzy. Poszukuje się nowych, bardziej wydajnych algorytmów, które umożliwią badanie interakcji pola elektromagnetycznego z materią. Podejście zaprezentowane w rozprawie jest pomysłowe, pozwala na szybkie wykonanie niezbędnych obliczeń i dzięki temu znakomicie nadaje się do zastosowania w zautomatyzowanym układzie dokonującym pomiarów w czasie rzeczywistym. Doktorant zbadał ograniczenia metody, zaproponował stosowne ulepszenia, zaprojektował i zrealizował układ pomiarowy, zaproponował sposób kalibracji i justowania urządzenia oraz efektywną i częściowo automatyczną procedurę pomiarową. Na koniec zaś przeprowadził serię eksperymentów, która wykazała wysoką dokładność pomiarów. Pod względem treści praca doktorska jest kompletna łącząc teorię z eksperymentem uwzględniając przy tym aspekt obliczeniowy.

W rozprawie nie stwierdziłem błędów merytorycznych. Zaproponowany w pracy model matematyczny jest nowy. Zarówno model jak i wyniki pomiarów wykorzystujących uproszczony model elektromagnetyczny zostały opublikowane przez doktoranta na konferencjach międzynarodowych i w jednym artykule zamieszczonym w czołowym dla techniki mikrofalowej czasopiśmie naukowym. Użyteczność opracowanych algorytmów obliczeniowych, procedur pomiarowych oraz układu pomiarowego została przez doktoranta udowodniona drogą testów numerycznych, porównana z wynikami zamieszczonymi w czasopismach naukowych lub też z danymi eksperymentalnymi. Tezy rozprawy zostały w pełni potwierdzone. Doktorant wykazał się dobrą znajomością literatury i biegłością w posługiwaniu się zaawansowanym aparatem matematycznym, a także zmysłem praktycznym. Zwraca uwagę duża liczba publikacji doktoranta zamieszczonych w pismach z listy JCR, jednakże większość z nich dotyczy tematyki niezwiązanej z zawartością pracy doktorskiej.

Uwagi krytyczne i sugestie dalszych ulepszeń

Uważam, że praca zyskałaby na jakości, gdyby rozdział trzeci został podzielony na dwa rozdziały. Jeden z tych rozdziałów mógłby zawierać bardziej szczegółową analizę teoretyczną wraz z wprowadzeniem do transformacji konforemnej, natomiast w drugim doktorant mógłby się skupić na analizie konsekwencji wprowadzonego modelu. Obecnie część teoretyczna zbyt skrótowo opisuje zagadnienie kluczowe, czyli samą transformację. Równie wykaz literatury powinien w większym stopniu odnosić się do odwzorowań konforemnych i ich konsekwencji, w tym tzw. optyki transformacyjnej. Rozdział piąty w zamierzeniu doktoranta miał stanowić podsumowanie i wskazywać dalsze kierunki rozwoju. Tak nie jest – zabrakło wniosków dotyczących ograniczeń metody i sugestii kolejnych kroków, jakie można podjąć, aby przezwyciężyć te ograniczenia.

Analizując zaproponowane podejście chciałbym zasugerować zastąpienie tablicy wartości nieco bardziej złożonym modelem regresji nieliniowej wiążącym bezpośrednio częstotliwość rezonansową i grubość próbki z poszukiwaną przenikalnością. W tym celu można zastosować modele zastępcze wykorzystujące funkcje radialne lub modne w ostatnim czasie techniki uczenia maszynowego. Zastanawia mnie też, dlaczego doktorant uważa, że konieczne jest czasochłonne całkowanie dla wszystkich warstw. Nie wydaje mi się to problemem, gdyż można to zrobić jednokrotnie, a następnie wzory 51 i 52 zmodyfikować tak, aby wydzielić z nich część niezmienną, charakteryzującą układ pomiarowy, i zmienną, związaną z mierzoną próbką.

Pod względem jakości części rysunków umieszczonych w rozdziale drugim praca budzi moje zastrzeżenia. Rysunki 2-5 są skopiowane z literatury – jest co prawda wskazane źródło, ale skopiowano obraz graficzny. W efekcie jakość tych rysunków jest niska (rozmyte linie i oznaczenia), a ponadto na rysunkach pojawiają się oznaczenia, które nie są objaśnione ani wykorzystane w tekście pracy. Na wielu rysunkach w rozdziale czwartym brak jest legendy lub wyjaśnień w podpisie pod rysunkiem, co przedstawiają różne krzywe (wyjaśnienia są jedynie w tekście). Wykaz literatury nie jest należycie zredagowany. Nie ma konsekwencji w zapisie angielskich tytułów artykułów – czasami tylko pierwsze słowo tytułu zaczyna się wielką literą (np. w 3,4, 5), w innych pozycjach (np. 2, 6) wielką literą zaczynają się także inne wyrazy (zgodnie z angielską konwencją). Poza tym znalazłem drobne błędy językowe. Praca jest napisana w języku angielskim. Doktorant często powiela błąd polegający na stosowaniu kalki językowej. W języku polskim po czasowniku „pozwalać” stosować można bezokolicznik, w języku angielskim po tym czasowniku musi wystąpić rzeczownik, zaimek, forma ciągła czasownika (gerund) lub przyimek. A więc nie jest poprawna konstrukcja „allow + to + infinitive”, jeśli pojawia się bezokolicznik to w strukturze „allow + smth + to + infinitive”. Interesujące jest, że autor nie jest konsekwentny; w części pracy stosowana jest prawidłowa konstrukcja. Zauważyłem też błędy edytorskie – jest ich sporo. Podaję kilka przykładów: str. 31 brag → Bragg, str. 33 (52) → [52] , str. 75 „resonance peek” → „resonance peak”, rys. 33 – „resonanse” → „resonance”, str. 82 „racked” → „tracked”, str. 108 „fallowed” → „followed”.

Konkluzja

Podsumowując uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Tomasza Karpisza jest istotnym przyczynkiem do rozwoju metod pomiarów właściwości dielektrycznym materiałów w paśmie fal milimetrowych, a przedstawione w niej wyniki potwierdzają słuszność tez sformułowanych przez doktoranta. Z tego względu uważam, że rozprawa z nadmiarem spełnia wymagania ustawowe i może zostać dopuszczona do obrony. Stwierdzam również, że tematyka rozprawy, jej treść i osiągnięcia mieszczą się w zakresie dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Chcę podkreślić, że podejście zaproponowane przez doktoranta jest bardzo interesujące i wprowadza nowe przyczynki do rozwoju nauki światowej. Mając zatem na względzie oryginalność zaproponowanego modelu, jego zalety oraz konsekwencje w postaci układu pomiarowego dającego bardzo dokładne wyniki przy uproszczonej w stosunku do tej pory stosowanych procedurze pomiarowej, a także publikacje mgr. inż. Tomasza Karpisza, proponowałbym wyróżnienie pracy. Sama rozprawa nie jest niestety wzorowa, czego można byłoby oczekiwać przy wyróżnieniu, dlatego z wnioskiem o wyróżnienie wstrzymuję się do czasu obrony i dyskusji komisji.



prof. dr hab. inż. Michał Mrozowski