

prof. dr hab. inż. Edward Sędek  
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy  
Bydgoszcz, Aleja prof. S. Kaliskiego 7

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama Pacewicza**

### **pt. Resonance Methods for Microwave Characterization of Ferromagnetic Spheres**

Rozprawa dotyczy opracowania nowych metod charakteryzacji materiałów ferrimagnetycznych pozwalających zwiększyć dokładność pomiaru szerokości linii rezonansowej i magnetyzacji nasycenia ferrytu lub granatu mikrofalowego. Materiały ferrimagnetyczne wykonywane są do pomiarów w postaci kulek. Z punktu widzenia zastosowań najważniejszym parametrem jest szerokość linii rezonansowej  $\Delta H$  dla ustalonej częstotliwości pracy podzespołu ferrytowego. W drugiej kolejności ważna jest magnetyzacja nasycenia  $M_s$  granatu lub ferrytu mikrofalowego. Metoda pomiaru  $M_s$ , zalecana obecnie przez IEC, zapewnia wystarczającą dokładność dla większości podzespołów mikrofalowych. Niemniej zwiększenie jej dokładności jest pożądane.

Celem rozprawy jest zastosowanie i wykorzystanie równania transcendentalnego (TDE) dla poprzecznych modów elektrycznych (TE) kulek wykonanych z ferrytów i granatów mikrofalowych w celu poprawy dokładności określenia ich szerokości linii rezonansowej  $\Delta H$  i magnetyzacji nasycenia  $M_s$ . Autor przeprowadził badania na monokrystalicznych i polikrystalicznych kulkach itrowo-żelazowego granatu (YIG) zarówno w szerokopasmowych układach sprzęgających, jak i wnękach rezonansowych pracujących na dyskretnych częstotliwościach. Autor formułuje trzy tezy rozprawy, a mianowicie:

- Zależność szerokości linii rezonansowej od wewnętrznego pola magnetycznego dla wysokiej jakości kulek żyromagnetycznych można sparametryzować za pomocą fizycznego modelu liniowego,

- Model elektromagnetyczny podstawowego (dominującego) modu rezonansowego w kulkach żyromagnetycznych może być wykorzystany do modelowania jego sprzężenia z modami rezonansowej wnęki prostokątnej, umożliwiając odzyskanie linii rezonansowej z pomiarów częstotliwości niezależnie od współczynnika sprzężenia,
- Model elektromagnetyczny podstawowych (dominujących) rezonansów w kulkach ferromagnetycznych ma zastosowanie do pomiarów ich magnetyzacji nasycenia i umożliwia poprawę dokładności pomiaru.

Zarówno cel pracy, jak i tezy rozprawy zostały sformułowane w sposób jasny i przekonujący.

Rozprawa składa się z dwóch rozdziałów oraz czterech załączników zawierających najważniejsze publikacje bezpośrednio związane z rozprawą, których doktorant jest współautorem, zamieszczonych w renomowanych czasopismach zagranicznych. Łącznie z załącznikami rozprawa liczy 108 stron. W pierwszej części rozprawy (str. 16-17) autor zamieszcza 8 tytułów publikacji związanych z rozprawą oraz 14 tytułów artykułów konferencyjnych. Ponadto wymienia w czterech artykułach szczegóły prac nad udoskonaleniem technik charakteryzacji ferrimagnetycznych kulek pomiarowych. Artykuły te są zamieszczone w pełnej wersji w załącznikach od A do D. W zamieszczonych artykułach dokonuje w sposób właściwy analizy źródeł literatury światowej i stanu wiedzy oraz zastosowań w przemyśle. Ponadto na końcu pracy podaje spis literatury przedmiotu w postaci 64 pozycji. W podanym spisie literatury zamieszczono publikacje historyczne dotyczące mikrofalowych układów ferrytowych, w tym metod ich pomiarów. Analiza źródeł została opracowana wyczerpująco.

Opracowana w rozprawie metoda oparta na wykorzystaniu i zastosowaniu równania transcendentalnego (TDE) dla poprzecznych modów elektrycznych (TE) kulek wykonanych z ferrytów i granatów mikrofalowych jest nowatorska w skali światowej i w sposób istotny poprawia dokładność pomiaru szerokości linii rezonansowej  $\Delta H$  oraz magnetyzacji nasycenia. Metoda ta jest aktualnie testowana w Oddziale Ferrytowym PIT-RADWAR S.A. w Kobyłce produkującym ferryty i granaty mikrofalowe oraz dielektryki.

Oryginalność rozprawy polega na zastosowaniu nowej metody pomiaru linii rezonansu żyromagnetycznego, zapewniającej zmniejszenie błędów pomiarowych i zwiększenie dokładności pomiarów magnetyzacji nasycenia ferrytów i granatów mikrofalowych.

Samodzielny i oryginalny dorobek doktoranta zawiera następujące osiągnięcia:

1. Zademonstrowano metodę charakteryzacji szerokości linii rezonansu ferromagnetycznego kulek ferrimagnetycznych, wykorzystującą wnękę podkrytyczną. Nowa metoda pozwala na zmniejszenie błędów pomiarowych. Podano również metodę analizy głównych z nich.
2. Stosując proponowaną metodę wykazano, że niezależna od kształtu właściwa (wewnętrzna) szerokość linii rezonansu ferromagnetycznego może mieć prawie idealnie liniową zależność widmową, czego nie można powiedzieć o zazwyczaj badanej zewnętrznej szerokości linii zależnej od kształtu. Informacja ta może być szczególnie przydatna np. do badań źródeł strat magnetycznych.
3. Wykazano, że analiza właściwej szerokości linii rezonansu ferromagnetycznego w funkcji wewnętrznego statycznego pola magnetycznego może prowadzić do jej scharakteryzowania za pomocą dwóch parametrów mających sens fizyczny. Jednym z nich jest wartość współczynnika tłumienia Gilberta dla wysokich częstotliwości, a drugim poszerzenie niejednorodne. Uzyskanie obu parametrów na podstawie zewnętrznej szerokości linii jest nieodłącznie obciążone dużym błędem systematycznym, który można postrzegać jako efekt geometryczny wynikający z powiązania szerokości linii z zewnętrznym polem magnetycznym.
4. Porównano główne istniejące algorytmy przetwarzania danych z eksperymentów FMR we wnęce i uszeregowano je według dokładności. Wykazano, że niektóre metody, które nadal najwyraźniej są stosowane w przemyśle, mogą prowadzić do mylących wyników.
5. Zaproponowano i zweryfikowano nowy algorytm przetwarzania danych z eksperymentu FMR we wnęce, który umożliwia dokładny pomiar szerokości linii rezonansu ferromagnetycznego w warunkach obecności jednego rodzaju, bez konieczności odsprzęgania próbki od wnęki, co stanowi znaczące uproszczenie techniczne.
6. Wykazano, że nowo zaproponowany model magnetycznego rezonansu plazmowego może być zastosowany do poprawy dokładności

mikrofalowych pomiarów magnetyzacji nasycenia kulek o wąskiej linii rezonansowej metodą wyznaczania częstotliwościowej odległości między rodzajami.

Przedstawione w rozprawie wyniki w formie wykresów są czytelne i jasno przedstawione. Sam tekst napisany jest w sposób zwięzły i jest zrozumiały dla specjalistów zajmujących się mikrofalowymi układami ferrytowymi. Czytając rozprawę nie zauważyłem błędów w zależnościach matematycznych ani w opisie zaproponowanej nowej metody charakteryzacji kulek ferrimagnetycznych.

Rozprawa jest przydana dla nauk inżynierjno-technicznych, w szczególności dla pracowników naukowych zajmujących się projektowaniem mikrofalowych układów ferrytowych takich jak cyrkulatory falowodowe dużej mocy, cyrkulatory paskowe i mikropaskowe, izolatory rezonansowe, przełączane przesuwniki fazy oraz filtry ferrytowe. We wszystkich wymienionych układach pracujących poza rezonansem jak i w rezonansie znajomość przebiegu linii rezonansowej ferrimagnetyka jest bardzo ważna, gdyż pozwala na wyznaczenie w punkcie pracy określonej przez natężenie stałego pola magnetycznego strat magnetycznych, które decydują o stratach całego podzespołu. W szczególności dotyczy to układów dużej mocy, gdzie straty te powinny być jak najmniejsze ze względu na ciepło, które wydziela się podczas pracy.

Odnosząc się do relacji osiągnięć doktoranta, którego rozprawa jest jednoznacznie przypisana do dyscypliny **elektronika** mogę stwierdzić, iż nie ma ona żadnych relacji z **automatyką**, natomiast w zakresie indukcji magnetycznej i pola magnetycznego ma pewien związek z **elektrotechniką**.

Uwagi do recenzowanej rozprawy:

1. Tytuł rozprawy powinien zawierać „ferrimagnetic spheres” a nie ferromagnetic, gdyż autor charakteryzuje kulki ferrimagnetyczne wykonane z granatu mikrofalowego i bada w pracy ich parametry.
2. Jednostki stosowane dla określania parametrów magnetycznych ferrimagnetyków w rozprawie powinny być w międzynarodowym systemie SI a nie w systemie CGS. Takie zasady nas obowiązują od dawna. Natężenie pola magnetycznego powinno być w kA/m, magnetyzacja nasycenia również w kA/m. Tymczasem w opisie rysunków mamy Oe i Gs, a w rys. 18,  $M_s$  jest w kA/m.

3. Drobna uwaga dotycząca sferycznego układu współrzędnych. Zwyczajowo oś pionowa jest osią  $z$  natomiast osie  $x$  i  $y$  leżą na dolnej płaszczyźnie. Wówczas kąt  $\theta$  zawarty jest między prostą łączącą początek układu współrzędnych z punktem w przestrzeni a osią  $z$ . Natomiast kąt  $\varphi$  określony jest między rzutem na płaszczyznę  $x-y$  a osią  $y$  w pierwszej ćwiartce układu.
4. Używanie określenia kulka żyromagnetyczna jest niezręczne, gdyż mówimy zjawisko żyromagnetyczne, rezonans żyromagnetyczny. Określenie to dotyczy zjawisk a nie elementów.

Przedstawione uwagi redakcyjne nie mają wpływu na wysoką ocenę recenzenta oceniającego merytoryczny poziom rozprawy doktorskiej.

Doktorant jest współautorem 9 publikacji będących na liście A punktowanej przez MNiSW w renomowanych czasopismach naukowych oraz posiada w swoim dorobku 17 cytowań w bazie Scholar i indeks Hirscha = 3.

W podsumowaniu stwierdzam, że roprawa doktorska mgra inż. Adama Pacewicza spełnia wymagania stawiane przez obowiązujące przepisy ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i jako taka kwalifikuje się do publicznej obrony.

Wniosuję o zaliczenie rozprawy do kategorii e) tzn. **wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.**

Warszawa dn. 9.02.2021

.....

*Podpis*

Gdańsk, 20.01.2021

dr hab. inż. Piotr Kowalczyk, prof. uczelni  
Politechnika Gdańska  
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

*Tytuł:* **Resonance methods for microwave characterization of ferromagnetic spheres**

*Tytuł w języku polskim:* **Metody rezonansowe charakteryzacji mikrofalowej kulek ferromagnetycznych**

*Autor:* **mgr inż. Adam Pacewicz**

*Promotor:* **dr hab. inż. Bartłomiej Salski, prof. uczelni**

*Dyscyplina:* **Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika (Elektronika)**

### 1. Informacje ogólne o opiniowanej pracy

Recenzja powstała na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechnik Warszawskiej – pismo RPW/19782/2020 N z dnia 30.12.2020 wystosowane przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny AEiE, prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego.

Praca ma charakter głównie eksperymentalny i dotyczy metod pomiarowych parametrów magnetycznych materiałów ferromagnetycznych, w szczególności szerokości linii rezonansu ferromagnetycznego ( $\Delta H$ ) oraz magnetyzacji nasycenia ( $M_s$ ) dla kulek żyromagnetycznych (mono- i polikrystaliczne kulki granatu itrowo-żelazowego) i rodzajów poprzecznych elektrycznie. Badania wykonywane były w szerokim zakresie częstotliwości mikrofalowych (od 1 do około 30 GHz).

Rozprawa składa się z czterech podstawowych części (rozdziałów) oraz czterech uzupełnień które załączono do pracy bezpośrednio w postaci publikacji naukowych (trzy z nich to artykuły w renomowanych czasopismach naukowych o wysokim wskaźniku cytowań – IF, jedna to komunikat konferencyjny).

W rozdziale pierwszym autor przedstawił aktualny stan wiedzy, cele, motywację oraz sformułował trzy twierdzenia/tezy (w wolnym tłumaczeniu):

- zależność szerokości linii rezonansu ferromagnetycznego od wewnętrznego pola magnetycznego może być sparametryzowana modelem liniowym (parametry o fizycznej interpretacji);
- model elektrodynamiczny rodzaju dominującego w kulkach żyromagnetycznych można wykorzystać do modelowania jego sprzężenia z modami wnęki prostokątnej, co umożliwi określenie szerokości linii z pomiarów częstotliwości niezależnie od poziomu sprzężenia;
- model elektrodynamiczny rodzaju dominującego w sferach ferromagnetycznych może być zastosowany do pomiarów ich magnetyzacji nasycenia i pozwala na poprawę dokładności pomiaru.

Drugi rozdział stanowi szczegółowe wprowadzenie teoretyczne do omawianych zagadnień. Zawiera klasyfikację materiałów magnetycznych, wyjaśnia istotę i znaczenie tensora przenikalności magnetycznej, tłumaczy równanie charakterystyczne (z uwzględnieniem skończonej przewodności ścianek wnęki). Na końcu rozdziału opisane są metody analizy rodzajów rezonansowych w materiałach namagnesowanych oraz metody pomiaru szerokości linii rezonansu ferromagnetycznego oraz magnetyzacji nasycenia.

Rozdział trzeci jest z pewnością najważniejszym elementem rozprawy i stanowi opis oryginalnego wkładu własnego mgr. inż. Adama Pacewicza. W pewnym sensie jest to streszczenie załączonych do pracy publikacji zawartych w uzupełnieniach A-D. Część ta zawiera między innymi uzasadnienie postawionych wcześniej tez. Uzupełnienie A (publikacja JCR, IF=3.998) dotyczy wykorzystania zamkniętego układu sprzęgającego w postaci wnęki podkrytycznej, który umożliwia dokładny pomiar dobroci, a przez to precyzyjne określenie szerokości linii rezonansu ferromagnetycznego dla różnych kulek żyromagnetycznych (dziesięciu, o różnych średnicach i magnetyzacjach nasycenia). Otrzymane wyniki potwierdziły, że zależność szerokości linii rezonansu ferromagnetycznego od pola jest (prawie idealnie) liniowa i może zostać zamodelowana dwoma parametrami posiadającymi bezpośredni sens fizyczny. Wykazano także niewielki wpływ strat związanych ze ścianami wnęki. Stanowi to potwierdzenie pierwszej ze sformułowanych tez. W pracy przytoczonej w uzupełnieniu B (publikacja JCR, IF=2.286) porównano różnego typu algorytmy przetwarzania danych pozyskiwanych eksperymentalnie (wnęka prostokątna), a otrzymane wyniki usystematyzowano. Ponadto, opracowano i zweryfikowano (w oparciu o trzy typy mono- i polikrystalicznych kulek granatu itrowo-żelazowego) nowy algorytm oparty na równaniu charakterystycznym, pozwalający na uzyskanie precyzyjnej wartości szerokości linii, niezależnie od poziomu sprzężenia pomiędzy rodzajami rezonansowymi badanej próbki i rodzajami rezonansowymi samej wnęki (potwierdzenie tezy drugiej). W uzupełnieniu C (komunikat konferencyjny) zaprezentowano wyniki badań związku pomiędzy dobrocią a szerokością linii rezonansu. Pokazano, że błędy pomiarowe w eksperymentach z wnęką podkrytyczną mogą być znaczące w przypadku mniejszych szerokości linii rezonansu ferromagnetycznego i dużych elektrycznie próbek. Publikacja zaprezentowana w uzupełnieniu D (publikacja JCR, IF=2.717) dotyczyła stosowalności równania charakterystycznego do wyznaczania wartości magnetyzacji nasycenia w oparciu o różnice częstotliwości rezonansowych. Zaproponowane podejście zweryfikowano dla kilku różnych próbek, potwierdzając jednocześnie skuteczność i precyzję otrzymanych wyników. Publikacja ta stanowi uzasadnienie dla sformułowanej wyżej trzeciej tezy.

Ostatni rozdział jest podsumowaniem osiągnięć autora, a tym samym jego wkładu w rozwój dyscypliny. Wyciągnięte wnioski są spójne, logiczne i poparte otrzymanymi wcześniej wynikami. Na końcu rozdziału zestawione zostały możliwe kierunki dalszego rozwoju.

Na bibliografię pracy składają się 64 publikacje, w tym pozycje książkowe oraz aktualne artykuły opublikowane w renomowanych czasopismach branżowych.

## **2. Krytyczny przegląd formy i treści rozprawy**

Podsumowując część recenzji zawartą w punkcie pierwszym można stwierdzić, że cel i tezy rozprawy zdefiniowane są jasno i jednoznacznie. Rozdziały ułożone są w sposób tworzący logiczną

całość, a odpowiedni dobór literatury dopełnia przekazywane treści. Pomimo, że liczba pozycji w bibliografii nie jest wysoka, to moim zdaniem wystarczy ona do stworzenia pełnego obrazu rozważanych zagadnień.

Wysoki poziom rozprawy potwierdza fakt, że jest ona poparta publikacjami w prestiżowych czasopismach naukowych o znaczącym wskaźniku cytowań (IF). Jest to potwierdzenie nie tylko poprawności przeprowadzonych badań, ale także ich użyteczności i wagi na arenie międzynarodowej. Jest to z pewnością najmocniejsza strona rozprawy. W głównej treści rozprawy autor odnosi się jednak wyłącznie do trzech publikacji z listy JCR (Uzupełnienia A, B i D) oraz jednego komunikatu konferencyjnego (Uzupełnienie C). Jednocześnie autor deklaruje bliski związek rozprawy z sześcioma pracami z listy JCR, których jest współautorem. Podobnie jest w przypadku komunikatów konferencyjnych – tu także autor deklaruje bliski związek z sześcioma pracami, jednak odnosi się bezpośrednio tylko do jednej z nich. W mojej opinii dorobek naukowy autora pozwalałby na przygotowanie pracy o znacznie szerszym zakresie, oczywiście nie zmienia to mojej wysokiej oceny rozprawy.

Jeśli chodzi o słabe strony pracy, to niestety autorowi nie udało się uniknąć drobnych usterek językowych (np. str. 26, linia 14) i edycyjnych (np. paragraf 2.9.2), jednak nie mają one żadnego wpływu na wartość merytoryczną pracy. Nie udało się także wyeliminować całkowicie niewielkich potknięć w formalizmie matematycznym. Na przykład wzór (1) definiuje moment magnetyczny jako wartość skalarną, co nie jest błędem, jednak już do określenia magnetyzacji – patrz wzór (5) musi on być zdefiniowany wektorowo (a staje się on wektorem dopiero we wzorze (13)). Podobne niekonsekwencje występują we wzorach (21), (22) i dalej w (24). Jednak uważam, że także te usterki nie rzutują na przekazywaną treść i jej wartość merytoryczną. Tym samym uważam, że wspomniane kwestie te nie wymagają dodatkowego komentarza ze strony autora.

Poza oceną samej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adama Pacewicza na szczególną uwagę zasługuje ogólny dorobek naukowy doktoranta, w szczególności chodzi tu o działalność publikacyjną. Doktorant jest współautorem 8 publikacji w najbardziej prestiżowych czasopismach naukowych oraz 14 komunikatów konferencyjnych.

### **3. Podsumowanie**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Adama Pacewicza wyróżnia się systematycznością i wnikliwością, świadczy o posiadanej przez doktoranta wiedzy teoretycznej i praktycznej. Jednocześnie praca ta jest ważnym przyczynkiem do badań nad materiałami magnetycznymi w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika (Elektronika). Moim zdaniem spełnia (nawet z nadmiarem) wymagania określone w art. 13 ust.1 Ustawy z dnia 14.03.2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06.2016 r., poz. 882). W związku z powyższym, **wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Adama Pacewicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Poziom merytoryczny pracy oraz fakt, że wyniki badań zostały szeroko opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych sprawia, że dodatkowo **wnioskuję o rozważenie wyróżnienia pracy.**

dr hab. inż. Piotr Kowalczyk