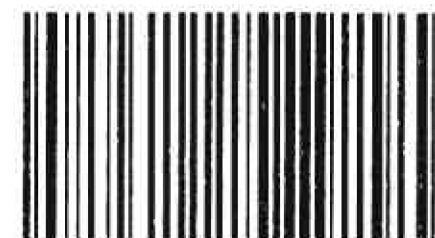


dr hab. inż. Tomasz Kulej, prof. PCz
Wydział Elektryczny
Politechnika Częstochowska
42-201 Częstochowa

Częstochowa, dn. 2.04.2026



RPW/15139/2026
Data: 2026-04-07

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jacka Goczковского
pt. Detekcja oraz zliczanie koincydencji fotonów przy zastosowaniu specjalizowanego
układu scalonego do diagnostyki własności kwantowych systemu optycznego oraz
kryptografii kwantowej na orbicie okołoziemskiej.**

Podstawą formalną recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Gdańskiej, z dnia 13 stycznia 2026, powołująca mnie na recenzenta w/w rozprawy. Ocena została dokonana zgodnie z przepisami Ustawy z dnia 20.07.2018, *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2023, poz. 742 z późn. zm.).

1. Temat pracy i jego znaczenie.

Przedmiotem rozprawy jest projekt i wdrożenie przetwornika czas–cyfra (TDC) o wysokiej rozdzielczości, precyzji oraz dużej częstotliwości próbkowania, z wykorzystaniem układów FPGA dopuszczonych do pracy w przestrzeni kosmicznej. Docelowym zastosowaniem przetwornika jest w szczególności detekcja koincydencji fotonów, wykorzystywana w kryptografii kwantowej i eksperymentach naukowych. Tematyka pracy jest aktualna i istotna, wpisując się w obszary o rosnącym znaczeniu, takie jak technologie kwantowe, elektronika wysokiej precyzji oraz systemy mikroelektroniczne do zastosowań kosmicznych, gdzie precyzyjne pomiary czasu przy użyciu TDC mają duże znaczenie praktyczne.

W pracy zauważalna jest pewna nieścisłość między tytułem, który wskazuje na realizację w układzie specjalizowanym (ASIC), a faktyczną implementacją opartą na układzie FPGA. Autor wyjaśnia tę różnicę trudnościami formalnymi związanymi ze zmianą tematu, podkreślając, że już na wstępnym etapie projektu rozważano realizację przy użyciu FPGA. Z perspektywy aplikacyjnej wybór FPGA jest uzasadniony ze względu na większą elastyczność projektową, możliwość rekonfiguracji oraz krótszy czas wdrożenia w porównaniu do układów ASIC. W ocenie recenzenta wykorzystanie układu FPGA nie obniża wartości merytorycznej pracy.

Zadeklarowana częstotliwość próbkowania na poziomie kilkunastu MSps, w połączeniu z rozdzielczością rzędu pojedynczych pikosekund, stanowi ambitny, lecz uzasadniony cel. Zbliżone parametry przetworników TDC osiągnano już w układach FPGA i ASIC, jednak ich implementacja w sprzęcie dopuszczonym do pracy w przestrzeni kosmicznej pozostawała ograniczona. Projektowanie przetwornika w FPGA dopuszczonym do pracy w przestrzeni kosmicznej jest szczególnie wymagające ze względu na ograniczone zasoby sprzętowe, konieczność uwzględnienia redundancji logicznej, zwiększoną zmienność parametrów PVT oraz złożoną topologię ścieżek czasowych, co utrudnia osiągnięcie wysokiej rozdzielczości, precyzji i częstotliwości próbkowania.

Doktorant, wykorzystując wcześniejsze doświadczenia w projektach kosmicznych, podjął się opracowania i implementacji przetwornika TDC o wysokich parametrach w zakresie rozdzielczości, precyzji i częstotliwości próbkowania, co wymagało opracowania nowych metod projektowania, implementacji i testowania systemów pomiarowych opartych na układach FPGA dopuszczonych do pracy w przestrzeni kosmicznej.

W świetle powyższych argumentów podjętą tematykę należy uznać za uzasadnioną i istotną zarówno z punktu widzenia aplikacyjnego, jak i poznawczego.

2. Zakres i cel rozprawy doktorskiej.

Celem rozprawy było opracowanie metody sprzętowej do wykrywania i zliczania koincydencji fotonów w zastosowaniach kosmicznych. Przyjęto założenie implementacji metody przy użyciu układów FPGA lub ASIC, przy czym faktyczna realizacja odbyła się przy użyciu FPGA. Realizacja powyższego celu wymagała opracowania lub adaptacji odpowiedniej metody pomiarowej, zaprojektowania systemu bazującego na tej metodzie, jego implementacji sprzętowej oraz przeprowadzenia testów i badań. Ostatecznym etapem było wdrożenie opracowanego urządzenia.

W pełnym brzmieniu teza główna rozprawy sformułowana jest następująco:

"Jest możliwa realizacja przetwornika czas-cyfra o rozdzielczości i precyzji rzędu pojedynczych pikosekund wymaganych do detekcji koincydencji fotonów oraz częstotliwości próbkowania powyżej kilkunastu MSps z wykorzystaniem układu scalonego typu FPGA dopuszczonego do pracy w przestrzeni kosmicznej."

Autor formułuje także dwie tezy podrzędne:

- Można zmniejszyć nieliniowość charakterystyki przetwornika czas cyfra zaprojektowanego w technice linii opóźniającej.

Teza główna pracy została sformułowana jasno i trafnie, obejmując kluczowe zagadnienia: rozdzielczość, precyzję oraz częstotliwość próbkowania. Choć teza obejmuje szeroki zakres zagadnień, pozostaje klarowna i dobrze osadzona w kontekście aplikacyjnym. Każda z tez podrzędnych jest adekwatna do problemu naukowego i jasno uzasadnia cel pracy. Wartości merytorycznej postawionej tezy nie obniża rozbieżność między realizacją wskazaną w tytule pracy (układ ASIC) a faktyczną realizacją w układzie FPGA.

3. Struktura rozprawy doktorskiej.

Rozprawa doktorska liczy 240 stron, uzupełnionych o bibliografię, spis rysunków, spis tabel i spis fragmentów kodu. Materiał został podzielony na sześć rozdziałów. Spis literatury obejmuje 192 pozycje, w tym trzy współautorstwa Doktoranta. Znaczna część źródeł pochodzi z ostatniej dekady, co świadczy o jego dobrym rozeznaniu w aktualnej literaturze przedmiotu.

W rozdziale pierwszym przedstawiono główne cele i tezy rozprawy oraz omówiono w skrócie jej zawartość, zgodnie z przyjętymi zasadami redagowania prac naukowych.

W rozdziale drugim uzasadniono potrzebę wykonania prac projektowo-badawczych. Zawiera on wprowadzenie do zagadnień związanych ze zjawiskiem splątania kwantowego i jego zastosowaniami (projekt SECSQES), precyzyjnym pomiarem czasu w aplikacjach kosmicznych oraz realizacją przetworników czas–cyfra. Omówiono tradycyjne sposoby konwersji, takie jak konwersja czasu na amplitudę, analogowa ekspansja czasu, metoda licznikowa oraz metoda noniuszowa, ze szczególnym uwzględnieniem technik opartych na liniach opóźniających.

Rozdział trzeci koncentruje się na projektowaniu i implementacji przetworników TDC w układach FPGA. Przedstawiono przykładowe architektury konfigurowalnych bloków logicznych oraz podstawowe etapy procesu projektowego, takie jak synteza i mapowanie. Omówiono metody doboru długości linii opóźniającej oraz precyzyjnego pomiaru czasu, w tym metodę propagacji wzorca z uwzględnieniem elementów wirtualnych. Poruszono także zagadnienia zrównoleglania elementów, optymalizacji ścieżek propagacji oraz typowe problemy w pomiarach czasowych w FPGA – nieliniowości, błędy kwantyzacji, dryft napięcia i zegara, jitter, starzenie elementów i błędy interpolacyjne. W rozdziale przedstawiono również parametry i miary stosowane do charakteryzacji TDC, takie jak nieliniowość całkowita (INL), nieliniowość różniczkowa (DNL) oraz wartość skuteczna błędu w jednostkach LSB (RMS LSB).

Zasadnicze wyniki prac projektowych Doktoranta przedstawiono w rozdziale czwartym, który poświęcony jest praktycznej realizacji i wdrożeniu TDC w FPGA, z uwzględnieniem zastosowań kosmicznych. Omówiono w nim wyzwania związane z funkcjonowaniem systemów mikroelektronicznych w przestrzeni kosmicznej oraz sposoby ich pokonywania w kontekście projektowania i testowania przetworników. Przedstawiono dwa główne projekty – dla firm AROBS [REDACTED] – różniące się liczbą wejść, częstotliwością próbkowania oraz wymaganiami dotyczącymi precyzji i rozdzielczości.

Dla obu projektów zastosowano technikę linii opóźniających (TDL) w połączeniu z metodą propagacji wzorca (WU) oraz strukturą równoległych linii (ECL), co pozwoliło osiągnąć wysoką rozdzielczość i precyzję pomiarów. Szczegółowo opisano projektowanie płytek rozszerzeń, konfigurację TDC i bloków pomocniczych oraz algorytmy strojenia i automatycznego doboru wzorców propagacji, zapewniające optymalną charakterystykę urządzenia. Rozdział obejmuje również analizę typowych problemów inżynierskich, takich jak nieliniowości, oraz sposoby ich kompensacji i ograniczania związanych z nimi błędów.

Przedstawiono wyniki kampanii pomiarowej dla różnych konfiguracji wejść i częstotliwości próbkowania, w tym pomiary LSB, RMS LSB, INL i DNL, wykazujące wysoką precyzję (RMS LSB rzędu kilku pikosekund) oraz możliwość detekcji koincydencji między równoległymi TDC. Pokazano również skuteczność skalowania systemu poprzez równoległe przetworniki, co pozwala zwiększać maksymalną częstotliwość próbkowania przy zachowaniu dokładności pomiaru. Wyniki potwierdzają skuteczność zaprojektowanej architektury, efektywność strojenia oraz zastosowalność w systemach kosmicznych.

Przedstawione w rozdziale czwartym osiągnięcia pozwalają stwierdzić, że główna teza rozprawy została potwierdzona: opracowany przetwornik TDC osiąga precyzję rzędu kilku pikosekund oraz częstotliwość próbkowania powyżej kilkunastu MSps w FPGA dopuszczonym do pracy kosmicznej. Tezy podrzędne również znalazły potwierdzenie – wykazano zarówno możliwość redukcji nieliniowości charakterystyki w technice linii opóźniających jak i możliwość wykorzystania sygnału do dystrybucji pomiarów do wielu równoległych TDC, co zwiększa maksymalną częstotliwość próbkowania całego systemu.

W rozdziale piątym Autor przedstawia aktualny stan rozwoju projektu w firmie AROBS, prezentując w skrócie kolejne praktyczne wdrożenia opracowanego przetwornika TDC, m.in. w projekcie detektora pojedynczych fotonów o wysokiej przepustowości oraz w mierniku przesunięć fazowych.

W ostatnim, szóstym rozdziale Autor podsumowuje swoje osiągnięcia, wskazując na dowiedzenie zarówno tezy głównej, jak i tez podrzędnych.

4. Ogólna ocena rozprawy doktorskiej.

Przedłożona rozprawa ma charakter pracy badawczo-wdrożeniowej o wyraźnym charakterze aplikacyjnym. Autor zrealizował rzeczywiste projekty dla firm AROBS i [REDAKTOR] wykorzystując układy FPGA dopuszczone do pracy w przestrzeni kosmicznej (RTG4, IGLOO2). Praca obejmuje pełny cykl: projekt, implementację, testy i walidację systemu, w tym szeroką kampanię pomiarową z wieloma konfiguracjami wejść i częstotliwościami próbkowania. Zastosowane metody, obejmujące projektowanie układów cyfrowych, implementację sprzętową oraz szeroki zakres badań eksperymentalnych i analiz statystycznych, są właściwe dla tego typu zagadnień. Praca dowodzi, że autor posiada umiejętności prowadzenia badań o charakterze inżynierskim i aplikacyjnym. Pewnym ograniczeniem jest brak bardziej systematycznego odniesienia wyników do danych literaturowych oraz jednolitej metodologii porównawczej.

Oryginalny dorobek autora obejmuje zaprojektowanie i wdrożenie przetwornika TDC łączącego techniki WU i ECL w układach FPGA dopuszczonych do pracy w przestrzeni kosmicznej, opracowanie innowacyjnej struktury [REDAKTOR]

[REDAKTOR] oraz stworzenie pełnego systemu obsługi, strojenia i testowania urządzenia. Dorobek ten ma duże znaczenie praktyczne, umożliwiając precyzyjne zliczanie koincydencji fotonów w eksperymentach kwantowych i aplikacjach kosmicznych, przy jednoczesnym zwiększeniu maksymalnej częstotliwości próbkowania. Poznawczo praca wnosi nowe rozwiązania w zakresie projektowania układów TDC w FPGA, metod redukcji nieliniowości oraz skalowania przetworników równoległych. Wdrożenie w projektach firm AROBS i [REDAKTOR] potwierdza jej realną użyteczność inżynierską.

Rozprawa w pełni świadczy o dużej wiedzy autora zarówno na poziomie podstawowym, jak i zaawansowanym w dziedzinie automatyki, elektroniki, elektrotechniki i technologii kosmicznych. Autor wykazuje biegłość w projektowaniu układów FPGA, metodach pomiarów czasu z pikosekundową rozdzielczością oraz w problematyce systemów mikroelektronicznych do zastosowań kosmicznych. Pokazuje również znajomość metod statystycznej analizy wyników i charakteryzacji przetworników TDC, co odpowiada szczegółowemu obszarowi prowadzonych badań. Rozprawa potwierdza kompetencje w zakresie projektowania sprzętu, integracji systemów pomiarowych oraz metodologii badań inżynierskich w naukach technicznych.

Przedłożona rozprawa prezentuje obszerną i aktualną literaturę z zakresu przetworników czas–cyfra, FPGA w zastosowaniach kosmicznych oraz systemów do detekcji koincydencji fotonów. Dobór źródeł i opis metod jest wystarczająco aktualny i kompletny, by potwierdzić znajomość najnowszych osiągnięć naukowych. Należy również podkreślić dobry poziom edytorski i językowy pracy, choć można sformułować drobne zastrzeżenia, które omówiono w kolejnym punkcie recenzji.

Podsumowując, recenzowana rozprawa doktorska stanowi wartościowe i spójne opracowanie o wyraźnym charakterze badawczo-wdrożeniowym, w którym przedstawiono

skuteczne rozwiązanie postawionego problemu oraz jego praktyczną implementację. Autor wykazał się zarówno ugruntowaną wiedzą teoretyczną, jak i wysokimi kompetencjami w zakresie samodzielnego prowadzenia prac projektowych i badań eksperymentalnych. Przedstawione wyniki jednoznacznie potwierdzają osiągnięcie założonych celów oraz weryfikację sformułowanych tez. Na szczególne podkreślenie zasługuje umiejętne połączenie aspektów teoretycznych z praktycznym wdrożeniem rozwiązania w warunkach zbliżonych do rzeczywistych zastosowań.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne.

Pomimo wysokiej wartości merytorycznej i aplikacyjnej rozprawy, można wskazać kilka zagadnień wymagających doprecyzowania i szerszej dyskusji.

a) Uwagi dyskusyjne

Po pierwsze, w pracy przedstawiono bogaty materiał eksperymentalny, jednak praca zyskałaby na szerszym porównaniu uzyskanych wyników z danymi literaturowymi. W szczególności warto byłoby zestawić parametry zaproponowanego rozwiązania z innymi realizacjami przetworników TDC – zarówno w układach FPGA, jak i ASIC – w odniesieniu do kluczowych parametrów, takich jak rozdzielczość, precyzja i częstotliwość próbkowania.

Po drugie, interesującym uzupełnieniem pracy byłoby szersze omówienie relacji pomiędzy precyzją a liniowością przetwornika. Autor wskazuje możliwość poprawy jednego z tych parametrów kosztem drugiego, co rodzi pytanie o dopuszczalny poziom nieliniowości w kontekście detekcji koincydencji fotonów oraz jej wpływ na końcową dokładność pomiaru.

Po trzecie, w pracy nie przedstawiono analizy wpływu warunków środowiskowych, takich jak temperatura oraz napięcie zasilania, na parametry przetwornika. W kontekście implementacji w układach FPGA oraz deklarowanych zastosowań kosmicznych zasadne jest pytanie o stabilność parametrów układu oraz ewentualne metody kompensacji wpływu tych czynników.

b) Uwagi redakcyjne

Praca została zredagowana starannie, a ponadto charakteryzuje się dużą szczegółowością opisu przeprowadzonych prac projektowych i eksperymentalnych, co można uznać za jej istotną zaletę. Jednocześnie, przy tak obszernej objętości materiału, przyjęty styl raportu utrudnia w niektórych fragmentach szybkie odnalezienie kluczowych informacji oraz całościową orientację w strukturze uzyskanych wyników.

Pomimo starannej edycji pracy i zasadniczo poprawnego języka, Autor nie uniknął jednak drobnych błędów stylistycznych i redakcyjnych; ich przykłady przedstawiono poniżej.

str. 12: „do ich obejścia” → do ich rozwiązania. Termin „obejście problemu” jest nieprecyzyjny i powtarza się w pracy.

str. 30: „często długi czasu” → często długi czas.

str. 48: „nakłada takie ograniczenia (ang. constraints)” → zbędne angielskie tłumaczenie słowa „ograniczenia”. Podobne nadmiarowe tłumaczenia występują w pracy wielokrotnie.

str. 56: „skomplikowanej” → złożonej.

str. 58: „to można go skonfigurować go w taki sposób” → nadmiarowe „go”.

str. 60: „szerokich opóźnień” → określenie żargonowe; warto rozważyć bardziej formalny zapis.

str. 60: „równo o połowę” → dokładnie o połowę.

str. 72: „gdy mierzony sygnał podłączony jest bezpośrednio do...” → lepiej: gdy mierzony sygnał jest podany na... lub doprowadzony do.... Podobne błędy na str. 99 i 177.

str. 94: „takimi urządzeniami są układy programowalne FPGA” → FPGA nie jest urządzeniem. Podobnie na str. 37 i 162.

str. 96: „sygnał z LUT-ów” → określenie kolokwialne; lepiej: sygnał pochodzący z LUT-ów lub sygnał z wyjść LUT-ów.

str. 115: „zegaru czasu rzeczywistego” → zegara czasu rzeczywistego.

str. 155: „o liczbie przekreśzeń wartości RTC w układzie FPGA” → poprawnie: liczba przepełnień licznika RTC lub liczba pełnych cykli licznika RTC.

str. 157: „do czasu zebrania pomiaru” → lepiej: do momentu zakończenia akwizycji danych.

str. 194: „na podstawie na ...” → nadmiarowe „na”.

str. 194: „zbierał dwie charakterystyki” → rejestrował dwie charakterystyki.

str. 211: „różnica w wyglądzie charakterystyk” → lepiej: różnice w przebiegach charakterystyk.

str. 212: „idealnie równe przewody” → bardziej precyzyjnie: przewody o identycznej długości lub przewody o jednakowych parametrach elektrycznych.

Pomimo wskazanych uwag krytycznych i dyskusyjnych rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, a uzyskane wyniki należy ocenić jako istotny wkład w rozwój metod i implementacji przetworników czas–cyfra oraz ich zastosowań w systemach pomiarowych dla detekcji koincydencji fotonów. Co więcej, zakres prac, poziom ich weryfikacji, osiągnięte parametry metrologiczne oraz wdrożenia praktyczne pozwalają zaliczyć ją do rozpraw wyraźnie wykraczających ponad poziom przeciętny.

6. Wniosek końcowy.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Jacka Goczkowskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę z dnia 20.07.2018, *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2023, poz. 742 z późn. zm.). Rozprawa przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o istotnym znaczeniu aplikacyjnym, potwierdzonym wdrożeniem, a ponadto prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wnioskuje zatem do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Gdańskiej o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do obrony. Jednocześnie, biorąc pod uwagę powyższą wysoką ocenę pracy, potwierdzone wdrożenie oraz spełnienie kryteriów publikacyjnych, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

Tomasz Kulij