

Profesor, dr hab. inż. Yevhen Yashchyshyn
Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych

Warszawa, 19 sierpnia 2026 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej

**Nowe układy pasywne wysokiej częstotliwości o niestandardowym kształcie
wykorzystujące techniki deformacji geometrii brył oraz druk 3D
(Ang. Novel high frequency components with non-conventional shape employing smooth
geometry deformation and manufacturing by 3D printing),**

Opracowanej na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka,
Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Gdańskiej z dnia
9.06.2026r.

Autor rozprawy: Mgr inż. Michał Baranowski
Promotor: Dr hab. inż. Adam Lamęcki, profesor uczelni
Dziedzina: Nauki inżynieryjno-techniczne (Dz. U. 2023, poz. 742 z pozn. zm.)
Dyscyplina: Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne

Przedmiotem niniejszej rozprawy jest nowe podejście do komputerowego projektowania złożonych geometrii 3D o konfigurowalnych krzywiznach powierzchni. Zastosowanie tej metody pozwala na realizację struktur, które nie są możliwe do wykonania przy użyciu tradycyjnych procesów produkcyjnych. W pracy zaprezentowano przegląd najnowszych rozwiązań w zakresie wytwarzania komponentów mikrofalowych drukowanych w technologii 3D, zwracając uwagę na ograniczenia istniejących narzędzi projektowych. W tym kontekście mgr inż. Michał Baranowski wskazuje, że swobodna deformacja brył w procesie projektowania otwiera nowe możliwości w modelowaniu struktur mikrofalowych, co pozwala w pełni wykorzystać potencjał druku 3D. Proponowana procedura projektowa łączy deformację kształtu (opartą na interpolacji za pomocą radialnych funkcji bazowych) z analizą pola elektromagnetycznego (opartą na metodzie elementów skończonych). Opisana metoda została wykorzystana do opracowania nowych struktur mikrofalowych o niestandardowej geometrii, charakteryzujących się lepszymi parametrami elektrycznymi, takimi jak wysoka dobroć lub większa separacja rodzajów pasożytniczych. W celu potwierdzenia poprawności proponowanego podejścia wszystkie przedstawione projekty zostały zweryfikowane eksperymentalnie za pomocą prototypów wykonanych w technologii druku 3D.

Problem naukowy rozprawy został trafnie i jasno sformułowany.

Głównym celem pracy jest pokonywanie istniejących ograniczeń modelowania EM poprzez ulepszenie konwencjonalnych narzędzi CAD EM za pomocą włączenia możliwości deformacji kształtów 3D oraz pokazanie możliwości oferowanych rozwiązań. W ramach recenzowanej



pracy proponuje się i dokładnie bada nową metodę projektowania i optymalizacji struktury geometrycznej pasywnych układów mikrofalowych. Pokazano, że integracja wspomnianej techniki modelowania w pełnofalowym symulatorze EM pozwala wykorzystać potencjał druku 3D. Proponowany zestaw narzędzi do optymalizacji następnie jest wykorzystywany do opracowywania nowych, objętościowych komponentów mikrofalowych zorientowanych na wytwarzanie przyrostowe, które polega na tworzeniu przedmiotów warstwa po warstwie na podstawie cyfrowego modelu 3D (*ang. AM – additive manufacturing*) i umożliwia wytwarzać unikalne kształty wraz z uzyskaniem gładkich profili powierzchni. Przedstawiono nowe projekty rezonatorów i filtrów mikrofalowych, wraz ze szczegółowym opisem procedury projektowej, z naciskiem na optymalizację kształtu. Każdy projekt przedstawiony w tej rozprawie jest eksperymentalnie weryfikowany za pomocą prototypu wydrukowanego w technologii druku 3D. Omówiono również wybrane zagadnienia dotyczące procesów drukowania 3D dla mikrofalowych komponentów elektronicznych. Pokazano, że wyprodukowane prototypy wykazują lepszą wydajność w zakresie częstotliwości mikrofalowych w porównaniu z tradycyjnymi rozwiązaniami.

Tematyka rozprawy jest aktualna i bardzo ważna.

Tezy pracy są następujące:

1. Technika deformacji dowolnej formy kształtu, która jest oparta na interpolacji funkcji bazowych radialnych, otwiera nowe możliwości projektowe i oferuje dodatkowe stopnie swobody w modelowaniu mikrofalowych komponentów 3D.
2. Wykorzystywanie możliwości deformacji kształtu w procesie projektowania elektromagnetycznego pozwala na wykorzystanie potencjału procesów przyrostowego wytwarzania przy produkcji urządzeń mikrofalowych o skomplikowanych kształtach i gładkich profilach,
3. Implementacja możliwości deformacji kształtu o dowolnej formie w procesie projektowania, w połączeniu z wytwarzaniem metodą przyrostową, może prowadzić do powstania komponentów wysokoczęstotliwościowych o poprawionej wydajności,
4. Łączenie zaawansowanego procesu druku 3D z odpowiednią obróbką końcową, możliwe jest wytwarzanie sprzętu mikrofalowego, którego wydajność jest porównywalna z komponentami produkowanymi przy użyciu ustalonych procesów.

Autor rozwiązał postawiony problem i użył do tego właściwych metod dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych. Dysertacja opiera się na wynikach badań opisanych w sześciu oryginalnych publikacjach [MB1–MB6], które są w całości zamieszczone. Praca jest podzielona na pięć rozdziałów. Rozdział 1 przedstawia motywację oraz określa cele tej pracy, które zostały opisane w Recenzji powyżej. Rozdział 2 zawiera podstawowe zagadnienia projektowania elektroniki mikrofalowej, przegląd najnowszych osiągnięć w zakresie pasywnych, drukowanych 3D rozwiązań mikrofalowych, a w tym kontekście identyfikuje również braki obecnych narzędzi do projektowania EM. Głównym wkładem pracy jest wprowadzenie metody deformacji kształtu obiektu do projektowania EM oraz jej integracja w proces optymalizacji, co szczegółowo opisano w



Rozdziale 3. Pozostała część pracy poświęcona jest zastosowaniu proponowanej metody do projektowania nowych rezonatorów mikrofalowych i filtrów o lepszych parametrach, co zostało opisane w pięciu międzynarodowych publikacjach naukowych i przedstawione w Rozdziale 4. Część badań przedstawionych w publikacjach [MB1–MB3] została przeprowadzona w ramach projektu koordynowanego przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA), we współpracy z partnerami zewnętrznymi, a udział ESA podkreśla duży potencjał praktycznego zastosowania tej pracy w systemach komunikacji satelitarnej. W Rozdziale 5 przedstawiono wnioski oraz perspektywy dalszych badań.

Rozprawa świadczy o wiedzy autora na zaawansowanym poziomie, o charakterze szczegółowym, odpowiadającej obszarowi prowadzonych badań naukowych. Rozprawa obejmuje najnowsze osiągnięcia nauki i świadczy o znajomości współczesnej literatury z dyscypliny naukowej, której dotyczy.

Zalety proponowanej metodologii projektowania są następujące:

- Technika swobodnej deformacji kształtu oparta na interpolacji funkcji bazowych radialnych otwiera nowe możliwości projektowe i oferuje dodatkowe stopnie swobody w modelowaniu 3D komponentów mikrofalowych. Przydatność proponowanej metody deformacji kształtu w projektowaniu elektroniki wysokoczęstotliwościowej została praktycznie wykazana w [MB1, MB2] i opisana bardziej szczegółowo w Sekcjach 3.2 i 4.1. Na podstawie projektowania rezonatorów i filtrów mikrofalowych w [MB1, MB2] pokazano, jak nowe podejście oparte na metodzie swobodnej deformacji (ang. Free-form Deformation, FFD) może rozszerzyć obecne możliwości projektowe w EM CAD. Proponowana deformacja brył 3D może być łatwo zintegrowana z istniejącymi narzędziami CAD i zapewnia większą elastyczność projektowania, umożliwiając swobodną modyfikację kształtów za pomocą dowolnie zdefiniowanych punktów kontrolnych.

Na przykład, projekty rezonatorów mikrofalowych i filtrów z ściśniętymi komorami z [MB2] lub modele zdeformowanych komór dwumodowych w falowodach kołowych [MB3] czy prostokątnych [MB4] nie mogłyby zostać opracowane ani zoptymalizowane pod względem kształtu przy użyciu istniejącego oprogramowania do modelowania EM bez zastosowania proponowanej struktury projektowej.

- Użycie deformacji kształtu w projektowaniu EM pozwala na wykorzystanie potencjału procesów druku 3D w wytwarzaniu urządzeń mikrofalowych o skomplikowanych kształtach i gładkich profilach. Praktyczne znaczenie możliwości projektowych, jakie dają techniki modelowania dowolnych kształtów, leży w ich użyteczności, która w przypadku obwodów mikrofalowych sprowadza się do wykonalności produkcji. Jak omówiono w sekcji 2.3, choć wytwarzanie przyrostowe oferuje dużą elastyczność w złożoności drukowanych modeli, nie zostało to w pełni rozważone i wykorzystane w projektowaniu EM. Zaproponowana technika projektowa ma na celu wypełnienie luki i usprawnienie projektowania komponentów mikrofalowych zorientowanego na wytwarzanie postępowe. Komponenty wydrukowane w 3D są przedstawione w rozdziale 4. Projekty filtrów o gładkim profilu w prostokątnym falowodzie [MB4] i powietrznej linii koncentrycznej [MB5] są szczególnie uznane za przykłady, które są



zorientowane na postępowe wytwarzanie struktur. Co więcej, takie złożone modele i geometrie mogły zostać wyprodukowane tylko przy użyciu techniki postępowego wytwarzania, więc metody modelowania dowolnych kształtów i technologia druku 3D uzupełniają się nawzajem.

- Wdrażanie deformacji swobodnej w procesie projektowania, w połączeniu z wytwarzaniem przyrostowym, może prowadzić do komponentów wysokoczęstotliwościowych o ulepszonej wydajności. Prawdziwość tego twierdzenia została potwierdzona przez szereg innowacyjnych projektów opisanych w Rozdziale 4. Obwody przedstawione w [MB2, MB3, MB4, MB5] zostały zweryfikowane przez wyprodukowane prototypy, które potwierdziły ich lepszą wydajność mikrofalową w porównaniu z konwencjonalnymi projektami obecnie stosowanymi w przemyśle. Opracowane komponenty charakteryzują się ulepszonymi parametrami elektrycznymi, takimi jak niskie straty, wysoki współczynnik jakości Q czy skuteczne rozdzielenie trybów pasożytniczych. Nowe urządzenia ukierunkowane na postępowe wytwarzanie mogą również w dużym stopniu przyczynić się do miniaturyzacji i większej integracji systemów mikrofalowych, co prowadzi do wielofunkcyjnych projektów, takich jak filtrujące skręcenie fali, opisane w [MB2]. Poprawienie wydajności zostało zilustrowane w artykule [MB3], gdzie zastosowano proponowaną metodologię projektowania do projektowania filtrów kanałowych dla OMUX w systemach komunikacji satelitarnej. Celem badania było osiągnięcie szerszego pasma zaporowego, aby mogło zostać obsłużonych więcej kanałów bez dodatkowych filtrów dolnoprzepustowych. Zastosowane rozwiązanie przyniosło 35% poprawę tłumienia w paśmie zaporowym w porównaniu z znanymi z literatury rozwiązaniami. W [MB4] wspomniana metoda została użyta do zaprojektowania nowej klasy filtrów falowodowych z komorami dwumodowymi. Opracowane struktury o gładkiej powierzchni charakteryzują się bardzo niskimi stratami dla komponentów wytwarzanych w technologii druku 3D. Co więcej, proponowany projekt rezonansowej komory pozwala na sprzęganie dwóch trybów podstawowych poprzez deformację samej komory, bez potrzeby stosowania dodatkowych elementów sprzęgających (np. śruby). Skuteczność przedstawionego podejścia projektowego została również potwierdzona w [MB5], gdzie zweryfikowano je w innej technologii — wypełnionej powietrzem linii koncentrycznej. Wytworzony komponent wykazuje najszersze pasmo tłumienia wśród powiązanych rozwiązań najnowszej generacji, spełniając wymagania stawiane przez obecne systemy satelitów obserwacji Ziemi.

- Łącząc zaawansowane procesy druku 3D z odpowiednią obróbką końcową, możliwe jest wytworzenie sprzętu mikrofalowego, którego wydajność jest porównywalna z wydajnością komponentów wytwarzanych przy użyciu ustalonych procesów. Jak omawiano w Sekcji 4.5, jednym z kluczowych czynników wpływających na wydajność drukowanych w 3D układów jest chropowatość powierzchni metalu. Od początku stosowania w inżynierii mikrofalowej, wytwarzanie przyrostowe cierpiało na stosunkowo dużą chropowatość powierzchni, co skutkowało ograniczonym zastosowaniem tej technologii, szczególnie przy wyższych częstotliwościach, takich jak zakres fal milimetrowych. Dlatego, wraz z trwającym szybkim rozwojem bardziej precyzyjnych procesów druku 3D do specjalistycznych zastosowań,



temat poprawy jakości powierzchni wydrukowanych części stał się również przedmiotem badań. W [MB6] pokazano, jak można poprawić chropowatość powierzchni komponentów falowodowych drukowanych w 3D, używając taniej metody polerowania mechanicznego. Dodatkowo, najnowsze projekty opracowane w [MB4, MB5] zostały wykonane przy użyciu procesów wytwarzania przyrostowego specjalnie dopasowanych do zakresu mikrofalowego, co dało znacznie lepsze wyniki pod względem szacowanej przewodności metalu (np. 10 MS/m dla filtra pasmoprzepustowego, opisanego w [MB4]). Badania w [MB6], wraz z wynikami uzyskanymi przy użyciu specjalistycznych technik wytwarzania przyrostowego, dowodzą łącznie, że metody przyrostowe na bazie proszku, w połączeniu z odpowiednią obróbką końcową, są w stanie wytwarzać elementy mikrofalowe o jakości powierzchni zbliżonej do tradycyjnych technik wytwarzania, takich jak frezowanie czy toczenie. Co więcej, dalsze postępy w precyzyjnym drukowaniu 3D i jego szersze zastosowanie w inżynierii mikrofalowej prawdopodobnie zwiększą dokładność wraz ze zmniejszeniem chropowatości obiektów w nadchodzących latach.

Oryginalny dorobek mgr inż. Michała Baranowskiego i jego przydatność praktyczna dla techniki można streścić w poszczególnych wkładach do każdego artykułu:

[MB1] - Wdrożenie opisanej struktury optymalizacji projektowej – przygotowanie skryptów w środowisku MATLAB kontrolujących operacje deformacji geometrii, projektowanie i optymalizacja przedstawionego filtra falowodowego, przygotowanie modelu do druku 3D, pomiary prototypu.

[MB2] - Implementacja opisanej struktury optymalizacji projektowej - przygotowanie skryptów w środowisku MATLAB kontrolujących operacje deformacji kształtu; badanie rezonatorów szczelinowych zmodyfikowanych przy użyciu technik deformacji kształtu, projektowanie trzech filtrów falowodowych przedstawionych w artykule, przygotowanie modeli 3D do druku 3D, pomiary prototypów, ręczne dostrajanie dwóch filtrów opisanych w odpowiednich sekcjach artykułu.

[MB3] - Analiza i projektowanie rezonatorów zmodyfikowanych przy użyciu technik deformacji kształtu, projektowanie filtra dwumodowego przedstawionego w artykule, przygotowanie modeli 3D do druku, pomiary i ręczne strojenie prototypów.

[MB4] - Analiza i projektowanie proponowanych rezonatorów dwumodowych zmodyfikowanych za pomocą technik deformacji kształtu, projektowanie wszystkich filtrów falowodowych przedstawionych w artykule, przygotowanie modeli 3D do druku 3D, pomiary prototypów, ręczne strojenie prototypu filtra ósmego rzędu.

[MB5] - Optymalizacja projektowania filtra dolnoprzepustowego o gładkim profilu przy użyciu technik deformacji kształtu, udział w projektowaniu filtra pasmowoprzepustowego ze wstawkami zwarciovymi oraz w projektowaniu filtra łączącego przedstawionego w artykule, przygotowanie modeli 3D do druku addytywnego, przygotowanie i poprawki artykułu.

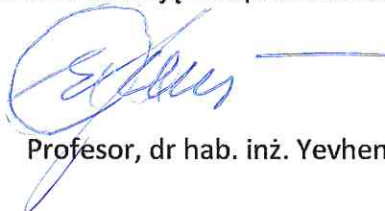
[MB6] - Projektowanie dwóch falowodowych filtrów szóstego rzędu o gładkim profilu używanych jako jednostki testowe w artykule, przygotowanie modeli 3D do wytwarzania przyrostowego, udział w pisaniu i redagowaniu artykułu.



Podsumowując, wyniki badań przeprowadzonych w rozprawie doktorskiej mgr inż. Michała Baranowskiego to nowa zintegrowana metoda projektowania pasywnych układów mikrofalowych przystosowana do druku 3D. Proponowana metoda pozwala w pełni wykorzystać możliwości druku 3D poprzez projektowanie układów o gładkich profilach i nieregularnych kształtach. Urządzenia opisane w towarzyszących publikacjach wykazują lepsze parametry elektryczne (takie jak tłumienie pasma zaporowego i straty wtrąceniowe) niż wcześniej prezentowane rozwiązania. Część przeprowadzonych badań była realizowana w ramach programów badawczych finansowanych przez ESA i dotyczyła obszarów o praktycznym zastosowaniu w systemach SATCOM. Warto również zauważyć, że kolejnym wkładem tej pracy jest komercyjna integracja opracowanego zestawu narzędzi z profesjonalnym środowiskiem symulacji elektromagnetycznej InventSim. Proponowane rozwiązanie jest obecnie unikalne w dziedzinie inżynierii mikrofalowej, uniwersalne i może być wykorzystywane do projektowania szerokiego zakresu komponentów elektronicznych wysokiej częstotliwości.

Jakie są wady i słabe strony rozprawy? Uwzględniając fakt, że rozprawa jest przedstawiona w postaci zbioru opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów nie sposób ocenić redakcyjną stronę rozprawy. Ponadto, artykuły są opublikowane w renomowanych czasopismach, które wymagają merytorycznego recenzowania. Ze swojej strony także nie mam zarzutów do proponowanych rozwiązań. Jediną wadę pracy, którą warto wymienić jest brak informacji o uzyskiwanej dokładności wykonania obiektów 3D w technologii wytwarzania przyrostowego oraz chropowatości powierzchni. Jest to szczególnie ważna informacja w przypadku oszacowania ograniczenia zastosowania w zakresie fal milimetrowych i sub-milimetrowych, gdzie chropowatość powierzchni ma największy wpływ.

Podsumowując stwierdzam, że mgr inż. Michał Baranowski przedstawił oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Kandydat posiada wiedzę teoretyczną i praktyczną potrzebną do prowadzenia badań naukowych w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Praca doktorska mgr inż. Michała Baranowskiego wyróżnia się szerokim zakresem zawartości merytorycznej i wnikliwością analizy stanu wiedzy dotyczącego podjętego zagadnienia naukowego. Wysoko oceniam wkład intelektualny Autora w opracowanie nowych rozwiązań z zakresu techniki projektowania. Stwierdzam w związku z tym, że Kandydat spełnia wymagania Ustawy z 2023 r. (Dz. U. 2023, poz. 742 z późn. zm.) o stopniach i tytule naukowym, a rozprawa wyraźnie wykracza poza poziom przeciętny i spełnia wymagania z nadmiarem. Wniosuję o wyróżnienie Rozprawy na podstawie Zasad wyróżnienia rozpraw doktorskich w dyscyplinie AEEiTK Politechniki Gdańskiej oraz wniosuję o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.



Profesor, dr hab. inż. Yevhen Yashchychshyn