

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Jacka Goczkowskiego

zatytułowanej:

**Detekcja oraz zliczanie koincydencji fotonów przy zastosowaniu specjalizowanego układu scalonego do diagnostyki własności kwantowych systemu optycznego oraz kryptografii kwantowej na orbicie okołoziemskiej**

### I. Informacje ogólne

Rzeczywistym przedmiotem rozprawy jest opracowanie przetwornika czas-cyfra w układzie programowalnym FPGA kwalifikowanym do zastosowań kosmicznych. Należy niestety stwierdzić, że realny zakres pracy doktoranta (niezależnie od jego dużej wartości merytorycznej) nie są zgodny z tytułem rozprawy. Można zasadnie przyjąć, że opracowany przetwornik mógłby stanowić kluczową część systemu „detekcji oraz zliczania koincydencji fotonów”, ale nie zostało to wykazane w formie zbudowania i charakteryzacji takiego systemu. Zważywszy na fakt, że przedłożona rozprawa jest pracą niewątpliwie wartościową, oraz na okoliczność, że odpowiedzialność za adekwatne i realistyczne sformułowanie tytułu rozprawy spoczywa raczej na opiekunach pracy niż na samym doktorancie, w niniejszej recenzji odniosę się do oceny osiągnięć doktoranta w odniesieniu do celów i tez sformułowanych w rozdziale wstępnym.

Zagadnienie wykorzystania układów FPGA do budowy przetworników czas-cyfra (nazywanych też licznikami czasu lub częstotliwości) jest zagadnieniem aktualnym i złożonym, mającym też potencjał komercyjny. Powstające współcześnie rozwiązania opracowywane są przez pokaźne zespoły naukowo-wdrożeniowe o wieloletniej tradycji, dlatego opracowanie całkowicie własnego rozwiązania uważam za przedsięwzięcie ambitne i wartościowe naukowo. Jest też ono w pełni zgodne z obszarem deklarowanej dyscypliny naukowej.

Doktorant sformułował ogólny cel pracy jako:  
*opracowanie metody sprzętowej, która za pomocą układu bezpośrednio programowalnej macierzy bramek (ang. Field Programmable Gate Array – FPGA) i/lub specjalizowanego układu scalonego (ang. Application-Specific Integrated Circuit - ASIC) może służyć do wykrywania i zliczania koincydencji fotonów na potrzeby przemysłu kosmicznego.*

Zostały też wskazane następujące cele szczegółowe:

- *zaadaptowanie lub opracowanie metody oraz opracowanie projektu systemu bazującego na tej metodzie służącego między innymi do wykrywania, pomiaru czasu wystąpienia i zliczania impulsów elektrycznych, które generowane są na podstawie detekcji pojedynczych fotonów, w celu określenia ich koincydencji, w oparciu o układ FPGA i/lub ASIC oraz sprzężone z nim analogowe i cyfrowe zewnętrzne elementy elektroniczne,*
- *implementacja sprzętowa systemu służącego między innymi do wykrywania, pomiaru*



*czasu wystąpienia i zliczania impulsów elektrycznych, które generowane są na podstawie detekcji pojedynczych fotonów, w celu określenia ich koincydencji, w układzie FPGA i/lub ASIC,*

- *testy i badania stworzonego rozwiązania,*
- *wdrożenie stworzonego urządzenia w projekcie firmy AROBS Polska.*

Teza pracy została określone następująco:

*Jest możliwa realizacja przetwornika czas-cyfra o rozdzielczości i precyzji rzędu pojedynczych pikosekund, wymaganych do detekcji koincydencji fotonów, oraz częstotliwości próbkowania powyżej kilkunastu mega próbek na sekundę (ang. mega samples per second - MSps) z wykorzystaniem układu scalonego typu FPGA dopuszczonego do pracy w przestrzeni kosmicznej.*

Doktorant wskazał również tezy określone jako podrzędne:

- *Można zmniejszyć nieliniowość charakterystyki przetwornika czas-cyfra zaprojektowanego w technice linii opóźniającej.*
- *Mierzony sygnał może służyć w bezpośredni sposób jako sygnał dystrybucji pomiarów do większej liczby równoległych przetworników w celu zwiększenia maksymalnej częstotliwości próbkowania całego urządzenia pomiarowego.*

Bibliografia zamieszczona w rozprawie zawiera trzy publikacje, których współautorem jest doktorant; dwie z nich mają charakter publikacji konferencyjnych, jedna opublikowana została w czasopiśmie z listy JCR.

## **II. Struktura rozprawy**

Przedłożona do oceny rozprawa liczy 268 stron i składa się z sześciu rozdziałów. Pierwszy z nich stanowi wstęp. W drugim autor zawarł wprowadzenie do tematyki przetworniki czas-cyfra, starając się przedstawić kontekst zastosowań kosmicznych. Rozdział trzeci jest rzetelnym i wyczerpującym przeglądem metod pomiaru czasu z wykorzystaniem układów FPGA, bazującym na praktycznie pełnym spektrum istotnych publikacji w tym zakresie. Rozdział czwarty jest centralną częścią pracy zawierającą autorskie rozwiązania doktoranta. Zostały one podzielone na dwa odrębne rozwiązania przypisane do dwu odrębnych projektów komercyjnych, jednakże z punktu widzenia rozprawy doktorskiej stanowią one raczej proces rozwijania i ulepszania zasadniczo tej samej koncepcji przetwornika. Rozdział piąty przedstawia aspekty wdrożeniowe, a szósty jest podsumowaniem pracy. Do pracy dołączono też bardzo obszerną i wyczerpującą bibliografię, oraz liczne spisy i wykazy.

## **III. Ocena wartości merytorycznej rozprawy**

Głównym osiągnięciem doktoranta jest samodzielne zaprojektowanie w pełni funkcjonalnego przetwornika czas-cyfra o rozdzielczości i precyzji rzędu kilku pikosekund w układzie programowalnym FPGA. Należy podkreślić, że układy te nie są przewidziane i zasadniczo nie nadają się do realizacji tej funkcji, o ile nie opracuje i zaimplementuje się szeregu nietrywialnych rozwiązań pozwalających zrealizować tę nietypową funkcjonalność. Dlatego implementacja w układzie FPCA przetwornika czas-cyfra nie jest porównywalna z typowymi aplikacjami modułów cyfrowych i stanowi zagadnienie o charakterze naukowym. Zasadniczo właściwszą drogą jest opracowanie układu dedykowanego (ASIC), jednakże z wielu powodów ścieżka wykorzystania układów FPGA jest cały czas uznawana za atrakcyjną i rozwojową. Świadczą o tym np. liczne publikacje naukowe grupy prof. Ryszarda Szpęta z WAT, czy produkty komercyjne, jak liczniki czasu firmy GuideTech i wielu innych.

Odnosząc się do deklarowanych z emfazą zastosowań kosmicznych (w szczególności

detekcji koincydencji fotonów, kryptografii kwantowej na orbicie itp.) uważam, że deklaracje te nie znajdują istotnego przełożenia na opisany proces projektowania i walidacji przetwornika, z wyjątkiem wyboru konkretnych typów układów FPGA kwalifikowanych do zastosowań kosmicznych. Z punktu widzenia realizacji pracy ogranicza to istotnie spektrum dostępnych platform układowych, i w tym jedynie aspekcie rzutuje na „kosmiczną” specyfikę projektu. Nie wydaje się zatem uzasadnione niezwykle częste życie w pracy przymiotnika „kosmiczne”.

Niestety, nie jest też jasne, na czym polega specyfika opracowania przetwornika czas-cyfra do detekcji koincydencji fotonów, i czym on się różni od przetwornika do jakiegokolwiek innego zastosowania. W pracy nie wyspecyfikowano klarownych i uzasadnionych wymagań parametrycznych tej konkretnej aplikacji, ani nie pokazano, choćby w formie rysunku blokowego, jak dwa detektory pojedynczych fotonów należy podłączyć do opracowanego przetwornika, i jak (gdzie) powstaje wynik, mówiący o koincydencji (lub jej braku).

Obie powyższe uwagi, oraz zasadnicza nieadekwatność tytułu pracy nie umniejszają osiągnięć doktoranta, jednakże muszą być potraktowane jako poważne uchybienie w zakresie elementarnych reguł konstrukcji jakiegokolwiek rozprawy naukowej, której tytuł i deklarowana specyfika ujęcia zagadnienia muszą być zgodne z treścią.

Odnosząc się bezpośrednio do tezy (i tez podrzędnych) należy stwierdzić, że opisany w pracy proces projektowy i wyniki charakteryzacji opracowanych przetworników w pełni potwierdzają jej (ich) przesłanie.

Do wymiernych i znaczących osiągnięć doktoranta zaliczam:

- - twórcze zastosowanie, rozwój i kombinację znanych z literatury metod poprawy rozdzielczości, precyzji i liniowości przetwornika czas-cyfra implementowanego w układzie FPGA,
- - osiągnięcie w układzie o relatywnie ograniczonej elastyczności konfiguracji dobrych parametrów przetwarzania oraz dużej szybkości pomiarów,
- - zaproponowanie oryginalnej metody dystrybucji sygnału do wielu kanałów przetwornika,
- - opracowanie narzędzi do wymuszania deterministycznej i korzystnej przestrzennej topologii połączeń wewnątrz układu FPGA,
- - opracowanie szeregu autorskich narzędzi programowych wspomagających opracowanie przetwornika, sterowanie pomiarami i akwizycję/obróbkę wyników pomiarów.

Jak domyślam się z tekstu rozprawy, oraz z zamieszczonej bibliografii, w środowisku pracy doktoranta, tj. Politechnice Gdańskiej i firmie AROBS, nie było wcześniejszej tradycji prac B-R w zakresie przetworników czas-cyfra, oraz występowały ograniczenia w dostępie do niezbędnej infrastruktury i sprzętu pomiarowego. Dlatego na szczególne podkreślenie zasługuje samodzielność, zaradność i determinacja doktoranta, które pozwoliły mu z powodzeniem zrealizować cel projektu.

Zważywszy na fakt, że doktorat powstawał w trybie wdrożeniowym, należy pozytywnie podkreślić, iż opracowane przez doktoranta wersje przetwornika czas-cyfra były istotnym elementem realnych projektów i wdrożeń realizowanych w jego macierzystej firmie.

Mimo zastrzeżeń i wątpliwości wspomnianych wcześniej i wymienionych szczegółowo poniżej, uważam, że przedstawione w rozprawie osiągnięcia stanowią spójną i wartościową całość, oraz że zasadniczy **cel pracy został osiągnięty**.

## IV. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

### A. Uwagi o charakterze ogólnym

1. Cała praca skupia się na projektowaniu i charakteryzacji układu pomiaru „końcówek” mierzonego odcinka czasu, tj. niecałkowitych części okresu zliczanego zegara systemowego. Jest to faktycznie zagadnienie kluczowe, jednakże czytelnik nie posiadający zewnętrznej wiedzy o układach pomiaru czasu nie jest sobie w stanie wyobrazić, jak zbudowany jest kompletny układ przetwornika (licznika czasu), i jak powstaje ostateczny wynik pomiaru. Ponadto nie jest opisane, czym różnią się (pod względem sprzętowym i w aspekcie przetwarzania surowych wyników) procedury stemplowania czasem, pomiaru odcinka (interwału) czasu, pomiaru koincydencji zdarzeń, itp.

2. Doktorant zdaje się mieszać ściśle i potoczne rozumienie pojęcia „precyzja”. Z jednej strony podaje poprawną metrologiczną definicję, z drugiej utożsamia „precyzję” z bliżej nieokreśloną jakością (?), czy też dokładnością (?) pomiaru. Przykładowo nie wiem, jak rozumieć fragment ze strony 76: *Duży wpływ na precyzję pomiarów ma także charakterystyka przetwornika. Błąd interpolacji parametrów (...) w skuteczny sposób może utrudnić jego precyzyjne działanie. Co tu oznacza dwukrotnie użyte pojęcie precyzji?*

Doktorant nie posługuje się natomiast w ogóle fundamentalnym w metrologii pojęciem niepewności pomiarowej. Narzuca się zatem pytanie: jeżeli autor twierdzi np., że zbudował przetwornik o precyzji 4 ps, to czy jest w stanie w sposób uzasadniony odpowiedzieć na pytanie, jaka jest niepewność pomiaru odcinka czasu tym przyrządem? Czy zdaniem doktoranta wynosi ona 4 ps?

3. W rozdziale 3.6 opisano statystyczną metodę charakteryzacji i kalibracji przetwornika, która była potem w praktyce wykorzystywana. Trudno się jednak doszukać konkretniejszych informacji, czy kalibracja była wykonywana automatycznie czy ręcznie, czy bazowała na generatorze wewnętrznym czy zewnętrznym, czy była wykonywana raz przy inicjalizacji urządzenia, czy powtarzana okresowo, czy wymagała przerywania normalnych pomiarów, czy wykonywała się „w tle”, czy wymagała sygnału okresowego o niskim szumie fazowym, czy przeciwnie - sygnału losowego, itd. Jest to kolejny przejaw obserwacji, że osoba która jest specjalistą w zakresie przetworników czas-cyfra, lub osoba, która spędziła wiele godzin na dyskusji z doktorantem, jest w stanie wielu rzeczy się domyślić, natomiast osoba bardziej „postronna” jest postawiona w trudnej sytuacji.

4. Doktorant deklaruje, że opracowywał przetwornik czas-cyfra do specyficznego zastosowania - detekcji koincydencji fotonów. Nasuwa się zatem pytanie, czy rozwiązania zaproponowane przez autora są na tyle uniwersalne, by mogły być potencjalnie zastosowane w licznikach czasu ogólnego przeznaczenia, np. takich, jak produkowane przez firmy GuideTech, Pendulum, Keysight czy Stanford Research Systems. Innymi słowy: czy mają one jakieś specyficzne ograniczenia, uniemożliwiające ich wszechstronne stosowanie?

5. W całej rozprawie nadużywane jest słowo „niestabilność”, również w dziwnych zbitkach, jak „potencjalna niestabilność”, „addytywna niestabilność”, „dodatkowy poziom niestabilności”, „destabilizacja pracy układu”. Autor ewidentnie używa tego słowa jako słowa-klucza w sytuacjach, kiedy nie umie się precyzyjnie wypowiedzieć, lub nie zna konkretnych przyczyn zjawisk, które opisuje lub obserwuje.

6. Odnosząc się do formy pisarskiej rozprawy, zawiera ona szereg rozległych fragmentów o charakterze opisowym i ogólnikowym, nie prowadzących do konkretnych wniosków, a zatem nieuzasadnionych w pracy naukowej.

## B. Uwagi szczegółowe

1. Na stronie 161 doktorant stwierdza: *Poprzez zastosowanie układu RTG4 spełniono też wymaganie potencjalnej migracji* (podkreślenie moje) *rozwiązania do zastosowań kosmicznych*. Również cała dalsza część tego akapitu napisana jest w formie warunkowej i ewidentnie niedokonanej. Czy zatem doktorant może rzetelnie stwierdzić, że opracował przetwornik do zastosowań kosmicznych, czy tylko zaimplementował go w układzie FPGA odpornym na promieniowanie?
2. Rozdział 3.5.2 zawiera dwie strony wzorów i dywagacji, z których wnioskiem jest to, że maksymalny błąd kwantyzacji równa się krokowi kwantyzacji. W ostatnim zdaniu doktorant powiększa go jeszcze bez jasnego uzasadnienia dwukrotnie. Moim zdaniem w poprawnie pomyślanym systemie błąd kwantyzacji zawiera się w granicach +/- 0,5 kroku kwantyzacji, i jest to raczej oczywistość, niż wynik zawiłych analiz.
3. Na str. 69 doktorant stwierdza, że jitter sygnału wejściowego powoduje *błędy dynamiczne*. Moim zdaniem jitter jest pojęciem adekwatnym dla sygnałów okresowych lub quasi-okresowych (jak synchroniczna transmisja danych), nie zaś do sygnałów (zdarzeń) jednorazowych, jak impuls na wyjściu detektora pojedynczych fotonów. Jak zatem autor rozumie jitter w odniesieniu do pojedynczego impulsu, docierającego (skądkolwiek) do wejścia przetwornika?
4. W odniesieniu do wariancji Allana (str. 70) doktorant stwierdza, że *czas uśredniania jest określany indywidualnie dla typu oraz rodzaju zastosowanego oscylatora*. Jaki zatem powinien być zdaniem doktoranta czas uśredniania dla np. oscylatora kwarcowego dobrej jakości?
5. Na str. 74 znajduje się stwierdzenie: *dla 50 ps czasu narastania częstotliwość sygnału wejściowego należy określać jako 20 GHz*. Zdanie takie nie oddaje należycie precyzyjnie widmowych własności sygnału, które zapewne autor miał na myśli.
6. Nie zgadzam się z twierdzeniem doktoranta (str. 105), że różnicowy standard logiczny CML wymusza stosowanie sprzężenia AC. Owszem, w pewnych warunkach sprzężenie AC jest możliwe i wygodne. Nie wystarczy jednak, by sygnały miały „dużą zmienność w czasie”. Przykładowo krótkie impulsy (sygnał o małym współczynniku wypełnienia) nie będzie prawidłowo przetwarzany przez sprzężenie AC. Podobnie do porwanego działania układu CDR (Clock Data Recovery) nie wystarczy „zmienność sygnału”, gdyż sama zmienność nie jest wystarczająca do synchronizacji pętli fazowej układu odzyskiwania zegara.
7. Na str. 131 znajduje się akapit komentujący dużą nieliniowość całkową. Po pierwsze, akapit ten jest dla mnie niezrozumiały, po drugie rodzi się pytanie: jeżeli nieliniowość całkową jest znana, to dlaczego jej nie skorygowano, np. poprzez zastosowanie tablicy korekcyjnej LUT?
8. Niezrozumiałe jest stwierdzenie ze str. 160, iż: *dodatkowe elementy asynchroniczne wprowadzają dodatkowy poziom niestabilności*.
9. Doktorant posługuje się pojęciem RTC (Real Time Clock) w sposób w moim rozumieniu nieadekwatny. Zegar czasu rzeczywistego odmierza czas dowiązany (lepiej lub gorzej) do jakiejś uniwersalnej skali czasu, zatem licznik okresów przebiegu zegarowego uruchomiony w jakimś arbitralnym momencie nim raczej nie jest.
10. Na stronie 175 doktorant pisze, że niepoprawne działanie układu może wynikać z *korelacji sygnału wejściowego z sygnałem próbkującym* (czyli zapewne zegarem przetwornika). Czy to oznacza, że opracowany przetwornik nie działa poprawnie jeżeli sygnał wejściowy wykazuje jakąś (jaką?) korelację z sygnałem zegarowym?
11. Nie jest jasne, co autor rozumie przez *straty propagacji* (str. 178).

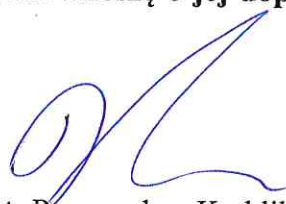
12. Na str. 233 pojawia się pojęcie *jitter pomiaru*. Moim zdaniem jitter charakteryzuje sygnał, a nie proces pomiaru.

13. Ogólnie pomysł wykorzystania modułu SERDES takiego, jaki doktorant miał do dyspozycji, uważam za z góry, w sposób oczywisty, nie mogący zakończyć się sukcesem. Rozumiem, że doktorant nie był tego początkowo świadomy, ale nie rozumiem, po co opisał w pracy koncepcję ewidentnie chybioną.

14. Doktorant zamieścił w pracy zrzuty ekranu obrazujące np. proces symulacji projektowanych układów, jak rys. 4.11 i wiele innych. Po pierwsze ich zawartość jest praktycznie nieczytelna, po drugie i tak są one niezrozumiałe dla czytelnika bez obszernych wyjaśnień.

## V. Podsumowanie

Podsumowując, należy stwierdzić, że praca, mimo wskazanych uchybień, jest ciekawa, wartościowa naukowo i atrakcyjna aplikacyjnie, oraz że autor wykazał dobre przygotowanie teoretyczne i umiejętność prowadzenia samodzielnej, kreatywnej pracy naukowej oraz projektowej. **Uważam, że przedłożona rozprawa spełnia wymagania określone przez Ustawę o stopniach i tytule naukowym, oraz wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**



dr hab. inż. Przemysław Krehlik

