

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 podstawie 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 tej 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. Λ 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 \rightarrow Bragg, str. 33 (52) \rightarrow [52], str. 75 „resonance peek” \rightarrow „resonance peak”, rys. 33 – „resonanse” \rightarrow „resonance”, str. 82 „racked” \rightarrow „tracked”, str. 108 „fallowed” \rightarrow „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