

Gdynia, dn. 28.08.2026

Dr hab inż Jerzy Julian Michalski
SpaceForest Sp z o. o.
Ul Bolesława Krzywoustego 1 B
81-035 Gdynia

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Baranowskiego zatytułowanej „Novel high frequency components with non-conventional shape employing smooth geometry deformation and manufacturing by 3D printing”.

1) Jaki jest problem naukowy (teza) rozprawy i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

Przed ostatnie dziesięciolecie, w zależności do skali produkcji oraz wymagań kosztowych, filtry mikrofalowe były oraz nadal są wykonywane w technologiach frezowania, odlewów oraz składania z elementów bazowych. W ciągu ostatnich kilku lat coraz to bardziej są dostępne technologie wytwarzania przyrostowego, druku 3D. Technologie te pozwalają na wytwarzanie elementów w wielu metalach takich jak aluminium, tytan, stopy niklu a nawet metale szlachetne takie jak srebro oraz złoto. Możliwości te otwierają drogę do projektowania nowych struktur w tym filtrów mikrofalowych, o geometriach na jakie wcześniej wykorzystywane technologie nie pozwalały. Autor wziął za cel opracowanie narzędzi pozwalających na projektowanie struktur, których wykonanie ogranicza się wyłącznie do druku 3D. Stawia za cele wskazanie zalet i przewag takiego podejścia w odniesieniu do rozwiązań do tej pory mających wyłączne zastosowanie.

W pracy autor stawia 4 tezy.

- Technika swobodnej deformacji kształtu, oparta na interpolacji za pomocą radialnych funkcji bazowych, otwiera nowe możliwości projektowe i zapewnia dodatkowe stopnie swobody w modelowaniu 3D mikrofalowych elementów elektronicznych.
- Zastosowanie deformacji kształtu w projektowaniu elektromagnetycznym pozwala wykorzystać potencjał technologii wytwarzania przyrostowego do produkcji urządzeń mikrofalowych o złożonych kształtach i gładkich profilach.

- Wdrożenie swobodnej deformacji kształtu do procesu projektowania, w połączeniu z wytwarzaniem przyrostowym, może prowadzić do powstania komponentów wysokoczęstotliwościowych o ulepszonych parametrach RF
- Łącząc zaawansowane procesy druku 3D z odpowiednią obróbką końcową, można wytwarzać komponenty mikrofalowe, których parametry są porównywalne z parametrami elementów produkowanych przy użyciu uznanych, konwencjonalnych technologii.

Autor w pracy projektuje, wykonuje oraz bada następujące struktury filtrów:

- filtry falowodowe o rezonatorach na bazie falowodu prostokątnego o zdeformowanym kształcie,
- dwurodzajowe filtry bazujące na falowodzie cylindrycznym,
- filtry bazujące na rezonatorach w postaci linii współosiowej,

Wszystkie te struktury, w swoich dotychczasowych technologiach wytwarzania są bardzo powszechnie wykorzystywane w zastosowaniach praktycznych.

W obliczu coraz to większych wymagań rynku związanych z szybkim prototypowaniem oraz coraz to większych wymagań dotyczących parametrów technicznych problem naukowy został dobrze sformułowany a przedstawione tezy trafnie zdefiniowane. Obejmują one bardzo szeroki zakres proponowanej tematyki; co powoduje, że badania autora prawie kompletnie wpisują się w całość nowego zakresu tematycznego jakim jest projektowanie, wytwarzanie oraz produkcji nowych struktur filtrujących wykonanych w technologii druku 3D.

2) Czy autor rozwiązał postawiony problem i czy użył do tego właściwych metod dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych?

Przedstawione przez autora cztery tezy są przez niego konsekwentnie udowadniane poprzez przeprowadzanie kolejnych badań, których wyniki są publikowane w pismach, zarówno konferencyjnych jak i również branżowych o najwyższym prestiżu. Ze względu na nowatorski charakter poruszanej tematyki metody, których używa się w znacznej mierze autorskie.

Deklarowany udział w autora w pracach badawczych, opisywanych w opublikowanych pracach jednoznacznie wskazują, że posiadał on umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych, łącznie z tymi w międzynarodowych zespołach.

3) Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?

Bez wątpienia tematyka proponowana w pracy jest zarówno aktualna jak i bardzo ważna. Techniki druku 3D w ciągu ostatnich lat stają się coraz bardziej dostępne oraz coraz częściej wykorzystywane w praktycznych zastosowaniach. Jest to związane z systematycznym spadkiem kosztów jak i również rosnącą jakością wytwarzania drukowanych elementów. Obserwujemy, że technologie druku 3D doganiają technologie CNC czy odlewu a dodatkowo umożliwiają wytwarzanie elementów, których nie można było wcześniej wykonać. Stare technologie mają natomiast nadal przewagę w postaci znacznie niższych kosztów oraz czasu ich wytwarzania. Patrząc natomiast na rozwój technologii druku 3D można przypuszczać, że te przewagi w niedługiej przyszłości zostaną znacząco zmniejszone. Narzędzia służące do projektowania struktur, które można wytwarzać jedynie w druku 3D, opracowane przez autora mają bez wątpienia uzasadnienie zarówno badawcze jak i również rynkowe. Zakładałbym, że będą one mogły służyć przyszłym projektantom nowych pasywnych struktur mikrofalowych, które do tej pory nie były rozważane, ze względu na brak możliwości ich projektowania oraz wytwarzania w aktualnie dostępnych technologiach.

4) Na czym polega oryginalny dorobek autora i jakie jest jego znaczenia poznawcze lub przydatność praktyczna dla nauki bądź techniki?

Wszystkie prace, które opublikował autor, były wykonane z zespołem badawczym. Deklaracje, które złożył przy każdej w wymienianych publikacji, których był współautorem, bez wątpienia wskazują na znaczny jego wkład w opracowaną technikę. Brał on udział w wielu pracach badawczych a jego wiedza pokrywa każdy z zakresów potrzebnych aby tą technologię opracować. Przydatność praktyczną opracowanej technologii widzę bezpośrednio w zakresie zastosowania jej przy produkcji urządzeń pasywnych, głównie filtrów mikrofalowych, dla których wymagania będą trudne do zrealizowania w technologii frezowania CNC, odlewu czy też składania z komponentów bazowych. Będą to np. filtry o nietypowych kształtach oraz te, którym narzucono wymagania na niską masę. Zastosowania kosmiczne są tutaj jednym z możliwych a na pewno bardzo interesującym przypadkiem ich użycia.

5) Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy autora, wiedzy na zaawansowanym poziomie, o charakterze podstawowym dla dziedziny nauk technicznych oraz o charakterze szczegółowym, odpowiadającej obszarowi prowadzonych badań naukowych?

Nie mam wątpliwości, że autor, realizując prace badawcze nad zagadnieniami przedstawionymi w niniejszej rozprawie, zdobył rozległą i pogłębianą wiedzę w obszarze będącym przedmiotem prowadzonych badań. Zakres przeprowadzonych analiz, sposób formułowania problemów badawczych oraz dobór i wykorzystanie odpowiednich metod wskazują na bardzo dobre opanowanie zarówno podstaw teoretycznych, jak i praktycznych aspektów omawianej tematyki. Na szczególne podkreślenie zasługuje jednak fakt, że podejmowana w pracy problematyka ma w znacznej mierze charakter nowatorski i dotyczy zagadnień, dla których istniejący stan wiedzy jest nadal rozwijany. W związku z tym jestem przekonany, że autor w toku realizacji pracy nie ograniczał się jedynie do przyswojenia i zastosowania wiedzy już istniejącej, lecz w wielu aspektach aktywnie uczestniczył w jej tworzeniu i poszerzaniu. Uzyskane przez niego wyniki, przeprowadzone analizy oraz sformułowane wnioski stanowią wkład w rozwój wiedzy w badanym obszarze i mogą być podstawą dalszych prac badawczych. Tym samym przedstawiona rozprawa dokumentuje nie tylko zdolność autora do samodzielnego zdobywania i wykorzystywania zaawansowanej wiedzy naukowej, lecz również jego umiejętność formułowania nowych problemów, poszukiwania oryginalnych rozwiązań oraz wytwarzania nowej wiedzy naukowej.

6) Czy rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy?

Praca liczy 123 pozycje literatury. Są to pozycje starsze, dobrze ugruntowane jak i również najnowsze pozycje opublikowane na krótko przed powstaniem niniejszej pracy. Wkład własny autora oraz cytowane pozycje literatury świadczą o szerokiej znajomości tematyki będącej przedmiotem niniejszej rozprawy

7) Jakle są wady i słabe strony rozprawy?

Prace jest napisana bardzo starannie. Zarówno jej organizacja jak i forma są na wysokim poziomie. Pracę czyta się bardzo dobrze. Wstępy do publikacji prezentowanych w pracy są napisane w taki sposób aby wyekstrahować z nich to co najważniejsze w sposób który pozwala

na szybkie i łatwe zapoznanie się z nimi. Czytając pracę nie widzę jej stron, które bym uznał za słabe. Natomiast mam do rozprawy uwagi. Autor w pracy przedstawia między innymi rozwiązania, których przeznaczeniem ma być ich użycie w przestrzeni kosmicznej. Są to konkretnie filtry o zastosowaniu w multiplekserach wyjściowych umieszczonych na satelitach do obserwacji Ziemi (publikacja MB5). Każde z rozwiązań, które mają przeznaczenie użycia ich w przestrzeni kosmicznej są zawsze poddawane wymagającym analizom i testom w procesie ich kwalifikacji. Szczegóły tych testów są opisane w ESA ECSS (European Cooperation for Space Standardization). Wymagania te dotyczą również urządzeń pasywnych, w tym filtrów mikrofalowych. Podczas procesu kwalifikacji wykonuje się między innymi analizy i testy mechaniczne, strukturalne oraz wibracyjne. Urządzenia są testowane w środowisku próżni przy jednoczesnych zmianach temperatur najczęściej w zakresie -40 C do $+85\text{ C}$. Poza tymi testami również należy wykonać szereg badań, w tym między innymi należy wykazać odporność urządzenia na poniższe zjawiska:

- „Corona” – zjawisko wyładowania elektrycznego zachodzącego w gazie przy określonym ciśnieniu, w tym również w warunkach obniżonego ciśnienia charakterystycznych dla środowiska kosmicznego
- „Multipactor” – zjawisko wyładowania elektronowego występujące w warunkach próżni, związane z wtórną emisją elektronów z powierzchni materiału, zachodzące w obecności pola elektromagnetycznego o odpowiednio dużej mocy i określonej częstotliwości.
- PIM (Passive Intermodulation) – powstawanie niepożądanych produktów intermodulacyjnych w elementach pasywnych na skutek występowania słabych nieliniowości, m.in. w miejscach styku metali, na połączeniach mechanicznych oraz na powierzchniach o podwyższonej chropowatości.

Autor w ogóle nie porusza w swojej pracy tych zagadnień, w szczególności wpływu technologii druku 3D na te zjawiska. Są to zagadnienia, które mogą przynieść zaskakujące wyniki gdyż z jednej strony chropowatość struktury może mieć negatywny wpływ np. na powstawanie pasywnych intermodulacji, a z drugiej strony technologia druku pozwala tworzyć monolit. Z badań wiadomo jest, że pasywne intermodulacje powstają między innymi na połączeniu 2 bądź więcej metali. Zachodzi pytanie czy technologia druku 3D polepsza czy pogarsza PIM? To samo pytanie dotyczy efektów „Corona” czy „Multipactor”. W ostatnich czasach powstały prace na ten temat. Jedną z tych prac („Enhanced multipactor performance in 3D printed microwave parts”, 2017) współtworzył Petronilo Martín-Iglesias, współautor publikacji autora MB5. Ponadto nie zostały przedstawione badania ani nawet komentarz dotyczący tego jak filtry

drukowane zachowują się przy zmianie temperatury. Są to punkty, których uwzględnienie w pracy dopełniło by poruszaną tematykę do końca. Wiedza ta jest niezbędna zanim nastąpi komercyjne użycie tej technologii, w szczególności do zastosowań kosmicznych. Liczę na to, że autor podczas obrony odniesie się do tych uwag.

8) Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) niespełniająca wymagań,
- b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c) zadowalająco spełniająca wymagania,
- d) wyraźnie wykraczająca poza poziom przeciętny (spełniająca wymagania z nadmiarem),
- e) wybitna.

Biorąc pod uwagę istotność i nowatorski charakter podjętej tematyki, a także kompleksowość rozprawy, obejmującej szeroki zakres badawczy, od sformułowania koncepcji, poprzez jej implementację i weryfikację numeryczną, aż po walidację eksperymentalną, jak również fakt, że uzyskane przez autora wyniki zostały potwierdzone licznymi publikacjami w renomowanych czasopiśmie branżowych, a przedstawione rozwiązania cechują się szerokim zakresem zastosowań, stwierdzam, że rozprawa z nadmiarem spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora. W związku z powyższym zaliczam ją do kategorii „d) wyraźnie wykraczająca poza poziom przeciętny (spełniająca wymagania z nadmiarem)” i wnoszę o jej wyróżnienie.

Uwagi i pytania.

Problem opisywany na stronie 74, związany z dodatkowym niepożądanym rezonansom występującym w paśmie pracy filtru może być związany z tym co jest powszechnie znane w innych fizycznych rozwiązaniach tego typu filtrów¹. W takich konstrukcjach (filtrów dwurodajowych) obserwuje się bardzo mocny wpływ elementu strojącego sprzężenie wejściowe na częstotliwość rezonansową pierwszego rezonatora oraz odwrotnie tj. wpływ ustawień elementu strojącego pierwszy rezonator na wartość sprzężenia wejściowego².

¹ Doświadczenie recenzenta jest związane ze strojeniem analogicznych struktur wykonanych w technologii składania filtru z komponentów bazowych

² Rozważania te są analogiczne w przypadku sprzężenia wyjściowego i ostatniego rezonatora

Ustawiając niepoprawnie sprzężenie wejściowe, częstotliwość rezonansowa pierwszej wnęki może zostać „wepchnięta” wewnątrz pasma przepustowego filtru, bądź może być powodem powstania dodatkowego niepożądanego rodzaju pola. Efekt ten jest często obserwowany gdy śruba strojąca sprzężenie wejściowe jest ustawiona bardzo głęboko. W takim przypadku podczas zestrzajania sprzężenia wejściowego i pierwszego rezonatora, dobrą metodą jest strojenie charakterystyki opóźnienia grupowego liczonego ze współczynnika odbicia filtru w zestrzajanych wrotach. W takim scenariuszu pozostałe rezonatory muszą być w mocnym rozstrojeniu, tj. ich rezonanse muszą być w znacznej odległości od pasma filtru, bądź nawet poza zakresem pomiaru charakterystyk rozproszenia filtru. Autor w pracy przedstawia rozwiązanie tego problemu za pomocą dodatkowego elementu strojącego mającego na celu eliminację niepożądanego rodzaju pola. W filtrze prezentowanym w pracy nie widzę zastosowanych elementów strojących sprzężenie wejściowe i wyjściowe. Czy autor podjął próbę zastosowania dodatkowych elementów strojących sprzężenia wejściowe oraz wyjściowe ? Czy możliwe jest aby brak możliwości strojenia sprzężeń wyjściowego i wyjściowego (co pokazuje zdjęcie filtru) spowodował, że nie możliwe było ustawienie częstotliwości rezonansowej pierwszego rezonatora na wartość prawidłową ? Czy możliwe jest, że niepoprawna wartość sprzężenia wejściowego (znaczną penetracją przez element strojący szczeliny sprzęgającej) spowodowała wystąpienie dodatkowego rodzaju, o którym pisze autor ?

Od rozpraw doktorskich oczekuje się, aby wносиły one istotną wartość dodaną do aktualnego stanu wiedzy w obszarze, którego dotyczą. Niniejsza rozprawa ma w dużej mierze bardzo silny charakter inżynierski. Z drugiej strony fakt, że wyniki prac i badań autora zostały opublikowane w renomowanych i prestiżowych czasopismach naukowych, stanowi istotne potwierdzenie ich wartości oraz naukowego charakteru prowadzonych badań.

Podczas obrony oczekiwałem jednak, aby autor w sposób syntetyczny przedstawił i scharakteryzował najważniejsze, jego zdaniem, osiągnięcia naukowe wynikające z rozprawy oraz jednoznacznie wskazał, na czym polega jego wkład w rozwój wiedzy w badanej dziedzinie.



Jerzy Julian Michalski