

Prof. zw. dr hab. inż. Janusz Mroczka, czł. koresp. PAN, dr h.c. (mult.)

Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej
Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej
ul. B. Prusa 53/55, 50-317 Wrocław
tel. (071)3211247
(071)3206232
fax: (071)3214277
e-mail: janusz.mroczka@pwr.edu.pl

adres prywatny:
ul. Wysłoucha 65
52-433 Wrocław
tel.: (071) 3635384

RECENZJA

pracy doktorskiej mgra inż. Dominika Sondej,.,
pt.: Pomiar odcinka czasu metodą kodowania wielokrotnego w niezależnych
liniach kodujących”

Promotor: prof. dr hab. inż. Ryszard Szplet

Tematyka pracy doktorskiej dotyczy metod precyzyjnego pomiaru odcinka czasu. Dynamiczny rozwój wielu dziedzin nauki i techniki w ostatnich dziesięcioleciach spowodował między innymi wzrost zainteresowania metodami precyzyjnego pomiaru odcinka czasu. Określenie precyzyjny oznacza w tym kontekście pomiar realizowany z rozdzielczością i standardową niepewnością pomiarową o wartościach pojedynczych pikosekund. Pomiaru takie od wielu lat znajdują zastosowanie w badaniach z dziedziny fizyki wysokich energii, np. do pomiaru czasu przelotu cząstek, w medycynie do emisyjnej tomografii pozytonowej, w spektroskopii ramanowskiej, dalmetrii laserowej, astronomii i telekomunikacji. Wraz z rozwojem technologii mikroelektronicznych i pojawiającą się możliwością realizacji kompletnych urządzeń pomiarowych w pojedynczym układzie scalonym obszar zastosowań precyzyjnego pomiaru odcinków czasu rozszerzył się o sprzęt elektroniczny powszechnego użytku, w tym m.in. skanery 3D, konsole do gier, przenośne dalmierze laserowe. Szerokie zastosowania i duże znaczenie precyzyjnego pomiaru odcinków czasu w rozwoju różnych dziedzin nauki i techniki, powoduje postępujący wzrost wymagań odnośnie parametrów metrologicznych urządzeń pomiarowych. Typowo

w rozwiązaniach implementowanych w układach scalonych parametry te, a w szczególności rozdzielczość przetwarzania, zależą ściśle od wartości opóźnień propagacyjnych bramek logicznych i ścieżek połączeniowych układu scalonego. W najczęściej stosowanych przetwornikach czasowo-cyfrowych, wykorzystujących dyskretne linie opóźniające, wartość osiąganą rozdzielczości nie może być mniejsza niż czas propagacji najszybszego elementu opóźniającego w układzie scalonym. Można zatem mówić o technologicznej barierze w uzyskiwaniu wyższych rozdzielczości, a chęć poprawy parametrów przetwornika implikuje konieczność zmiany technologii mikroelektronicznej użytej do realizacji układu scalonego, na inną, zazwyczaj nowszą, o mniejszych opóźnieniach propagacyjnych. Z różnych względów rozwiązanie takie nie zawsze jest możliwe. Poszukiwane są więc alternatywne metody, dla których parametry metrologiczne nie zależą od technologii w jakiej układ został wykonany.

Cel pracy został sformułowany przez Autora w rozdziale trzecim. Praca ma charakter teoretyczno-doświadczalny, a przedstawione w niej zagadnienia dotyczą istotnych problemów metodologicznych odnoszących się do metody przetwarzania czasowo-częstotliwościowego, zapewniającej wartość rozdzielczości przetwarzania mniejszej niż opóźnienie pojedynczego elementu logicznego dostępnego w danym układzie scalonym

Tezy pracy stawiane przez Autora mówią że,:

istnieje możliwość opracowania nowej metody pomiaru odcinków czasu bazującej na idei linii opóźniającej z odczepami, umożliwiającej osiągnięcie rozdzielczości przetwarzania użytego do budowy tej linii i możliwej do zaimplementowania w układzie scalonym z użyciem ograniczonej ilości zasobów logicznych,

zastosowanie opracowanej metody w interpolacyjnym liczniku czasu zaimplementowanym w taniej i łatwo dostępnej technologii mikroelektronicznej pozwala na uzyskanie układu pomiarowego o femtosekundowej rozdzielczości, pikosekundowej precyzji i w szerokim zakresie pomiarowym.

Do udowodnienia tak postawionych tez została zaproponowana nowa metoda, będąca złożeniem dwóch metod, a mianowicie: (1) przetwarzania z użyciem niezależnych linii kodujących, opracowanego w Zakładzie Techniki Cyfrowej

ITK WEL WAT, oraz (2) kodowania wielokrotnego (*wave union*), zaproponowanego w Laboratorium Fermiego w Batavii (USA). Już pierwsza z wymienionych metod daje możliwość pokonania wspomnianego ograniczenia technologicznego, jednakże jej realizacja układowa absorbuje znaczną ilość zasobów logicznych układu scalonego. Dużą oszczędnością w tym zakresie charakteryzuje się z kolei druga metoda, dlatego połączenie obydwu stwarza możliwość uzyskania bardzo wysokiej rozdzielczości (o wartościach subpikosekundowych) z użyciem ograniczonej ilości zasobów logicznych układu. Metodę zastosowano w interpolacyjnym liczniku czasu wykonanym w popularnym, stosunkowo tanim i łatwo dostępnym układzie programowalnym Spartan-6 firmy *Xilinx* (CMOS 45 nm). Implementacja ta umożliwiła opracowanie kompletnego modułu pomiarowego o bardzo wysokiej rozdzielczości (< 1 ps), dużej precyzji (< 8 ps) i szerokim zakresie pomiarowym (do 1 s). Opracowanie metody i projektu licznika czasu wymagało wykonania szeregu zadań, których realizację Autor opisuje w kolejnych rozdziałach rozprawy.

Struktura i zawartość merytoryczna rozprawy

Rozprawa liczy 96 stron i zawiera sześć zasadniczych rozdziałów oraz wprowadzenie i podsumowanie z wnioskami końcowymi. Zasadniczą treść pracy uzupełniają wykazy skrótów i cytowanej literatury (132 pozycje literaturowe).

Pod względem merytorycznym pracę można podzielić na cztery główne części.

Pierwsza z nich, obejmująca cztery początkowe rozdziały pracy, stanowi wprowadzenie do problematyki współczesnej precyzyjnej metrologii czasu, a jej merytorycznym rezultatem jest sformułowanie problemu badawczego oraz propozycja metody, będącej potencjalnie jego rozwiązaniem. W części tej wskazano główne obszary zastosowań precyzyjnego pomiaru odcinków czasu, a następnie opisano rozwój metod przetwarzania czasowo-cyfrowego wraz z przykładami implementacji w urządzeniach pomiarowych. Przegląd obejmuje zarówno klasyczne metody analogowe, jak i metody cyfrowe, które są szczególnie dobrze predestynowane do implementacji w układach scalonych. Opis jest przygotowany przejrzysto i zwięźle, stanowiąc zwarte kompendium wiedzy na temat metod i technik pomiarowych w zakresie merytorycznym rozprawy.

W kolejnym rozdziale tej części pracy określony został główny problem badawczy, dotyczący poszukiwania nowej metody konwersji czasowo-cyfrowej, umożliwiającej przezwycięzenie bariery technologicznej związanej z ograniczeniem rozdzielczości przetwarzania do wartości czasu propagacji najszybszego elementu wewnętrznej struktury układu scalonego, nadającego się do użycia w budowie dyskretnej linii opóźniającej. Warto zauważyć, że dodatkowym warunkiem, utrudniającym rozwiązanie powyższego problemu było przyjęcie założenia, iż opracowana metoda powinna umożliwić implementację opartego na niej przetwornika czasowo-cyfrowego z użyciem możliwie małej ilości zasobów logicznych układu. W celu rozwiązania postawionego problemu badawczego Autor zdecydował się na połączenie dwóch stosunkowo nowych metod przetwarzania czasowo-cyfrowego, tj. metody niezależnych linii kodujących i metody kodowania wielokrotnego. Dokładne analizy każdej z tych metod ułatwiają zrozumienie idei proponowanej fuzji obydwu metod. Jej opis kończy pierwszą część merytoryczną niniejszej pracy.

Druga część pracy, zawarta w rozdziale 5, dotyczy projektu licznika czasu opartego na proponowanej nowej metodzie przetwarzania oraz problemów projektowych związanych z realizacją licznika w układzie programowalnym. W części tej opisano budowę i zasadę działania głównych bloków funkcjonalnych licznika, a mianowicie: układu wejściowego, pierwszego i drugiego stopnia interpolacji oraz licznika okresów. Z oczywistych względów najwięcej uwagi poświęcono drugiemu stopniu interpolacji, w którym zastosowano nowo opracowaną metodę. Autor koncentruje się na najważniejszych problemach projektowych wynikających z realizacji drugiego stopnia interpolacji, a dotyczących przede wszystkim odpowiedniego doboru długości linii kodujących, sposobu generowania wielozboczowego sygnału prostokątnego niezbędnego w opracowanej metodzie oraz eliminacji błędów bąbelkowych.

Trzecia część pracy, ujęta w rozdziale 6, poświęcona jest analizie źródeł błędów pomiarowych opracowanego licznika czasu. Jako główne źródła błędów systematycznego wskazano niedokładność oszacowania częstotliwości zegara referencyjnego i różnicę opóźnień w torach pomiarowych licznika. W celu szczegółowego określenia występujących różnic opóźnień torów pomiarowych

dokonano szczegółowej analizy budowy licznika. Analiza objęła wszystkie elementy tworzące torę pomiarowe, począwszy od złącza sygnałowego umieszczonego na płycie PCB, a skończywszy na układzie scalonym z zaimplementowanym licznikiem czasu. W wyniku analizy sformułowano ogólną zależność opisującą błąd systematyczny licznika. Następnie przeprowadzono analizę źródeł błędów przypadkowych, do których zaliczono: błąd kwantyzacji, błąd niedokładności identyfikacji przedziałów kwantowania interpolatorów, rozmycie czasowe zboczy sygnału zegarowego i impulsów określających początek i koniec mierzonego odcinka czasu. Szczególną uwagę poświęcono rozmyciu zboczy sygnałów w torach pomiarowych. Część trzecia jest zakończona sformułowaniem ostatecznego modelu łącznej niepewności pomiarowej licznika oraz sugestiami dotyczącymi minimalizacji wpływu wymienionych w modelu czynników na błąd pomiaru.

Na ostatnią, czwartą część pracy składają się rozdziały 7 i 8. Część ta dotyczy badań eksperymentalnych licznika oraz zawiera podsumowanie z wnioskami końcowymi. W wyniku przeprowadzonych badań Autor określił podstawowe parametry metrologiczne licznika, takie jak: rozdzielczość, nieliniowość przetwarzania, precyzję pomiaru w szerokim zakresie pomiarowym sięgającym 1 s oraz błąd niezrównoważenia licznika. W części tej stosunkowo dużą uwagę poświęcono również analizie wpływu zmian temperatury na jakość konwersji w pierwszym i drugim stopniu interpolacji. W podsumowaniu pracy zawarto spis istotnych osiągnięć będących wynikiem realizacji rozprawy oraz krytyczne uwagi dotyczące kierunków dalszych prac, mających na celu dalszą poprawę precyzji pomiarów krótkich odcinków czasu.

Oryginalność naukowa. Tematyka pracy ma charakter oryginalny. Obejmuje kilka istotnych aspektów. Na pierwszym miejscu należy wymienić opracowanie nowej metody konwersji czasowo-cyfrowej, zapewniającej wartość rozdzielczości przetwarzania mniejszą niż opóźnienie pojedynczego elementu logicznego dostępnego w danym układzie scalonym oraz weryfikację tej metody w interpolacyjnym liczniku czasu wykonanym w układzie programowalnym.

Oryginalnymi osiągnięciami Autora to:

- krytyczna analiza współczesnych metod przetwarzania czasowo-cyfrowego w kontekście podstawowych kryteriów metrologicznych (rozdzielczość i precyzja) i projektowych (złożoność układowa, łatwość implementacji, podatność na modyfikacje),
- opracowanie nowatorskiej metody przetwarzania czasowo-cyfrowego zapewniającej rozdzielczość o wartości mniejszej niż czas propagacji najszybszego elementu opóźniającego w układzie scalonym oraz możliwej do implementacji w układzie scalonym o ograniczonych zasobach elementów logicznych,
- skuteczna integracja zaproponowanej metody konwersji czasowo-cyfrowej i metody interpolacji dwustopniowej, w wyniku której możliwa jest realizacja licznika czasu o wysokiej precyzji i szerokim zakresie pomiarowym,
- dokładna analiza zasadniczych problemów projektowych, wynikających z implementacji zaproponowanej metody w układzie programowalnym, w tym przede wszystkim: sposobów wytwarzania wzorcowego sygnału kodowanego; problemu minimalizacji błędów przetwarzania, w szczególności eliminacji błędów bąbelkowych; zagadnień dotyczących projektowania topograficznego, zorientowanego na oszczędzanie zasobów logicznych układu,
- wszechstronna analiza błędów pomiarowych opracowanego licznika czasu oraz opracowanie matematycznego modelu niepewności pomiarowej licznika,
- opracowanie stanowiska laboratoryjnego i przeprowadzenie kompleksowych badań opracowanego licznika czasu, umożliwiających weryfikację eksperymentalną zaproponowanej metody i określenie zasadniczych parametrów metrologicznych licznika.

Realizacja przedstawionego celu wymagała od autora wykazania się szeroką wiedzą teoretyczną z dziedziny rozprawy oraz biegłą obsługą narzędzi projektowych. Przedstawiono w sposób wzorcowy metodologię charakterystyczną dla tego typu problemów. Zaprezentowane przez doktoranta rozważania ukazują ,

że opanował on naukowy warsztat pracy i posiadał umiejętności formułowania problemów naukowych i właściwy sposób ich rozwiązywania.

Stopień rozwiązania zagadnienia, biorąc pod uwagę temat i cel, praca w pełni odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim z dziedziny pomiarów odcinka czasu. Na podkreślenie zasługuje przyjęta metodologia badań, wychodząca od dobrego rozeznania literaturowego w zakresie realizowanej pracy i prowadząca do pełnej weryfikacji doświadczalnej. W działaniach tych Autor wykazał się znajomością i prawidłowym wykorzystaniem współczesnych technik badawczych. Zaprezentowany w pracy sposób postępowania świadczy o dojrzałości naukowej doktoranta. Biegłość w stawianiu hipotez, przejrzystość i logika zaprezentowanych analiz, konsekwencja w rozwiązywaniu trudnych problemów konstrukcyjnych, krytyczna ocena uzyskiwanych wyników, konsekwencja w realizacji eksperymentu, to obraz umiejętności jakie prezentuje doktorant przedkładaną do oceny rozprawą.

Układ treści i opracowanie redakcyjne odzwierciedlają przyjętą metodologię badań, co przyczynia się do przejrzystości pracy. Praca napisana jest poprawnym językiem. Poziom edytorski odpowiedni dla prac doktorskich.

Uwagi krytyczne. Nie mam uwag krytycznych. Z wielkim zainteresowaniem zapoznałem się z tą rozprawą. Przy tak zaprezentowanym poziomie naukowym pracy odczuwa się niedosyt w kwestii interpretacji sformułowania „ograniczonej ilości zasobów logicznych”, które to sformułowanie nie jest precyzyjne, a w rozprawie niewiele uwagi poświęcono określeniu ilości zasobów układu scalonego niezbędnych do implementacji nowej metody.

W podsumowaniu rozprawy odczuwa się brak porównania (np. w postaci tabelarycznej) uzyskanych parametrów metrologicznych opracowanego licznika z parametrami innych rozwiązań tego typu.

Do istotnych osiągnięć rozprawy zaliczono opracowanie dwóch typów generatorów sygnału wzorca. Niemniej przedstawione w pracy badania eksperymentalne dotyczą tylko jednego z nich. Wprawdzie w rozprawie

argumentowane jest zastosowaniem w liczniku konkretnego typu generatora (generator z użyciem multiplekserów charakteryzuje się mniejszym rozmyciem czasowym zboczy wzorca niż generator z tablicami LUT), ale argumentacja ta nie została poparta wynikami badań eksperymentalnych.

Mam świadomość, że te problemy wykraczają poza zakres ocenianej pracy doktorskiej. Nie oczekuję na nie odpowiedzi. Formułując je tutaj pragnę pokazać, że można je kierować do doktoranta z takim potencjałem umiejętności.

Dokonując **ogólnej oceny pracy** stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Dominika Sondej jest pracą bardzo wartościową, stojącą na odpowiednio wysokim poziomie naukowym. Autor wykazał się dobrą znajomością metodologii i techniki prowadzenia badań eksperymentalnych w obszarze pomiarów odcinka czasu, gdzie na rzeczywistym obiekcie jakim była metoda czasowo-cyfrowego przetwarzania, pokazał pełną gamę złożonych narzędzi naukowego poznania. Praca zawiera szereg wymienionych wcześniej elementów oryginalnych. Cel pracy został osiągnięty, a postawione na wstępie tezy w swym wymiarze naukowym i technicznym zostały udowodnione. Biorąc powyższe pod uwagę wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej pracy.

Reasumując uważam, że rozprawa doktorska pt. "Pomiar odcinka czasu metodą kodowania wielokrotnego w niezależnych liniach kodujących" spełnia wymogi jakie stawia rozprawom doktorskim Ustawa o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych oraz stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Dominika Sondej do publicznej obrony przedłożonej pracy.

Wrocław, 20 lipiec 2019r

