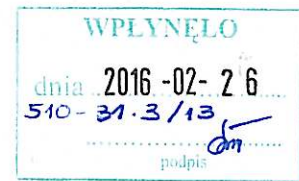


Warszawa, dnia 15.02.2016 r.

prof. dr hab. inż. Ryszard Romaniuk  
Politechnika Warszawska  
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Instytut Systemów Elektronicznych



***KWESTIONARIUSZ – RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI  
I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ  
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE***

**Tytuł rozprawy: Modułowy system do obrazowania z wykorzystaniem promieniowania X pracujący w trybie zliczania pojedynczych fotonów**

**Autor rozprawy: mgr inż. Jacek Rauza**

Podstawą recenzji jest uchwała Rady Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH oraz pismo Dziekana w tej sprawie, nr. WEAlIB-b/510-31/13 z dnia 1.02.2016 r.

Autor rozprawy, Pan mgr inż. Jacek Rauza posiada zapis bibliograficzny w podstawowych naukowych bazach danych o zasięgu globalnym jak Web of Science Thomson Reuters oraz Scopus Elsevier. Parametry zapisów są następujące: dla WoS - liczba dokumentów – 8, liczba cytowań – 3, indeks Hirscha H=1; dla Scopus – liczba dokumentów 12, liczba cytowań 5, indeks Hirscha 2. Wszystkie cytowane prace mają charakter współautorski. Najbardziej aktualne cytowania pochodzą z roku 2015. Są to, subiektywnie według recenzenta – w przypadku nie istnienia w zakresie nauk technicznych krajowych standardów w tym względzie, parametry wystarczające do ubiegania się o stopień naukowy doktora. Doktorant posiada zapis w bazie danych BPP AGH, gdzie wykazano 18 publikacji autora, a także skromne nieautoryzowane zapisy w bazach spie.org, dblp computer science bibliography i LinkedIn.

**1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy /teza rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?**

Obszarem badawczym pracy doktorskiej jest rozwój metod obrazowania w zakresie promieniowania rentgenowskiego. Ten obszar nauki i techniki podlega intensywnemu

rozwojowi, po pierwsze z powodu rozszerzających się zastosowań, oraz po drugie z powodu przejścia jakiś czas temu na technologie cyfrowe. Podobnie do innych dziedzin cyfryzacja w tym obszarze ulega pogłębieniu i doskonaleniu, dalej rozszerzając zastosowania precyzyjnego, szybkiego, automatycznego i taniego obrazowania EUV i rentgenowskiego. Prezentacja rezultatów obrazowania ma inny charakter w systemach wizji maszynowej, systemach badania struktury materiałów metodami dyfrakcyjnymi, innych systemach skanowania automatycznego, itp. a zupełnie inny gdy wchodzi w grę obraz dla operatora człowieka. Zrozumiały obraz rentgenowski musi już obecnie a w przyszłości jeszcze bardziej być dopasowany do percepcji ludzkiej. Stosuje się techniki nakładania obrazu optycznego i rentgenowskiego (np. w astronomii), techniki skalowania długości fali i intensywności do spektrum optycznego, techniki sztucznych barw, i wiele innych. Techniki cyfrowe umożliwiają takie manipulacje, przy jednoczesnym zachowaniu pełnej informacji w obrazie rentgenowskim. Techniki analogowe, np. korzystające z klisz filmowych, były niepomernie bardziej ograniczone. W zasadzie odchodzą w przeszłość.

Praca doktorska wpisuje się w trend doskonalenia cyfrowych technik obrazowania rentgenowskiego. To doskonalenie polega ogólnie po stronie detekcyjnej na zwiększeniu dokładności odwzorowania poprzez zwiększanie ilości pikseli detekowanego obrazu, zwiększeniu powierzchni detektorów pikselowych, zwiększeniu rozdzielczości energetycznej i natężeniowej, wielo-spektralności, zwiększeniu szybkości działania, obniżeniu kosztów, miniaturyzacji, itp. Po stronie nadawczej doskonalone są źródła promieniowania i optyka RTG dające lepsze parametry wiązek oświetlających – w tym wiązki monochromatyczne, przestrajane energetycznie, skanowane, itp. Do doskonalonych źródeł nowej generacji (np. miniaturowych FEL) muszą być dostosowane nowe generacje detektorów pikselowych – bezpośrednio sprzężonych z elektroniką odczytową. Autor w pracy doktorskiej wykonuje ciekawy, samodzielny krok naukowo – techniczny w kierunku doskonalenia pikselowego systemu obrazowania złożonego z matrycy detektorowej i zintegrowanej elektroniki odczytowej w postaci dedykowanego układu scalonego. Takie podejście jest obecnie uznawane za główny kierunek badań w tej technice. Postęp w tej i podobnych dziedzinach składa się z wielu takich kroków, jaki wykonał doktorant. Niektóre z tych kroków są dość, a nawet bardzo, kosztowne, jak np. zaprojektowanie i wykonanie nowej generacji detektora i współpracującego z nim układu scalonego elektroniki odczytowej. Tutaj autor raczej składa i optymalizuje (także bada jego właściwości) system obrazowania rentgenowskiego z dostępnych układów funkcjonalnych. Zarys obszaru badawczego pracy autor przedstawia we wstępie do rozprawy dość skrótowo, skupiając się na rozwoju systemów detekcyjnych.

Zagadnieniem naukowym rozpatrzonym w pracy jest projekt i implementacja autorskiego dedykowanego procesora programowego realizującego główne funkcjonalności szybkiej kamery cyfrowej obrazującej w zakresie promieniowania X. Autor formułuje to cząstkowe zagadnienie, o charakterze głównie algorytmicznym i programistycznym, jednak w pełnym otoczeniu funkcjonalnym obejmującym takie niezbędne etapy jak koncepcja i projekt pełnej funkcjonalnej kamery w rozwiązaniu modułowym, konstrukcja adekwatnych zestawów laboratoryjnych do pomiarów funkcjonalności kamery, wykonanie pomiarów i ocena jakości systemu. Dopiero wówczas takie postawienie zagadnienia naukowego ma sens. Nie tylko dlatego, że można zaprojektowany algorytmicznie i napisany procesor programowy implementować w układzie FPGA i przetestować jego funkcjonalności „na sucho”. Przede wszystkim

dlatego, że budowana kamera ma działać w praktyce, a bez sterowania układu scalonego elektroniki odczytowej działać nie będzie. Autor decyduje się na budowę własnego procesora, optymalizowanego w kierunku minimalizacji zasobów i maksymalizacji osiągnięć, w tym szybkości działania. Nie korzysta z dostępnych zasobów gotowych rozwiązań otwartego sprzętu i oprogramowania, ani z firmowych procesorów programowych. Uzasadnia także dlaczego nie korzysta. Autor jasno formułuje cel pracy jako budowę prototypu kamery. Budowa takiego prototypu to jednak obszerna praca zespołowa. Podkreśla więc i jasno definiuje swój najistotniejszy udział autorski w tym dużym projekcie. Rozprawa ma charakter doświadczalny z elementami projektowymi, programowymi, sprzętowymi i pomiarowymi.

Konstruowana przez Autora (w zespole) i oprogramowana (samodzielnie, w warstwie wbudowanego procesora programowego) kamera bazuje na najnowszej generacji pikselowych detektorów zliczających fotony poprzez bezpośrednie zbieranie ładunku. Detektory te posiadają szereg zalet w porównaniu z matrycami scyntylacyjnymi o detekcji pośredniej i z integracją ładunku. W tym rozwiązaniu minimalizowany jest szum śrutowy, oraz możliwa jest detekcja spektralna fotonów. Detektory bezpośrednie mogą bazować na półprzewodnikach o dużej liczbie Z. Znaczna grubość warstwy detekcyjnej nie pogarsza rozdzielczości przestrzennej, jak to się dzieje w detektorach scyntylacyjnych. Detektory zliczające fotony są jednak nieliniowe dla większych strumieni fotonowych ze względu na takie parametry jak energia fotonów, poziom dyskryminacji spektralnej, czas martwy elektroniki odczytowej, a nawet rodzaj wiązki fotonowej, itp. Przy konstrukcji kamery i oprogramowania dla niej doktorant musi uwzględnić te cechy zastosowanego nowoczesnego detektora zliczającego fotony. Tematyka konstrukcji kamer rentgenowskich wykorzystujących hybrydowe scalenie pomiędzy matrycą detekcyjną i elektroniką odczytową jest zagadnieniem naukowo – technicznym bardzo współczesnym i wymagającym. Ponadto posiada silny aspekt konkurencyjny i wdrożeniowy.

Podsumowując, zagadnieniem naukowym rozpatrzonym w pracy jest autorskie opracowanie i implementacja wbudowanego dedykowanego procesora programowego, optymalizowanego do rodzaju zastosowanego detektora i elektroniki odczytowej (oba elementy w postaci układów scalonych), obsługującego przepływ danych w czasie akwizycji obrazów rentgenowskich. Zadanie jest realizowane w środowisku pełnego układu funkcjonalnego kamery rentgenowskiej. Zagadnienie jest jasno sformułowane przez doktoranta.

**2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle /świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?**

Prace nad hybrydowymi detektorami pikselowymi są obecnie prowadzone bardzo intensywnie na świecie. Jest kilka zespołów silnie dominujących. Obszarem bardzo stymulującym badania i budowę nowych generacji detektorów jest astrofizyka, ale także medycyna, a w następnej kolejności przemysł, nie wspominając o obronności i bezpieczeństwie. Autor powołuje się na prace tych głównych zespołów naukowych jak PSI, CERN, INFN, IFD-PP, a także komercyjnych jak TSMC. Szczególnie ciekawe wyniki otrzymano ostatnio w znakomitym zespole dr Ronaldo Bellaziniego z INFN, Frascati,

opublikowane jako artykuł Characterization of Pixirad-1 photon counting detector for X-ray imaging, JINST January 2016, DOI: 10.1088/1748-0221/11/01/P01015, a więc już po wydaniu pracy doktorskiej.

Warto wspomnieć o pracach w tym obszarze wybitnych uczonych polskiego pochodzenia: Jan S.Iwańczyk (absolwent PW i IPJ), Radiation detectors for medical imaging. CRC Press; Krzysztof Iniewski, Troy Farncombe, Medical imaging, technology and applications, CRC Press; Dr J.Iwańczyk założyciel firmy DxRay jest członkiem zespołu który opracował jedne z pierwszych cyfrowych kamer zliczających fotony X dla celów medycznych. Moduły DxRay były instalowane w 2010r. w skanerze VCT firmy GE.

Wykaz bibliografii w rozprawie doktorskiej zawiera 89 pozycji. Tematyka bibliografii zawiera następujące główne zagadnienia: rentgenowska tomografia komputerowa, detektory pikselowe, technologia bump bonding (C4, flip chip), zliczanie fotonów rentgenowskich, pikselowe układy scalone elektroniki odczytowej, analogowe układy scalone CMOS. Kilkanaście pozycji bibliograficznych pochodzi z Zespołu Badawczego Katedry Metrologii i Elektroniki WEAIiB AGH, w tym kilka we współautorstwie Doktoranta. Autor obficie korzysta z doświadczeń poprzedników pracujących w obszarze budowy hybrydowo zintegrowanych kamer rentgenowskich, a w szczególności dr hab. P. Maja, dr hab. R.Szczygła oraz zespołów swoich bezpośrednich opiekunów naukowych. Osiągnięcia zespołu detektorowego są znaczne i w takim korzystnym dla siebie środowisku działa doktorant. Doktorant nie opublikował pracy samodzielnej w tematyce swoich działań badawczych, lub przynajmniej takiej w której jest pierwszym autorem. Być może wynika to z polityki publikacyjnej Zespołu Badawczego.

Ogólnego przeglądu literatury Autor dokonuje w pierwszych rozdziałach pracy. W szczególności pokazuje kilka zasadniczych rozwiązań kolejnych generacji hybrydowych układów zintegrowanych dla kamer rentgenowskich takich jak Medipix, Eiger, Pixie, PXD, XPAD. To stanowi dobrą platformę odniesienia do obecnego poziomu technicznego i do prowadzenia własnych prac doświadczalnych z układem UFXC.

Podsumowując, uważam że w rozprawie przeprowadzono analizę źródeł w sposób właściwy. Autor wykazuje się dobrą znajomością zagadnień otoczenia literaturowego hybrydowej integracji układów scalonych, oprogramowania funkcjonalnego układów i budowy funkcjonalnej całości w postaci nowoczesnej działającej kamery rentgenowskiej. Cytowana literatura jest adekwatna do przedmiotu rozprawy doktorskiej. Wnioski z przeglądu literatury są sformułowane jasno i przekonująco, oraz pozwalają autorowi prawidłowo wykonać stojące przed nim zadania oprogramowania, implementacji i uruchomienia urządzenia. Także liczba i jakość prac własnych w tematyce rozprawy doktorskiej jest więcej niż wystarczająca do ubiegania się o stopień naukowy doktora nauk technicznych.

### **3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

Autor stawia przed sobą wybrane zagadnienia koncepcyjne, programistyczne, konstrukcyjne i pomiarowe związane z budową modułowej kamery rentgenowskiej, pracującej w trybie zliczania fotonów. To zagadnienie Autor rozwiązuje etapami.

Zapoznaje się i testuje pikselowy układ scalony UFXC dostosowany do współpracy z detektorem matrycowym. Opracowuje koncepcję modułowej budowy kamery. Analizuje zagadnienie oprogramowania funkcjonalnego kamery przedstawiając kilka opcji rozwiązania. Dokonuje wyboru opcji wymagającej minimalnych zasobów sprzętowych w postaci rozwiązania typu „embedded”, czyli procesora wbudowanego. Buduje i implementuje procesor programowy. Testuje w warunkach laboratoryjnych kamerę złożoną z dostępnych modułów. Ten tok postępowania jest właściwy i zagwarantował Autorowi rozwiązanie postawionego zadania badawczego. W ramach wymienionych ogólnych bloków zadaniowych Autor wykonuje szereg istotnych szczegółowych działań pomiarowych i testowych jak np. sprawdzenie zasadności stosowania połączeń typu przelotki TSV, pojedyncze i podwójne. Wykazuje przy okazji przydatność tego typu połączeń. Nie było bowiem pewności czy tak poważna ingerencja mechaniczna w strukturę obszaru pola kontaktowego nie powoduje innych szkodliwych konsekwencji elektrycznych. Tego typu różnego rodzaju testów laboratoryjnych, konstrukcyjnych i pomiarowych wykonuje więcej wykazując biegłość w pracy laboratoryjnej oraz rozwiązując po drodze różne istotne problemy techniczne, np. testowanie i klasyfikacja martwych i gorących pikseli detektora, itp.

Założeniem przyjętym w rozprawie była budowa nowoczesnej kamery rentgenowskiej złożonej z nowej generacji funkcjonalnych elementów składowych sprzętowych i programistycznych. Założenie to zostało realistycznie zweryfikowane przez możliwości laboratoryjne Zespołu Badawczego w którym doktorant realizuje pracę, zdolności i pracowitość Autora pracy. Te wszystkie elementy złożyły się prawidłowo i dały w wyniku laboratoryjnie przetestowany model kamery rentgenowskiej. Podsumowując należy stwierdzić, że Autor rozwiązał postawione zagadnienie i użył do tego właściwych metod.

#### **4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?**

We wstępie pracy Autor opisuje w skrócie zadania badawcze a w podsumowaniu odnosząc się do tych zadań wymienia podstawowe osiągnięcia w postaci listy z następującym krótkim opisem technicznym. Recenzent zgadza się z tą listą osiągnięć. Wymieniam tutaj najważniejsze według mnie otrzymane wyniki samodzielne pracy Doktoranta z krótkim krytycznym komentarzem recenzenta:

- koncepcja modułowej konstrukcji kamery rentgenowskiej; Koncepcje takie są znane w literaturze, a tutaj Autor niejako integruje w swoim rozwiązaniu korzystne cechy kilku analizowanych rozwiązań; unika niektórych błędów rozwiązań opublikowanych; ukierunkowuje swoje rozwiązanie na minimalno – zasobowe; korzysta wyłącznie z nowoczesnej hybrydowej technologii pikselowej, oraz przyszłościowej technologii zliczania pojedynczych fotonów – która będzie umożliwiała precyzyjną dyskryminację spektralną, obrazowanie wielo-spektralne, itp.,
- stosuje technologię układów programowalnych umożliwiającą parametryzację rozwiązania programowego; uzyskuje łatwą re-konfigurowalność funkcjonalną urządzenia; opracowuje i implementuje procesor wbudowany, docelowe powielane rozwiązanie techniczne być może powinno bazować na układzie ASIC, itp.,
- testuje bloki funkcjonalne w tym oba pikselowe układy scalone, składa bloki funkcjonalne w całość, testuje pełne urządzenie, rozwiązując po drodze samodzielnie

wiele naukowo – technicznych problemów laboratoryjnych.

Samodzielny i oryginalny dorobek Autora polega na opracowaniu i implementacji minimalno – zasobowego procesora programowego realizującego kluczowe funkcjonalności kamery rentgenowskiej. To zadanie algorytmiczne i programistyczne było otoczone innymi wymagającymi zadaniami naukowo-technicznymi które wymagały wkładu intelektualnego Autora jak opracowanie koncepcji budowy kamery z modułów i zaplanowanie całej procedury jej konstrukcji, etapowego uruchamiania, testów elementów składowych i finalnego urządzenia.

Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową jest bardzo dobra i adekwatna do krajowego wyposażenia laboratoryjnego jaką dysponuje znakomita Katedra Metrologii i Elektroniki AGH.

#### **5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?**

Redakcja pracy jest poprawna i przebiega według logicznego schematu budowy złożonego urządzenia jakim jest kamera rentgenowska. Autor przedstawia kluczowe elementy składowe budowanego urządzenia, dokonuje krytycznego wyboru do swojego projektu, uzasadnia ten wybór, pokazuje czym dysponuje w swoim laboratorium, opisuje właściwości tych bloków funkcjonalnych, testuje te bloki które tego wymagają jak np. układ scalony UFXC oraz technologię połączenia detektora pikselowego z układem scalonym elektroniki odczytowej, składa urządzenie i poddaje testom funkcjonalnym. Przeprowadzone testy funkcjonalne kamery z pozytywnymi rezultatami stanowią dowód poprawnie wykonanych zadań. Sposób przedstawienie uzyskanych wyników nie budzi zastrzeżeń. Wyniki są przedstawione w sposób jasny i zrozumiały także dla niespecjalisty. Doktorant jest współautorem kilku artykułów co pewnie miało znaczenie przy redakcji rozprawy doktorskiej. Doktorant ogranicza się dość rygorystycznie do bezpośredniej tematyki swoich działań badawczych, co czyni rozprawę bardzo zwięzłą.

#### **6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?**

Praca jest bardzo zwięzła. Dla recenzenta jest to zaletą. Jednak można byłoby zapytać czy przy tak dynamicznie rozwijającej się i niezwykle perspektywicznej dziedzinie wysokoenergetycznego wielo-spektralnego zobrazowania „optycznego” praca nie powinna zawierać nieco szerszy wstęp dotyczący tej tematyki.

Niektóre z ograniczeń w realizacji pracy wynikały z dostępności określonych zasobów laboratoryjnych Zespołu Badawczego w którym działa doktorant. Tak więc nie jest to w żadnym wypadku wina Doktoranta. Pokazanie pełnego potencjału takiego skomplikowanego urządzenia, które zostało zbudowane, możliwe byłoby gdyby laboratorium dysponowało np. kompaktowym EUV i rentgenowskim źródłem przestrajalnym spektralnie o kształtowanej wiązce. Wiązka używana była relatywnie nieadekwatna do pełnych testów zbudowanego znakomitego urządzenia o znacznie szerszych możliwościach obrazowania niż można było pokazać w konkretnych warunkach laboratoryjnych. Ta zbudowana kamera jest naprawdę znacznym osiągnięciem naukowo – technicznym Zespołu i Doktoranta, ale nie ma jej jak

wszechstronnie przetestować. Zagadnienie adekwatnego wyposażenia naszych laboratoriów akademickich jest problemem o charakterze ogólniejszym.

#### **7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?**

Praca dotyczy w zasadzie pełnego cyklu „produkcyjnego” kamery rentgenowskiej w rozwiązaniu laboratoryjnym. Cykl ten obejmuje, jak wspomniano poprzednio, wszystkie kluczowe etapy takie jak koncepcja, projekt, wybór optymalnych elementów, weryfikacja pod względem własnych zasobów technicznych i wykonalności projektu, koszty, zasoby sprzętowe, programistyczne, laboratoryjne, możliwości technologiczne i pomiarowe, konstrukcja całego złożonego urządzenia i jego testowanie. Korzystając z doświadczeń Autora zapisanych w rozprawie można zapewne re-skalować te działania do wyższego poziomu zaawansowania technicznego.

Przydatność rozprawy dla nauk technicznych jest znaczna z następujących powodów: opracowano model urządzenia funkcjonalnego, rozwiązano wiele problemów konstrukcyjnych, przetestowano różne opcje rozwiązań i technologii. Wyniki przedstawionych w rozprawie działań projektowych, konstrukcyjnych, teoretycznych i laboratoryjnych mogą być bezpośrednio wykorzystane do kontynuacji prac aplikacyjnych i wdrożeniowych.

#### **8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:**

a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy

b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania

c/ spełniająca wymagania

**d/ spełniająca wymagania z nadmiarem**

e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Wnioskuje o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów procesu doktoryzowania.

