

Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Zieniutycz  
Katedra Inżynierii Mikrofalowej i Antenowej  
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki,  
Politechnika Gdańska

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Izabeli Słomian pt.:  
„Design of dual-polarized and scanned-beam microstrip antenna arrays operating in microwave frequency range”  
„Projektowanie mikropaskowych układów antenowych dwupolaryzacyjnych oraz o skanowanej wiązce pracujących w paśmie mikrofalowym”

### **Charakterystyka rozprawy**

Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnień związanych z projektowaniem, realizacją oraz pomiarami parametrów szyków anten planarnych, a w szczególności ich układów zasilania. Szyki anten planarnych są niezmiennie, od szeregu lat, przedmiotem zainteresowania ze względu na ich liczne zalety, a w szczególności możliwość uzyskania akceptowalnych parametrów przy jednoczesnym zachowaniu technologiczności i relatywnie niskich kosztów wykonania. Szyki anten mikropaskowych znajdują szereg zastosowań w systemach telekomunikacyjnych naziemnych, satelitarnych, teledetekcyjnych oraz w technice radarowej, gdzie wprowadzenie architektury z zasilaniem rozproszonym (modułów nadawczo-odbiorczych) pozwoliło ominąć ograniczenia mocowe tego typu anten. Jest rzeczą powszechnie znaną, że podstawowym zagadnieniem w projektowaniu szyków anten planarnych jest wybór optymalnego układu zasilania z punktu widzenia pożądanych własności szyku, a w szczególności wysokiej sprawności, typu polaryzacji (liniowej, kołowej), czy też parametrów mechanicznych, co może mieć istotne znaczenie np. w technologiach kosmicznych. Warto zauważyć, że jakkolwiek układ zasilania anteny można traktować jako wielowrotnik, to w praktycznej realizacji stanowi on integralną część anteny i jego własności determinują parametry (elektryczne oraz fizyczne) całej anteny. Odpowiednio zaprojektowane układy zasilania mogą umożliwić pracę wielopolaryzacyjną anteny, co pozwala za zwielokrotnienie kanałów transmisji danych, czy też, w przypadku techniki radarowej, dostarcza dodatkowych informacji o obserwowanych obiektach. Z tego też względu prace dotyczące nowych rozwiązań w zakresie układów zasilania szyków anten planarnych, a w szczególności układów umożliwiających pracę wielopolaryzacyjną szyku, są wartościowe i wciąż aktualne. Skupienie się doktorantki nad układami zasilania anten mikropaskowych jest więc trafnym wyborem, gdyż w zakresie samych łąt promieniujących pracujących w zakresie częstotliwości mikrofalowych trudno w chwili obecnej oczekiwać przełomowych dokonań.

Doktorantka wymienia trzy cele przedstawionej rozprawy: (i) opracowanie szyków typu „broadside” o wysokiej sprawności (niskich stratach) z podwójną polaryzacją, charakteryzujących się stabilnym kierunkiem wiązki głównej w szerokim zakresie częstotliwości, (ii) opracowanie nowych metod zasilania dla szyków zasilanych przez matrycę Butlera, (iii) opracowanie anten z falą wyciekającą o zwiększonym zakresie kątowym wiązki głównej.

Przedstawione powyżej cele zdeterminowały organizację tekstu rozprawy, która została przedstawiona do recenzji w formie zbioru 19 publikacji, zgrupowanych w trzech rozdziałach, oraz wstępu (rozdział 1) i podsumowania (rozdział 5). Cała praca, z wyjątkiem polskiej wersji streszczenia, jest napisana w języku angielskim i liczy 153 strony.

W rozdziale pierwszym doktorantka na wstępie przedstawiła motywacje do podjęcia prac, cele rozprawy oraz omówiła organizację tekstu rozprawy.

Rozdział 2 rozprawy dotyczy szyków anten mikropaskowych o regulowanej polaryzacji, zasilanych szeregowo. Wybór tego typu zasilania wynikał z dwóch przesłanek: (i) pożądanej minimalizacji strat w sieci zasilającej oraz (ii) konieczności zapewnienia pracy wielopolaryzacyjnej, przy jednoczesnym ograniczeniu strat. Istotną wadą szeregowej metody zasilania szyku jest brak stabilności kierunku

wiązki głównej w funkcji częstotliwości, wynikający ze zmieniającej się drogi elektrycznej linii mikropaskowej łączącej sąsiednie promienniki w szyku. Ten efekt prowadzi więc do ograniczenia pasma pracy szyku. Doktorantka zaproponowała nowy sposób organizacji szyku zasilanego szeregowo, polegający na jego segmentacji oraz odpowiednim zasilaniu przez szczelinę sprzęgającą. Powstałą strukturę promienników 4x4 nazwała strukturą kratową (ang. lattice). Pojedynczy segment, to szyk 2x2 łąt kwadratowych zasilanych szeregowo z obu boków, co przy zachowaniu odpowiednich relacji fazowych pozwala uzyskać polaryzacje: zarówno liniowe (pionową, poziomą) jak i kołowe (prawo- i lewoskrętną). Ww. relacje fazowe uzyskuje się poprzez wykorzystanie sprzężenia linii zasilających promienniki z zewnętrzną linią zasilającą poprzez ukośną szczelinę we wspólnym ekranie. Takie zasilanie prowadzi do uzyskania symetrycznego rozkładu fazy w aperturze dyskretnej szyku, co stabilizuje kierunek wiązki głównej w funkcji częstotliwości, a więc zabezpiecza pracę szerokopasmową w trybie „broadside”. Jednocześnie zasilanie szeregowo minimalizuje straty w układzie zasilającym. Pracę wielopolaryzacyjną uzyskuje się poprzez pobudzenie jednego z czterech wrót wejściowych sieci zasilającej. Zasilanie bezpośrednie łąt kwadratowych z linii mikropaskowych jest jednak wąskopasmowe ze względu na dopasowanie, więc w kolejnych publikacjach rozdziału przedstawiono propozycje poszerzenia pasma pracy. Doktorantka zaproponowała wykorzystanie stosowanych w takich przypadkach rozwiązań m.in. poprzez zasilanie łaty poprzez sprzężenie elektromagnetyczne (zamiast bezpośredniego zasilania). Inny kierunek badań nad strukturą kratową, to prace nad strukturą sieci zasilającej. Tutaj badania koncentrowały się na: (i) wykorzystaniu innych układów podziału mocy, niż wspomniana szczelina sprzęgająca, (ii) wykorzystaniu bardziej rozbudowanego układu podziału mocy zamiast prostej szczeliny sprzęgającej. Wyniki badań zawarto w trzech artykułach w czasopismach indeksowanych w bazie JCR oraz w czterech komunikatach zgłoszonych na konferencje indeksowane w bazie WoS

Rozdział 3 rozprawy dotyczy szyków anten mikropaskowych zasilanych przez matrycę Butlera, która jest w istocie wielowrotnikiem zawierającym  $n$  wejść i  $n$  wyjść. Tego typu zasilanie w wersji klasycznej umożliwia pracę szyku z pewną liczbą wiązek, których kierunek jest związany z pobudzeniem określonego wejścia układu. Jakkolwiek jest to koncepcja zaproponowana ponad pięćdziesięciu lat temu, również obecnie spotkamy prace, w których proponuje się modyfikacje, które bądź usuwają znane wady rozwiązania klasycznego (np. wysoki poziom listków bocznych), bądź umożliwiają uzyskanie nowych funkcjonalności matrycy. Oba ww. nurty można znaleźć w pracach składających się na rozdział trzeci rozprawy. Przykładowo, w pierwszej z prac rozdziału zaproponowano układ zasilający 4x4 umożliwiający wprawdzie uzyskanie tylko dwóch kierunków wiązki, ale o różnych polaryzacjach kołowych. W innej pracy proponuje się realizację matrycy na powierzchni bocznej walca, co umożliwia eliminację skrzyżowań linii mikropaskowych, będących potencjalnym źródłem niepożądanych sprzężeń pomiędzy wrotami matrycy. Istotną wadą klasycznej macierzy Butlera jest niski poziom listków bocznych wynikający z równomiernego rozkładu amplitudy w dyskretnej aperturze szyku. Doktorantka proponuje w kolejnych pracach uzupełnienie klasycznej matrycy Butlera dodatkowymi dzielnikami mocy, co umożliwia uzyskanie odpowiedniego rozkładu amplitudy w aperturze i w konsekwencji redukcję poziomu listków bocznych. Prace te dotyczyły zarówno szyków antenowych z polaryzacją kołową jak i liniową. W rozdziale zaproponowano również koncepcję szyku antenowego zasilanego z matrycy Butlera pracującego na dwóch częstotliwościach, odległych od siebie o ok. oktawę. Przedstawiono projekt matrycy Butlera pracującej na dwóch częstotliwościach oraz układ anten łatowych na oba pasma zgrupowany we wspólnej aperturze. Na rozdział składa się siedem prac, z których trzy to artykuły opublikowane w czasopismach indeksowanych w bazie JCR, zaś cztery to komunikaty na konferencjach indeksowanych w bazie WoS.

Rozdział czwarty rozprawy dotyczy anten z falą wyciekającą z regulowanym kierunkiem wiązki realizowanych w postaci periodycznych struktur mikropaskowych (komórek). Doktorantka proponuje różne struktury pojedynczych komórek anteny, które zawierają odcinki linii transmisyjnej prawo-/lewoskrętną (ang. CRLH line). Badania mają na celu: (i) zwiększenia czułości zmiany kierunku wiązki w funkcji częstotliwości, (ii) uzyskanie maksymalnie szerokiego zakresu przemiatania sektora kąтового przez wiązkę główną anteny, (iii) ułatwienia w zakresie realizacji struktury od strony technologicznej. Autorka wykorzystuje w pojedynczej komórce m.in. sekcje linii sprzężonych, co

skutkuje koniecznością spełnienia warunku równości współczynników fazy rodzajów parzystego i nieparzystego. Niezbędna analizę pojedynczej komórki przeprowadzono metodą pobudzenia w fazie i przeciwfazie oraz przy pomocy symulacji elektromagnetycznych. W jednej z prac doktorantka uzyskuje niesymetryczną charakterystykę w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku propagacji fali w antenie. Jako rozwiązanie tego problemu proponuje zastosowanie sztyku dwóch anten zasilanych przez proste rozgałęzienie, co umożliwi uzyskanie struktury o odpowiedniej symetrii i prowadzi do symetrycznej charakterystyki promieniowania. W rozdziale zamieszczono pięć prac, z których dwie to artykuły opublikowane w czasopiśmie indeksowanych w bazie JCR, zaś trzy, to komunikaty na konferencjach indeksowanych w bazie WoS.

Ostatni, piąty rozdział stanowi podsumowanie pracy. Doktorantka wymienia główne osiągnięcia pracy (piętnaście pozycji) i odnosi je do sformułowanych celów rozprawy. Podsumowanie kończy syntetyczne nakreślenie tematyki dalszych prac.

Na bibliografię pracy składa się 66 pozycji, przy czym 19 z nich to prace składające się na rozprawę doktorską. We wszystkich pozycjach doktorant występuje jako współautor, przy czym w 16 spośród 19 prac składających się na rozprawę doktorantka występuje jako pierwszy współautor. Ze względu na współautorski charakter publikacji doktorantka sprecyzowała swój wkład w odniesieniu do wszystkich 19 prac. Dla publikacji, w których występuje ona jako pierwszy autor, zaś kolejnym jest promotor, wkład ten jest opisany niekiedy dość ogólnie. Bardziej precyzyjny opis wkładu dotyczy publikacji, w których nie występuje ona jako pierwszy autor. W obu przypadkach recenzent nie zgłasza zastrzeżeń w tej sprawie.

Podsumowując tę część recenzji można stwierdzić, że cele rozprawy, są zdefiniowane w sposób jasny i jednoznaczny i odnoszą się bezpośrednio do kolejnych rozdziałów pracy. Każdy z rozdziałów pracy zawiera krótki wstęp, w których omówiono jego zawartość oraz przedstawiono krótki przegląd literaturowy. Dobór publikacji do rozdziałów z punktu ich treści merytorycznej recenzent uważa za trafny.

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

Przedstawioną do oceny rozprawę stanowi cykl dziewiętnastu prac, z których osiem to artykuły opublikowane w czasopiśmie z listy A MNiSzW. Pozostałe prace to komunikaty na konferencjach o zasięgu międzynarodowym indeksowane w bazie WoS. Wszystkie zostały opublikowane w ciągu czterech ostatnich lat. Analizując układ rozprawy i zawartość poszczególnych rozdziałów można zauważyć, że rozdziały drugi i trzeci dotyczą sztyków antenowych, zaś czwarty anten z falą wyciekającą. W tym kontekście można zadać pytanie, czy tytuł rozprawy oddaje w pełni jej zawartość. Recenzent zdaje sobie sprawę z faktu, że rozważane anteny z falą wyciekającą są realizowane w postaci struktur periodycznych wykonanych w technologii mikropaskowej, jednak ich działanie, oraz metody analizy odbiegają zasadniczo od teorii sztyków antenowych. W tym kontekście można mieć pewne zastrzeżenia, czy przedstawiony zestaw publikacji stanowi cyt. *spójny tematycznie zbiór artykułów*, jak to przewidział ustawodawca w odnośnych regulacjach prawnych. Na str. 18 doktorantka stwierdza, że praca dotyczy m.in. analizy sztyków antenowych. W istocie elementy analizy dotyczą jedynie komórek anten z falą wyciekającą (rozdział czwarty), gdzie wykorzystano metodę analizy pobudzeń w fazie i przeciwfazie. W odniesieniu do sztyków antenowych adekwatnym sformułowaniem będzie symulacje pełnofalowe, gdyż rozważania dotyczące podziału mocy (rozdział trzeci) trudno nazwać analizą.

Można zauważyć, że w swojej pracy doktorantka nie postawiła tezy (czy też tez), chociaż po przeczytaniu tekstu załączonych publikacji ich sformułowanie nie nastęrcza trudności. Jakkolwiek obecność tezy w rozprawie nie jest niezbędna, to jej postawienie i następnie udowodnienie podniosłoby wartość rozprawy. Jest to szczególnie istotne w przypadku prac dotyczących nowych rozwiązań układowych/konstrukcyjnych, a taki właśnie charakter ma przedstawiona do oceny praca.

Zawartość rozdziałów drugiego i trzeciego są spójne tematycznie i dotyczą w zasadzie układów zasilania szyków anten mikropaskowych. Same promienniki nie są przedmiotem zainteresowania rozprawy.

W rozdziale drugim przedstawiono koncepcję układu zasilania szyku mikropaskowych łąt kwadratowych zasilanych z dwóch boków, co umożliwiło uzyskanie nowych, pożądaných właściwości i funkcjonalności, szczególnie w zakresie pracy z wieloma polaryzacjami (liniowymi, kołowymi) oraz ze stabilną co do kierunku wiązką główną, w szerokim zakresie częstotliwości. Ta ostatnia cecha nie jest oczywista w układach antenowych zasilanych szeregowo. Recenzent pragnie zwrócić przy tym uwagę na specyfikę rozpraw w formie zbioru artykułów. W przypadku opublikowania wyników badań w czołowych czasopiśmie światowych (co ma miejsce w dyskutowanym przypadku) autorzy zwykle rezygnują z prezentacji szeregu etapów pośrednich, które doprowadziły ich do finalnego rozwiązania. Ma to swoje uzasadnienie, gdyż na etapie recenzji ocena takiej pracy mogłaby być obniżona. Z kolei rozprawa doktorska jest pracą kwalifikacyjną, w której oprócz wyniku finalnego równie istotna jest prezentacja sposobu dochodzenia do efektu finalnego, bo to właśnie świadczy o znajomości warsztatu naukowego doktoranta. Przykładowo w pracy [2] doktorantka twierdzi, że uzyskuje poszerzenie pasma pracy poprzez zastosowanie zasilania łąt przez sprzężenie elektromagnetyczne oraz zastosowanie odpowiedniego dzielnika mocy ze szczeliną sprzęgającą. Czy oba te rozwiązania w równym stopniu poszerzyły pasmo pracy szyku? Tego typu drobne uzupełnienia mogłyby znaleźć się we wstępie do rozdziału.

Rozdział trzeci prezentuje dorobek doktorantki w zakresie szyków antenowych zasilanych poprzez różne wersje matrycy Butlera. Istotna część prac dotyczy wykorzystania dzielników mocy celem uzyskania nierównomiernego rozkładu amplitudy w aperturze, co skutkuje obniżeniem poziomu listków bocznych. W pracy [11] proponuje się określone rozkłady amplitud zasilających wynikające z zastosowania za matrycą Butlera dodatkowych dzielników mocy. W zależności od zastosowanych dzielników mocy uzyskuje się różne zakresy zmiany kierunku wiązki głównej z określonym poziomem listków bocznych. Czy uzyskany poziom obniżenia listków bocznych (z uwzględnieniem wtórnego maksimum dyfrakcyjnego (grating lobe) jest optymalny, czy też można jeszcze obniżyć ten poziom kosztem dalszego ograniczenia zakresu zmian kierunku wiązki głównej? Wprowadzenie dodatkowych dzielników mocy w sposób oczywisty obniży zysk energetyczny anten. Informacja na ten temat poziomu tego obniżenia byłaby cennym uzupełnieniem dyskutowanej pracy.

Rozdział czwarty, poświęcony antenom z falą wyciekającą jest o tyle związany tematycznie z rozdziałem trzecim, że dotyczy również zagadnienia zmiany kierunku wiązki głównej co jest podstawową funkcjonalnością szyków antenowych. Warto zauważyć, że w pracy [16] doktorantka wykorzystwała przybliżoną metodę analizy komórki CRLH (metodą pobudzeń w fazie i przeciwfazie) do ustalenia podstawowych jej parametrów elektrycznych, a w konsekwencji również fizycznych. Dalsza część analizy wykorzystuje modelowanie elektromagnetyczne. Recenzent pragnie podkreślić że takie postępowanie powinno być standardowe, jednak coraz częściej można zaobserwować pominięcie wstępnej analizy (nawet korzystającej z założeń upraszczających) i korzystanie wyłącznie z narzędzi numerycznych. W prezentowanych pracach doktorantka skupiła się na zagadnieniu poszerzenia zakresu zmian kierunku promieniowania anten z falą wyciekającą. Recenzent nie znalazł w pracach informacji o własnościach wiązek w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny, w której zmienia ona swój kierunek. Taka informacja pozwoliłaby ocenić możliwości potencjalnego wykorzystania tej anteny w różnych systemach, np. lokalizacji.

Podsumowując tą część recenzji recenzent stwierdza, że zestaw publikacji dokumentuje osiągnięcia doktorantki w zakresie szyków antenowych, a w szczególności ich układów zasilania. Prace te mają w większości charakter projektowo-eksperymentalny, zaś przedmiotem badań są nowe rozwiązania układowe i konstrukcyjne. Doktorantka w swoich badaniach umiejętnie wykorzystwała aktualnie dostępne narzędzia numerycznej analizy układów mikrofalowych oraz anten. Proponowane nowe rozwiązania układowe wskazują na jej biegłość w zakresie wykorzystania wiedzy dotyczącej układów podziału mocy oraz generacji określonego typu polaryzacji przez anteny mikropaskowe. Wszystkie prezentowane prace zawierają wyniki pomiarów podstawowych parametrów elektrycznych

zrealizowanych układów antenowych, bądź w przypadku rozdziału czwartego anten. W prezentowanych publikacjach recenzent nie znalazł błędów merytorycznych.

Za silną stroną pracy uważam jej aspekty praktyczne, a w szczególności weryfikację eksperymentalną proponowanych nowych rozwiązań układowych, dotyczących układów zasilania szyków anten mikropaskowych. Słabą stroną pracy jest nieprecyzyjne sformułowanie tytułu rozprawy, który może powodować u czytelnika wrażenie pewnego braku spójności prezentowanych publikacji.

### **Konkluzja**

Rozprawa doktorska mgr inż. Izabeli Słomian, pomimo sformułowanych uwag, jest ważnym przyczynkiem do badań nad układami zasilania szyków antenowych oraz anten z falą wyciekającą i spełnia, moim zdaniem, wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki wraz z późniejszymi zmianami (patrz art. 13) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Sformułowane powyżej zastrzeżenia nie dotyczą istotnych błędów merytorycznych, których w pracy nie znalazłem. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt publikacji wyników badań w czołowych czasopismach światowych z zakresu anten oraz prezentacji na światowych konferencjach antenowych. W tej sytuacji recenzent proponuje rozważyć wyróżnienie pracy, jednak rezerwuje sobie prawo do ostatecznej decyzji po publicznej obronie rozprawy.

