

Prof. dr hab. inż. Marek Zieliński  
Katedra Automatyki i Systemów Pomiarowych,  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika  
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń

Toruń, 12 sierpnia 2019 r.

Recenzja pracy doktorskiej  
**mgr inż. Dominika Sondej**  
pt. „**Pomiar odcinka czasu metodą kodowania wielokrotnego  
w niezależnych liniach kodujących**”

Recenzowana praca dotyczy bardzo istotnego problemu, jakim jest pomiar odcinka czasu z wysoką precyzją i rozdzielczością. Układy i systemy zapewniające precyzyjne pomiary odcinka czasu znajdują szerokie zastosowanie w badaniach naukowych prowadzonych w zakresie fizyki atomowej, fizyki jądrowej, biofizyki i astronomii. Systemy takie są również wykorzystywane w geodezji, mikroelektronice, telekomunikacji, informatyce technicznej oraz technice wojskowej. Tematyka podjęta przez doktoranta jest aktualna, o czym świadczy duża liczba artykułów z tej dziedziny opublikowanych w ostatnich latach. Znaczna liczba tych prac dotyczy konstrukcji oraz poprawy parametrów metrologicznych precyzyjnych układów i systemów pomiaru odcinka czasu, implementowanych w programowalnych układach FPGA. W tej grupie znajduje się właśnie praca mgr inż. Dominika Sondej, która dotyczy warstwy sprzętowej wysokorozdzielczego systemu pomiaru odcinka czasu.

Pierwsze układy pomiaru odcinka czasu o wysokiej precyzji (wówczas nanosekundowej), wykorzystujące linie opóźniające zostały opracowane w latach sześćdziesiątych ubiegłego stulecia. W latach późniejszych, dzięki

szybkemu rozwojowi technologii wytwarzania układów elektronicznych, a w szczególności technologii CMOS oraz układów programowalnych FPGA nastąpił dalszy szybki rozwój układów pomiaru odcinka czasu. Wytwarzane obecnie układy CMOS FPGA są układami bardzo szybkimi i względnie tanimi, umożliwiającymi implementację precyzyjnych systemów pomiaru odcinka czasu o bardzo dobrych parametrach metrologicznych.

Wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominika Sondej jest, zatem właściwy - wskazuje, że doktorant włącza się w rozwiązywanie jednego z istotnych problemów współczesnej metrologii, jakim jest precyzyjny pomiar odcinka czasu. Przyjęte przez Autora metody i zadania naukowo badawcze przedstawione w rozdziale trzecim uważam za sformułowane właściwie. Ważnym jest również fakt, że miejscem realizacji prac badawczych doktoranta był Zakład Techniki Cyfrowej przy Wydziale Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej - ośrodek dysponujący bazą laboratoryjną w pełni przygotowaną do prowadzenia badań w tym zakresie. Cel pracy - opracowanie nowej metody pomiaru odcinka czasu o rozdzielczości lepszej niż dostępne opóźnienie pojedynczego elementu logicznego w strukturze układu FPGA został osiągnięty.

Rozprawa dotyczy projektowania, konstrukcji i weryfikacji systemu pomiarowego. Autor zaprezentował w rozprawie projekt części sprzętowej systemu pomiaru odcinka czasu, o bardzo dobrych parametrach metrologicznych, implementowanego w strukturze układu programowalnego FPGA.

Oryginalność rozprawy jak i wcześniejszy dorobek naukowy Autora nie budzą moich zastrzeżeń. Mgr inż. Dominik Sondej jest współautorem 11 publikacji przedstawionych na stronie internetowej WAT, w tym 8 prac naukowych z zakresu tematyki rozprawy (cytowanych w rozprawie). Większość tych prac to prace wspólne zespołu, aczkolwiek w czterech pracach jest ich pierwszym autorem.

Rozprawa doktorska mgr inż. Dominika Sondeja licząca 95 stron tekstu ma charakter konstrukcyjno doświadczalny i została podzielona na osiem rozdziałów, spis literatury, zawierający 131 pozycji, wykaz skrótów i oznaczeń oraz streszczenie pracy. Dobór źródeł oraz sposób ich wykorzystania w niniejszej rozprawie nie budzą większych zastrzeżeń. Praca jest zredagowana poprawnie, aczkolwiek zawiera drobne błędy i usterki, które zostaną wymienione w dalszej części recenzji.

Już na wstępie szczegółowej analizy pracy wyrażam opinię, że Autor wykazał dobrą znajomość tematu oraz umiejętność rozwiązywania złożonych problemów z zakresu projektowania i konstrukcji systemów pomiaru odcinka czasu implementowanych w strukturach układów programowalnych. Przedstawiony przez niego system wykorzystujący metodę wielokrotnego kodowania w niezależnych liniach kodujących wyróżnia się zarówno wysoką rozdzielczością jak i dużą precyzją.

Zaproponowanie przez Autora oryginalnej konstrukcji dwustopniowego interpolatora z wieloma niezależnymi liniami kodującymi w drugim stopniu interpolacji oraz z wykorzystaniem metody kodowania wielokrotnego stanowi bez wątpienia silną stronę rozprawy. W szczególności do zalet recenzowanej pracy zaliczam przeprowadzenie analizy błędów układu pomiarowego oraz jego kompleksową weryfikację z uwzględnieniem wpływu temperatury na wynik pomiaru. Zaletą są też oryginalne rozwiązania bloków sprzętowych systemu pomiarowego zaproponowane przez Autora, takich jak generator sygnału wzorca oraz korektor błędów bąbelkowych.

Słabą stroną rozprawy jest nieprecyzyjne określenie zakresu pomiarowego w drugiej tezie rozprawy (Str.25). Autor umieścił operator koniunkcji, który sugeruje, że femtosekundową rozdzielczość, pikosekundową precyzję oraz szeroki zakres pomiarowy można uzyskać jednocześnie a to nie jest prawdą. Ponadto, przyjęta w streszczeniu precyzja 8 ps, która jest zgodna z Rys.7.8 ogranicza zakres pomiarowy do 10 ms, a podana w podsumowaniu (Str.84)

precyzja równa 6 ps ograniczy ten zakres do 200 ns. Głównym powodem ograniczenia zakresu pomiarowego systemu pomiaru odcinka czasu są fluktuacje fazowe sygnału zegara referencyjnego. Autor podziela tą opinię i przytacza zależność (6.31) która, jest słuszna tylko dla generatorów o nie skorelowanych fluktuacjach fazowych. Problem ten był opisany w artykule "Accumulated jitter measurement of standard clock oscillators", Metrology and Measurement Systems, XVI, 2009, No.2, (259-264), którego byłem współautorem oraz pracy doktorskiej Marcina Sebastiana Kowalskiego, pt "Wpływ fluktuacji fazowych generatora wzorcowego na dokładność pomiaru odcinka czasu", Akademia Morska w Gdyni; Wydział Elektryczny, 2009r.

Autor wprawdzie rozważa jak liczba linii kodujących oraz liczba zboczy wzorca wpływa na średnią rozdzielczość interpolatora (Str.75), ale nie dyskutuje ich wpływu na czas przetwarzania systemu (czas martwy). Brak jest również podobnych informacji związanych z pozostałymi blokami sprzętowymi jak chociażby korektorem błędów bąbelkowych i konwerterem kodu.

Praca ma kilka drobnych usterek, które wymienię poniżej:

Rys.2.8 (Str.23) - zbocze START powinno wyprzedzać zbocze STOP,

Rys.5.2 (Str.38) i Rys.5.3 (Str.40) - bufor D1 jest w torze START czy STOP? - nie zgadza się to również z zależnościami (6.25) i (6.26),

Rys.5.2 (Str.38) zawiera blok "Układ sterujący" - nigdzie niepodłączony i nieopisany w pracy,

Relacja 6.27 (Str.65) wymaga komentarza - niepewność nie może być ujemna,

W pracy znalazłem też kilka błędów technicznych i językowych:

Str.11 - jest " Osiągnięcie tak zwanej poprawy tych parametrów" - proponuję - Osiągnięcie poprawy tych parametrów,

Str.11 - jest " implementacją przetworników C/C w nowych technologiach mikroelektronicznych" - proponuję - implementacją przetworników C/C w układach wytwarzanych w nowych technologiach mikroelektronicznych,

Str.14 - jest " Metoda ta realizowana jest dwóch etapach." - proponuję - Metoda ta realizowana jest w dwóch etapach.

Str.41 - jest " Generator wytwarza zegar cztero-fazy (ZCF) odpowiednio przesuniętych względem sygnału referencyjnego o  $0, \pi/2, \pi, 3/2\pi$  radianów." - proponuję - Generator wytwarza zegar cztero-fazowy (ZCF).

Str.41 - jest "Elementy te w układzie programowalnym zostały zaimplementowane jako tablice LUT" - proponuję - Elementy te w układzie programowalnym zostały zaimplementowane w tablicach LUT,

Str.43 - jest "Linie te sterowane są przez bufor globalny BUFG" - proponuję - Linie te sterowane są przez bufor główny BUFG.

Podsumowując stwierdzam, że mocne elementy rozprawy mgr inż. Dominika Sondeja dotyczące opracowania nowego systemu pomiarowego oraz jego weryfikacji metrologicznej przeważają nad wymienionymi wyżej usterkami. Podjęta w rozprawie tematyka jest bardzo aktualna i pozwala przypuszczać, że przedstawione w niej wyniki znajdą szybko zastosowanie w praktyce oraz w dalszych badaniach naukowych nad wysokorozdzielczymi systemami pomiaru odcinka czasu. W mojej opinii tego typu systemy pomiarowe mogą znaleźć zastosowanie zarówno w badaniach naukowych, w telekomunikacji, w przemyśle a także w systemach pomiarowych mających zastosowanie w wojsku,

Uważam, że rozprawa spełnia warunki stawiane pracom doktorskim i z pełnym przekonaniem stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Dominika Sondeja do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Marek Zieliński