prof. dr hab. inż. Dariusz Kania
Politechnika Śląska
Katedra Systemów Cyfrowych
ul. Akademicka 16
44-100 Gliwice

Gliwice, 10.09.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Marcina Gurskiego dla Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego

(podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne" z dnia 10.07.2024)

Tytuł rozprawy: Wysokorozdzielczy system pomiaru odcinka czasu wykorzystujący wielosegmentowe linie opóźniające o kontrolowanych charakterystykach

Autor rozprawy: mgr Maciej Gurski
Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Ryszard Szplet
Promotor pomocniczy: dr Robert Frankowski
Dyscyplina: Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne

Zagadnienia naukowe rozprawy (cel i teza pracy)

Rozwój technologiczny otwiera wiele nowych obszarów zastosowań układów programowalnych. Przykładem mogą być implementowane w układach FPGA różnorodne generatory liczb prawdziwie losowych (ang. TRNG – True Random Numer Generator), implementacje fizycznie niekopiowalnych funkcji (ang. PUF – Physically Unclonable Function), czy też liczne specjalizowane układy pomiarowe, wykorzystujące specyfikę wybranego układu. Istota tych rozwiązań tkwi w możliwości wykorzystania niewielkich opóźnień wewnątrzukładowych, czasami charakterystycznych dla wybranego egzemplarza układu.

Przykładem ciekawego wykorzystania specyfiki układów programowalnych są rozwiązania układowe służące do pomiaru odcinka czasu. Dopasowane są one do zasobów wewnętrznych tych układów i wraz z ich rozwojem zapewniają wykonywanie pomiarów z coraz większą rozdzielczością. Jednym z istotniejszych elementów w systemach pomiaru odcinków czasu są linie opóźniające. Można je oczywiście zrealizować w różny sposób, ale ważne jest, aby wybrać takie zasoby układu, które cechują się możliwie najmniejszymi

opóźnieniami. Elementami takimi są bloki szybkich przeniesień arytmetycznych, które są optymalizowane pod względem minimalizacji czasu propagacji sygnałów, co sprawia, że zapewniają dużą rozdzielczość pomiaru czasu. Jako że nie znalazły się one wewnątrz struktury FPGA w celu wykorzystania w konstrukcji linii opóźniających, zachodzi potrzeba wykonania wielu zabiegów optymalizacyjnych, ukierunkowanych na zwiększenie rozdzielności i liniowości układów pomiarowych.

Praca doktorska mgr. Marcieja Gurskiego dotyka sprzętowo-programowych zagadnień tworzenia i optymalizacji parametrów linii opóźniających realizowanych w układach FPGA. Zaproponowane rozwiązania wpisują się w obszar badań, których istota tkwi w nietypowym wykorzystaniu specyfiki układów programowalnych, w analizowanym przypadku przede wszystkim układów szybkich przeniesień. Opracowane metody i algorytmy ukierunkowane są na dostępne zasoby struktury oraz skorzystanie z nadmiarowości tych zasobów. W pracy zaproponowano i przeanalizowano wiele algorytmów konstrukcji i optymalizacji linii opóźniających, stanowiących główny element układowy precyzyjnych systemów pomiaru odcinka czasu.

Zarówno cel, jak i teza pracy zostały precyzyjne sformułowane. Rozprawa ma charakter inżyniersko-eksperymentalny, przy czym opracowane rozwiązania bez wątpienia stanowią istotny element rozwoju systemów precyzyjnego pomiaru odcinków czasu.

Uwzględniając powyższe uważam, że **temat recenzowanej rozprawy doktorskiej Pana mgr. Macieja Gurskiego jest interesujący, aktualny i bardzo ważny technicznie.** Stopień złożoności, znaczenie naukowe i zakres zadania odpowiadają ustawowym i zwyczajowym wymogom stawianym rozprawie doktorskiej.

Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa stanowi dobrze skomponowaną całość, w której zawarto najważniejsze podstawy teoretyczne, odniesienie do aktualnego stanu wiedzy, ciekawe nowatorskie propozycje algorytmów tworzenia i optymalizacji wielokrotnych linii opóźniających oraz wyniki licznych eksperymentów, potwierdzających skuteczność zaproponowanych rozwiązań.

W rozdziale pierwszym, stanowiącym wprowadzenie do rozprawy, przedstawiono ogólne informacje na temat rozwoju systemów pomiaru odcinka czasu oraz korzyści z realizacji tych układów w strukturach programowalnych. Więcej szczegółów pokazujących metody precyzyjnego pomiaru odcinków czasu oraz koncepcje realizacji cyfrowych linii opóźniających zawarto w rozdziale 2. Całość rozważań, powiązana z licznymi publikacjami opisującymi różnorodne implementacje, stanowi ciekawie przedstawioną analizę stanu wiedzy, bezpośrednio i pośrednio związaną z tematyką rozprawy. W jednostronicowym rozdziale 3 zawarto jasno przedstawiony cel oraz tezę pracy.

Najważniejszą częścią pracy są rozdziały 4, 5 i 6. W rozdziale czwartym zawarto opis platformy wykorzystanej do budowy sytemu pomiaru odcinka czasu, którą zrealizowano na

układzie programowalnym z rodziny Kintex UltraScale. Uwagę skoncentrowano na tych elementach wewnętrznych układu, które zostały wykorzystane do realizacji linii opóźniającej oraz zrealizowanego systemu pomiarowego. Warto wspomnieć, że w opracowanym systemie wykorzystano wirtualne mikroprocesory MicroBlaze odpowiedzialne za sterowanie procesem pomiarowym oraz przetwarzaniem i transmisją danych. Ważnym aspektem rozważań jest konstrukcja wielosegmentowej linii opóźniającej realizowanej w postaci łańcucha przeniesień arytmetycznych. Szczególną uwagę zwrócono na metody minimalizacji błędu bąbelkowego oraz poprawę właściwości pomiarowych układu, uzyskiwaną poprzez sortowanie segmentów linii.

W rozdziale 5 uwagę skoncentrowano na sposobach tworzeniu wielokrotnych linii opóźniających zapewniających możliwie najlepszą rozdzielność i liniowość. Rozważania dotyczą systemów jedno i wielokanałowych oraz systemów, w których kanały pomiarowe są konfigurowalne. Uzupełnieniem przedstawionych rozważań są liczne wyniki eksperymentów obrazujących czas wykonywanych obliczeń potrzebnych do znalezienia jak najlepszego rozwiązania oraz potrzebne zasoby pamięci.

Dopełnieniem rozważań przedstawionych w rozdziałach 4 i 5 są wyniki eksperymentów wnikliwie omówione w rozdziale 6. Zawarto w nim parametry linii opóźniających oraz charakterystyki i parametry układów pomiarowych uzyskiwanych różnymi przedstawionymi w pracy metodami. Cennym podsumowaniem przeprowadzonych eksperymentów jest wykres (Rys. 75) będący kwintesencją proponowanych metod projektowych, stanowiący wskazówki projektowe potrzebne do skonstruowania systemu o określonej rozdzielczości w określonym czasie.

Opracowane rozwiązania i algorytmy pozwalające na projektowanie precyzyjnych układów do pomiaru odcinków czasu w strukturach FPGA, ze szczególnym uwzględnieniem realizacji linii opóźniającej uważam za ciekawą koncepcję poszukiwania poprawy parametrów specjalizowanych systemów pomiarowych. **Szczególnie doceniam zastosowanie w procesie optymalizacji układu wielu rozwiązań głęboko zakorzenionych w sprzęcie, a nade wszystko umiejętności inżynierskie związane z „panowaniem" nad procesem syntezy, szczególnie w obszarze odwzorowania technologicznego realizowanych układów wewnątrz struktury programowalnej.**

Za najważniejsze, oryginalne elementy rozprawy uważam:

- opracowanie algorytmu minimalizacji błędów bąbelkowych w przetwornikach czasowo-cyfrowych wykorzystujących wielosegmentowe linie opóźniające,
- opracowanie algorytmu automatycznego sortowania segmentów linii opóźniającej ukierunkowanego na optymalizację rozdzielczości przetwornika czasowo-cyfrowego,

- opracowanie algorytmów doboru wielosegmentowych linii opóźniających dla różnych konfiguracji systemów pomiarowych odcinka czasu, ukierunkowanych na zwiększenie rozdzielczości systemu pomiarowego,
- zaproponowanie metod projektowych doboru linii opóźniających parametryzowanych właściwościami pomiarowymi oraz złożonością obliczeniową stosowanych metod syntezy,
- przeprowadzenie szerokiego spektrum dobrze przemyślanych eksperymentów potwierdzających skuteczność zaproponowanych rozwiązań.

Podsumowując ten fragment recenzji stwierdzam, że **cel pracy został osiągnięty. Wyniki eksperymentów potwierdzają słuszność postawionej tezy i pozwalają stwierdzić, że została ona udowodniona.**

Praca jest napisana bardzo starannie, co sprawia, że w części dotyczącej krytycznych uwag szczegółowych, uwagę skoncentruję na nurtujących mnie kilku pytaniach, drobnych wątpliwościach oraz stosowanym słownictwie.

Wątpliwości, pytania

1. Z czego wynika niemonotoniczny charakter wartości rozdzielczości ekwiwalentnej $q_{eqv\,max}$ przedstawionej w tabeli 24? Chodzi o wartości odstające zawarte w tabeli 24 jak i zobrazowane na Rys. 72 dla ZWLO składających się z 16 i 25 WLO. Podobny wynik, ale tylko dla liczby WLO równiej 16 można znaleźć w Tab. 25.
2. W pracy przedstawiono liczne eksperymenty ukierunkowane na potwierdzenie postawionej tezy i dokumentujące właściwości metrologiczne proponowanego rozwiązania. Czasami stanowią one wskazówki dla projektantów systemów pomiaru czasu. Nasuwa się pytanie na ile uzyskane wyniki będą powtarzalne dla innego egzemplarza układu serii Kintex UltraScale. Czy można zastosować proponowane rozwiązania dla innej rodziny układów programowalnych np. układów firmy Intel/Altera?

Uwagi dotyczące użytego języka, słownictwa

Użyte w pracy sformułowania są w większości właściwe. Chciałbym jednak zwrócić uwagę na kilka pojęć, do których powoli się przyzwyczajamy, a w mojej opinii powinniśmy z nimi walczyć. Zdaję sobie sprawę, że być może jest to walka z wiatrakami, ale uważam, że zawsze warto zastanowić się, czy używane coraz powszechniej słownictwo jest właściwe.

1. Absolutnie nie mogę zaakceptować nazwy „rejestr przesuwny" (str. 20, $l^{2,3}$, str. 35, l_{10} itd.) Omawiany we wskazanych miejscach pracy rejestr przesuwa informację, dlatego powinien się nazywać **rejestrem przesuwającym.** Gdyby rozpatrywany rejestr był przesuwany, to wtedy nazywałby się rejestrem przesuwnym

2. Za niewłaściwe uważam wprowadzenie określeń „korona drzewa" (str. 67, l_1) oraz „pień drzewa" (str. 68, l^1). Zgodnie z ugruntowanymi pojęciami teorii grafów przedstawione na Rys. 51 drzewa mają korzeń na górze, a liście na dole. Nieznane mi są określenia „korona drzewa" oraz „pień drzewa", a dodatkowo w przypadku korzenia, który znajduje się na górze wprowadzają zamieszanie co do kierunku przeszukiwania kombinacji. Zgodziłbym się z określeniami a) w górę (w kierunku korzenia drzewa), b) w dół (w kierunku liści drzewa).

3. Dalekie od precyzyjnego, czy nawet poprawnego języka technicznego są moim zdaniem również poniższe sformułowania. Czasami mają one charakter żargonowy.

str.10, l^6 - „...odpowiednio połączone zatrzaski." – zdaję sobie sprawę, że tak często nazywa się przerzutniki typu D z mechanizmem synchronizacji, który jest aktywny poziomem (ang. latch – zatrzask). Nie mam pewności, czy w opisie chodziło o takie przerzutniki.

W poniższych przykładach warto zamiast „przebieg" użyć słowa „sygnał".

str.19, l^2 - „...Rys. 8 Przebiegi w układzie" – powinno być „Wykres czasowy sygnałów..."

str. 46, l_2, - „...przebiegi na wyjściach ..."

str. 53, l^{20}, l_7, - „...przebiegi zegara wzorcowego ...", „...przebiegów zegara wzorcowego."

str. 71, l_{78} - "...przebieg zegara o częstotliwości ..."

Inne przykłady żargonowych określeń:

str. 24, l^2 – „...podaje się sygnał..."

str. 26, l^9 – „...częstotliwość zegara..."

str. 33, l^5, - "...podawany jest na wejście..."

str. 76, l^7, - "...działanie algorytmu..."

str. 77, l_7, - "...wolniejsze taktowanie..."

Uwagi szczegółowe dotyczące niedociągnięć edytorskich

str.9, l^{17} – brak spacji „...nanosekundowych)stosuje..."

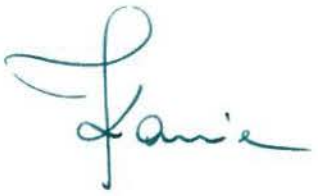
str.67, l^6 - jest „...ze..." powinno być „...że..." "

str.42, l_2 – dwa razy „na"

str.103, l_3 – brak kropki po" rys"

Chciałbym podkreślić, że powyższe uwagi dotyczące użytego słownictwa oraz drobnych braków edytorskich, wyspecyfikowane z opiniodawczego obowiązku, absolutnie nie podważają zasadniczego dorobku Autora i nie obniżają mojej wysokiej oceny wartości merytorycznej rozprawy.

Ocena końcowa rozprawy

Uważam, że przedstawione w rozprawie doktorskiej wyniki wnoszą istotny wkład w rozwój Dyscypliny Naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne".

Podsumowując stwierdzam, że zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789), rozprawa doktorska mgr. Macieja Gurskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zatem **wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony**.