

Wrocław, 31 październik 2025 r.

prof. dr hab. inż. Karol Malecha

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów

Politechnika Wrocławska

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Kacpra Skarżyńskiego,

**pt. „Opracowanie technologii wytwarzania elementów systemu
pozyskiwania i bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej
z zastosowaniem techniki przyrostowej druku aerozolowego”.**

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska autorstwa Pana mgr inż. Kacpra Skarżyńskiego, której tematyka koncentruje się na zagadnieniach związanych z możliwością wykorzystania stosunkowo nowoczesnych i tanich techniki druku aerozolowego AJP (*ang. Aerosol Jet Printing*) oraz druku przyrostowego z użyciem uplastycznionego filamentu FDM (*ang. Fused Deposition Modeling*), nie wymienionej w tytule rozprawy, do wytwarzania podzespołów przeznaczonych do pozyskiwania i przesyłania energii za pomocą fal elektromagnetycznych o częstotliwościach radiowych. Recenzowana rozprawa doktorska podejmuje istotny i aktualny temat związany z odzyskiwaniem tzw. energii odpadowej (*ang. Energy harvesting*) z otoczenia, której potencjalnym źródłem mogą być urządzenia powszechnie obecne w środowisku człowieka, takie jak nadajniki telefonii komórkowej, sieci Wi-Fi czy inne systemy bezprzewodowej transmisji danych. Co więcej w ostatnich latach opublikowano prace naukowe, których autorzy zademonstrowali możliwość pozyskiwania energii elektrycznej z urządzeń konsumenckich obecnych w większości gospodarstw domowych, takich jak kuchenki mikrofalowe czy routery Wi-Fi. Chociaż wspomniane źródła fal elektromagnetycznych emitują niewielką

ilość energii to ich powszechna obecność sprawia, że całkowity potencjał odzysku staje się znaczący. Urządzenia takie jak nadajniki GSM i routery Wi-Fi mogą dostarczać w sposób ciągły niewielkie ilości energii możliwej do wykorzystania, np. do zasilania urządzeń i systemów bezbateryjnych IoT (*ang. Internet of Things* - Internet rzeczy). Jednymi z wymogów stawianych tego typu urządzeniom są niewielkie rozmiary, niezawodność oraz niska cena, dlatego wciąż poszukiwane są nowe materiały i technologie umożliwiające wytwarzanie i miniaturyzację podzespołów i elementów elektronicznych przy jednoczesnym obniżeniu kosztów wytwarzania. Stosowane obecnie niskokosztowe techniki wytwarzania obwodów elektrycznych dla urządzeń łączności bezprzewodowej wykorzystują różne metody druku, takie jak sitodruk, druk strumieniowy (*ang. ink-jet printing*), druk offsetowy. Wspomniane techniki umożliwiają nanoszenie warstw o odmiennych właściwościach elektrycznych i z powodzeniem były stosowane do wytwarzania różnorodnych podzespołów elektronicznych stosowanych w łączności bezprzewodowej (np. cewek, kondensatorów, filtrów, rezonatorów, sprzęgaczy, linii transmisyjnych, anten, itp.). Jednak ograniczeniem standardowych technik druku jest możliwość nanoszenia warstw na podłoża płaskie, co w dużej mierze wpływa na potencjał miniaturyzacji finalnego urządzenia. Dlatego opracowanie wysokorozdzielczej techniki nanoszenia materiałów o określonych właściwościach elektrycznych na zarówno podłoża płaskie, jak i profilowane lub zakrzywione ma duże znaczenie praktyczne. Dodatkowo jej zastosowanie do wytwarzania podzespołów dla bezprzewodowego pozyskiwania i przesyłania energii elektrycznej może doprowadzić do upowszechnienia stosowania bezbateryjnych urządzeń IoT.

Recenzowana praca nie zawiera tezy, jednak doktorant sformułował w jasny sposób cel pracy jako:

„opracowanie technologii wytwarzania elementów systemu pozyskiwania i bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej z zastosowaniem techniki przyrostowej druku aerozolowego”.

Przedstawiony cel pracy wydaje się zawężony w stosunku do treści recenzowanej rozprawy, ponieważ nie obejmuje on przeprowadzonych badań aplikacyjnych związanych z opracowaniem czujnika glukozy oraz technologicznych nad możliwością zastosowania alternatywnej metody

wytwarzania anten za pomocą techniki przyrostowej FDM. Dlatego, w opinii recenzenta, opisany cel pracy powinien być rozszerzony o wszystkie aspekty naukowo-technologiczne, które umieszczono w rozprawie.

Doktorant osiągnął postawiony cel na drodze doświadczalnej. Wiązało się to z przeprowadzeniem szeregu eksperymentów numerycznych i technologicznych związanych zaprojektowaniem geometrii anten oraz linii transmisyjnych wytworzonych z zastosowaniem metod druku AJP oraz FDM, a także zestawieniu szeregu stanowisk badawczych, w tym wykorzystujących zaawansowaną aparaturę pomiarową (np. wektorowy analizator sieci, VNA). Opis przeprowadzonych przez doktorant prac naukowych obejmuje ponad 60 stron tekstu, podczas gdy na cały dokument obejmujący recenzowaną rozprawę składa się 189 stron. Treść pracy została podzielona na 10 rozdziałów, zawiera ona również spisy treści, akronimów oraz wykaz cytowanej literatury. Do rozprawy dołączono również dwa jednostronicowe streszczenia napisane w języku polskim i angielskim. Zaproponowany układ pracy nie budzi większych zastrzeżeń, jest logiczny i przejrzysty.

Rozprawa rozpoczyna się czterostronicowym wprowadzeniem, w którym Doktorant zarysowuje poruszany problem badawczy i wprowadza czytelnika w problematykę zasilania miniaturowych bezprzewodowych czujników IoT. Lakonicznie omawia techniki druku stosowane do wytwarzania anten prostowniczych do pozyskiwania energii fal elektromagnetycznych. Przedstawia również pokrótce główne założenia i zawartość rozprawy. Przegląd literaturowy został zawarty w drugim rozdziale. Doktorant omawia w nim pokrótce zagadnienia związane z Internetem rzeczy, istniejącymi systemami pozyskiwania energii, takimi jak termogeneratory, piezogeneratory, ogniwa fotowoltaiczne oraz anteny prostownicze. W dalszej części rozdziału prezentowane są zagadnienia związane z projektowaniem anten prostowniczych oraz przywoływane są podstawowe zależności związane z bezprzewodowym przesyłaniem i odbieraniem energii, a także omawiane są poszczególne elementy z których zbudowany jest układ anteny prostowniczej. Następnie przedstawiane są główne (potencjalne) źródła energii odpadowej możliwe do pozyskania na drodze bezprzewodowej oraz obowiązujące przepisy dotyczącą emisji mocy przez urządzenia oraz sieci 5G. Rozdział kończy omówienie podstawowych technik drukowania stosowanych w elektronice (sitodruk, druk strumieniowy, druk offsetowy, bezpo-

średni druk tuszem oraz druk aerozolowy) oraz opis ich aplikacji w systemach pozyskiwania energii i bezprzewodowego transferu mocy. W rozdziale 3, liczącym zaledwie jedną stronę, Autor przedstawia cel i zakres rozprawy doktorskiej, uzasadnia również pokrótce wybór geometrii badanych anten (mikropaskowa typu „patch”) oraz techniki ich realizacji za pomocą druku aerozolu. Część eksperymentalną rozprawy stanowią rozdziały 4-8. W pierwszej kolejności omawiane są materiały zastosowane do wytworzenia poszczególnych struktur testowych za pomocą metod AJP oraz FDM. Następnie opisano sposób przeprowadzania eksperymentów numerycznych z użyciem oprogramowania ANSYS HFSS oraz procedurę wykonywania struktur testowych i ich przygotowania do pomiarów. Jednak w wypadku symulacji numerycznych brakuje podstawowych informacji umożliwiających weryfikację ich poprawnego przeprowadzenia, np. o metodzie modelowania, warunkach brzegowych/początkowych, właściwościach materiałowych, itd. Badania właściwości opracowanych elementów anteny prostowniczej zostały przeprowadzone za pomocą wektorowego analizatora sieci i polegały na pomiarze dwóch współczynników macierzy rozproszenia – współczynnika odbicia (S_{11}) w wypadku anten oraz współczynnika transmisji (S_{21}) dla linii transmisyjnych. Rezystancja struktur testowych mierzona była za pomocą standardowej metody dwupunktowej z użyciem multimetru cyfrowego, podczas gdy parametry elektryczne wykonanych cewek indukcyjnych mierzono za pomocą miernika indukcyjności. W omawianym rozdziale przywołano również wzory na podstawie których obliczano wybrane parametry anten prostowniczych, takie jak zysk energetyczny i efektywność konwersji mocy prostownika z układem dopasowania indukcyjnego. Pomiary właściwości geometrycznych zrealizowanych struktur testowych wykonano za pomocą mikroskopu optycznego, a chropowatość naniesionych warstw określano przy użyciu profilometru. Rozdział 5 został poświęcony pracą konstrukcyjnym mającym na celu udoskonalenie istniejącego już systemu do druku aerozolu. Należy podkreślić, że wspomniane urządzenie jest autorskim pomysłem Doktoranta i zostało opracowane przez niego w wyniku wcześniejszych prac badawczych prowadzonych w ramach jego pracy dyplomowej na Politechnice Warszawskiej. Chociaż w rozdziale poruszane są ważne aspekty natury inżynierskiej związane z budową nowoczesnej aparatury technologicznej to brakuje w nim elementów naukowych. W opinii recenzenta, doktorant mógł pokusić się o krótkie scharakteryzowanie opracowanego/ulepszonego urządzenia, np. przeprowadzając badania przy zastosowaniu metod statystycznych nad wpływem parametrów procesu drukowania na rozdzielczość i powtarzalność uzyskiwanych wzorów.

Zmodyfikowany przez doktoranta system do druku aerozolowego został z powodzeniem użyty do wytworzenia rzeczywistych struktur testowych anten prostowniczych, a związane z tym prace technologiczne opisano w rozdziale 6. W pierwszej kolejności doktorant skupił się na doborze parametrów druku umożliwiających uzyskanie ciągłych linii o kontrolowanej szerokości. Na podstawie przeprowadzonych prac uzyskał linie o szerokości około $30\ \mu\text{m}$ i odległością między środkami kolejnych linii równą $20\ \mu\text{m}$. Co w wypadku komercyjnie stosowanych technik drukowania jest wynikiem bardzo dobrym, jednak brak informacji o przeprowadzonych badaniach statystycznych nie pozwala stwierdzić jaki jest rzeczywisty uzysk stosowanej metody. Na podstawie dobranych parametrów pracy drukarki AJP wykonano struktury testowe w postaci anteny siatkowej, siatkowej linii transmisyjnej, podwójnie siatkowej anteny typu „patch” oraz anteny mikropaskowej typu „patch” z siatką z pojedynczych linii. Dla wszystkich wspomnianych układów uzyskano wyraźne minimum współczynnika S_{11} ($-20\ \text{dB}$ lub mniej, co odpowiada mniej niż 1% energii odbitej), co sugeruje dobre dopasowanie sygnału o częstotliwości $2,45\ \text{GHz}$ do wejść poszczególnych układów. Jednak porównując wyniki pomiarów z krzywymi obliczonymi na podstawie symulacji numerycznych widoczne są pewne różnice, które nie zostały wystarczająco skomentowane przez Doktoranta. Dodatkowo przywołując wspomniane we wcześniejszym fragmencie recenzji braki informacji o szczegółach przeprowadzonych symulacji utrudniają interpretację uzyskanych odstępstw między modelem a strukturą rzeczywistą. Zmierzone wartości S_{11} posłużyły do obliczenia zysku energetycznego poszczególnych anten wytworzonych za pomocą druku AJP, który generalnie był niższy od zysku energetycznego komercyjnie dostępnych rozwiązań, chociaż należy zaznaczyć, że w wypadku wydrukowanej anteny siatkowej był tego samego rzędu. W dalszej części rozdziału opisana jest próba stworzenia anteny prostowniczej poprzez połączenie wcześniej wspomnianych anten siatkowych z prostownikiem opracowanym przez doktoranta. W celu zbadania właściwości zrealizowanych układów przeprowadzono eksperyment mający na celu sprawdzenie możliwości pozyskiwania energii odpadowej w środowisku biurowym. W tym celu jako potencjalne źródła promieniowania zaproponowano kuchenkę mikrofalową oraz router Wi-Fi. Eksperyment polegał na pomiarze napięcia stałego pojawiającego się na obciążeniu poszczególnych anten prostowniczych. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że napięcie osiągnięte przez drukowaną antenę siatkową było porównywalne z napięciem wytworzonym dla komercyjnych rozwiązań. W wypadku pozostałych wydrukowanych geometrii anten zmierzone napięcia były

kilkukrotnie niższe. Rozdział kończy podsumowanie, w którym brakuje jednak dyskusji otrzymanych wyników, zdaniem recenzenta, doktorant mógłby skomentować (nawet lakonicznie) uzyskane rezultaty i omówić różnice otrzymane dla poszczególnych konstrukcji analizowanych anten. W kolejnym rozdziale przedstawiono możliwość zastosowania opracowanej techniki druku aerozolowego do konstrukcji czujników. W tym celu doktorant wykonał strukturę testową w postaci linii mikropaskowej na podłożu z poliimidu (Kapton) o różnej grubości oraz na laminacie mikrofalowym. Pomiar współczynnika transmisji (S_{21}) dla częstotliwości sięgającej 40 GHz, wykazały zbliżone straty transmisyjne dla poszczególnych struktur testowych. Doktorant wskazał, że otrzymany współczynnik S_{21} był na akceptowalnym poziomie (około -2 dB). W tym miejscu rozprawy pojawia się pewna rozbieżność - z treści wynika, że pomiary wykonano dla częstotliwości maksymalnej równej 43 GHz, podczas gdy na rysunku obrazującym wyniki pomiarów skala kończy się na wartości 40 GHz, niestety Autor nie tłumaczy skąd wynika ta różnica. Na podstawie uzyskanych wyników podjęto udaną próbę stworzenia mikrofalowego czujnika glukozy, jednak w pracy nie zamieszczono żadnych krzywych pomiarowych obrazujących pracę wspomnianego urządzenia, a jedynie odwołanie do innej opublikowanej pracy naukowej. W rozdziale 8 Doktorant opisuje badania prowadzone nad alternatywną metodą wytwarzania anten za pomocą techniki przyrostowej FDM. Za pomocą wspomnianej metody Doktorant wykonał antenę mikropaskową typu „patch” i zmierzył jej charakterystykę odbiciową, uzyskując wartość współczynnika S_{11} równą -21,9 dB dla częstotliwości 2,45 GHz. Jednak w rozdziale brakuje informacji o użytym kompozycie przewodzącym oraz podłożu na którym wykonano antenę, co utrudnia interpretację otrzymanych wyników i ich rozbieżności względem symulacji. W następnym kroku Doktorant dołączył do wykonanej anteny opracowany w ramach wcześniejszych prac prostownik i zmierzył napięcie możliwe do uzyskania w pobliżu kuchenki mikrofalowej. Otrzymana wartość 1,223 V była porównywalna do napięcia zmierzonego dla anten komercyjnych oraz anteny siatkowej wykonanej techniką AJP. Rozdział 9 zawiera wyniki prac technologicznych nad zastosowaniem druku aerozolowego do wykonywania elementów biernych na potrzeby anten prostowniczych. W pierwszej kolejności Doktorant skupił się na wytworzeniu cewek planarnych na podłożu z Kaptonu. Otrzymane podzespoły charakteryzowały się indukcyjnością na poziomie poniżej 0,6 μH i rezystancją w zakresie 105-190 Ω . W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki eksperymentów związanych z opracowaniem własnych kompozycji tuszy przeznaczonych do druku aerozolowego. W ra-

mach badań opracowano kompozycje o właściwościach przewodzących (na bazie mrówczanu miedzi), dielektryczny (na bazie polimetakrylanu metylu, PMMA) oraz półprzewodnikowy (na bazie tlenku indu, galu i cynku, IGZO). Ostatnim eksperymentem opisywanym w rozdziale 9 była próba zastosowania druku aerozolowego do nanoszenia warstw przewodzących na podłoża o różnej krzywiznie (15° , 30° i 45°). Na podstawie przeprowadzonych pomiarów rezystancji stwierdzono, że rezystancja ścieżki naniesionej na podłożu o krzywiznie 15° jest porównywalna z rezystancją ścieżki na podłożu płaskim, a wraz ze wzrostem krzywizny podłoża rezystancja ścieżki rośnie. Podsumowanie i wnioski końcowe dotyczące otrzymanych w ramach rozprawy wyników prac badawczych przedstawiono w rozdziale 10.

Autor odwołuje się do 463 pozycji literaturowych, z czego 4 to prace z jego udziałem. Z jednej strony tak duża liczba cytowanych prac naukowych jest imponująca, jednak z drugiej strony może budzić wątpliwości jak dokładnie Doktorant zapoznał się z ich treścią. Pan mgr inż. Kacper Skarżyński w swojej rozprawie powołuje się na książki, artykuły naukowe, referaty konferencyjne oraz źródła internetowe, większość z nich została opublikowana w ostatnich 10 latach, dlatego należy uznać je za aktualne. Chociaż w wykazie można również odnaleźć pozycje opublikowane w latach 80-tych XX wieku, które należy już uznać za historyczne.

Pewne zastrzeżenia budzi część edytorska pracy. W rozprawie zdarzają się tabele, które podzielone są pomiędzy dwie strony (np. Tab. 2, s. 100-101; Tab. 6, s. 108-109). W tekście pojawia się dużo akronimów, niestety nie wszystkie zostały ujęte w spisie zamieszczonym na początku rozprawy. Co więcej wiele akronimów umieszczonych w pracy nie jest rozwijana lub objaśniana (np. PMMA, PCB, CAD, LED, itd.). W pracy doktorant odwołuje się również do wielu wzorów i formuł matematycznych, jednak przy ich opisie w wiele wypadkach nie podaje jednostek wielkości fizycznych w nich występujących. Autorowi rozprawy brakuje również konsekwencji w sposobie zapisywania wartości wielkości fizycznych i ich jednostek, w jednej części pracy zapisuje je rozdzielone spacją, a w innych bez niej. Tymczasem według konwencji przyjętej dla prac naukowych wartość liczbową powinna być zawsze oddzielona od jednostki spacją, wyjątek stanowią jedynie symbole stopnia oraz procenta i promila. Dodatkowo Doktorant odwołując się do temperatury bardzo często zapomina podać jej skali, recenzent jedynie z kontekstu może się domyślać, że chodzi o temperaturę w skali Celsjusza. Rozprawa zawiera

także pewna liczba błędów z zakresu pisowni i interpunkcji. Wymienione uchybienia nie mają jednak wpływu na wartość merytoryczną rozprawy, ale w dużej mierze utrudniają jej lekturę.

Pod względem merytorycznym treść pracy nie budzi większych zastrzeżeń. Szczególnie, że część prezentowanych wyników została opublikowana w uznanych periodykach naukowych o zasięgu międzynarodowym, znajdujących się w bazie *Journal Citation Reports* (JCR), pozytywnie przechodząc przez rygorystyczną procedurę recenzji wydawniczych. Dodatkowo opracowana w ramach rozprawy technologia stała się przedmiotem zgłoszenia patentowego.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa Pana mgr inż. Kacpra Skarżyńskiego przyczyniła się do rozwoju dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, a Doktorant wykazał się wiedzą i umiejętnościami wymaganymi dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych. Niemniej w trakcie czytania rozprawy nasunęły mi się następujące uwagi i pytania:

1. Na rys. 6 (s. 20) przetłumaczono opis „non-radiative near field” jako „reaktywne bliskie pole”, tymczasem poprawne tłumaczenie powinno brzmieć „nieradiacyjne bliskie pole”, chociaż oba pojęcia są ze sobą blisko spokrewnione to nie oznaczają dokładnie tego samego.
2. Termin „sieć dwuportowa” jest bezpośrednim tłumaczeniem z języka angielskiego „two-port network”, natomiast „dwuwrotnik” to nazwa bardziej zakorzeniona w polskiej nomenklaturze technicznej.
3. Dla wszystkich badanych/symulowanych materiałów podłożowych powinno się podać co najmniej wartość przenikalności dielektrycznej o współczynniku strat.
4. Problematiczna jest definicja wsp. S_{11} podana na s. 23 jako „amplitudę napięcia fali odbitej do portu 1 w stosunku do amplitudy napięcia fali wychodzącej z tego portu”, czym różni się „fala odbita” od „fali wychodzącej” w tym kontekście?
5. Co autor rozumie pod pojęciem podłoża 3D i 4D?
6. Jak definiowana jest „znormalizowana rezystancja w funkcji długości” (s. 70) ?

7. Z czego mogą wynikać widoczne różnice pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów rzeczywistych anten (np. rys. 51 lub 54 - pojawia się wyraźne drugie minimum na zmierzonej krzywej, które nie jest skomentowane w pracy)?
8. Czy Doktorant może dokładniej wyjaśnić na czym polegał mechanizm „odfiltrowania wpływu złącz” (s. 100) ?
9. W rozdziale 7 podano, że pomiary wykonanej linii mikropaskowej wykonano dla częstotliwości do 43 GHz, podczas gdy na rys. 62 (s. 112) obrazującym te pomiary skala kończy się na 40 GHz, skąd ta rozbieżność?
10. Z rys. 67 wynika, że zmierzony współczynnik 11 dla anteny wykonanej za pomocą techniki FDM przekroczył -30 dB, natomiast w treści pracy podano -21,9 dB. Która wartość jest prawidłowa?

Przytoczone powyżej pytania i uwagi nie podważają wartości merytorycznej rozprawy i należy je potraktować jako głos recenzenta w dyskusji. Uważam, że Doktorant osiągnął postawiony cel.

Reasumując stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane rozprawom doktorskim w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, określone przez Ustawę Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

prof. Karol Malecha

