

Prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski

Politechnika Poznańska

Wydział Informatyki

Instytut Automatyki i Sterowania

Zakład Układów Elektronicznych

i Przetwarzania Sygnałów

OCENA

rozprawy doktorskiej pt.: *„Algorytmy realizacji i implementacji liniowych stacjonarnych filtrów cyfrowych 3D w potokowych strukturach z rotatorami Givensa”*,

Doktorant Pan mgr inż. Paweł Poczekajło

1 Ocena doboru tematu oraz celu i zakresu przeprowadzonych badań

Tematem ocenianej rozprawy doktorskiej jest opracowanie metod projektowania i sprzętowej realizacji za pomocą układów FPGA cyfrowych ortogonalnych filtrów 3D z rotatorami Givensa.

Celem podjętych badań (jak napisał Autor rozprawy na str. 11) jest:

„Opracowanie efektywnych numerycznie metod realizacji filtrów cyfrowych 3D dla zadanych współczynników odpowiedzi impulsowej lub transmitancji za pomocą ortogonalnych równań stanu oraz ich implementacji w potokowych strukturach zbudowanych z rotatorów Givensa.”

Na tej stronie Doktorant sformułował też następującą tezę naukową rozprawy:

„Opracowanie algorytmów ortogonalnych równań stanu dla liniowych, stacjonarnych filtrów cyfrowych 3D umożliwia ich implementację za pomocą rotatorów Givensa. Struktury te charakteryzują się większą dokładnością obliczeń na liczbach o skończonej precyzji w porównaniu do filtrów implementowanych w strukturach bezpośrednich.”

Temat rozprawy obejmuje ważne i, mimo poświęconego mu już wieloletniego wysiłku w kilku ośrodkach naukowych, nadal aktualne zagadnienie naukowe, dotyczące projektowania ortogonalnych filtrów cyfrowych. Doktorant skoncentrował się na filtrach trójwymiarowych (3D) realizowanych za pomocą układów programowalnych strukturalnie tj. tzw. układów FPGA (field programmable gate arrays), przy założeniu wykorzystania schematów potokowych z rotatorami Givensa.

Doktorant przeanalizował to zagadnienie kompleksowo i skrupulatnie, rozważając zarówno filtry FIR (finite impulse response) jak i filtry IIR (infinite impulse response). Można jednak zapytać dlaczego w pracy rozważono akurat filtry 3D a nie ogólnie n -wymiarowe? Dlaczego

rozważono tylko realizacje za pomocą układów FPGA i nie porównano ich z realizacjami za pomocą procesorów sygnałowych DSP (digital signal processors)? Wreszcie można też zapytać dlaczego ograniczono się tylko do struktur realizowanych za pomocą rotatorów Givensa a pominięto reflektory Householdera? Przy omawianiu tematu rozprawy zabrakło mi więc uzasadnienia słuszności przyjętych założeń i ograniczeń.

Zarówno cel pracy jak i teza naukowa są zgodne z podjętym tematem i zakresem badań i są sformułowane jasno i precyzyjnie. Jednak określenie „współczynniki odpowiedzi impulsowej” użyte przez Doktoranta w sformułowanym celu badań nie jest poprawne i powinno być zastąpione przez „próbki odpowiedzi impulsowej”.

Podobnie sformułowanie „Opracowanie algorytmów ortogonalnych równań stanu ...” występujące w tezie naukowej jest nieprecyzyjne i powinno być zastąpione przez „Opracowanie algorytmów tworzenia równań stanu z ortogonalną macierzą globalną ...”.

2 Ocena tekstu, analizy źródeł i dorobku publikacyjnego Doktoranta

Recenzowana rozprawa została napisana w języku polskim. Jej tekst zawiera 120 stron i oprócz umieszczonych na samym początku: podziękowań (str. 2), streszczenia w języku polskim (str. 3), streszczenia w języku angielskim (str. 4), spisu treści (str. 5), spisu rysunków (str. 6 i 7), spisu tabel (str. 8), spisu wybranych symboli i operatorów (str. 9), składa się z 7-miu rozdziałów, stanowiących główną część pracy, a także ze spisu literatury i trzech dodatków uzupełniających rozważania matematyczne zawarte w głównym tekście rozprawy.

We wstępie (rozdział 1) Doktorant omówił znaczenie tematyki rozprawy i sformułował cel badań i tezę naukową.

Rozdział 2 stanowi przegląd zagadnień dotyczących analizy i projektowania wielowymiarowych filtrów cyfrowych

Główną część rozprawy, w której Pan mgr inż. Paweł Poczekajło przedstawił oryginalne wyniki przeprowadzonych badań, stanowią rozdziały od 3-ciego do 7-mego. Doktorant zajął się w nich kolejno:

- opracowaniem algorytmów realizacji ortogonalnych filtrów potokowych 3D za pomocą rotatorów Givensa (rozdział 3) — rozważone zostały zarówno separowalne jak i nieseparowalne filtry FIR 3D oraz filtry IIR 3D
- analizą dwóch wariantów implementacji filtrów o strukturach rotatorowych: bezpośrednią realizacją rotatorów oraz ich realizacją z wykorzystaniem algorytmu CORDIC (rozdział 4)
- analizą wrażliwości charakterystyk projektowanych filtrów na błędy ich współczynników (z uwzględnieniem efektów związanych z błędami obliczeniowymi) oraz związaną z tym analizą propagacji szumów addytywnych (rozdział 5)
- eksperymentalnym potwierdzeniem wcześniej opisanych wyników teoretycznych (w rozdziale 6) na podstawie analizy przykładów wybranych filtrów: filtru Gaussa i filtru LoG (Laplacian of Gaussian)
- obszernym podsumowaniem uzyskanych wyników w rozdziale 7.

Spis literatury zamieszczony na stronach 116–120 zawiera 80 pozycji i stanowi wyczerpujący przegląd literatury światowej dotyczącej tematyki rozprawy. W tym spisie jest 11 wartościowych publikacji Doktoranta (także z listy JCR), w tym 6 prac samodzielnych, opublikowanych w większości w Przeglądzie Elektrotechnicznym. Te publikacje świadczą o dużych kompetencjach Doktoranta w dziedzinie projektowania ortogonalnych filtrów cyfrowych i stanowią znaczny dorobek naukowy, istotny w tej dziedzinie.

3 Ocena opracowanych metod oraz uzyskanych wyników

Do najważniejszych zadań podjętych i wykonanych przez Pana dr. inż. Pawła Poczekajłę oraz najważniejszych uzyskanych przez Niego wyników należy, moim zdaniem, zaliczyć:

- propozycję metody wyznaczania ortogonalnych równań stanu dla separowalnych cyfrowych filtrów 3D o zadanych transmitancjach lub odpowiedziach impulsowych (rozdział 3.1)
- propozycję rozkładu transmitancji jedno-wejściowych i jedno-wyjściowych nieseparowalnych filtrów FIR 3D na iloczyn wielu jedno-wejściowych i jedno-wyjściowych transmitancji 2D dołączonych do jednej wielo-wejściowej lecz jedno-wyjściowej transmitancji 1D a następnie opracowanie realizacji tych transmitancji za pomocą rotatorów (rozdział 3.2)
- propozycję rozkładu jedno-wejściowych i jedno-wyjściowych transmitancji filtrów IIR 3D przy założeniu separowalności mianownika transmitancji (rozdział 3.3)
- analityczne i eksperymentalne potwierdzenie hipotezy, że rozważane i opracowane w rozprawie ortogonalne filtry cyfrowe charakteryzują się znacznie mniejszymi wrażliwościami i lepszymi parametrami szumowymi niż inne struktury filtrów cyfrowych, zwłaszcza otrzymywane przez bezpośrednią realizację operacji splotu 3D.

Zasadniczą wadą zaproponowanych algorytmów projektowania filtrów 3D: tj. rozkładu transmitancji 3D na transmitancje 2D i 1D a następnie rozkładu transmitancji 2D na transmitancje 1D jest rezygnacja z wielowymiarowej ortogonalności (tj. wielowymiarowej bezstratności realizowanych filtrów) i zadowolenie się jedynie bezstratnością jednowymiarową. Trójwymiarowa struktura współczynników splotu 3D jest bowiem dzielona na naturalne warstwy 2D a następnie każda warstwa 2D jest rozkładana na naturalne przekroje 1D, co, moim zdaniem, w dużym stopniu niweczy potencjalną małą wrażliwość i dobre właściwości szumowe ostatecznej realizacji. Niedosyt budzi też to, że Doktorant nie zajął się optymalizacją kolejności dokonywania tych przekrojów w celu minimalizacji wrażliwości i redukcji propagacji szumu.

Brakuje mi także rozważań dotyczących zapewnienia pasywności realizowanych układów przy założeniu skończonej dokładności obliczeń, bo jej brak może być przyczyną niestabilności numerycznej układów bezstratnych tylko w warunkach idealnych (tj. przy zerowych błędach arytmetycznych).

4 Poprawność przedstawienia uzyskanych wyników

Oceniana rozprawa doktorska ma prawidłową strukturę i kompozycję, choć niektóre bardzo istotne wyniki, np. rozkład nieseparowalnych filtrów FIR 3D na transmitancje 2D i transmitancję 1D, są opisane zbyt pobieżnie.

Język pracy jest poprawny, poza drobnymi wyjątkami, wymienionymi w uwagach szczegółowych.

Rozważania matematyczne, z których składa się większość tekstu pracy, są na ogół przeprowadzone z akceptowalną starannością a sam formalizm matematyczny, poza drobnymi usterkami, podanymi w uwagach szczegółowych, nie budzi moich zastrzeżeń, chociaż zapisy niektórych wzorów są mało czytelne a wzór (92) na str. 34, w którym zamiast

$$\begin{bmatrix} Y_1(z) & 0 \end{bmatrix}$$

powinno być

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

jest, prawdopodobnie przez przeoczenie, błędny i powinien być poprawiony.

5 Wybrane uwagi szczegółowe

Poniżej zebrałem niektóre uwagi szczegółowe, które nasunęły mi się podczas czytania tekstu rozprawy:

- str. 3 (wiersze 16 i 17^g): sformułowanie „bloki opóźniające realizujące macierze permutacji” jest błędne, ponieważ, w przyjętym modelu filtrów cyfrowych, macierze nie realizują opóźnień
- str. 3 (wiersze 12 i 13_d): określenie „procesor reprogramowalny FPGA” jest niepoprawne, ponieważ typ programowalności układu FPGA jest zawarty w jego nazwie (FP oznacza field programmable) i chodzi tu nie reprogramowalność, którą charakteryzują się też oczywiście wszystkie procesory z określoną listą rozkazów, a o programowalność strukturalną
- str. 9 (wiersze 6 i 7^g): oznaczenie przez C zbioru liczb całkowitych jest mylące, ponieważ standardowo tak oznacza się zbiór liczb zespolonych (od nazwy „complex”)
- str. 9 (wiersze 22, 23 i 24^g): w nawiasach brak kropek oznaczających zmienną niezależną
- str. 10 (wiersz 12_d i szereg dalszych miejsc pracy): zamiast „częstotliwość próbkowania” powinno być „szybkość próbkowania” (co odpowiada w języku angielskim nazwie „sampling rate”)¹
- str. 12 (wiersze 10 i 11^g): przecież liniowe układy stacjonarne nie są najbardziej uniwersalne!

¹Jestem przeciwnikiem stosowania nazwy „częstotliwość próbkowania” i mierzenia jej w hercach (Hz). Jest to niepoprawne i prowadzi do nieporozumień. Należy bowiem rozróżniać pojęcia: „częstotliwość” jako właściwość sygnału i „szybkość” jako właściwość procesu wykonywanego nad sygnałem (w omawianym przypadku procesu próbkowania) i powstałego strumienia danych. Dlatego należy wyłącznie stosować określenie „szybkość próbkowania” i należy ją mierzyć w próbkach na sekundę (S/s), podobnie jak szybkość binarnego strumienia danych mierzy się w bitach na sekundę (b/s), a nie w hercach. Dzięki temu można jednoznacznie rozróżniać powszechnie stosowane pojęcia: „częstotliwość Nyquista” i „szybkość Nyquista”. Przez częstotliwość Nyquista rozumie się maksymalną częstotliwość widma sygnału dolnopasmowego, który można próbować z określoną szybkością, a przez szybkość Nyquista — minimalną szybkość, z którą można próbować sygnał dolnopasmowy o określonej maksymalnej częstotliwości widma. Skutkiem stosowania niepoprawnego terminu „częstotliwość próbkowania” jest więc niejednoznaczność pojęcia „częstotliwość Nyquista”.

- str. 15 (wiersz 10^g): zamiast „jego” powinno być „ich”
- str. 15 (wiersz 4_d): wzór (26) nie określa „dyskretnej transformaty Fouriera” jak napisał Doktorant, w której zakłada się skończone bloki próbek, a transformatę Fouriera o dyskretnych zmiennych wejściowych
- str. 17: dlaczego we wzorach (35), (36) i (37) zmieniono oznaczenia występujące we wzorze (34)?
- str. 18: we wzorach (40), (41) i (42) zastosowano jeszcze inną konwencję oznaczeń
- str. 19: znaczenie macierzy $\mathbf{G}$ we wzorze (47) i dalszych rozważaniach jest inne niż to, które jest podane w spisie symboli na str. 9
- str. 21: ostatnie odczepy na rys. 2 nie mogą się „spotkać”, jeśli $m \neq k$
- str. 23: zamiast „częstotliwość próbkowania” powinno być „szybkość próbkowania” a ponadto zamiast $1/f[s]$ i $n/f[s]$ powinno być $1/f [s]$ i $n/f [s]$
- str. 23: dlaczego we wzorze (59) po lewej stronie występuje różniczka d a po prawej stronie przyrost Δ ?
- str. 25: założenie kwantowania w układzie na rys. 7 po każdym mnożeniu jest złą strategią w przypadku zwłaszcza ortogonalnych filtrów cyfrowych
- str. 28: we wzorze (68) występuje myląca zbieżność oznaczeń ze wzorem (37)
- str. 29 (wiersz 7^g): we wzorze (43) nie występuje macierz $\mathbf{A}_c$
- str. 30: dlaczego iloczyn macierzy $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2\mathbf{R}_3 \cdots \mathbf{R}_k\mathbf{R}_{k+1}$ we wzorze (68) jest ujęty w nawias prostokątny?
- str. 31 (wiersz 5_d): we wzorze (71) nie występuje macierz $\mathbf{A}$
- str. 32: dlaczego we wzorze (85) i na rys. 11 w iloczynie macierzy $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2\mathbf{R}_3 \cdots \mathbf{R}_k\mathbf{R}_{k+1}$ każda z nich jest ujęta w nawias prostokątny?
- str. 33: podobny problem występuje we wzorach (86) i (87)
- str. 34: dlaczego macierze $\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \mathbf{G}_3, \dots, \mathbf{G}_k, \mathbf{G}_{k+1}$ są we wzorze (91) ujęte w nawiasy prostokątne?
- str. 34: wzór (92) jest błędny
- str. 46: dlaczego w układzie na rys. 22 jest tylko jedna zmienna niezależna n , poza tym skąd się wzięła i co oznacza zmienna z we wzorze (117)?
- str. 47: podobne uwagi dotyczą układów przedstawionych na rys. 23 i 24
- str. 87: dlaczego iloczyn macierzy $\mathbf{Z}_h\mathbf{T}_h$ we wzorze (216) jest ujęty w nawias kwadratowy?

- str. 106: omówione wyniki dotyczące wrażliwości otrzymanych filtrów, z których wynika, że w przypadku 7 % przypadków wrażliwości zaproponowanych filtrów są nawet większe niż realizacji wynikających bezpośrednio ze splotu potwierdza przypuszczenie, że jednowymiarowa bezstratność zaproponowanych struktur filtrów nie jest strategią optymalną
- str. 110: przypuszczenie to potwierdza także ostatnie zdanie zamykające główny tekst rozprawy, nawiasem dodając zamiast „bardzo indywidualny” wystarczyłoby „indywidualny” a zamiast „praktycznego zastosowania” wystarczyłoby „zastosowania”.

6 Konkluzja

Podsumowując powyższą charakterystykę recenzowanej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że Pan mgr inż. Paweł Poczekajło zamieścił w niej wartościowe i oryginalne wyniki prac przeprowadzonych przez Niego pod kierunkiem Promotora rozprawy Pana Profesora dr. hab. inż. Krzysztofa Wawryna oraz Promotora pomocniczego Pana dr. inż. Tomasza Wirskiego.

Oceniam, że Doktorant osiągnął zakładany cel badawczy i wykazał prawdziwość postawionej tezy naukowej. Wymienione przeze mnie w poprzednich punktach uwagi krytyczne nie wpływają negatywnie na wartość osiągniętych i przedstawionych w rozprawie wyników. Stwierdzam więc, że przedłożona praca spełnia wymagania stawiane przez stosowne przepisy rozprawom doktorskim i uważam, że Pan mgr inż. Paweł Poczekajło powinien być dopuszczony do dalszych etapów procedury doktorskiej i do publicznej obrony ocenionej przeze mnie rozprawy.

