

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Macieja Gurskiego

zatytułowanej:

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

I. Informacje ogólne

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy systemów pomiaru odcinka czasu implementowanych w programowalnych układach cyfrowych typu FPGA. W szczególności skupia się ona na rozwiązaniach, bazujących na wielosegmentowych liniach opóźniających i wykorzystujących szybkie łańcuchy przeniesień arytmetycznych, które są dostępne jako standardowy element zasobów logicznych w układach FPGA. Jako że łańcuchy przeniesień w zamysle projektantów układów FPGA mają służyć przyspieszeniu wykonywania operacji arytmetycznych i nie są optymalizowane pod kątem równomierności wnoszonego opóźnienia, należy spodziewać się, że parametry metrologiczne systemu pomiaru odcinka czasu zbudowanego z ich wykorzystaniem (takie jak rozdzielczość czy liniowość) będą zależą od miejsca implementacji linii opóźniającej w strukturze układu FPGA, konkretnego wykorzystanego egzemplarza układu, jak również od sposobu implementacji linii. Poprawa parametrów systemu pomiarowego może być osiągnięta przez zwiększenie liczby wykorzystanych linii, konstruując tzw. linie złożone, niemniej jednak praktyka wykazuje, że osiągnięty efekt szybko maleje wraz ze wzrostem liczby użytych linii.

W związku z tym celem badawczym, który stawia sobie Doktorant, jest zbadanie możliwości poprawy parametrów metrologicznych systemu pomiaru odcinka czasu przez wybór tylko takich linii z puli wszystkich możliwych do zaimplementowania w danym układzie FPGA, które dają w efekcie linię złożoną o najlepszych parametrach. Zagadnienie takie jest niewątpliwie warte uwagi z punktu widzenia implementacji złożonych systemów cyfrowych w układach programowalnych. Ze względu na bardzo dużą liczbę koniecznych do rozpatrzenia kombinacji linii nie jest też ono trywialne. Aby uzyskać użyteczne i przydatne w celach projektowych narzędzie jest konieczne opracowanie rozsądnych algorytmów, które w akceptowalnym czasie będą w stanie rozwiązać postawiony problem. Istotność zagadnienia podkreśla fakt, że systemy pomiaru interwału czasu implementowane w układach programowalnych dają projektantom stosunkowo łatwą i szybką ścieżkę (w porównaniu z innymi rozwiązaniami) tworzenia urządzeń o dobrych parametrach, oferujących ponadto możliwość reprogramowalności, rekonfiguracji czy też integracji z innymi elementami bardziej złożonych struktur cyfrowych.

W dorobku publikacyjnym Doktoranta można znaleźć 4 artykuły w czasopiśmie oraz kilka wystąpień konferencyjnych, z czego znaczna część dotyczy tematyki układów programowalnych i ich wykorzystania w zagadnieniach pomiaru interwału czasu. Zaskakujące jest, że Doktorant żadnej z tych pozycji nie włączył do literatury przywoływanej

w rozprawie.

Przedłożona praca odpowiada dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Można ją wpisać w zakres rozwoju metod projektowania i analizy złożonych systemów cyfrowych, w szczególności metrologicznych.

II. Struktura rozprawy

Rozprawa liczy 118 stron i składa się na nią siedem rozdziałów oraz spis przywoływanej literatury. Rozdział 1 przedstawia krótko uzasadnienie podjętego wątku badawczego. Kolejne dwa rozdziały zawierają przegląd zagadnień dotyczących cyfrowych linii opóźniających oraz metod pomiaru odcinka czasu. Można uznać, że rozdziały te potwierdzają dobrą orientację Doktoranta w tematyce niezbędnej do rozwiązania postawionych przed sobą celów.

Rozdział 3 przedstawia cel i tezę rozprawy, którą Doktorant formułuje w następujący sposób: „Poprzez zastosowanie odpowiedniego algorytmu wyboru wielosegmentowych linii opóźniających do budowy złożonych wielosegmentowych linii opóźniających możliwe jest istotne zwiększenie rozdzielczości i liniowości systemu precyzyjnego pomiaru odcinka czasu”.

Rozdziały 5 i 6, a w części również rozdział 4, tworzą zasadniczą, autorską część rozprawy. W pierwszej części rozdziału 4 jest przedstawiony opis platformy sprzętowej KCU105 z układem Kintex UltraScale firmy Xilinx, którą Doktorant wykorzystał do implementacji badanych w rozprawie systemów pomiaru odcinka czasu. W drugiej, autorskiej części przedstawiona jest struktura oraz opis zaprojektowanego systemu, a także omówienie problemu błędu bąbelkowego oraz sposobu jego rozwiązania. Rozdziały 5 szczegółowo dyskutuje różne warianty algorytmów doboru wielosegmentowych linii opóźniających, które można stosować w systemach jedno- i wielo-kanalowych, a także rekonfigurowalnych. Rozdział 6 zawiera wyniki badań eksperymentalnych Doktoranta i ukazuje poprawę parametrów (głównie rozdzielczości ekwiwalentnej), którą można uzyskać dzięki zaproponowanym algorytmom.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie prowadzonych badań.

Załączony spis literatury liczy 88 pozycji, z czego ok. połowa to artykuły opublikowane w czasopiśmie w latach od 1947 do 2022. Ponadto cytowane są materiały konferencyjne, pozycje książkowe, patenty, materiały firmowe, a także rozprawy doktorskie. Spis literatury dobrze odzwierciedla stan przedmiotu badań Doktoranta oraz potwierdza znajomość przez niego tematyki badawczej. Jak już wcześniej zaznaczyłem, pewne zdziwienie budzi fakt, że żadna z publikacji Doktoranta nie znalazła się na liście cytowanych pozycji.

Oceniając strukturę przedłożonej rozprawy, należy stwierdzić, że jest ona poprawna z formalnego punktu widzenia. W poszczególnych rozdziałach widać pewien stopień nieuporządkowania i brak metodycznego podejścia (więcej na ten temat w dalszej części recenzji), co utrudnia czytanie rozprawy. Problem ten nie umniejsza jednakże w istotnym stopniu jej merytorycznej wartości.

III. Ocena wartości merytorycznej rozprawy

Pomysł wykorzystania linii opóźniających do pomiaru odcinka czasu nie jest pomysłem nowym, podobnie jak wykorzystanie łańcucha szybkich przeniesień arytmetycznych do konstruowania linii wielosegmentowych. Za główny wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny należy uznać podjęcie systematycznej próby rozwiązania problemu wpływu położenia linii opóźniających na ich parametry metrologiczne oraz zaproponowanie skutecznych algorytmów selekcji takich linii, które pozwalają uzyskać najlepsze parametry linii złożonych.

W szczególności do wymiernych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- zbadanie zagadnienia powstawania błędów bąbelkowych w wielosegmentowych liniach opóźniających wraz z opracowanym i zaimplementowanym w języku Python algorytmem sortowania, skutecznie je redukującym;
- zbadanie zagadnienia doboru linii opóźniających w układach FPGA w celu tworzenia linii złożonych o optymalizowanych parametrach metrologicznych; opracowane algorytmy doboru linii w systemach pomiaru odcinka czasu jedno- i wielo-kanalowych, oraz rekonfigurowalnych pozwalają w akceptowalnym czasie
- przetestowanie opracowanych algorytmów na różnych komputerach i potwierdzenie redukcji wymaganego czasu obliczeń przy jednoczesnej poprawie rozdzielczości ekwiwalentnej;
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych z użyciem autorskiego systemu pomiaru odcinka czasu, zaimplementowanego w układzie Xilinx Kintex UltraScale w środowisku testowym KCU105.

Mimo pewnych zastrzeżeń i wątpliwości wymienionych poniżej, uważam, że przedstawione w rozprawie osiągnięcia stanowią wartościowy wkład w dyscyplinę automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, oraz potwierdzają umiejętności Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Uważam też, że **cel pracy został osiągnięty, a zasadność przyjętej tezy rozprawy została wykazana.**

IV. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

A. Uwagi o charakterze ogólnym

1. Pomimo tego, że rozprawa porusza zagadnienia metrologii, nigdzie w jej tekście nie znajdujemy analizy dokładności pomiaru, możliwej do osiągnięcia za pomocą rozważanych układów. Autor posługuje się głównie pojęciami rozdzielczości i liniowości, które jedynie częściowo opisują dokładność, wyrażaną za pomocą niepewności. Termin „niepewność” w ogóle nie pojawia się w tekście rozprawy.
2. Rozdział dotyczący weryfikacji eksperymentalnej należy uznać za niepełny - brak w nim schematów i opisu wykorzystywanych układów pomiarowych, zastosowanych przyrządów pomiarowych, jak również metodologii pomiarowej. Informacje takie są niezbędne by ocenić, czy prezentowane wyniki zostały uzyskane zgodnie z zasadami sztuki i czy można je uznać za wiarygodne.
3. Doktorant podaje wyniki pomiarowe z rozdzielczością do 1 fs, a czasem nawet 100 as (np. tabele 16, 17 str.83) – czy to jest uzasadnione w kontekście niepewności pomiaru? Nie podano też, w jaki sposób te wartości zostały wyznaczone. Jak duży jest rozrzut wyników (określany czasem jako niepewność typu A) przy pomiarze powtarzanym odcinków czasu o tej samej długości?
4. Doktorant nie przedstawił metodyki, którą wykorzystywał do kalibracji linii pomiarowych.
5. Na ile błąd bąbelkowy można rozważać jako zjawisko o charakterze deterministycznym? Na str. 49 pojawia się informacja, że źródłem tego rodzaju błędów są „rozrzuty produkcyjne układów scalonych, szумы i zakłócenia w układzie”. O ile rozrzuty produkcyjne można uznać za czynnik o charakterze deterministycznym, to szумы i zakłócenia już niekoniecznie. Co autor ma na myśli mówiąc o szumach i zakłóceniach? Czy któryś z wymienionych czynników można uznać za dominujący?
6. Tabela 6 na str. 70, podsumowująca wyniki optymalizacji systemu z rekonfigurowalną liczbą kanałów pomiarowych sugeruje, że dla ustalonej liczby kanałów uzyskiwane

parametry nie zależą istotnie od wyboru algorytmu. Czy jest to efekt przypadkowy, występujący dla konkretnego uruchomienia algorytmu, czy też można to uznać za cechę generalną badanego problemu? Jak dużych rozrzutów można się spodziewać przy wielokrotnym uruchomieniu algorytmu? A z innej perspektywy, czy podawanie wyników z dokładnością do pojedynczych fs jest uzasadnione?

7. W systemach cyfrowych znany jest problem przesłuchów poprzez linie zasilające i podłoże, który powoduje zmiany czasów propagacji. W zależności od tego, czy sygnały wywołujące przesłuch są synchroniczne lub asynchroniczne w stosunku do propagującego się sygnału, efektem może być stały offset lub jitter. Czy problem ten był przez Doktoranta badany?

B. Istotniejsze uwagi szczegółowe

1. Rozprawa jest napisana w sposób, który nie ułatwia jej czytania – wielokrotnie pojawiają się pojęcia, których zdefiniowanie lub objaśnienie następuje dopiero w dalszej części pracy (np. pojęcie błędu bąbelkowego pojawia się na str. 45, podczas gdy jego opis dopiero na str. 48, a kolejne jego objaśnienie na str. 49). Niektóre pojęcia w ogóle nie są objaśnione (np. interpolator na str. 16, skrót DLK – rysunek na str. 17, procedura weryfikacji – str. 49).

Podobny problem jest się na str. 61 - pojawia się pojęcie „systemu rekonfigurowalnego o zmiennych parametrach” – brak jest definicji rozważanej koncepcji a jej podanie na początku znacznie ułatwiłoby zrozumienie dalszej części tekstu. Na str. 60 ten sam system nazwany jest jako „system z rekonfigurowalnymi kanałami pomiarowymi o parametrach zależnych od ich liczby”. Na str. 67, w rozdziale traktującym o tego typu systemach, jego nazwa to znowu „system z rekonfigurowalnymi kanałami o zmiennych parametrach”. Takie podejście nie ułatwia zrozumienia intencji autora – nazwa „system rekonfigurowalny o zmiennych parametrach” sugeruje, że celem rekonfiguracji są te właśnie parametry, podczas gdy chodzi tu w istocie o „samorzutną” zmianę parametrów metrologicznych (ich pogorszenie), spowodowaną zmniejszeniem liczby linii w przypadku zwiększenia liczby kanałów. Bardziej adekwatną nazwą byłby tu „system z rekonfigurowalną liczbą kanałów pomiarowych”.

2. Całościowy obraz sposobu wykorzystania opracowanych algorytmów pojawia się dopiero w rozdziale 5.3 „Implementacja algorytmu” na str. 73. Weześniejsza część rozdziału 5 nie daje jasności, jakie jest podejście do badanego problemu.
3. W rozdziale 4 niepotrzebnie rozbudowane są fragmenty podające szczegóły wykorzystanej karty prototypowej KCU105, np. suche wyliczenie dostępnych złączy, składników karty, dostępnych magistral – nie wnosi wiele do rozprawy i ma nikły związek z przedmiotem jej zainteresowania. Podobnie opis procesora Micro Blaze jest chyba zbędny. Zamiast tego bardziej przydatny byłby fragment, pokazujący strukturę układów z serii Kintex (np. struktura CLB, sposób organizacji domen zegarowych itp.). Projekt systemu pomiarowego, który jest podstawą wszystkich wykonywanych eksperymentów, zajmuje 2 strony, podczas gdy pozostałe opisy zajmują 8 stron (z czego 4 strony to opis procesora Micro Blaze).
4. Na str. 53 pojawia się informacja, że liczba rejestrowanych pomiarów zawiera się pomiędzy 10^6 a 10^8 – jakie jest uzasadnienie tej liczby?
5. Rys. 40 na str. 54 jest trudny do interpretacji – np. centralną część rys. (a) zajmuje fragment, który w okolicy 1/4 (licząc od dołu) wykazuje skok, którego czytelnik się nie spodziewa na podstawie podpisu zamieszczonego pod rysunkiem: „zbocze narastające zarejestrowane dla posortowanych segmentów dla zbocza narastającego”. Dopiero po dokładnym przyjrzeniu się i przeczytaniu opisu można zauważyć cieniutki niebieski

fragment, który jest efektem opisywanego sortowania. Nie jest jasne, czemu rysunek (c), umieszczony pod rys. (a), połączony jest z nim dwoma równoległymi liniami, pokazującymi błędy bąbelkowe.

6. Na str. 60 Doktorant pisze, że domyślnym kryterium doboru linii opóźniających jest rozdzielczość ekwiwalentna, ale można osiągnąć poprawę parametrów w zakresie liniowości, albo obydwu parametrów jednocześnie. Czy Autor dysponuje danymi potwierdzającymi ten postulat?
7. Na str. 64 podano, że na podstawie wstępnych założeń odnośnie parametrów metrologicznych systemu wyznaczana jest niezbędna liczba linii opóźniających, które następnie są implementowane w różnych miejscach układu. Jak, nie znając parametrów wszystkich linii określić ile ich będzie trzeba aby spełnić wymagane założenia, jeśli parametry linii zależą od miejsca implementacji w strukturze FPGA?
8. Na str. 72 jest przedstawiony rys. 56, pokazujący zmianę rozdzielczości ekwiwalentnej przy pominięciu początkowych przedziałów kwantowania – ma on charakter zasadniczo „malejący” co sugeruje, że początkowe przedziały mają dużą szerokość. Czy takie zachowanie jest normą i znajduje jakieś uzasadnienie?
9. Sposób zapisu kryterium optymalizacyjnego, które jest zawarte w rozdziale o systemach wielokanałowych (str. 65) jest niejasny – przyjęte podejście jest rekurencyjne, co nie wynika z podanego wzoru (25).
10. Na str. 75 podano informację o opracowanym symulatorze, którego celem jest „skrócenie czasu realizacji algorytmu wyboru WLO”. Z kolei na str. 76 czytamy, że „duża zgodność uzyskanych wyników pozwoliła na znaczne skrócenie procesu opracowania algorytmu doboru WLO”. Jaki więc jest rzeczywisty cel opracowania symulatora?
11. Tabele 16 do 21 na str. od 83 do 86 zawierają różnice rozdzielczości ekwiwalentnych w systemach wielokanałowych podane z dokładnością od 10^{-19} s do 10^{-12} s – czy takie postępowanie jest uzasadnione w kontekście niepewności pomiarowej?
12. Jak zachowuje się system pomiarowy nie umieszczony w komorze klimatycznej – czy przeprowadzono takie badania? Jak zmiany temperatury wpłyną na dokładność pomiaru oferowaną przez badane systemy?
13. W całej pracy nigdzie nie znajdujemy podanej wprost informacji o tym, jak długi interwał czasu można mierzyć za pomocą badanych linii.

C. Uwagi szczegółowe mniejszej wagi

1. Wykaz symboli i skrótów, zamieszczony na początku rozprawy, jest niepełny – brakuje np., δ , τ , DLK.
2. Zapis $\tau + \delta_i \in \langle m - 1, nm - 2 \rangle$ na str. 14 jest błędny – wartości podanego zakresu są liczbami naturalnymi, czego trudno się spodziewać po opóźnieniach poszczególnych segmentów linii opóźniającej.
3. Zamiast „kilkuset do kilkudziesięciu” (str. 16) powinno być raczej „kilkudziesięciu do kilkuset”.
4. Opis metody noniusza elektronicznego na str. 18 dotyczy układu, wykorzystującego linie opóźniające, chociaż tytuł rozdziału sugeruje układ z oscylatorami.
5. Na str. 18 pojawia się informacja, że precyzja układu wynosi 3 ns – czy chodzi tu faktycznie o precyzję pomiaru (powtarzalność wyników w pomiarze wielokrotnym), czy raczej o rozdzielczość opisywanego układu?
6. Tekst na str. 23, dotyczący przetwornika z dwiema liniami jest w pewnym stopniu powtórzeniem tekstu o linii różnicowej ze str. 16.

7. Na str. 26 przywoływany jest w kontekście metody z zegarem wielofazowym wzór (7), który zasadniczo dotyczy linii różnicowej.
8. Na str. 57 przydały się schemat blokowy opracowanego programu sortującego, co ułatwiłoby zrozumienie jego działania.
9. Użycie na rys. 48, 49 i 50 podziałki mniejszej niż 1 jest niepotrzebne i mylące – liczba kanałów nie może zmieniać się o mniej niż 1.
10. Na str. 71 pojawia się wielkość oznaczona jako τ , której znaczenie nie jest objaśnione.
11. Nazywanie przedziałów kwantowania kanałami (str. 71) nie wydaje się ani potrzebne, ani rozsądne, zwłaszcza w sytuacji, gdy w rozprawie rozważane są systemy o wielu kanałach.

V. Podsumowanie

Podsumowując, należy stwierdzić, że praca, mimo wskazanych uchybień, jest ciekawa i wartościowa naukowo, oraz że autor wykazał dobre przygotowanie teoretyczne i umiejętność prowadzenia kreatywnej pracy naukowej oraz projektowej. Szkoda, że rozprawa nie została przygotowana w j. angielskim, co umożliwiłoby jej szersze rozpropagowanie wśród osób zainteresowanych tematyką implementacji systemów pomiaru odcinka czasu w układach FPGA.

Uważam, że przedłożona rozprawa spełnia wymagania określone przez Ustawę z dn. 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, oraz wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



dr hab. inż. Łukasz Śliwczyński