

tytuł, stopień, imię i nazwisko
dr hab. inż. Adam Abramowicz

data 31.01.2024 r.

miejsce pracy
Politechnika Warszawska
Instytut Systemów Elektronicznych

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY DYSCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA i ELEKTROTECHNIKA i TECHNOLOGIE
KOSMICZNE WOJSKOWEJ AKADEMII TECHNICZNEJ im. JAROSŁAWA
DĄBROWSKIEGO w WARSZAWIE**

Tytuł rozprawy:

Cyfrowany mikrofalowy detektor częstotliwości z wykorzystaniem macierzy Butlera 4x4.

Autor rozprawy:

ppłk. mgr inż. Hubert Stadnik

Tematyka, cel i zakres pracy

Rozprawa dotyczy analizy, projektowania, realizacji i weryfikacji doświadczalnej mikrofalowych detektorów częstotliwości w różnych konfiguracjach w tym przede wszystkim cyfrowego mikrofalowego detektora częstotliwości (CMDCz) wykorzystującego macierz Butlera 4x4.

Detektory częstotliwości lub inaczej dyskryminatory częstotliwości szczególnie w wersjach umożliwiających (niemal) natychmiastowy pomiar częstotliwości sygnałów mikrofalowych stanowią przedmiot zainteresowania między innymi użytkowników wojskowych systemów elektronicznych stanowiąc istotne elementy składowe systemów ESM (*Electronic Support Measures*). Systemy te gromadzą informacje poprzez m.in. bierny nasłuch sygnałów elektromagnetycznych interesujących z wojskowego punktu widzenia. Cyfrowe dyskryminatory częstotliwości i mierniki częstotliwości chwilowej są krytycznymi składowymi systemów przechwytywania i rozpoznania szybkich sygnałów impulsowych w szerokim pasmie częstotliwości. Przykładowe systemy wykorzystujące CMDCz to np. RWR (*Radar Warning Receiver*), ELINT (*Electronics Intelligence*), SIGINT (*Signal Intelligence*), COMINT (*Communications Intelligence*).

Autor sformułował tezę rozprawy następująco:

„Zastosowanie interferometru o strukturze matrycy Butlera 4x4 i zaproponowana metoda usuwania niejednoznaczności pomiaru częstotliwości sygnału pozwala na uzyskanie szerokopasmowego układu CMDCz”.

Celem pracy było natomiast „opracowanie i zbadanie nowatorskiego cyfrowego mikrofalowego detektora częstotliwości.”

Cel i zakres pracy wymusiły konieczność realizacji szeregu zadań badawczych, które autor podzielił na sześć grup z czego trzy zadania są teoretyczne, a trzy zadania praktyczne. Do zadań teoretycznych zaliczam:

- opracowanie modelu symulacyjnego MDCz z interferometrem w strukturze macierzy Butlera 4x4,
- wypracowanie metody usuwania niejednoznaczności układu
- opracowanie modelu urządzenia cyfrowego o trzech kanałach pomiarowych.

Natomiast zadania większości praktyczne to:

- analiza i dobór rzeczywistych elementów składowych CMDCz,
- wykonanie i realizacja badań urządzenia,
- analiza i poszukiwanie sposobu na usunięcie niejednoznaczności wynikających z rzeczywistych charakterystyk elementów składowych CMDCz.

Cel rozprawy został określony szeroko z domniemaniem realizacji kompletnego CMDCz, ale bez skonkretyzowania zakresu częstotliwości urządzenia i kryteriów uznania go za szerokopasmowe i wystarczająco precyzyjne. Wymagania na CMDCz mogą zawierać znacznie więcej parametrów np. precyzja i rozdzielczość częstotliwości, czułość, właściwości impulsowe i szereg innych niestety niesprecyzowane w celach rozprawy. Teza rozprawy zawężająca realizację CMDCz do struktury z macierzą Butlera 4x4 oraz „zaproponowanej metody usuwania niejednoznaczności pomiaru częstotliwości” jest częściowo niejednoznaczna w zakresie metody usuwania niejednoznaczności ze względu na dwukrotne jej występowanie w celach rozprawy w odniesieniu do idealizowanego modelu symulacyjnego oraz realizacji praktycznej. Niezależnie od tego cele rozprawy i teza rozprawy są zrozumiałe i wyznaczają kierunek skutecznej realizacji CMDCz wraz z opisującą tę realizację rozprawą doktorską.

Aby zrealizować postawione cele i udowodnić tezę rozprawy Autor analizował-symulował model interferometru z macierzą Butlera 4x4, zaproponował metodę usuwania niejednoznaczności sygnałów wyjściowych układu, opracował model CMDCz o trzech kanałach, wykonał sprzęgacze kierunkowe tworzące macierz Butlera 4x4, wykonał przesuwniki fazy, dobrał linie transmisyjne o wymaganych długościach, zestawił stanowisko pomiarowe, wykonał pomiary urządzenia i w końcu zweryfikował ilość sygnałów cyfrowych utworzonych na podstawie analogowych sygnałów wyjściowych i ich kombinacji zapewniających jednoznaczne rezultaty w pasmie pracy.

Analiza źródeł oraz stan wiedzy autora.

Lista odwołań bibliograficznych obejmuje 38 pozycji, z czego tylko jedno odwołanie dotyczy pracy, której autor jest współtwórcą. Należy stwierdzić, że Autor bardzo oszczędnie potraktował dostępne źródła. Rozdział I rozprawy poświęcony analizie stanu wiedzy w dziedzinie rozprawy ma tylko dwie strony. Odwołania do źródeł mają często postać linijki wyliczonych numerów publikacji bez ich omówienia i przywołania rezultatów lub wniosków. Zauważalne jest oparcie analizy źródeł dotyczących dyskryminatorów częstotliwości o publikacje z lat osiemdziesiątych poprzedniego wieku powstałe głównie w kręgu badaczy związanych z WAT. Referencje do publikacji dotyczących zagadnień związanych z realizacją układów mikrofalowych w tym macierzy Butlera 4x4 są już bardziej obszerne i współczesne choć ciągle można mieć zastrzeżenia co do zakresu odwołań lub ich precyzji. Biorąc pod uwagę, że źródła dotyczące zagadnień wykorzystywanych do celów militarnych są często celowo szczątkowe, a często niedostępne można uznać, że autor wykazuje zapewne wystarczającą wiedzę i orientację w literaturze przedmiotu dotyczącej rozprawy choć w pewnym sensie unika odwołań do publikacji źródłowych. Autor wykazuje również dużą wiedzę o projektowaniu i praktycznych realizacjach układów wielkich częstotliwości, której raczej nie ujawnia w tekście rozprawy, a prezentuje praktycznie w zrealizowanych układach. Wykazuje on również wystarczającą wiedzę i dojrzałość w pomiarach zrealizowanych CMDCz oraz inwencję w podejściu do tworzenia sygnałów służących do usuwania niejednoznaczności pomiarów częstotliwości.

Dodać jeszcze należy, że lista publikacji autora rozprawy zawiera 5 pozycji w tym jedną czasopiśmie MPDI Electronics oraz cztery komunikaty konferencyjne z lat 2018-2022. Wszystkie te publikacje są tematycznie mniej lub bardziej związane z rozprawą (mikrofalowymi dyskryminatorami

częstotliwości), zatem mogły by się znaleźć w spisie literatury zamieszczonym w rozprawie publikacje autora potwierdzają jego zaangażowanie i doświadczenie w tematyce MDCz.

Omówienie rozprawy

Rozprawa dotyczy analizy, projektowania, realizacji doświadczalnej i weryfikacji działania mikrofalowych detektorów częstotliwości w wersji z interferometrem opartym o macierz Butlera i z możliwością analizy cyfrowej postaci sygnałów wyjściowych.

W rozdziale trzecim po omówieniu zasady działania interferometrycznego mikrofalowego detektora częstotliwości i właściwości mikrofalowego detektora obwiedni autor analizuje postać „klasyczną” MDCz (dzielnik mocy oraz trzy sprzęgacze kierunkowe lub docelowo dwa dzielniki mocy, linia opóźniająca i trzy sprzęgacze kierunkowe) oraz postać z macierzą Butlera 4x4 (zastępującą dzielnik mocy i trzy sprzęgacze). Obie wersje MDCz analizowane są zakładając idealność elementów składowych w sensie stałych parametrów w funkcji częstotliwości. Analiza wykonywana jest na bazie grafów przepływu sygnałów. Kolejne etapy analizy MDCz polegają na uwzględnieniu zmian parametrów elementów składowych w funkcji częstotliwości o założonym charakterze zmian np. dla sprzęgaczy to charakter zmian jak w idealnym sprzęgaczu Langa. Uwzględnienie teoretycznych charakterystyk częstotliwościowych elementów składowych umożliwiło Autorowi wykazanie, że w MDCz w strukturze z macierzą Butlera uzyskuje się czterokrotnie mniejszy błąd dyskryminacji częstotliwości niż w MDCz o strukturze klasycznej w założonym zakresie częstotliwości wejściowych. Kolejny etap analizy dotyczy wpływu zwielokrotniania kanałowego na dokładność pomiarów częstotliwości. Analizowane są MDCz o strukturze klasycznej i MDCz z macierzą Butlera z trzema torami o różnych, ale ściśle określonych długościach linii opóźniających w relacji 1-4-16. Ponownie rezultaty wskazują na mniejsze błędy układu z macierzą Butlera. Autor zauważył, że w MDCz z macierzą Butlera błąd dyskryminacji można zmniejszyć przez dobór sprzężenia sprzęgaczy kierunkowych tworzących macierz Butlera. W ostatnim etapie analiz porównane zostały MDCz z macierzą Butlera o dwóch i trzech torach.

Rozdział czwarty został poświęcony analizom działania cyfrowego mikrofalowego detektora częstotliwości (CMDCz). Zastosowana metoda cyfryzacji sygnałów wyjściowych jest metodą przejść przez zero sygnałów wyjściowych MDCz. Autor ponownie analizuje kolejno dwa CMDCz zbudowane z elementów o charakterystykach niezależnych od częstotliwości oraz dwa CMDCz zbudowane z elementów o charakterystykach o założonym analitycznym przebiegu. CMDCz z macierzą Butlera zbudowaną z elementów o charakterystykach niezależnych od częstotliwości wykazuje niejednoznaczność sygnałów cyfrowych. Wprowadzenie elementów o charakterystykach o założonym analitycznym przebiegu skutkuje niejednoznacznością w obu wersjach CMDCz (klasycznej i z macierzą Butlera). Autor rozwiązuje problem niejednoznaczności przez generowanie dodatkowych sygnałów cyfrowych w postaci prostej sumy sygnałów wyjściowych. Analizując dalej CMDCz ze zwielokrotnieniem torów Autor napotyka problem niejednoznaczności powiela rozwiązanie generując kolejne sygnały cyfrowe na podstawie tym razem również różnicy sygnałów wyjściowych z poszczególnych torów.

W rozdziale piątym Autor opisał realizację i pomiary parametrów rzeczywistych elementów zastosowanych później w praktycznej realizacji CMDCz. Przedstawiono realizację i wyniki pomiarów sprzęgaczy wykorzystywanych w macierzy Butlera, realizację przesuwnika fazy i linii odniesienia oraz realizację układu wypracowującego proporcjonalną różnicę faz. Sprzęgacze kierunkowe i szerokopasmowy przesuwnik fazy zostały wykonane w technologii niesymetrycznych linii paskowych na laminacie FR4. Połączenia między elementami CMDCz wykonano przy pomocy linii półsztywnej RG402 o odpowiednio dobranych długościach. Autor zaprojektował i wykonał wymienione wyżej elementy, a następnie zmierzył ich charakterystyki częstotliwościowe. Spośród wielu wykonanych sprzęgaczy kierunkowych wykonanych jako sprzęgacze szczelinowe Autor wyselekcjonował te o najlepszych charakterystykach. Do budowy MDCz Autor użył też posiadanych wcześniej dzielnika Wilkinsona oraz szerokopasmowych detektorów mikrofalowych.

Rozdział szósty zawiera wyniki pomiarów zestawionego MDCz z matrycą Butlera. Autor wykonał pomiary sygnałów wyjściowych analogowych przy pomocy oscyloskopu potwierdzając działanie układu oraz wady rozwiązania z tylko sygnałami analogowymi jako wyjściowymi. Następnie układ pomiarowy został zmodyfikowany do wersji umożliwiającej pomiar sygnałów wyjściowych analogowych dla trzech długości linii opóźniającej. Sygnały analogowe z detektorów mikrofalowych szczytywały cyfrowe multimetry. W kolejnym etapie pomiarów wyznaczono przedziały częstotliwości metodą przejść przez zero przy pomocy generatora sygnałowego i czterokanałowego oscyloskopu cyfrowego. Zarejestrowane sygnały i analiza przedziałów częstotliwości przez zastosowanie sygnałów cyfrowych odpowiadających bezpośrednio wyjściom, sumie sygnałów wyjściowych i różnicom sygnałów wyjściowych pozwoliła Autorowi stwierdzić, że w całym paśmie pracy układu MDCz o trzech kanałach możliwy jest jednoznaczny odczyt częstotliwości wejściowej przy użyciu 10 bitowego słowa. Uzyskane 137 przedziały częstotliwości mają różne szerokości od 0.2 MHz do 24.1 MHz. Analizy prowadzone w środowisku Matlab potwierdziły skuteczność metody usuwania niejednoznaczności zakresów częstotliwości.

Praca jest doświadczalno-teoretyczna. Oryginalnym dorobkiem przedstawionym w rozprawie jest w pierwszym rzędzie opracowanie sposobu usuwania niejednoznaczności poprzez wprowadzanie do słowa wyjściowego dodatkowych bitów zależnych od sygnałów sumacyjnych i różnicowych, przy czym liniowe kombinacje napięć wyjściowych z detektorów mikrofalowych mają identyczne współczynniki (równe 1) co jest rozwiązaniem prostszym od stosowanych poprzednio. Również zastosowanie macierzy Butlera 4x4 w konstrukcji MDCz jest nowe i jak wynika z analiz i pomiarów poprawia możliwości MDCz. W ten sposób cele rozprawy zostały w dużej części zrealizowane i teza w znacznym stopniu potwierdzona. Cele zapisane w rozdziale drugim mogłyby sugerować, że powstanie kompletny CMDCz. W pracy znajduje się model MDCz z macierzą Butlera 4x4, który został przebadany w trzech wersjach dla trzech długości linii opóźniającej, a rezultaty pomiarów tych trzech MDCz i możliwych do uzyskania z nich sygnałów cyfrowych stanowiły podstawę do analizy działania CMDCz.

Zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy

Rozprawa napisana w języku polskim ma 88 stron objętości. Została podzielona na Wstęp i 7 rozdziałów, które poza krótkim Wstępem, Analizą stanu wiedzy, i Celem i tezą rozprawy i dotyczą dobrze wydzielonych zagadnień: MDCz, CMDCz, realizacja i analiza rzeczywistych elementów użytych do budowy MDCz z matrycą Butlera 4x4, pomiary MDCz z matrycą Butlera. Pracę kończy Podsumowanie. Praca została napisana w sposób zwięzły, często zbyt zwięzły bez przedstawiania szczegółów np. realizacji pomiarów. Wydaje się mimo tego, że te istotne wyniki pomiarowe są zawarte. Zdecydowana większość wzorów, schematów, zdjęć i rysunków (łącznie 56 schematów, zdjęć i rysunków) została przedstawiona w sposób zrozumiały, z czytelnymi oznaczeniami i podpisami. Można mieć pewne zastrzeżenia do czytelności rysunków od Rys. 6.9 do Rys. 6.13 – być może zwiększenie rozmiaru tych rysunków ułatwiłoby ich interpretację oraz do niejednolitego stosowania dużych i małych liter określających np. napięcie wejściowe na rysunkach (grafach przepływu sygnałów) i we wzorach. Uzupełnieniem pracy są wykaz skrótów, wykaz oznaczeń, streszczenie po polsku i angielsku oraz wykaz 38 pozycji bibliografii.

Podział zagadnień między rozdziały jest przemyślany i zgodny z naturalnym tokiem prac: najpierw analizy i symulacje, potem projektowanie i realizacja, weryfikacja działania i wyciągnięcie wniosków końcowych. Występują natomiast pewne niedostatki językowe i redakcyjne w tym literówki, dodatkowe spacje lub brak spacji np. wyraz coraz na stronie 10 zapisany „co raz”. Występuje też kilka błędów gramatycznych związanych z odmianą wyrazów. Autor stosuje system skrótów nazw polskich i angielskich co może sprawiać wrażenie braku konsekwencji, ale nie stanowi przeszkody w rozumieniu opisywanych układów. Pewnym niedostatkiem, aczkolwiek dyskusyjnym, jest sposób numerowania odwołań do bibliografii – na pierwszej stronie Rozdziału 1 numerowanie odwołań rozpoczyna się od [31, 32], a następne jest [2] przy małej ilości pozycji bibliograficznych nie tyle

utrudnia to czytanie rozprawy co sugeruje brak uporządkowania odwołań. Ogólnie w sensie redakcyjnym praca jest co najmniej poprawna.

Uwagi i wady rozprawy

Wymienione poniżej wady i zadane pytania do rozprawy są z punktu widzenia całości niedominujące, a częściowo dyskusyjne i nie zmieniają ogólnie pozytywnej oceny rozprawy.

Zakres częstotliwości wybrany do analiz i realizacji ma zapewne jakieś uzasadnienie, które miałyby przełożenie na odbiór pracy. W pracy nie zostały sformułowane wymagania dotyczące pożądanej rozdzielczości częstotliwościowej CMDCz jak też pożądanej czułości urządzenia. Do określenia pożądanych parametrów urządzenia mogłyby posłużyć np. noty katalogowe dostępnych na rynku CMDCz (np. Quantic PMI, Akon Inc., Wide Band Systems Inc.). Jednym z istotnych parametrów jest czas reakcji lub zdolność do określenia częstotliwości krótkich impulsów mikrofalowych. Zagadnienie to niestety nie zostało poruszone w rozprawie.

Wydaje się również, że pewnego rodzaju „pomieszenie” opisu MDCz poprzez stosowanie napięć na zaciskach wejściowych i wyjściowych oraz opisu elementów wyrazami macierzy rozproszenia S mogłoby być bez szkody dla rezultatów inaczej zapisane.

Wprawdzie uproszenia przyjęte przez autora: wszystkie wrota dopasowane, izolacje sprzęgaczy kierunkowych i dzielnika mocy nieskończenie duże, elementy mikrofalowe symetryczne, ułatwiają analizy, ale przy przejściu do zrealizowanego MDCz na rzeczywistych elementach możliwe było użycie w analizach kompletu parametrów rzeczywistych, a tym samym zbadanie wpływu niedoskonałości rzeczywistych układów na działanie MDCz.

Autor przytacza szereg zależności i wzorów nie zawsze podając źródło ich pochodzenia (np. w podrozdziale 3.2) lub też nie podkreśla tego co zostało uzyskane przez niego w ramach rozprawy.

Co do podrozdziału 3.2, to brak jest określenia co autor rozumie przez małe i duże wartości stosunku sygnał/szum (gdzie jest granica?) oraz co autor rozumie przez „sygnał jest wytłumiany przez szumy”.

Czy autor rozważał realizację wielotorowych układów MDCz z innymi niż 1-4-16 stosunkami długości linii opóźniających?

Czym się autor kierował wybierając do realizacji hybrydowe kwadraturowe sprzęgacze szczelinowe zbudowane z dwóch identycznych ćwierćfalowych linii o stałej szerokości? Czy sprzęgacze szczelinowe z liniami np. o eliptycznym kształcie (Abbosh, Białkowski, IEEE T-MTT, Feb. 2007) mogłyby być lepszym rozwiązaniem poza sprzęgaczami wielostopniowymi? Jakie narzędzia zostały użyte do zaprojektowania sprzęgaczy kierunkowych?

Czy rozdzielczość częstotliwościowa pomiaru zmian wartości cyfrowej sygnału określana z krokiem 0.1 MHz była wystarczająca wobec 0.2 MHz minimalnej szerokości przedziałów zmian wartości cyfrowej sygnału?

Jak rozumieć zdanie z Podsumowania, że „na wyjściach interferometru możemy otrzymać sygnał o poziomie dochodzącym do wartości bliskiej zeru, czyli poniżej poziomu szumów”?

Użycie słowa „nowatorskich” (str. 83, piaty akapit) w odniesieniu do zrealizowanych sprzęgaczy kierunkowych szczelinowych wydaje się jednak zdecydowanie nadmiarowe (np. Progres in Electromagnetic Research C, vol. 73, pp.27-36, 2017)

Podsumowanie

Praca ma znaczenie dla rozwoju metod realizacji Cyfrowych Mikrofalowych Detektorów Częstotliwości. Autor wskazuje metody analizy, projektowania i realizacji CMDCz, które mogą być przydatne w praktycznie realizowanych układach. Należy stwierdzić, że Autor zrealizował w znacznym stopniu postawione przed pracą cele i uzyskał rezultaty potwierdzające sformułowaną tezę. Wykazał się wiedzą i umiejętnościami koniecznymi do analizy, realizacji praktycznej i weryfikacji pomiarowej zaprojektowanego urządzenia. Rozprawa mieści się w szerokim nurcie prac, które łączą aspekty techniczne i naukowe, praktyczne i poznawcze, w tym docelowo zapewne

komercyjne, dlatego jest istotna dla rozwoju nauk technicznych w zakresie zastosowań układów i systemów wielkich częstotliwości m.in. w radiolokacji, narzędziach walki elektronicznej i nauce. Rozprawa i dorobek autora mieszczą się w ramach dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.

Reasumując, uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska ppłk. mgr. inż. Huberta Stadnika spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w odpowiedniej ustawie dotyczącej stopni naukowych i tytułów naukowych i zwracam się do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne w Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Podpis

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'A. G. ...', written in a cursive style.