

Łódź, 16 grudnia 2024 r.

prof. dr hab. inż. Michał Strzelecki
Instytut Elektroniki Politechniki Łódzkiej
Al. Politechniki 8, 90-924 Łódź
michal.strzelecki@p.lodz.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Ślota
**„Wykorzystanie spektroskopii dielektrycznej w badaniach
materiałowych i diagnostyce medycznej”**
promotor prof. dr hab. Ilona Zasada,
promotor pomocniczy prof. dr hab. n. med. Agata Bielecka-Dąbrowa

Podstawą niniejszej recenzji jest postanowienie Komisji UŁ ds. stopni naukowych w dyscyplinie nauki fizyczne z dn. 23 października 2024 r. powołujące mnie na recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia doktora mgr. inż. Maciejowi Ślotowi, prowadzonym w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie nauki fizyczne.

Spektroskopia dielektryczna to metoda badawcza, która umożliwia analizę właściwości dielektrycznych materiałów. Zastosowania tej metody są szerokie, obejmują m.in. materiałoznawstwo (w tym badania elementów elektronicznych lub monitorowanie stanu urządzeń energetycznych), badania cieczy i roztworów oraz wybrane działy diagnostyki medycznej. Choć metoda ta nie jest obecnie tak popularna jak inne urządzenia diagnostyki obrazowej, to jest wykorzystywana w różnych specjalnościach medycznych, m.in. w detekcji nowotworów, w ocenie chorób neurodegeneracyjnych, analizie właściwości mięśnia sercowego czy w diagnostyce i monitorowaniu cukrzycy. Techniki spektroskopowe mają zatem duży potencjał rozwoju w diagnostyce medycznej i materiałowej, jako narzędzie zarówno badawcze jak i technologiczne przy tworzeniu nowoczesnych nieinwazyjnych metod diagnostycznych. W ten nurt badań wpisuje się niniejsza rozprawa, w której przedstawiono dwa rodzaje czujników spektroskopowych do zastosowań w diagnostyce medycznej oraz

w badaniach materiałowych. Tematykę rozprawy uważam zatem za bardzo ważną i aktualną, z możliwością wykorzystania zbudowanych czujników w praktyce.

Celem pracy zostały sformułowane poprawie i jednoznacznie. Dotyczą one zaprojektowania i zbudowania prototypu dwóch układów wykorzystujących metodę spektroskopii dielektrycznej:

- do diagnostyki kardiologicznej w celu wykrycia obecności zastoju w płucach,
- do detekcji defektów w drukach 3D pozwalającego na ocenę jakości druku w czasie wytwarzania elementu.

Rozprawa została podzielona na 8 rozdziałów. W rozdziale 1., mającym charakter wstępny przedstawiono cele rozprawy, omówiono przykłady technik spektroskopowych wraz z podaniem ich przykładowych zastosowań. Opisano również metody diagnostyki zastoju płynu w płucach podając tychże metod zalety i ograniczenia oraz koncentrując się na istniejących metodach mikrofalowych. Przedstawiono też podstawowe typy defektów materiałowych występujących przy druku 3D. Omówiono ponadto stan techniki w zakresie miernictwa mikrofalowego, przeanalizowano także wykorzystanie mikrofal w diagnostyce medycznej oraz defektoskopii.

Pierwsza część rozdziału 2 dotyczy projektowania anten wykorzystywanych w diagnostyce pulmonologicznej, szczególnie w kontekście detekcji płynu w płucach. Anteny te pełnią kluczową rolę w konwersji energii elektrycznej na promieniowanie elektromagnetyczne i są integralnym elementem systemów pomiarowych opartych na spektroskopii dielektrycznej. W prawidłowo przeprowadzonym procesie projektowania (stosując często metodę prób i błędów) uwzględniono szereg parametrów anteny, takich jak charakterystyka promieniowania, impedancja wejściowa oraz minimalizacja strat energetycznych w celu optymalizacji charakterystyki anteny. Szczególną uwagę poświęcono dostosowaniu anten do pracy w warunkach bliskiego kontaktu z ciałem pacjenta, co wymagało zastosowania rozwiązań pozwalających na zmniejszenie wpływu geometrii klatki piersiowej na odstrojenie częstotliwości rezonansowej anteny. W pracach wykorzystano oprogramowanie CST Studio Suite oraz Matlab Antenna Toolbox. To poprawnie dobrane narzędzia, które umożliwiły precyzyjne modelowanie propagacji sygnału oraz analizę interakcji między promieniowaniem a ludzkimi tkankami. W wyniku przeprowadzonych prac udało się zaprojektować antenę częstotliwości o środkowej $f = 1.25$ GHz i założonych charakterystykach promieniowania przy uwzględnieniu ograniczeń konstrukcyjnych oraz klinicznych warunków pracy systemu.

W 2. części tego rozdziału opisano proces projektowania sond mikrofalowych do wykrywania defektów w drukach 3D. Kluczowym wyzwaniem było zintegrowanie czujnika mikrofalowego z drukarką 3D w celu jednoczesnego drukowania i analizy próbki. W tym celu zaprojektowano antenę helikalną działającą w paśmie 3.5 – 4 GHz, co pozwoliło na zmniejszenie jej rozmiarów i dopasowanie do wymogów konstrukcyjnych drukarki. Badania wykazały zdolność anteny do wykrywania prefabrykowanych defektów, takich jak wgłębienia. Jednak ograniczona czułość detekcji uniemożliwiła wykrywanie uszkodzeń na poziomie zbliżonym do precyzji technologii druku 3D (wykrywano defekty o wymiarach rzędu centymetra). W celu poprawy czułości jako emiter mikrofalowy zastosowano sondy koncentryczne. Testy przeprowadzone na zbudowanym stanowisku pomiarowym potwierdziły możliwości detekcji defektów o rozmiarach pojedynczych milimetrów, co jest wystarczające z punktu widzenia parametrów technologii addytywnej druku 3D.

Rozdział 3 rozprawy omawia symulacje propagacji sygnału mikrofalowego przez ludzką klatkę piersiową, których przeprowadzenie jest bardzo istotne dla skutecznego opracowywania systemów diagnostycznych opartych na spektroskopii dielektrycznej. Doktorant szczegółowo przeanalizował zasady modelowania propagacji w środowisku biologicznym, uwzględniając różnorodność właściwości tkanek (m.in. przenikalność elektryczna i współczynnik strat dielektrycznych). Symulacje przeprowadzono z użyciem oprogramowania CST Studio Suite, co umożliwiło zbadanie zjawisk odbicia i transmisji fal elektromagnetycznych w szerokim zakresie częstotliwości. Szczególną uwagę poświęcono wpływowi geometrii ciała oraz niejednorodności materiałowych na skuteczność detekcji sygnału. Symulacje te dostarczyły bardzo cennych informacji o optymalnych warunkach pomiarowych (pod kątem m.in. minimalizacji zakłóceń), na które mają wpływ pozycjonowanie anten oraz wybrane pasmo częstotliwości. Wyznaczono także prognozowane wartości parametrów S_{11} oraz S_{21} dla pacjentów z grupy kontrolnej oraz pacjentów z płynem w płucach. W efekcie przeprowadzone symulacje potwierdziły możliwość detekcji podwyższonej ilości płynu w płucach z wykorzystaniem wykonanych anten.

W rozdziale 4 dysertacji opisano proces przygotowania do detekcji płynu w płucach przy użyciu spektroskopii dielektrycznej w wolnej przestrzeni. Szczególną uwagę poświęcono modyfikacji konstrukcji anten i ich ułożeniu względem klatki piersiowej człowieka uwzględniając jej złożoność anatomiczną. Opracowano własny algorytm pomiarowy bazujący na metodzie Nicholsona-Rossa-Weira, który umożliwił precyzyjne określenie przenikalności elektrycznej. Uwzględniono ograniczenia związane z niewielką odległością anten od ciała, co wpłynęło na odstrojenie częstotliwości rezonansowej. W tym rozdziale opisano również poprawnie przeprowadzone kalibracje analizatora wektorowego oraz układu pomiarowego w wolnej przestrzeni, co pozwoliło na eliminację niepożądanych odbić od komponentów układu oraz wpływu chwytaków i elementów stelaża na propagację fal. Dalsze działania, opisane w kolejnym rozdziale 5, dotyczyły detekcji płynu za pomocą opracowanej metody, co wymagało przeprowadzenia badań nad absorpcją mikrofal w środowisku biologicznym. Do przeprowadzenia testów zaprojektowano pomysłowe stanowisko badawcze wykorzystujące specjalne waniенki polistyrenowe wypełnione wodą, które miały ograniczyć zakłócenia propagacji sygnału. W ramach eksperymentów przeprowadzono pomiary na próbkach symulujących właściwości tkanek ludzkich, wykorzystując świeże półtusze wieprzowe. Stwierdzono korelację pomiędzy zwiększeniem się ilości wody w badanej tkance i wzrostem straty dielektrycznej, którą wyznaczono na podstawie sygnału odbitego i transmitowanego przez model klatki piersiowej. Przeprowadzono też badania z udziałem pacjentów (łącznie 154 osoby), budując kolejne autorskie stanowisko pomiarowe. Część z tych pacjentów (11 osób) cierpiała na zastój płynu w płucach, co zweryfikowano badaniem rentgenowskim klatki piersiowej. Niestety, opis badań z udziałem pacjentów oraz uzyskanych wyników został przedstawiony dość chaotycznie. Być może opis ten jest zrozumiały dla lekarza, natomiast jest niejasny dla inżyniera (np. nie wiadomo, dlaczego wyznaczono szereg biomarkerów dla badanych pacjentów). Generalnie wykazano statystycznie istotną różnicę w wartościach zmierzonej straty dielektrycznej dla pacjentów z grupy kontrolnej oraz z zastojem płynu w płucach (choć pokazujące to rys. 5.20-5.22 są dalekie od przekonującej ilustracji zauważonych różnic).

Rozdział 6 pracy zawiera rzetelnie przeprowadzoną dyskusję i podsumowanie wyników dotyczących detekcji płynu w płucach za pomocą zaproponowanej metody spektroskopii dielektrycznej. Analizowano różne aspekty techniczne, takie jak wpływ geometrii klatki

piersiowej i parametrów dielektrycznych na dokładność pomiarów. Przedyskutowano ograniczenia związane z niską rozdzielczością czasową analizatorów i ograniczoną czułością w wykrywaniu małych ilości płynu. Autor rozprawy porównał uzyskane wyniki z podobnymi, już opublikowanymi wynikami badań, wskazując na potrzebę dalszego rozwoju zaproponowanej technologii, m.in. pod kątem możliwości jej zastosowania w warunkach klinicznych. Nakreślił także perspektywy dalszych prac w postaci potrzeby stworzenia bardziej zaawansowanych modeli symulacyjnych oraz weryfikacji zaproponowanej metody w testach klinicznych.

W rozdziale 7 przedstawiono wyniki badań nad wykrywaniem defektów w drukach 3D przy wykorzystaniu opracowanej metody wykorzystującej elementy i układy zaprojektowane w rozdziale 2. Zaprojektowana sonda pomiarowa została zintegrowana z drukarką 3D, umożliwiając równoczesne drukowanie i skanowanie próbek w celu identyfikacji defektów. Eksperymenty przeprowadzone dla wielu różnych próbek potwierdziły skuteczność tej metody w wykrywaniu rozwarstwień, niedoskonałości adhezji i innych typowych szkod strukturalnych. Zastosowanie technologii umożliwiło osiągnięcie rozdzielczości milimetrowej, co jest bardzo dobrym wynikiem. Rozdział 8, podsumowując eksperymenty dotyczące wykrywania defektów wskazuje na potencjalne obszary dalszego rozwoju opracowanej metody. Omówiono m.in. możliwość integracji algorytmów automatycznego wykrywania defektów z plikami CAD, co zwiększy precyzję kontroli jakości. Choć zabrakło wskazania ograniczeń zaproponowanego rozwiązania, to z pewnością zaproponowana metoda detekcji defektów posiada duży potencjał zastosowań w druku 3D oraz w inżynierii materiałowej.

Liczący 119 pozycji wykaz literatury obejmuje najważniejsze pozycje literatury światowej dotyczące tematyki związanej z rozprawą. W pracy przedstawiono również wykaz publikacji Doktoranta. Obejmuje o 5 publikacji współautorskich zamieszczonych w czasopiśmie naukowych oraz 4 referaty w materiałach konferencyjnych. Wśród czasopism są bardzo dobre *Virtual and Physical Prototyping* z IF = 10.2 oraz *Biomedicine* z IF = 3.9. Ponadto prace Doktoranta uzyskały 6 cytowań (Scopus, grudzień 2024) co jest dobrym wynikiem zważywszy na niedawną datę ich publikacji w latach 2023 i 2024.

Podsumowując merytoryczną ocenę rozprawy stwierdzam, że Doktorant osiągnął założone cele badawcze. Ich realizacja, czyli wykonanie dwóch układów wykorzystujących metodę spektroskopii dielektrycznej wymagała przeprowadzeniu szeregu eksperymentów i opracowaniu odpowiednich metod pomiarowych. Wszystkie opisane w rozprawie badania zaplanowano i zrealizowano poprawnie, co było znaczącym wyzwaniem. Projektowanie, budowa oraz testowanie elektronicznych systemów wielkoczęstotliwościowych jest trudne, ponieważ często nawet niewielka zmiana parametrów geometrycznych (np. anteny) prowadzi do istotnych modyfikacji ich charakterystyk częstotliwościowych. Opracowane i przedstawione autorskie układy oraz metody pomiarowe poddano wyczerpującej dyskusji, co świadczy o dojrzałości Doktoranta. Należy podkreślić, że dla osiągnięcia celów pracy mgr Maciej Ślot musiał się wykazać szeroką wiedzą z nie tylko z dyscypliny nauki fizyczne, ale również z dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Doktorant posiada również bardzo duże umiejętności inżynierskie, które były niezbędne do zaprojektowania, zbudowania i uruchomienia układów elektronicznych oraz stanowisk pomiarowych. Do najważniejszych osiągnięć Autora rozprawy pracy zaliczam:

1. Zaprojektowanie, implementację oraz przetestowanie z udziałem pacjentów układu diagnostyki kardiologicznej umożliwiającego nieinwazyjną detekcję zastoju w płucach przez analizę charakterystyk dielektrycznych badanych narządów.

2. Zaprojektowanie, implementację oraz przetestowanie układu do wykrywania defektów o rozmiarach milimetrowych w drukach 3D, umożliwiającego kontrolę jakości druku w czasie trwania procesu tworzenia próbki.

Praca jest napisana poprawnym językiem, nie zawiera wielu usterek redakcyjnych:

Str. 12: (w środowisku... - zbędny nawias

Str. 13: nie może być używana -> nie mogą być używane

Str. 29: ...Wave Ratio -> ...Wave Ratio)

Str. 36, rys. 1.21: nieczytelne niebieskie napisy w górnej części rysunku

Str. 46: Rysunek 2.7 -> rysunku 2.7

Str. 48: dopasowani impedancyjnych -> dopasowań impedancyjnych

Str. 108 Histogram ilości pacjentów -> Histogram liczby pacjentów

Str. 139 przy opisie referencji [6] brak podania daty dostępu do strony internetowej

Lektura pracy nasuwa również kilka przedstawionych poniżej uwag krytycznych i dyskusyjnych.

1. Z punktu widzenia organizacji rozprawy lepiej byłoby ją podzielić na dwie części, niezależnie opisujące opracowane układy. Obecnie rozdziały dotyczące układu do detekcji zastoin płucnych oraz do defektoskopii mieszają się, co utrudnia czytelnikowi percepcję przedstawionego materiału.
2. Nie wyjaśniono związku metod spektroskopowych opisanych na str. 8 z rysunkiem 1.1, który w założeniu ma opisywać mechanizmy oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią. Sam rysunek jest dość niejasny, nie wiadomo czym są pokazane tam kółeczka oraz strzałki i jak się ma tego pokazana tam skala częstotliwości.
3. Proszę o precyzyjny opis eksperymentu z udziałem pacjentów mającego na celu weryfikację możliwości detekcji zastojów płucnych. W jakim celu zmierzono i przeanalizowano szereg biologicznych parametrów, skoro potwierdzeniem zalegania płynu w płucach jest badanie rentgenowskie? Jak należy interpretować rys. 5.20, który wydaje się być kluczowy dla oceny opracowanej metody? Proszę przygotować taką wersję tego rysunku, na której będą zaznaczone punkty reprezentujące wszystkich pacjentów biorących udział w badaniu z użyciem różnych symboli dla grupy kontrolnej i osób chorych. Ta sama prośba dotyczy rysunków 5.21 i 5.22.
4. Czy podjęto próbę klasyfikacji pacjentów na zdrowych i posiadających płyn w płucach na podstawie pomiaru straty dielektrycznej?
5. Jakie są perspektywy zastosowania opracowanej metody detekcji zastojów w płucach?

Wszystkie moje uwagi dyskusyjne w żadnym stopniu nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę recenzowanej pracy. Stwierdzam, że praca „Wykorzystanie spektroskopii dielektrycznej w badaniach materiałowych i diagnostyce medycznej” spełnia z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z ustawą Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami. W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie tej rozprawy i dopuszczenie mgr. inż. Macieja Ślota do publicznej obrony.

Jednocześnie uważam, że recenzowana rozprawa cechuje się bardzo wysokim poziomem naukowym, potwierdzonym 4 publikacjami w dobrych czasopismach naukowych oraz zdobytymi przez Doktoranta dwoma gratami naukowymi MEN „Inkubator Innowacyjności 4.0”. Jest ona również interdyscyplinarna a ponadto stanowi istotny wkład do dyscyplin nauki fizyczne jak i automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Praca otwiera również szerokie możliwości praktycznych zastosowań opracowanych układów (co potwierdzają uzyskany przez Doktoranta patent oraz złożone wnioski patentowe). Z tych względów wnoszę o wyróżnienie rozprawy.

Mieczysław Stankiewicz