

Katedra Elektroniki
Wydz. Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgra inż. Pawła Kwiatkowskiego

zatytułowanej:

WIELOKANAŁOWY INTERPOLACYJNY LICZNIK CZASU O PRECYZJI PIKOSEKUNDOWEJ W PROGRAMOWALNYM UKŁADZIE SCALONYM

I. Informacje ogólne

Celem naukowym rozprawy jest opracowanie i przebadanie wielokanałowego scalonego licznika czasu, który charakteryzować się ma dużą dokładnością pomiarową, szerokim zakresem pomiarowym, oraz dużą szybkością przetwarzania pomiarów. Autor pracy przyjął, że licznik będzie zrealizowany w układzie programowalnym FPGA, a wysokie parametry metrologiczne będzie można osiągnąć dzięki innowacyjnemu połączeniu kilku technik i algorytmów pomiarowych, w szczególności metody stempli czasu, oraz metody interpolacji dwustopowej z ekwiwalentną linią kodującą w drugim stopniu.

Tak sformułowany cel badań jest bardzo ciekawy i aktualny. Istnieje bowiem duży obszar zastosowań dokładnych liczników czasu, a zaproponowana metoda stempli czasowych w układzie wielokanałowym pozwala rozszerzyć obszar zastosowań licznika poza klasyczny pomiar interwału czasu, umożliwiając jego wykorzystanie do wielokanałowej rejestracji sekwencji i relacji czasowych wielu zdarzeń. Jako przykładowe obszary zastosowań takiego licznika można wymienić instalacje obsługujące różnorakie eksperymenty fizyczne, a także laboratoria generujące atomowe skale czasu o najwyższej dokładności.

W tezach pracy stwierdzono, iż:

„Możliwe jest opracowanie scalonego, wielokanałowego licznika czasu, zapewniającego szybką realizację pomiaru (rzędu dziesiątek milionów pomiarów na sekundę), z precyzją pikosekundową, w bardzo szerokim zakresie czasu (rzędu godziny)”,
oraz:

„Istnieje możliwość wykonania licznika z użyciem taniej i łatwo dostępnej technologii mikroelektronicznej”.

W pracy przedstawiono i uzasadniono wypracowaną metodę pomiarową, opisano proces implementacji licznika w nowoczesnym układzie Kintex-7 firmy Xilinx, przedstawiono teoretyczną analizę czynników określających parametry metrologiczne licznika, oraz badania wykonanego prototypu.

Praca zakwalifikowana została do dyscypliny elektronika, co w pełni odpowiada jej zawartości merytorycznej.

Zarówno tematyka pracy, jak też pewne metody, narzędzia, zastosowane rozwiązania, są twórczą kontynuacją tematyki badawczej od lat konsekwentnie rozwijanej w Zakładzie Techniki Cyfrowej Wydziału Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej pod kierownictwem prof. Ryszarda Szpleta, a wcześniej prof. Józefa Kalisza. Przedłożona praca pokazuje, że ta konsekwencja zespołu badawczego jest środowiskiem sprzyjającym rozwojowi naukowemu doktorantów.

II. Struktura rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa liczy 106 stron i składa się z siedmiu zasadniczych rozdziałów oraz wprowadzenia i spisu cytowanej literatury.

W rozdziale pierwszym przedstawiono wyczerpującą analizę aktualnego stanu wiedzy w zakresie metod pomiaru odcinków czas, powołując szeroki zakres źródeł literaturowych. Prezentacja obejmuje między innymi klasyczne metody oparte o przetwarzanie czas-napięcie, czy analogową lub cyfrową ekspansję czasu, a także szereg rozwiązań (i ich wariantów) stosowanych we współczesnych cyfrowych licznikach czasu, jak dyskretne linie kodujące, czy różnicowe linie kodujące. W szczególności przedstawiono też metodę wielokrotnej, ekwiwalentnej linii kodującej, opracowaną w Zakładzie Techniki Cyfrowej i z powodzeniem stosowaną we wcześniejszych konstrukcjach liczników opracowanych w Zakładzie. W końcowej części rozdziału autor nakreśla metody interpolacyjne, pozwalające połączyć dużą dokładność i szeroki zakres pomiarowy, oraz omawia zagadnienie pomiarów wielokanałowych. Rozdział ten stanowi klarowne i bardzo pomocne wprowadzenie do tematyki pracy.

W tak określonym kontekście autor precyzuje cel i tezy rozprawy (rozdział drugi). Autor uzasadnia tu swój kierunek badań stwierdzeniem, iż brakuje gotowych opracowań liczników charakteryzujących się jednocześnie dużą precyzją, dużym zakresem pomiarowym, dużą szybkością pomiarów i rejestracją wielokanałową. Pojawia się tu też stwierdzenie, że autor zamierza osiągnąć ww. cechy poprzez odpowiednie połączenie wielu metod/technik pomiarowych.

W rozdziale trzecim znajduje się zwięzła charakterystyka przyjętej metody stempli czasu i interpolacji dwustopniowej z ekwiwalentnymi liniami kodującymi, co bardzo ułatwia lekturę rozdziału kolejnego, przedstawiającego szczegółowe zagadnienia implementacji licznika w układzie FPGA.

Rozdział czwarty jest relatywnie obszerny, liczy 35 stron, i daje czytelnikowi dobry ogłód rozległości i stopnia skomplikowania zagadnień związanych z praktyczną realizacją licznika w układzie programowalnym. Szczegółowo omówiono pierwszy stopień interpolacji, oparty na zegarze wielofazowym. Przedstawiono rozległe badania wpływu temperatury, napięcia zasilania a także niepowtarzalności technologicznej układów FPGA na pracę interpolatora w wielu wariantach liczby faz zegara. Obszernie opisano też drugi stopień interpolacji, oparty o dyskretne linie kodujące. Również w tym przypadku przeanalizowano szereg czynników wpływających na pracę interpolatora, w szczególności możliwość poprawy jego parametrów poprzez sortowanie kolejności odczytu przerzutników. W dalszej części opisano licznik okresów, procesor kodu oraz układ sterujący. Rozdział ten przedstawia w bardzo zrozumiały sposób całokształt zagadnień związanych z praktyczną implementacją przyjętych metod pomiarowych w układzie FPGA.

W rozdziale piątym autor przedstawia teoretyczną analizę błędów pomiarowych. Doktorant wyróżnia błędy systematyczne i losowe, jednakże lektura tego rozdziału zdaje się sugerować, że ostatecznie żadne błędy systematyczne w opracowanym urządzeniu nie występują. Problem ten zostanie rozwinięty w dalszej części recenzji.

Rozdział szósty opisuje badania eksperymentalne zbudowanego prototypu licznika. Badania te są rozległe i obejmują wiele istotnych aspektów. Zdaniem recenzenta występują tu pewne wątpliwości interpretacyjne wymagające dyskusji, opisane w dalszej części recenzji.

W podsumowaniu autor rzetelnie wskazuje swój autorski wkład w projekt budowy licznika, którego opracowanie, jak należy się domyślać, było zespołowym przedsięwzięciem podjętym w Zakładzie Techniki Cyfrowej w ramach programu badań stosowanych, finansowanego przez NCBiR.

Na końcu rozprawy zamieszczono bardzo obszerny i wyczerpujący spis cytowanej literatury. W bibliografii znajduje się 16 pozycji współautorstwa doktoranta.

Oceniając strukturę przedłożonej rozprawy, należy stwierdzić, że jest ona poprawna

i klarowna. Od strony językowej i edytorskiej praca przygotowana jest starannie. Należy szczególnie podkreślić, że pracę czyta się bardzo dobrze. Autor rzadko przyprawia czytelnika o frustrację wynikającą z niezrozumienia tekstu, a pojawiające się wątpliwości przeważnie znajdują wyjaśnienie w bezpośrednio następujących akapitach tekstu, nie zmuszając czytelnika do wielokrotnego analizowania tych samych fragmentów pracy. Autor skutecznie unika też pojęć żargonowych lub używanych w wąskich kręgach użytkowników.

III. Ocena wartości merytorycznej rozprawy

Zdefiniowany przez autora cel pracy - opracowanie i implementacja w strukturze FPGA wielokanałowego licznika czasu o wysokich parametrach metrologicznych - to zamierzenie ambitne i rozległe tematycznie. Jego realizacja wymagała zarówno dużej wiedzy teoretycznej, jak też szczególnej sprawności konstruktorskiej, bardzo cennej w naukach technicznych.

W szczególności do wymiernych osiągnięć doktoranta należy zaliczyć:

- twórczą integrację różnorodnych metod pomiarowych pozwalającą na budowę wielokanałowego licznika o wysokich parametrach metrologicznych w stosunkowo taniej technologii układów programowalnych;
- szczegółowe opracowanie modułów interpolacji, w szczególności całkowicie nowe rozwiązanie pierwszego stopnia interpolacji;
- szczegółowe opracowanie modułów realizujących metodę stempli czasu
- praktyczną implementację opracowanych modułów pomiarowych w układzie FPGA Kintex-7;
- opracowanie funkcjonalności czterech zaawansowanych trybów pracy licznika;
- opracowanie i przeprowadzenie rozległych badań zbudowanego urządzenia.

Rezultatem podjętej przez doktoranta pracy jest powstanie konkretnego urządzenia - wielokanałowego licznika czasu o bardzo wysokich parametrach i wysokiej użyteczności praktycznej. Mimo pewnych zastrzeżeń i wątpliwości przedstawionych poniżej **uważam, że cel pracy został w pełni osiągnięty a postawione tezy udowodnione.**

O wysokiej wartości podjętych badań, poza oceną przedłożonej rozprawy, świadczy też pośrednio fakt, iż opracowany licznik znalazł zastosowanie praktyczne między innymi w infrastrukturze powstałej w ramach innego projektu NCBiR (projekt OPTIME), oraz to, że doktorant jest współautorem wielu publikacji bezpośrednio związanych z tematem rozprawy, w tym publikacji na wiodących w tej tematyce konferencjach i w prestiżowych periodykach.

IV. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

A. Uwagi o charakterze ogólnym.

1. Zasadniczą wątpliwość, rozwiniętą poniżej w uwagach 2 - 5, można najkrócej sformułować w postaci pytania do autora: Jaka jest niepewność pomiarów odcinka czasu wykonywanych opracowanym przyrządem? (Przypomnijmy, że poprawny metrologicznie wynik pomiaru zawiera estymatę wartości mierzonej oraz nieodzownie oszacowanie niepewności tejże estymaty.)

2. Autor w sposób wieloznaczny używa słów „precyzja” i „precyzyjny”. W powszechnie uznanym w metrologii znaczeniu „precyzja” to rozrzut wyników serii pomiarów przeprowadzonych w ustalonych, niezmiennych warunkach, wyrażony zwykle poprzez odchylenie standardowe (por. np. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms - JCGM 2012). Autor oczywiście zna i stosuje to znaczenie (np. na str. 81), jednakże w wielu miejscach „precyzja” zdaje się być użyta w znaczeniu „dokładność”, czy wręcz „niepewność pomiarowa”, co jest całkowicie nieuzasadnione

i wyraźnie wskazywane jako błąd terminologiczny (choćby w przywołanym powyżej słowniku). Często „precyzja”, lub „pikosekundowa precyzja” zdaje się być nie tyle ilościową charakterystyką określoną w wyniku konkretnych badań, co synonimem określenia „wysoka jakość”. Sporadycznie też „precyzja” zdaje się zastępować „rozdzielczość” (np. na str. 56). Miarą niepokojącej uniwersalności użycia pojęć „precyzja” i „precyzyjny” jest fakt, że występują one w pracy ponad 150 razy, podczas gdy „niepewność”, będąca pojęciem o fundamentalnym znaczeniu metrologicznym, występuje jedynie 10 razy (przeważnie zresztą jako synonim precyzji).

3. Niejasności terminologiczne, opisane powyżej, mają implikacje wykraczające poza formalizm nazewnictwa. Otóż wydaje się, że autor nie tylko językowo, ale również logicznie utożsamia rozrzut serii pomiarów przeprowadzonych w ustalonych warunkach (czyli precyzję), z niepewnością pomiarową opracowanego i badanego licznika czasu. Sugeruje to choćby zestawienie deklaracji autora ze str. 27, gdzie zapowiadana jest ocena parametrów metrologicznych licznika, w tym „standardowej niepewności pomiarowej”, z faktyczną zawartością rozdziału szóstego, gdzie słowo „niepewność” w ogóle nie występuje, natomiast przeprowadzone są w różnorodnych warunkach pomiary precyzji (w sensie rozrzutu serii pomiarów).

4. W całym rozdziale szóstym, poświęconym „weryfikacji parametrów metrologicznych”, nie znajduje się ani jedno porównanie wskazań badanego licznika z rzeczywistą (lepiej lub gorzej określoną) wartością mierzonego odcinka czasu. Jest to kolejny niepokojący przejaw podejścia do parametrów metrologicznych.

5. W rozdziale piątym, poświęconym analizie błędów, autor na wstępie rozróżnia błędy systematyczne i przypadkowe. Jednakże analizując poszczególne efekty systematyczne autor za każdym razem stwierdza, że są one nieistotne: „błąd systematyczny wprowadzany przez wymienione czynniki jest niemal całkowicie eliminowany” (str. 66), „wprowadzono możliwość jego kompensacji w procesorze kodu” (str. 67) itp. Ostatecznie wnioskiem z przeprowadzonej analizy błędów zdaje się być stwierdzenie, że opracowany licznik nie wykazuje żadnych (!) błędów systematycznych. Jeżeli tak rewelacyjny wniosek uzyskano w wyniku analizy teoretycznej, wydaje się obowiązkiem rzetelności naukowej przeprowadzić jego weryfikację eksperymentalną, choćby w skromnym zakresie wynikającym z ograniczeń posiadanego instrumentarium. Skądinąd rysunek 6.13 i stowarzyszony z nim opis sugerują, że jednak licznik charakteryzuje się błędem systematycznym (offsetem) rzędu 2 ns, (który mógłby, ale nie został skompensowany?), i co więcej błąd ten wyraźnie zależy od temperatury, czyli skuteczność potencjalnej kompensacji jest ograniczona.

6. W rozdziale piątym i szóstym zakłada się, że zegar licznika jest niesynchroniczny z generacją mierzonych interwałów czasu, co powoduje, że błędy kwantyzacji i nieliniowości interpolatorów mają charakter losowy i nie generują błędów systematycznych. Jednakże w praktyce laboratoryjnej dąży się często do doprowadzenia do wszystkich urządzeń (w tym licznika czasu) możliwie najlepszego posiadanego wzorca częstotliwości, np. sygnału z zegara atomowego. W takim przypadku błędy kwantyzacji i nieliniowości nabierają charakteru systematycznego, co niewątpliwie wpływa na parametry licznika. Szkoda, że autor nie odniósł się do tej istotnej praktycznej sytuacji.

7. Większość przyrządów pomiarowych ma różnego rodzaju specyficzne „słabe punkty”. Doktorant, będąc konstruktorem badanego licznika a zarazem naukowcem, jest osobą szczególnie predysponowaną do przewidzenia i zbadania takich potencjalnych problemów. Byłoby to ciekawą kontynuacją pomiarów przedstawionych w rozdziale szóstym. Przykładowo, zdaniem recenzenta, wysoce prawdopodobne jest występowanie przesłuchów między sygnałami doprowadzanymi do różnych kanałów licznika, zarówno w obrębie płytki drukowanej jak i samego układu scalonego. Jest bardzo prawdopodobne, że mogą one wpływać na wynik pomiarów w przypadku koincydencji lub innych niekorzystnych relacji

czasowych między tymi sygnałami.

Należy wyraźnie podkreślić, iż powyższe uwagi krytyczne, acz istotne, nie kwestionują wysokiej wartości metrologicznej opracowanego przez doktoranta licznika czasu, lecz odnoszą się do sposobu jej charakterystyki.

B. Uwagi szczegółowe mniejszej wagi.

8. Sposób obliczania maksymalnej częstotliwości pracy synchronizatora (str. 37 i 38) nie jest czytelny. Intencją autora było być może obliczenie, przy jakiej częstotliwości zegarowej efekt metastabilności przerzutnika synchronizatora nie doprowadzi ani raz do błędnego pomiaru przez cały czas eksploatacji licznika. Zdaniem recenzenta, ponieważ mamy tu do czynienia ze zjawiskiem o naturze losowej, czytelniejsze byłoby przyjęcie maksymalnego dopuszczalnego prawdopodobieństwa wystąpienia metastabilności (np. 10^{-9} , lub 10^{-12}) i wyznaczenie maksymalnej częstotliwości zegarowej na tej podstawie.

9. Rys. 4.5, który miał przedstawiać sposób implementacji interpolatora nie jest zrozumiały.

10. Na str. 40 autor pisze, że dobrano napięcie zasilania układu o wartości 1,25 V ze względu na uzyskanie dużej rozdzielczości DLK, podczas gdy rys. 4.6 pokazuje, że przy takim napięciu następuje bardzo znaczne wydłużenie ósmej fazy zegara.

11. Na str. 55 i 56 zawarto informację, że w procesorze kodu zaimplementowano funkcję kompensacji offsetów pomiędzy kanałami. Na stronie 58 występuje mniej stanowcze stwierdzenie, że „istnieje możliwość wprowadzenia wartości korygujących”. Z kolei na stronie 89 napisano, że pomiędzy kanałami występują duże offsety, które ewentualnie można by odjąć od wyniku pomiaru. Ostatecznie nie wiadomo, czy funkcjonalność kompensacji offsetu została zaimplementowana, i czy realizowana jest automatycznie podczas kalibracji licznika. Jest to tym bardziej istotne, że offset wyraźnie zależy od temperatury.

12. Na str. 65 napisano, że czas ustalania przerzutnika t_{SU} wpływa na czas propagacji sygnału w kanale pomiarowym. Wydaje się to wątpliwe, być może jest tu niejasność terminologiczna.

13. We wzorze 5.5 występuje prawdopodobnie niepotrzebnie czynnik 2 w mianowniku.

14. Niezrozumiały jest fragment na str. 70, w którym autor pisze, że kształt charakterystyki przetwarzania modeluje się funkcją sinusoidalną lub wykładniczą. Dalej pojawia się dziwny wniosek, że wskazane jest zmniejszenie liczby przedziałów kwantyzacji.

15. Indeksowanie zmiennych we wzorze 5.12 jest prawdopodobnie niepoprawne.

16. Zależność 5.20 zakłada określony model widmowy szumu fazowego zegara, czego autor nie napisał.

17. Na str. 73 autor stwierdza, iż „wartość rozmycia czasowego jest wprost proporcjonalna do liczby elementów opóźniających”. Zależność taka byłaby prawdziwa jedynie w nierealnej sytuacji, gdyby składowe od wszystkich elementów były ściśle skorelowane.

5. Podsumowanie

Podsumowując, należy stwierdzić, że praca, mimo pewnych uchybień i niedociągnięć, jest bardzo ciekawa i wartościowa naukowo, oraz że autor wykazał dobre przygotowanie teoretyczne i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz konstruktorskiej. **Uważam, że przedłożona rozprawa w pełni spełnia wymagania określone przez Ustawę o stopniach i tytule naukowym oraz wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

dr hab. inż. Przemysław Krehlik, prof AGH