Gdynia, dn. 30.08.2019

Dr hab. inż. Jerzy Julian Michalski
Pomorski Park Naukowo-Technologiczny
SpaceForest Sp. z o. o.
Al. Zwycięstwa 96/98
81-451 Gdynia

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Żukocińskiego zatytułowanej „Metoda projektowania filtrów szerokopasmowych z rezonatorami sprzężonymi bezpośrednio".

1) **Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Autor w rozprawie przedstawia opis oraz właściwości filtrów pasmowoprzepustowych. W obszarze badań autora znajdują się zarówno filtry szerokopasmowe jak i również ultraszerokopasmowe. Wstępem do jego badań jest opis oraz analiza inwerterów idealnych oraz proponowanych przez niego inwerterów „*rzeczywistych*", które modeluje za pomocą dodatkowych elementów RLC w schemacie inwertera idealnego.

Analizując rozmieszczenie na osi częstotliwości minimów oraz maksimów (w skali decybelowej) współczynnika odbicia autor proponuje nową definicję częstotliwości środkowej filtru, którą nazywa *„charakterystyczną częstotliwością środkową filtru"*. Częstotliwość środkowa, zgodnie z tą definicją, dla filtru o rzędzie N nieparzystym ma bezpośredni związek z lokalizacją minimum środkowego (N+1)/2, natomiast dla filtrów o rzędzie parzystym jest lokalizacją (N/2)-tego maksimum charakterystyki odbicia.

Moim zdaniem dla filtrów fizycznych definicja ta w wielu przypadkach nie będzie miała zastosowania ze względu na niemożliwość określenia w sposób dokładny lokalizacji minimów oraz maksimów dla charakterystyk pomierzonych filtrów - szczególnie dla filtrów o wysokich rzędach. Natomiast cel autora, związany z wprowadzeniem tej definicji, polega na powiązaniu wartości „częstotliwości charakterystycznej" z rodzajami sprzężeń typu pojemnościowego oraz indukcyjnego w filtrach i badaniu relacji pomiędzy nimi.

Znaczną część swojej pracy autor poświęca tak zwanemu „dualizmowi filtrów". Określeniem tym definiuje takie dwa układy obwodowe filtrów, w których pomimo zastosowania różnego rodzaju sprzężeń, tj. pojemnościowych bądź indukcyjnych, ich charakterystyki elektryczne są

takie same, „*dualne*”. Autor wykazuje, że szerokopasmowe wpływy sprzężeń pojemnościowych i sprzężeń indukcyjnych, w szczególności te związane ze zmianami „częstotliwości charakterystycznej” wraz ze zmianą szerokości pasma przepustowego filtru, zastosowanych w tym samym filtrze mogą kompensować się wzajemnie. Następnie dowodzi, że dzięki temu filtr o sprzężeniach komplementarnych uzyskuje charakterystykę identyczną jak filtry z inwerterami idealnymi, projektowane zgodnie z klasyczną teorią filtrów wąskopasmowych. Dalej wykazuje, że koncepcja filtrów o sprzężeniach komplementarnych pozwala projektować filtry ze sprzężeniami rzeczywistymi i charakterystykami o dowolnej szerokości pasma przepustowego.

W pracy autor zwraca również uwagę na to, że wartości impedancji charakterystycznych rezonatorów są czynnikiem określającym wartości sprzężeń między rezonatorami, co w konsekwencji przekłada się na szerokość pasma projektowanego filtru. Zależność ta, mająca również potwierdzenie w badaniach autora, jest znana i stosowana w rozwiązaniach realizowanych filtrów szerokopasmowych.

Metoda projektowania filtrów, proponowana przez autora polega na wcześniejszym przygotowaniu, na podstawie symulacji numerycznych, aproksymowanych krzywych projektowych. Przedstawiają one zależności, w funkcji szerokości pasma filtru, poszczególnych wielkości uniwersalnych parametrów projektowych takich jak: wartości impedancji charakterystycznych rezonatorów, wartości sprzężeń czy wartości dobroci rezonatorów zewnętrznych. Zależności te pozwalają na bezpośredni wybór wielkości uniwersalnych dla projektowanej szerokości pasma.

Szereg przedstawianych przez autora eksperymentów prezentuje proponowaną przez niego metodykę oraz jej skuteczność.

Autor w pracy na stronie 16 przedstawia następującą tezę „[…] *uwzględnienie częstotliwościowego charakteru różnego typu inwerterów rzeczywistych oraz wpływu szerokości pasma przepustowego i stopnia filtru na kształt charakterystyk filtru umożliwia sformułowanie dokładnych zależności projektowych dla filtrów szerokopasmowych*”

Teza jest jasno sformułowana, a praca ma charakter teoretyczny wraz z potwierdzeniem doświadczalnym tezy stawianej przez autora.

Autor w swoich badaniach rozważa jedynie klasę filtrów zbudowanych z rezonatorów sprzężonych bezpośrednio. Pomija zaś klasę filtrów zawierających również sprzężenia skrośne (ang. cross-coupling). Jedynie w podsumowaniu stwierdza, że „*Ponadto opisane w pracy*

właściwości filtrów z bezpośrednimi sprzężeniami rzeczywistymi można rozszerzyć na przypadki filtrów o bardziej złożonej topologii, a więc filtrów ze sprzężeniami pomiędzy niesąsiednimi rezonatorami." Bardzo brakuje mi chociaż małego podrozdziału dotyczącego zagadnienia jak autor proponowałby to zrobić. Druga klasa filtrów, pomijana przez autora, jest powszechniej używana w zastosowaniach rynkowych, zarówno tych niskoczęstotliwościowych np. telewizja DVB-T (ang. Digital Video Broadcasting) czy ostatnio bardzo popularna satelitarna obserwacja Ziemi oraz telekomunikacja satelitarna operująca w pasmach X, K, Ka, czy jeszcze wyżej.

2) Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle / świadczącą o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonywujący?

Praca obejmuje 220 pozycji literatury, która przez autora jest dobrze dobrana. Zawiera zarówno współczesne pozycje, jak również pozycje starsze lecz istotne z punktu widzenia poruszanych w pracy zagadnień. Wkład własny autora oraz cytowane pozycje literatury świadczą o znajomości tematyki będącej przedmiotem niniejszej rozprawy. W rozdziale 2.4 zatytułowanym „Historia filtrów radioelektronicznych w Polsce", autor poświęcił uwagę przeglądowi historycznych oraz współczesnych pozycji polskich badaczy, związanych z technologiami filtrów.

Cytowania własne liczą 10 pozycji literatury, w 8 z nich mgr inż. Mateusz Żukociński jest pierwszym autorem. Niestety wszystkie z nich stanowią wyłącznie publikacje konferencyjne. Co ciekawe najstarsza pozycja autora pochodzi już z roku 2004. Brakuje mi publikacji autora w uznanych pismach techniki mikrofalowej. Moim zdaniem choćby jedna taka pozycja potwierdziłaby i umocniłaby znacząco wartość proponowanej w niniejszej rozprawie metodyki.

3) Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Tak, autor rozwiązał postawione przez siebie zagadnienia oraz wykazał poprawność swojej metodyki za pomocą symulacji oraz szeregu weryfikacji eksperymentalnych. Autor w swoich badaniach posługuje się narzędziami oraz metodami powszechnie stosowanymi przez badaczy oraz inżynierów zajmujących się filtrami mikrofalowymi. Zajmuje się on głównie analizą obwodową, chociaż sięga również do opisu filtrów za pomocą macierzy sprzężeń. Wykazuje się

także umiejętnościami korzystania z symulatora pełno-falowego 3D oraz symulatora obwodowego AWR Microwave Office do celów projektowych.

4) Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu technik reprezentowanych przez literaturę światową?

Projektowanie filtrów jest dość chętnie podejmowanym tematem badawczym. Świadczy o tym duża ilość publikacji w pismach branżowych. Filtry szerokopasmowe również są często poruszaną przez badaczy klasą filtrów stosowaną do nowych realizacji aplikacyjnych. W ostatnich latach, między innymi w związku z zapotrzebowaniem rynku na transmisje szerokopasmowe, filtry szerokopasmowe oraz ultraszerokopasmowe stanowią coraz częstszy przedmiot zainteresowań badaczy. Za oryginalny dorobek autora uznałbym głównie zaproponowanie metody analizy filtrów szerokopasmowych z łączonymi rodzajami sprzężeń oraz badanie ich wpływu na charakterystyki rozproszenia.

Tematyka rozważana przez autora jest bez wątpienia ważna i moim zdaniem stanowi ciekawą pozycję w stosunku do poziomu technik reprezentowanych przez literaturę światowa.

5) Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonywującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników / zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy ?

Praca jest napisana starannie i łatwo się ją czyta. Wyniki są prezentowane w sposób czytelny. Można bez wątpienia stwierdzić, że autor poświęcił bardzo dużo uwagi formie i jakości redakcyjnej pracy.

6) Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady ?

Słabą stroną rozprawy jest całkowite pominięcie klasy filtrów zawierających sprzężenia skrośne. Jak podkreślałem powyżej, zgodnie z moim stanem wiedzy, filtry te stanowią aktualnie znaczną ilość, może i nawet 90 %, typów filtrów stosowanych w różnych aplikacjach systemowych. Również znalazłem kilka nieścisłości czy nieznacznych błędów, które opisałem na końcu recenzji, w części zatytułowanej „Uwagi dodatkowe”.

7) Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych ?

Autor sam twierdzi, że „*Rezultaty prac przyczynią się do rozwoju innych zagadnień szerokopasmowych, np. dopasowań szerokopasmowych, natomiast rozpatrywane filtry mogą służyć m.in. do opracowywania filtrów o asymetrycznej charakterystyce transmisji oraz układów zwrotnic mikrofalowych. Ponadto opisane w pracy właściwości filtrów z bezpośrednimi sprzężeniami rzeczywistymi można rozszerzyć na przypadki filtrów o bardziej złożonej topologii, a więc filtrów ze sprzężeniami pomiędzy niesąsiednimi rezonatorami.*"

Zgadzam się z autorem, przynajmniej w pierwszej części tego stwierdzenia. Proponowane przez niego metody analizy czy projektowania mogą znaleźć zastosowanie przy realizacjach fizycznych filtrów czy innych urządzeń, w których zjawisko dyspersji ma znaczący wpływ na ich parametry elektryczne.

Co do drugiej części dotyczącej rozszerzenia metody na filtry ze sprzężeniami skrośnymi, dla których analiza jest dużo bardziej złożona, zapewne też można by spróbować znaleźć zastosowanie proponowanej metodyki. Nie mniej jednak, jak wspominałem wcześniej, brakuje mi w pracy krótkiego podrozdziału stanowiącego chociaż wstępny opis tego jak autor widziałby takie podejście do rozszerzenie swojej metody.

8) Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- **a) niespełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,**
- **b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,**
- **c) spełniająca wymagania,**
- **d) spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,**
- **e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.**

Biorąc pod uwagę istotność proponowanej tematyki, znaczenie praktyczne oraz spełnienie wszystkich warunków stawianych kandydatom do stopnia doktora, rozprawę zaliczam do kategorii c „spełniająca wymagania".

Uwagi dodatkowe

Czytając wnikliwie pracę dostrzegłem kilka elementów, które wymagają mojego komentarza. Dla niektórych punktów oczekiwałbym dyskusji podczas obrony.

Strona 3, 40 oraz kilka innych miejsc w pracy.

-Zdanie „*dobroci zewnętrzne rezonatorów skrajnych*".

Rozumiem, że autor miał na myśli dobroci skrajnych / zewnętrznych rezonatorów.

Strona 13:

-Zdanie *„Klasyczna teoria filtrów środkowoprzepustowych i środkowozaporowych dotyczy filtrów wąskopasmowych (o względnej szerokości pasma przepustowego < ~5 %)"*.

Wiele pozycji literatury definiuje filtr wąskopasmowy jako filtr o pasmie <10 %.

Strona 15, 41 oraz 120:

-W przypadku ogólnym na rysunku powinny być umieszczone również sprzężenie wejściowe oraz wyjściowe.

Strona 16:

-Autor napisał *„Jak już wspomniano, opis filtrów szerokopasmowych jak dotąd nie został zaproponowany".*

W literaturze przedmiotu można znaleźć wiele pozycji dotyczących zagadnienia opisu oraz projektowania filtrów szerokopasmowych.

Strona 16:

-Zdanie *„Metoda projektowania oznacza tutaj zbiór zależności dotyczących filtrów z różnego typu inwerterami modelującymi sprzężenia rzeczywiste."*

Zdanie to jest mało czytelne. Zapewne autor miał na myśli, że w metodzie wykorzystuje się zbiór zależności […].

Strona 23:

-Zdanie *„Taki idealny filtr charakteryzowałby się stałą i pełną transmisją sygnału w paśmie przepustowym (transmitancja równa 1)*".

Rozumiem, że jest to skrót myślowy. Zazwyczaj transmitancja jest zespolona, zatem dla przypadku bezstratnego to moduł transmitancji może być równy 1.

Strona 25:

-Zdanie „*Zależny od częstotliwości stosunek fali padającej do fali odbitej we wrotach filtru jest współczynnikiem odbicia fali*”.

Współczynnik odbicia jest zdefiniowany jako zależność odwrotna, tj. stosunek fali odbitej do fali padającej.

Strona 26:

-Na stronie jest mowa o „*stratach wnoszonych*”.

Częściej stosowane nazewnictwo to straty wtrąceniowe.

Strona 29:

-Zdanie „*W ogólności funkcja transmisji filtru jest funkcją wymierną*”. Później definicja ta jest jeszcze powtórzona na stronie 33.

Raczej użyłbym w tym przypadku „w szczególności”, zamiast „w ogólności”, bo w ogólności transmisja jest to stosunek dwóch funkcji, które mogą być również typu transciedental, które to nie są wielomianami.

-Zdanie „*Pierwiastki wielomianu L(s), a więc zera transmisji filtru*”.

Brak ścisłości. Raz autor używa słowa *pierwiastki* a raz *zera*. Proszę wyjaśnić różnice, bo takowe zgodnie ze ścisłością matematyczną istnieją.

Strona 33:

-Zdanie „*W ogólności specyfikacja filtru to po prostu wartości częstotliwości granicznych pasma przepustowego, wartości maksymalnego tłumienia w paśmie oraz wartości minimalnego tłumienia poza pasmem przepustowym […]*”.

To jest bardzo duże uproszczenie. Jest dużo więcej parametrów specyfikujących filtr mikrofalowy, które trzeba brać pod uwagę, np. maksymalny poziom PIM (Passive Inter Modulation), wartość peek-to-peek (zafalowanie) opóźnienia grupowego – Group Delay (GD), zafalowanie w paśmie, ciągła moc maksymalna, chwilowa moc maksymalna, oraz wiele innych.

Strona 168:

-Proszę wyjaśnić czym może być spowodowane widoczne zero transmisji na wykresie 5.14? (pasożytniczy triplet?). Polecam zapoznać się z publikacją J. Brian Thomas, „Cross-Coupling in Coaxial

Cavity Filters—A Tutorial Overview," IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 51, NO. 4, APRIL 2003.

Strona 173:

-Proszę wyjaśnić czym może być spowodowane widoczne zera transmisji na wykresie 5.17, 5.18 ? (2 pasożytnicze triplety ?). Polecam zapoznać się z publikacją ja powyżej.

Strona 192:

-Analiza wykresów dobroci zewnętrznych rezonatorów powinna być bardziej szczegółowo przedyskutowana. Szczególnie jej niskie wartości, opadające wraz ze wzrostem szerokości pasma filtru. Wartości dobroci bliskie zero są dość zastanawiające.

Strona 200:

-Tabela przedstawia wartości parametrów projektowych w postaci między innymi impedancji poszczególnych rezonatorów. Dla metody opracowanej przez autora impedancje dla rezonatorów wewnętrznych filtru nie mają konkretnej wartości lecz przedział wartości, dla których można uzyskać filtr o projektowanej szerokości pasma. Nie jest jasne jakie konkretne wartości zostały użyte do uzyskania charakterystyk rozproszenia przedstawionych na dalszych stronach. Taka sama uwaga dotyczy tabel prezentowanych w dalszej części pracy.

Strona 207,

-Na wykresie dla transmisji dla filtru ze sprzężeniami typu sL widoczne jest zero transmisji po lewej stronie. Wskazana byłaby analiza pomiędzy którymi rezonatorami występuję/(może występować) sprzężenie pasożytnicze i jakiego jest rodzaju: pojemnościowe czy indukcyjne (proponuje zapoznać się z publikacją podaną powyżej).

Strona 214,

-Na wykresie dla transmisji dla prezentowanego filtru widoczne jest zero transmisji po lewej stronie. Wskazana byłaby analiza pomiędzy którymi rezonatorami występuje/(może występować) sprzężenie pasożytnicze i jakiego jest rodzaju: pojemnościowe czy indukcyjne (proponuje zapoznać się z publikacją podaną powyżej).