

Dr hab. inż. Sebastian Molin, prof. PG
Katedra Inżynierii Materiałów Funkcjonalnych
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechnika Gdańska

Gdańsk, 04-11-2025

Recenzja pracy doktorskiej

Autor rozprawy: mgr inż. Kacper Skarżyński

Tytuł rozprawy: **“Opracowanie technologii wytwarzania elementów systemu pozyskiwania i bezprzewodowego przesylu energii elektrycznej z zastosowaniem techniki przyrostowej druku aerozolowego”**

Wstęp

Niniejsza recenzja została sporządzona na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej w celu weryfikacji rozprawy doktorskiej pod kątem jej oryginalności, wartości poznawczej i poprawności metodologicznej, zgodnie z wymogami określonymi w art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z dnia 20 lipca 2018 r.).

Rozprawa została wykonana w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej pod opieką naukową dr hab. inż. Marcina Słomy, prof. uczelni. Praca dotyczy opracowania i eksperymentalnej weryfikacji technologii wytwarzania elementów systemów pozyskiwania energii z pola radiowego i bezprzewodowego przesylu energii (WPT) z zastosowaniem techniki przyrostowej druku aerozolowego (Aerosol Jet Printing, AJP). Szczególny nacisk położono na anteny siatkowe typu patch oraz ich integrację z prostownikami (rectenna), z demonstracją funkcjonalności w paśmie 2,45 GHz.

Tematyka badawcza oraz jej aktualność

Tematyka rozprawy mieści się w dynamicznie rozwijającym się obszarze interdyscyplinarnym, łączącym elektronikę drukowaną, techniki przyrostowe oraz bezprzewodowe pozyskiwanie i przesyl energii (RF energy harvesting, Wireless Power Transfer). Praca wpisuje się w nurt badań nad rozwojem lekkich urządzeń mikrofalowych dla systemów Internetu Rzeczy (IoT), w których dąży się do minimalizacji zależności od klasycznych źródeł energii.

Współczesna elektronika drukowana, w szczególności technika druku aerozolowego (Aerosol Jet Printing, AJP), otwiera nowe możliwości wytwarzania układów elektronicznych o geometrii nieosiągalnej metodami fotolitograficznymi, przy obniżeniu kosztów produkcji i ograniczeniu odpadów materiałowych. Technika AJP umożliwia precyzyjne nanoszenie ścieżek przewodzących o szerokości rzędu kilkudziesięciu mikrometrów na podłożach płaskich i trójwymiarowych, co czyni ją atrakcyjną dla wytwarzania elementów wysokoczęstotliwościowych.

Autor wprowadza szereg nowatorskich rozwiązań, w tym koncepcję siatkowych anten typu patch, które umożliwiają ograniczenie zużycia materiału przewodzącego przy zachowaniu korzystnych parametrów mikrofalowych, oraz dokonuje eksperymentalnej demonstracji pełnego układu

prostowniczego wykonanego techniką AJP – rozwiązania dotychczas nieprezentowanego w literaturze w takiej formie.

Podsumowując, tematyka rozprawy jest w pełni zgodna z aktualnymi światowymi kierunkami rozwoju elektroniki drukowanej i technologii pozyskiwania energii z otoczenia. Praca wypełnia lukę badawczą dotyczącą zastosowania AJP w wytwarzaniu funkcjonalnych elementów RF o praktycznym znaczeniu.

Charakterystyka rozprawy i opis rozdziałów

Rozprawa liczy 189 stron (włącznie ze spisem literatury) i została przygotowana jako samodzielne dzieło naukowe (monografia) zgodnie z tradycyjną strukturą rozprawy doktorskiej. Właściwa treść rozprawy obejmuje 10 rozdziałów merytorycznych w logicznej i przejrzystej strukturze.

Krótki opis struktury rozprawy:

Rozdział 1 (Wprowadzenie, str. 11-14) w zwięzły sposób wprowadza czytelnika w problematykę, wskazując lukę badawczą dotyczącą braku kompletnych anten prostowniczych wykonanych techniką druku aerozolowego oraz potrzebę zastosowania konstrukcji siatkowych.

Rozdział 2 (Stan wiedzy, str. 15-73) stanowi wyczerpujący przegląd literatury światowej, podzielony na pięć podrozdziałów: Internet rzeczy, systemy pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy, elektronika drukowana, aplikacje elektroniki drukowanej w systemach EH/WPT oraz podsumowanie. Autor cytuje ponad 400 pozycji obejmujących zarówno prace fundamentalne, jak i najnowsze doniesienia z lat 2020-2025. Rozdział ten zajmuje prawie 60 stron, co stanowi ponad 40% merytorycznej treści pracy.

Rozdział 3 (Cel i zakres pracy, str. 74) w precyzyjny sposób formułuje cel główny oraz cele szczegółowe, obejmujące wykonanie anten siatkowych typu patch o częstotliwości rezonansowej 2,45 GHz, optymalizację czasu druku oraz weryfikację możliwości pozyskiwania energii.

Rozdział 4 (Materiały i metody, str. 75-80) przedstawia materiały (tusze srebrne Ag25Te i Ag60Te produkcji UTDots, podłoża: folia Kapton, laminat FR4, podłoża szklane), proces druku aerozolowego z atomizacją ultradźwiękową, procedury spiekania fotonicznego oraz metody symulacji elektromagnetycznych i charakteryzacji próbek.

Rozdział 5 (Prace konstrukcyjne, str. 81-89) opisuje rozwój stanowiska badawczego, w tym atomizer ultradźwiękowy z regulacją mocy oraz stolik podciśnieniowo-grzewczy, które pozwoliły na zwiększenie stabilności procesu i precyzji druku.

Rozdział 6 (Anteny prostownicze, str. 90-109) to najważniejszy rozdział rozprawy, systematycznie przedstawiający proces od wstępnych prac technologicznych przez projektowanie i charakteryzację różnych wariantów anten siatkowych (siatkowe linie transmisyjne, anteny podwójnie siatkowe, anteny z siatką z pojedynczych linii) po kompletne anteny prostownicze z prostownikiem i układem dopasowania impedancyjnego. Wykazano redukcję czasu druku o około 70% przy zachowaniu parametrów elektromagnetycznych porównywalnych z antenami pełnymi.

Rozdziały 7-9 prezentują badania aplikacyjne druku aerozolowego w sensorach mikrofalowych działających do 43 GHz, alternatywne podejście z wykorzystaniem druku FDM z kompozytami przewodzącymi oraz prace perspektywiczne dotyczące wytwarzania cewek planarnych i druku na podłożach niepłaskich (nachylenie do 15°).

Rozdział 10 (Podsumowanie i wnioski, str. 133-138) zawiera syntezę przeprowadzonych prac i 10 zwięzłych wniosków dobrze udokumentowanych wynikami.

Bibliografia (str. 139-189) zawiera bogatą bazę bibliograficzną liczącą ponad 400 pozycji, obejmującą zarówno fundamentalne prace, jak i najnowsze publikacje z lat 2020-2025 z prestiżowych czasopism międzynarodowych.

Całość rozprawy cechuje się spójnością, logiczną strukturą i przejrzystością przekazu. Praca jest bogato ilustrowana (78 numerowanych rysunków), co znacząco ułatwia zrozumienie prezentowanych zagadnień.

Zagadnienie naukowe/badawcze rozpatrywane w pracy

Autor w sposób jasny sformułował problem badawczy wraz z celami pracy. Cel główny brzmi: opracowanie technologii wytwarzania elementów systemu pozyskiwania i bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej z zastosowaniem techniki przyrostowej druku aerozolowego.

Problem naukowy zidentyfikowany przez Autora dotyczy braku w literaturze światowej kompletnych, funkcjonalnych anten prostowniczych wykonanych z wykorzystaniem techniki druku aerozolowego. Mimo że poszczególne komponenty elektroniczne były już wytwarzane tą techniką (anten, elementy RLC, tranzystory), kompleksowe rozwiązania umożliwiające pozyskiwanie energii z fal elektromagnetycznych nie zostały dotychczas opracowane. Drugim istotnym problemem jest optymalizacja procesu produkcji – wysoka rozdzielczość druku aerozolowego wiąże się z wolnym procesem nanoszenia pełnych powierzchni. Autor zidentyfikował możliwość zastosowania konstrukcji siatkowych anten, które mogłyby zredukować czas druku przy zachowaniu funkcjonalności elektromagnetycznej.

Cele szczegółowe obejmują: (1) wykonanie anten siatkowych typu patch o częstotliwości rezonansowej 2,45 GHz, (2) osiągnięcie niskiej wartości współczynnika odbicia S_{11} , (3) optymalizację czasu druku poprzez zastosowanie konstrukcji siatkowej, (4) weryfikację możliwości pozyskiwania energii odpadowej oraz (5) rozwój stanowiska badawczego.

Wybór kluczowych parametrów jest uzasadniony: częstotliwość 2,45 GHz ze względu na powszechne występowanie w przestrzeni zurbanizowanej (WiFi, Bluetooth), antena mikropaskowa typu patch ze względu na prostotę wykonania, konstrukcja siatkowa jako odpowiedź na długi czas drukowania dużych wzorów, podłoże Kapton ze względu na odporność termiczną i znane parametry dielektryczne.

Zagadnienie naukowe zostało sformułowane w sposób jasny i zrozumiały, z poprawnie zidentyfikowaną luką badawczą i realistycznymi celami.

Analiza źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle

Rozdział 2 rozprawy (Stan wiedzy, str. 15-73) stanowi obszerny przegląd literatury zajmujący 59 stron, co odpowiada prawie 40% objętości merytorycznej pracy. Przegląd został podzielony na pięć sekcji tematycznych: Internet Rzeczy, systemy pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy, elektronika drukowana, aplikacje elektroniki drukowanej w systemach EH/WPT oraz podsumowanie.

Bibliografia rozprawy zawiera ponad 460 pozycji literaturowych, obejmujących zarówno fundamentalne opracowania z zakresu elektroniki drukowanej i systemów RF, jak i najnowsze publikacje z lat 2020-2025. Duża część cytowanych prac pochodzi z prestiżowych czasopism międzynarodowych, co potwierdza aktualność przeglądu literatury. Autor odwołuje się do szerokiego spektrum źródeł, włącznie z raportami przemysłowymi oraz pracami z wiodących ośrodków badawczych. Wartościowym elementem jest publikacja przez Autora własnego artykułu przeglądowego dotyczącego elektroniki drukowanej w zastosowaniach RF, co świadczy o dogłębnym opanowaniu tematyki.

Autor poprawnie identyfikuje lukę badawczą, wskazując na brak w literaturze kompletnych anten prostowniczych wykonanych techniką druku aerozolowego. Mimo że pojedyncze komponenty (anten, elementy RLC, tranzystory) były już wytwarzane tą techniką, kompleksowe rozwiązania systemowe nie zostały dotychczas zaprezentowane. Szczególnie wartościowe jest szczegółowe omówienie techniki druku aerozolowego z uwzględnieniem jej zalet (wysoka rozdzielczość $\sim 10 \mu\text{m}$, możliwość druku na podłożach 3D) oraz ograniczeń (efekt overspray, długi czas drukowania pełnych powierzchni). Ta krytyczna analiza prowadzi do oryginalnego rozwiązania w postaci konstrukcji siatkowych anten.

Podsumowując, przegląd literatury jest obszerny, aktualny i w dużej mierze kompletny. Autor poprawnie zidentyfikował lukę badawczą i uzasadnił podjęcie badań własnych. Przedstawiony przegląd spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie.

Metodyka badań

Autor zastosował kompleksowy program badawczy łączący symulacje komputerowe, prace konstrukcyjne, badania technologiczne oraz charakteryzację elektromagnetyczną wykonanych struktur. Metodyka została opisana w rozdziałach 4-6 rozprawy.

Materiały: Jako podłoża wykorzystano głównie folię poliimidową Kapton HN o grubości $75 \mu\text{m}$, a także szkło, laminat RO4003C oraz FR4. Do wytwarzania przewodzących wzorów zastosowano tusze srebrne z nanocząstkami Ag25Te oraz eksperymentalny Ag60Te (UTDots, USA), ten drugi o wyższej zawartości fazy funkcjonalnej. Jako płaszczyznę uziemienia użyto miedzianej taśmy samoprzylepnej 3M.

Symulacje: Projektowanie i analizę elektromagnetyczną linii transmisyjnych oraz anten przeprowadzono w programie ANSYS HFSS. Prostowniki i układy dopasowania impedancyjnego zaprojektowano w programie QucsStudio.

Proces druku aerozolowego: Drukowanie realizowano na stanowisku z atomizacją ultradźwiękową i dyszą o średnicy $150 \mu\text{m}$. Autor dokonał istotnych modyfikacji stanowiska, w tym zaprojektował atomizer ultradźwiękowy z regulacją mocy oraz stół podciśnieniowo-grzewczy umożliwiający precyzyjne mocowanie cienkich folii. Parametry procesowe obejmowały temperaturę podłoża 60°C , liczbę warstw 6-10 oraz prędkość druku dostosowaną do geometrii wzoru. Jako główną metodę spiekania zastosowano spiekanie fotoniczne z użyciem lampy halogenowej 500 W przez 60 sekund.

Charakteryzacja: Pomiary parametrów S (S_{11} , S_{21}) przeprowadzono przy użyciu analizatora wektorowego w zakresie częstotliwości od kilkuset MHz do 43 GHz. Pomiary energetyczne anten prostowniczych obejmowały charakterystykę napięcia wyjściowego DC przy różnych poziomach mocy wejściowej RF oraz weryfikację możliwości zasilania prostych układów elektronicznych. Dodatkowo wykonano pomiary rezystancji powierzchniowej metodą czterosondową, chropowatości powierzchni oraz mikroskopię optyczną w celu weryfikacji jakości druku.

Podsumowując, zastosowana metodyka badań jest odpowiednia do osiągnięcia celów pracy i obejmuje kluczowe aspekty niezbędne do weryfikacji funkcjonalności opracowanych rozwiązań. Szczególnie wartościowe są prace konstrukcyjne nad rozwojem stanowiska badawczego, które świadczą o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań eksperymentalnych.

Oryginalność i znaczenie uzyskanych wyników

Głównym oryginalnym wkładem rozprawy jest wytworzenie anten siatkowych typu patch o częstotliwości 2,45 GHz metodą druku aerozolowego oraz demonstracja kompletnych anten

prostowniczych wykonanych tą techniką. Autor przedstawił trzy warianty anten siatkowych: antenę siatkową (teoretyczna przezroczystość optyczna 87,2%, $S_{11} = -29,1$ dB, czas druku ~ 9 godz.), antenę podwójnie siatkową (przezroczystość 96%, $S_{11} = -18,9$ dB, czas druku ~ 2 godz.) oraz antenę z siatką z pojedynczych linii (przezroczystość 97,32%, $S_{11} = -25,9$ dB, czas druku $\sim 1,5$ godz.). Konstrukcja siatkowa umożliwiła redukcję czasu druku o około 70-85% w porównaniu z antenami pełnymi przy zachowaniu parametrów elektromagnetycznych porównywalnych z rozwiązaniami konwencjonalnymi.

Według przeglądu literatury przeprowadzonego przez Autora, anteny siatkowe były wcześniej wykonywane metodą DIW, jednak nie były dotychczas realizowane techniką druku aerozolowego. Istotnym osiągnięciem jest wytworzenie kompletnych anten prostowniczych łączących anteny siatkowe z prostownikami i układami dopasowania impedancyjnego. Według twierdzeń Autora, w literaturze brakuje przykładów kompletnych anten prostowniczych wykonanych z wykorzystaniem druku aerozolowego, co czyniłoby to osiągnięcie pierwszym tego typu w skali światowej.

Wykonane anteny osiągnęły częstotliwość rezonansową 2,45 GHz zgodnie z założeniem oraz współczynniki odbicia S_{11} od -18,9 dB do -29,1 dB. Maksymalne napięcie DC na obciążeniu w pobliżu kuchenki mikrofalowej (1200 W) wynosiło od 0,825 V do 1,620 V dla prostownika 6-stopniowego, co jest porównywalne z komercyjną anteną monopolową (1,355 V) i anteną PCB z miedzi (1,620 V). Wartości te teoretycznie pozwalają na zasilanie układów zarządzania energią wymagających napięcia 0,38-0,6 V.

Autor dokonał również istotnych prac konstrukcyjnych nad stanowiskiem badawczym, opracowując atomizer ultradźwiękowy z regulacją mocy oraz stół podciśnieniowo-grzewczy. Atomizer z regulacją mocy pozwolił na wydłużenie stabilności procesu atomizacji do około 8 godzin. Te rozwiązania konstrukcyjne mają charakter raczej inżynierski, niemniej świadczą o umiejętności samodzielnego dostosowywania aparatury badawczej do potrzeb eksperymentu.

Oprócz anten prostowniczych, Autor przedstawił badania wykraczające poza główny zakres pracy: linie transmisyjne działające do 43 GHz, sensory mikrofalowe do pomiaru stężenia glukozy, druk FDM z kompozytami przewodzącymi oraz druk na podłożach 3D o nachyleniu do 15°. Te badania mają charakter eksploracyjny i świadczą o szerszym spojrzeniu na problematykę.

Podsumowując, praca przedstawia wartościowe wyniki dotyczące zastosowania druku aerozolowego do wytwarzania anten siatkowych typu patch. Głównym oryginalnym wkładem jest wytworzenie pierwszych kompletnych anten prostowniczych z wykorzystaniem tej techniki oraz wykazanie możliwości redukcji czasu druku poprzez zastosowanie konstrukcji siatkowej. Praca spełnia wymagania rozprawy doktorskiej, wykazując umiejętność samodzielnego prowadzenia badań i rozwiązania oryginalnego problemu naukowego.

Opracowanie redakcyjne

Rozprawa została przygotowana jako samodzielne dzieło naukowe o objętości 189 stron zgodnie z tradycyjną strukturą rozpraw doktorskich. Opracowanie redakcyjne jest na dobrym poziomie. Język polski jest poprawny, terminologia właściwa i konsekwentna. Struktura jest logiczna i przejrzysta, numeracja rozdziałów poprawna. Praca zawiera liczne rysunki i tabele, które w większości są czytelne, choć w niektórych przypadkach jakość reprodukcji jest niewystarczająca.

Niestety miejscami widać liczne drobne niedopracowania, np. w podpisach rysunków (Rysunki 63, 64,...). Część rysunków zyskałaby na jakości, jeżeli zawarto by skalę porównawczą wielkości (np. Rysunki 69, 73, ...).

Przydatność rozprawy dla nauk inżyniersko-technicznych

Rozprawa dostarcza cennych wyników dla rozwoju elektroniki drukowanej i systemów pozyskiwania energii dla Internetu Rzeczy. Wykazanie możliwości wytwarzania anten siatkowych z redukcją czasu produkcji o 70-85% przy zachowaniu wysokiej rozdzielczości stanowi istotny wkład poznawczy i technologiczny. Opracowane konstrukcje siatkowe mogą być wykorzystane nie tylko w technice druku aerozolowego, ale również adaptowane do innych metod elektroniki drukowanej, co zwiększa potencjał aplikacyjny wyników.

Szczególnie wartościowe dla środowiska naukowego są opracowane rozwiązania konstrukcyjne: atomizer z regulacją mocy oraz stolik podciśnieniowo-grzewczy, które mogą być bezpośrednio wykorzystane przez inne ośrodki badawcze rozwijające technikę AJP. Dokumentacja procesu technologicznego oraz analiza wpływu parametrów druku na właściwości końcowych struktur stanowią praktyczny punkt odniesienia dla kolejnych prac w tej dziedzinie.

Demonstracja kompletnych anten prostowniczych wykonanych metodą druku aerozolowego, po raz pierwszy przedstawiona w literaturze, otwiera nowe perspektywy badawcze. Uzyskane napięcia wyjściowe (0,8-1,6 V) są wystarczające dla prostych układów zarządzania energią w systemach IoT. Dalszy rozwój technologii może obejmować optymalizację ekonomiczną procesu oraz weryfikację funkcjonalności w szerszym spektrum aplikacji komercyjnych.

Praca ma solidną wartość poznawczą i stanowi istotny punkt wyjścia dla dalszych badań nad drukowaniem elektroniki wysokich częstotliwości. Wyniki dotyczące linii transmisyjnych działających do 43 GHz, druku na podłożach 3D o nachyleniu do 15°, oraz zastosowania w sensorach mikrofalowych wskazują na szerokie możliwości zastosowania opracowanej metodyki. Technika AJP zachowuje unikalne przewagi w kontekście prototypowania, wytwarzania niskonakładowego oraz aplikacji wymagających druku na powierzchniach niekonwencjonalnych, co czyni wyniki rozprawy aktualnymi i perspektywicznymi dla rozwoju elektroniki noszonej, implantów medycznych oraz systemów IoT nowej generacji.

Uwagi/pytania szczegółowe

Ze względu na wielowątkowe zagadnienia poruszane w pracy oraz w celu pogłębienia zrozumienia uzyskanych wyników, proszę o wyjaśnienie następujących kwestii:

Optymalizacja konstrukcji anten siatkowych

1. Jak szczegółowo przebiegał proces optymalizacji geometrii siatki anten? Czy przeprowadzono systematyczne badania parametryczne dla różnych wartości współczynnika wypełnienia, czy też optymalizacja miała charakter iteracyjny? Czy istnieje optymalna wartość współczynnika wypełnienia zapewniająca najlepszy kompromis między czasem druku, zużyciem materiału a parametrami elektromagnetycznymi anteny?

Materiały i technologia druku

2. Jakie konkretnie różnice zaobserwowano między tuszami Ag60Te i Ag25Te w kontekście efektu overspray oraz przewodności warstw po spiekaniu? W jaki sposób obecność overspray wpływa na funkcjonalność wykonanych anten, szczególnie w kontekście dokładności odwzorowania zaprojektowanej geometrii siatki?
3. Jaka jest morfologia warstw srebrowych po spiekaniu fotonicznym? Jak dokładnie zostały dobrane warunki spiekania (moc lampy 500 W, czas 60 s) – czy przeprowadzono optymalizację tych parametrów? Jaki jest mechanizm przewodzenia w warstwach drukowanych w

porównaniu do konwencjonalnych warstw miedzianych, i jak wpływa to na straty w zakresie wysokich częstotliwości?

Zbieżność wyników symulacji i pomiarów

4. W rozprawie obserwuje się różnice między wynikami symulacji a pomiarów (np. dla anteny siatkowej: symulowane S_{11} w okolicy -20 dB, zmierzone -29,1 dB; przesunięcia częstotliwości rezonansowej). Jakie czynniki mogą być odpowiedzialne za te rozbieżności?

Porównania i weryfikacja

7. Czy przeprowadzono bezpośrednie porównanie parametrów elektromagnetycznych (S_{11} , zysk, wydajność promieniowania) anten wykonanych drukiem aerozolowym z antenami o identycznej geometrii siatkowej wykonanymi innymi technikami elektroniki drukowanej (np. DIW, sitodruk) lub technikami konwencjonalnymi?
8. W jaki sposób rzeczywiste warunki pomiarowe w pobliżu kuchenki mikrofalowej (o mocy 1200 W) odpowiadają realnym scenariuszom pozyskiwania energii odpadowej? Jakiego poziomu mocy RF można oczekiwać w typowych środowiskach zurbanizowanych (WiFi, stacje bazowe), i czy anteny prostownicze wytwarzałyby wystarczające napięcia do zasilania rzeczywistych układów elektronicznych?

Perspektywy rozwoju

9. Biorąc pod uwagę obecny stan technologii oraz wyniki przedstawione w rozprawie, czy w przyszłości możliwe będzie wykonanie w pełni drukowanych anten prostowniczych zawierających wszystkie komponenty (antena, prostownik, układ dopasowania impedancyjnego, cewki, kondensatory, diody) wyłącznie techniką druku aerozolowego? Jakie są główne wyzwania technologiczne, które należy przezwyciężyć?
10. Jak Autor ocenia potencjał komercyjnego zastosowania opracowanej technologii? Czy przeprowadzono analizę ekonomiczną porównującą koszty produkcji (materiały, czas druku, energia) anten drukowanych aerozolowo z rozwiązaniami konwencjonalnymi lub innymi technikami elektroniki drukowanej?

Ocena spełnienia wymogów ustawowych

Na podstawie szczegółowej analizy przedstawionej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że spełnia ona warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, co uzasadniam następująco:

1. Ogólna wiedza teoretyczna w dyscyplinie

Rozprawa wykazuje, że Autor posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Przejawia się to w kompetentnym przedstawieniu stanu wiedzy dotyczącego elektroniki drukowanej, systemów RF oraz technik wytwarzania przyrostowego. Szczególnie rozdział 2, zawierający obszerny przegląd literatury (ok. 460 pozycji), świadczy o szerokim zapoznaniu się z problematyką. Autor poprawnie stosuje terminologię z zakresu elektromagnetyki, elektroniki wysokich częstotliwości oraz materiałoznawstwa, wykazując znajomość fundamentów teoretycznych niezbędnych do prowadzenia badań w wybranym obszarze.

2. Umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Autor wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej na wszystkich jej etapach. Świadczą o tym:

- Samodzielną identyfikacją luki badawczej w literaturze światowej
- Opracowanie metodyki badań obejmującej symulację, wytwarzanie oraz charakteryzację
- Rozwój stanowiska badawczego poprzez konstrukcję atomizera z regulacją mocy i stolika podciśnieniowo-grzewczego
- Przeprowadzenie kompleksowych badań eksperymentalnych i pomiarów w szerokim zakresie częstotliwości
- Analiza i interpretacja wyników w kontekście literatury światowej
- Formułowanie wniosków i wskazanie kierunków dalszych badań

Szczególnie istotne jest samodzielne dostosowanie aparatury badawczej do potrzeb eksperymentu, co świadczy o umiejętnościach inżynierskich i elastyczności w rozwiązywaniu problemów technicznych.

3. Oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego polegające na opracowaniu technologii wytwarzania anten prostowniczych metodą druku aerozolowego. Oryginalność przejawia się w:

- Zastosowaniu konstrukcji siatkowej anten wykonanych techniką AJP, co według wiedzy Autora nie było wcześniej badane
- Wytworzeniu pierwszych kompletnych anten prostowniczych z wykorzystaniem druku aerozolowego
- Wykazaniu możliwości redukcji czasu druku o 70-85% przy zachowaniu funkcjonalności elektromagnetycznej
- Opracowaniu rozwiązań konstrukcyjnych poprawiających stabilność procesu atomizacji

Wyniki rozprawy stanowią wkład do rozwoju elektroniki drukowanej i systemów pozyskiwania energii dla Internetu Rzeczy, choć ich znaczenie ma charakter głównie poznawczy i wymaga dalszej weryfikacji w warunkach aplikacyjnych.

Podsumowanie

Rozprawa spełnia wszystkie wymogi formalne i merytoryczne stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Autor wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną, umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz rozwiązał oryginalny problem naukowy. Praca stanowi wartościowy wkład do rozwoju techniki druku aerozolowego w zastosowaniach wysokoczęstotliwościowych.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Kacpra Skarżyńskiego stanowi wartościowe opracowanie naukowe z zakresu elektroniki drukowanej i systemów RF. Autor wykazał się dobrą orientacją w literaturze przedmiotu, umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań eksperymentalnych oraz zdolnością do rozwiązywania problemów technologicznych.

Główne osiągnięcia pracy

Autor opracował metodykę wytwarzania anten siatkowych typu patch o częstotliwości 2,45 GHz z wykorzystaniem druku aerozolowego, osiągając redukcję czasu druku o 70-85% w porównaniu z antenami pełnymi. Wykonane anteny prostownicze wykazały parametry elektromagnetyczne porównywalne z rozwiązaniami konwencjonalnymi i zdolność do generowania napięć wyjściowych na poziomie 0,8-1,6 V. Opracowane rozwiązania konstrukcyjne (atomizer z regulacją mocy, stolik podciśnieniowo-grzewczy) stanowią wkład w rozwój techniki druku aerozolowego.

Praca zawiera także wartościowe badania dodatkowe dotyczące linii transmisyjnych działających do 43 GHz oraz druku na podłożach 3D o nachyleniu do 15°, rozszerzające potencjalne zastosowania techniki poza pierwotny zakres rozprawy.

Klasyfikacja rozprawy

Zgodnie z wytycznymi Rady Naukowej, klasyfikuję przedstawioną rozprawę jako spełniającą wymagania z wyraźnym nadmiarem (kategoria d). Praca wykazuje solidny poziom naukowy, odpowiednią metodykę badań i oryginalne rozwiązanie problemu.

Wniosek końcowy

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Kacpra Skarżyńskiego pt. "Opracowanie technologii wytwarzania elementów systemu pozyskiwania i bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej z zastosowaniem techniki przyrostowej druku aerozolowego" spełnia wszystkie wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Kacpra Skarżyńskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz o nadanie mu stopnia doktora w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Z poważaniem,

Sebastian Molin