

Dr hab. inż. Grzegorz Blakiewicz, prof. PG  
Politechnika Gdańska  
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki  
Katedra Systemów Mikroelektronicznych  
ul. Gabriela Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk  
tel.: 583482478  
e-mail: grzegorz.blakiewicz@pg.edu.pl

Gdańsk, 5.11.2025

SEKRETARIAT  
Rady Dyscypliny AEEiTK

Wpłynęło dnia ..... 12.11.2025 .....

Zarejestrowano pod nr ..... 510.3-8 /25 .....

Podpis .....  .....

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej pana mgr inż. Dominika Górni

pt. Pikselowe detektory promieniowania z in-situ przetwarzaniem sygnałów, i z wyzwalanymi zdarzeniami, zoptymalizowanymi pod kątem przepustowości sposobami odczytu

Podstawą opracowania recenzji jest Uchwała Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie nr 134 z dnia 25.09.2025. Ocena rozprawy została wykonana zgodnie z przepisami Ustawy z dnia 20.07.2018, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024, poz. 1571).

### 1. Temat pracy i jego znaczenie

Główną tematyką rozprawy doktorskiej są układy odczytu danych z pikselowych detektorów promieniowania realizowanych w formie specjalizowanych układów scalonych ASIC (ang. *Application-Specific Integrated Circuit*). Tego rodzaju detektory mają strukturę matryc składających się z wielu elementarnych komórek nazywanych pikselami, których zadaniem jest detekcja promieniowania i przetwarzanie go na postać sygnałów elektrycznych. Detektory w formie matrycowej, w odróżnieniu od detektorów pojedynczych, ze względu na możliwość przestrzennej reprezentacji cech promieniowania, umożliwiają implementację złożonych algorytmów wydobywających informacje istotne z punktu widzenia systemów pomiarowych rejestrujących eksperymenty naukowe, jak również wykrywania ważnych zdarzeń w systemach bezpieczeństwa czy też kontroli procesów technologicznych.

Tendencje rozwojowe współczesnych detektorów matrycowych narzucają konieczność stosowania matryc o coraz większych rozmiarach, sięgających kilku tysięcy pikseli w każdym rzędzie i kolumnie i w efekcie wytwarzających sygnały o liczbie dochodzącej do kilkudziesięciu milionów. Każdy z tych sygnałów może reprezentować kilka różnych parametrów zarejestrowanego promieniowania, takich jak np.: natężenie (wielkość zaabsorbowanej energii), znacznik czasu, czy też adres piksela. Ponadto część z tych parametrów, ze względu na sposób dalszego przetwarzania, może wymagać przesyłania w formie analogowej, a część w formie cyfrowej. Te wszystkie uwarunkowania oraz dodatkowe kryteria dotyczące dużej szybkości i wiarygodności rejestrowanych zjawisk sprawiają, że projektowanie systemów odczytu danych z detektorów matrycowych o dużych rozmiarach staje się istotnym

wyzwaniem. Autor we wstępie rozprawy wyjaśnia, że dotychczas stosowane układy odczytu danych są obciążone wieloma niedoskonałościami i ograniczeniami, które stają się coraz bardziej krytyczne w detektorach nowszych generacji cechujących się dużą rozdzielczością i szybkością rejestracji.

Autor rozprawy doktorskiej podjął się bardzo ambitnego zadania polegającego na opracowaniu systemu odczytu danych z detektorów matrycowych, który wyróżnia się cechami nieosiągalnymi w dotychczas stosowanych rozwiązaniach. Na szczególną uwagę zasługuje również to, że Autor nie tylko opracował teoretyczną koncepcję i zweryfikował ją symulacyjnie, ale również zaprojektował dwa wyspecjalizowane układy scalone (ASIC) i dokonał eksperymentalnych pomiarów prototypowych detektorów matrycowych wykorzystujących nowatorski system odczytu danych. Pierwszy prototyp, zawierający matrycę analogowych układów wstępnego przetwarzania sygnałów z pikselowych detektorów wraz z opracowanym systemem odczytu, przetestowano w rzeczywistym środowisku poddając go promieniowaniu X. W wyniku porównania rezultatów z wynikami wzorcowymi oceniono, że system odczytu działa poprawnie i spełnia stawiane wymagania. Drugi prototypowy ASIC zawierał tylko system odczytu, a detektory zostały zamienione obwodami emulującymi ich działanie. Ten prototyp pozwolił na znacznie szersze przebadanie właściwości samego systemu odczytu w bardzo różnych warunkach pracy detektora matrycowego. Autor odpowiednio programując obwody emulujące działanie poszczególnych detektorów w matrycy zbadał właściwości i wydajność systemu odczytu w typowych warunkach i w sytuacji przeciążenia nadmiarem przesyłanych danych. Uzyskane wyniki potwierdziły, że system wykazuje pożądane cechy, a mianowicie: zagwarantowanie takiego samego priorytetu dostępu do magistrali danych wszystkim pikselom w matrycy; inicjalizowana zdarzeniami transmisja danych; sprawiedliwe i efektywne rozstrzyganie konfliktów w dostępie do magistrali danych w sytuacji jednoczesnego wystąpienia zdarzeń. Należy podkreślić, że w dotychczas stosowanych systemach odczytu niemożliwe było osiągnięcie wszystkich wymienionych cech jednocześnie, co sprawiało, że znane rozwiązania detektorów matrycowych wykazywały istotne wady, takie jak między innymi niezdolność do rejestracji szybkich spontanicznych zdarzeń, czy też, generowanie zniekształceń geometrycznych związanych z ograniczonym czasem trwania ramki obrazu, itp.

Podjęta tematyka rozprawy jak również osiągnięte rezultaty mają bardzo duże znaczenie praktyczne, które wynika z kierunków rozwojowych współczesnych detektorów matrycowych. Ze względu na stosowanie coraz większych matryc o dużej szybkości rejestracji obrazu, systemy odczytu danych stają się tzw. „wąskim gardłem” ograniczającym postęp w tej dziedzinie. Na szczególne podkreślenie zasługuje duża rzetelność prac badawczo-projektowych opartych zarówno na wynikach symulacji komputerowych jak i rzeczywistych pomiarach. Dzięki dobrze przemyślanym pomiarom prototypowych układów scalonych, Autor w przekonujący sposób udowodnił, że możliwe jest w praktyce zbliżenie się do poziomu parametrów i właściwości, którymi cechują się idealne systemy odczytu danych.

## **2. Zakres i cel rozprawy doktorskiej**

Zakres, cel i spodziewane rezultaty prac zostały precyzyjnie sformułowane w podrozdziałach 1.2.2 oraz 1.2.3. W pierwszej kolejności Autor stawia pięć pytań badawczych dotyczących

istotnych kwestii związanych z opracowywanym nowatorskim systemem odczytu danych. W szczególności poruszane problemy dotyczą: 1) możliwości opracowania systemu odczytu, który pozwalałby przewyżżyć najważniejsze ograniczenia dotychczas stosowanych rozwiązań; 2) możliwości wykorzystania standardowych procesów projektowania układów scalonych z użyciem przemysłowych narzędzi typu CAD (ang. Computer-Aided Design) do fizycznej implementacji innowacyjnego systemu odczytu; 3) możliwości oceny efektywności nowego systemu odczytu; 4) sposobów zapewniających prawidłową współpracę w pełni asynchronicznego systemu odczytu z zewnętrznymi synchronicznymi systemami akwizycji danych oraz 5) oceny na ile da się uzyskać poprawę kluczowych parametrów w innowacyjnym systemie odczytu w porównaniu do znanych rozwiązań. Tak sformułowane pytania prowadzą do postawienia głównej hipotezy badawczej, a mianowicie:

„Nowa architektura odczytu cechuje się niemal idealnym, sterowanym zdarzeniami odczytem i asynchroniczną logiką arbitrażową z dostępem bez priorytetów, zaimplementowana jako drzewo decyzyjne oparte na przerzutnikach RS, zapewni znaczną poprawę działania detektorów promieniowania o wysokiej gęstości pikseli poprzez osiągnięcie wyższej przepustowości, mniejszych opóźnień i wyraźnie bardziej sprawiedliwego przetwarzania zdarzeń w porównaniu z tradycyjnymi architekturami odczytu opartymi na ramkach, odpytywaniu i kodowaniu priorytetów, umożliwiając w ten sposób powstanie nowej generacji detektorów pikselowych.”

Autor precyzuje również szczegółowe cele swoich prac badawczo-projektowych, które określił jako: 1) szczegółowy projekt koncepcyjny i analiza teoretyczna proponowanej architektury; 2) implementacja arbitrażu niepriorytetowego z wykorzystaniem asynchronicznych bloków logicznych; 3) kompleksowa ocena wydajności poprzez symulacje i weryfikacje eksperymentalne; 4) realizacja sprzętowa i prototypowanie układów ASIC oraz 5) ocena porównawcza i analiza wydajności.

W mojej opinii Autor poprawnie, w sposób bardzo szczegółowy i kompletny określił zakres swoich prac, których zasadniczym celem było opracowanie innowacyjnego systemu odczytu przewyższającego parametrami dotychczas stosowane rozwiązania. Należy również podkreślić, że Autor położył duży nacisk na praktyczne aspekty, a mianowicie, dostosowanie proponowanego systemu odczytu do wymogów procesów projektowania układów scalonych za pomocą narzędzi CAD oraz na pełną eksperymentalną weryfikację parametrów. Biorąc pod uwagę wymienione cechy, mogę z pełnym przekonaniem stwierdzić, że Autor w znaczący sposób przyczynił się do udoskonalenia i rozwoju pikselowych sensorów promieniowania, wyznaczając jednocześnie nowy kierunek ich rozwoju.

### **3. Struktura rozprawy doktorskiej i zawartość merytoryczna**

Rozprawa została napisana w języku angielskim i liczy 183 strony wraz ze wszystkimi wykazami i dodatkami. Przedstawiony materiał został podzielony na 6 głównych rozdziałów oraz wykaz literatury zawierający 131 pozycji. W wykazie literatury znajduje się 12 pozycji, w których pan mgr inż. Dominik Górni jest autorem lub współautorem. Pięć pozycji odnosi się do uzyskanych praw patentowych na system odczytu sterowany zdarzeniami z arbitrażem bez priorytetów dla wielokanałowych źródeł danych. Ochronę patentową uzyskano w Stanach Zjednoczonych

Ameryki, Europy, Australii, Japonii i w zakresie międzynarodowym. We wszystkich patentach Autor jest pierwszym współtwórcą wynalazku.

W pierwszym rozdziale Autor dokonuje zwięzłego przeglądu zastosowań detektorów promieniowania i podkreśla duże ich znaczenie we współczesnej astronomii, nauce i medycynie. Prezentowane są najważniejsze rodzaje detektorów i identyfikowane najistotniejsze wady i ograniczenia systemów odczytu danych. W drugiej części rozdziału Autor precyzyjnie określa tematykę i zakres rozprawy oraz formułuje pytania badawcze, na podstawie których stawia główną hipotezę rozprawy doktorskiej. Ponadto Autor wyznacza szczegółowe cele prac, które pozwolą mu zweryfikować hipotezę.

Rozdział drugi to obszerny przegląd literatury obejmujący: detektory promieniowania, obwody wstępnego formowania i przetwarzania sygnałów w pikselach, jak również systemy odczytu danych z matrycy detektorów. Autor klasyfikuje i omawia detektory, wyjaśniając podstawowe zjawiska fizyczne wykorzystywane w konwersji promieniowania na wielkości elektryczne. Podkreślane jest również znaczenie wstępnego przetwarzania sygnałów w pikselach, które ma duży wpływ na jakość rejestracji parametrów promieniowania. Bardzo ważny wątek tematyczny dotyczy systemów odczytu danych. Autor identyfikuje zalety i wady systemów obecnie stosowanych i zwraca uwagę, że w rozpatrywanych zastosowaniach pikselowych detektorów promieniowania bardzo korzystne cechy wykazują systemy odczytu sterowane zdarzeniami. Tej grupie systemów jest poświęcona szczegółowa dyskusja, w której uwypuklono między innymi problemy techniczne związane z fizyczną implementacją bloków funkcyjnych w układach scalonych. Tym samym Autor przygotowuje zasób wiedzy niezbędny do zrozumienia zasady działania i właściwości proponowanego przez siebie systemu o nazwie EDWARD (ang. Event Driven With Access and Reset Decoder).

W trzecim rozdziale omówiono system odczytu danych EDWARD oraz zaprezentowano projekty dwóch prototypowych układów scalonych, w których wykorzystano ten system. Cechami szczególnymi systemu EDWARD jest zdolność do inicjalizowania transmisji tylko po zarejestrowaniu przez piksel istotnych zdarzeń, uzyskując efekt swoistego filtrowania danych prowadzący do lepszego wykorzystania przepustowości magistrali i tym samym redukcji poboru mocy. Zasada sterowania transmisji zdarzeniami jest szczególnie korzystana w pewnych zastosowaniach, w których matryca pikseli generuje rzadkie macierze danych, co ma miejsce np. w fluorescencyjnym obrazowaniu rentgenowskim. Aby zagwarantować wysoką jakość i wiarygodność rejestracji promieniowania, przy opracowywaniu systemu EDWARD szczególny nacisk położono również na maksymalizację przepustowości, minimalizację opóźnień i zrównanie priorytetów dostępu do magistrali wszystkim pikselom w matrycy. W początkowych podrozdziałach Autor w szczegółowy sposób wyjaśnia: jak realizowane są operacje wykrywania istotnych zdarzeń w pikselu, jak odbywa się generowanie żądań dostępu do magistrali i ich zarządzanie gwarantujące zbliżony priorytet dostępu dla wszystkich pikseli. Znaczną część rozdziału poświęcono jednemu z ważniejszych zagadnień, a mianowicie mechanizmowi asynchronicznego rozstrzygnięcia konfliktów żądań dostępu do magistrali. Autor analizuje i omawia właściwości kilku zaproponowanych bloków służących do rozstrzygnięcia konfliktów i wyjaśnia w jaki sposób, wykorzystując te bloki, można zbudować optymalne drzewo decyzyjne zapewniające sprawiedliwy dostęp pikselom do magistrali.

Kolejne podrozdziały poświęcono projektowi optymalnego interfejsu, który zapewnia poprawną transmisję asynchronicznie generowanych danych przez matrycę pikseli za pomocą synchronicznej magistrali systemu akwizycji. Autor omawia również możliwe modyfikacje i rozszerzenia systemu EDWARD, między innymi wymienia hierarchiczne drzewa decyzyjne pozwalające na efektywniejszą obsługę transmisji w matrycach o dużych rozmiarach. Podrozdziały 3.6 i 3.7 zawierają szczegółowe omówienie projektów dwóch prototypowych układów scalonych, w których wykorzystano system EDWARD. Pierwszy prototyp o nazwie 3FI65P1 zawiera kompletny zestaw bloków analogowych i cyfrowych dostosowany do przetwarzania sygnałów z matrycy detektorów o rozmiarach 32x32, który jest przeznaczony do fluorescencyjnego obrazowania promieniowania rentgenowskiego. W tym układzie scalonym umieszczono również system odczytu EDWARD wraz z obwodami służącymi do programowania i kalibracji. Zasadniczym przeznaczeniem tego prototypu była demonstracja możliwości zastosowania systemu EDWARD w rzeczywistym detektorze pikselowym poddawany promieniowaniu. Drugi opracowany prototyp o nazwie EDWARD65P1 zawiera system odczytu EDWARD oraz obwody emulujące działanie poszczególnych detektorów w matrycy. Głównym przeznaczeniem tego prototypu było wyczerpujące przebadanie właściwości i wydajności systemu EDWARD w różnych warunkach pracy. Podsumowując zawartość rozdziału trzeciego należy podkreślić, że omawiane zagadnienia zostały przedstawione z dużą dbałością o szczegóły, które są kluczowe w wyjaśnieniu istoty proponowanego nowatorskiego rozwiązania.

Rozdział 4 dotyczy wstępnej, symulacyjnej fazy weryfikacji poprawności działania i oszacowania wydajności zaprojektowanych prototypowych detektorów. Ze względu na specyficzną ich budowę, konieczne było zastosowanie symulacji analogowo-cyfrowej, pozwalającej w wiarygodny sposób zbadać współdziałanie bloków analogowych oraz asynchronicznych i synchronicznych bloków cyfrowych. Z uwagi na fakt, że takie podejście do symulacji nie jest standardowe, a ponadto ma kluczowe znaczenie w ocenie poprawności działania proponowanych rozwiązań, Autor zamieszcza szczegółowe informacje o modelowaniu bloków funkcyjnych, zastosowanych algorytmach testowania i sposobie weryfikacji poprawności uzyskanych wyników. Już na etapie symulacyjnym Autor może wykazać, że zaprojektowane układy scalone działają poprawnie, a uzyskane parametry potwierdzają korzystne cechy systemu EDWARD, a mianowicie: dużą szybkość transmisji danych z poszczególnych pikseli, która w niewielkim stopniu zależy od umiejscowienia (adresu) piksela w matrycy oraz, że asynchroniczne drzewo decyzyjne rozwiązuje konflikty bez faworyzowania określonych ścieżek lub lokalizacji pikseli.

Wyniki pomiarów opracowanych prototypów przedstawiono w rozdziale 5. Rozdział ten zawiera najważniejsze informacje o zastosowanych stanowiskach pomiarowych oraz metodach pomiaru. Prototyp o nazwie 3FI65P1 w połączeniu z półprzewodnikowym sensorem wykorzystano w obrazowaniu promieniowania rentgenowskiego. Przeprowadzone wstępne pomiary wykazały, że analogowo-cyfrowa architektura spełnia wymagania dotyczące założonej rozdzielczości energetycznej oraz, że sam system odczytowy EDWARD jest w stanie poprawnie działać w warunkach napromieniowywania wiązką promieniowania X. W drugim prototypie o nazwie EDWARD65P1 testowano właściwości systemu odczytu EDWARD. W pierwszej fazie zweryfikowano czy cyfrowe obwody emulujące działanie detektorów

promieniowania mają pożądane charakterystyki zgodne z charakterystykami źródeł promieniowania. Po upewnieniu się, że uzyskano założone parametry emulatorów, doświadczalnie zweryfikowano działanie systemu odczytu EDWARD programując różne scenariusze rejestrowanego promieniowania. Wyniki pomiarowe w pełni potwierdziły funkcjonalność systemu EDWARD i jego korzystne właściwości, które wcześniej zostały zweryfikowane symulacyjnie.

W ostatnim 6 rozdziale Autor podsumowuje swoje osiągnięcia podkreślając rzetelność swoich prac badawczo-projektowych, które nie tylko opierały się na rozważaniach teoretycznych ale również zostały zweryfikowane symulacyjnie oraz za pomocą pomiarów prototypowych układów scalonych. W kolejnym podrozdziale Autor w metodyczny sposób zestawia kwestie poruszane w poszczególnych pytaniach badawczych z rezultatami uzyskanymi w ramach postawionych celów, tym samym w sposób nie budzący wątpliwości wykazuje, że postawiona hipoteza została udowodniona. Rozdział ten zawiera również cenne podsumowania na temat najważniejszych osiągnięć i ich znaczenia naukowego na tle znanych rozwiązań. Końcowe dyskusje poruszają również ograniczenia i wyzwania dotyczące dalszych prac nad proponowanym systemem EDWARD. Dyskutowane są również możliwości innych mniej oczywistych zastosowań i kierunków rozwoju. Takie szerokie ujęcie tematu jest bardzo cenne dla kontynuatorów prac nad systemem EDWARD.

#### **4. Ogólna ocena rozprawy doktorskiej**

Autor bardzo wnikliwie przeanalizował dotychczasowy stan techniki z dziedziny pikselowych detektorów promieniowania, a w szczególności dostrzegł istotne ograniczenia stosowanych systemów odczytu danych. W odpowiedzi na zidentyfikowane wady i ograniczenia, zaproponował innowacyjny system EDWARD, którego parametry pozwalają zbliżyć się do poziomu charakteryzującego niemalże idealny system odczytu danych. Autor weryfikuje praktycznie efektywność działania systemu EDWARD za pomocą serii symulacji i pomiarów prototypowych sensorów matrycowych o niewielkich rozmiarach 32x32 pikseli. Należy jednak podkreślić, że w końcowych dyskusjach Autor przyznaje, że chociaż praktyczna weryfikacja dotyczyła relatywnie małych matryc, to zastosowanie systemu EDWARD, z ewentualnymi udoskonaleniami, powinna umożliwić efektywną transmisję z matryc o dużej rozdzielczości. Moim zdaniem teza badawcza sformułowana w rozprawie została w pełni udowodniona. Ważniejsze wyniki prac pana mgr inż. Dominika Górni zostały zamieszczone w 12 publikacjach, w tym w 4 czasopismach *Journal of Instrumentation* (IF=1.3) oraz *Journal of Synchrotron Radiation* (IF=2.4), ponadto uzyskał on 5 praw patentowych. Biorąc pod uwagę, że główny wysiłek Autora był skierowany na opracowanie i praktyczną weryfikację skomplikowanego systemu EDWARD, oceniam osiągnięcia publikacyjne jako wystarczające.

Moim zdaniem jakość uzyskanych rezultatów, sposób ich prezentacji i znaczenie praktyczne przeprowadzonych prac badawczo-projektowych pozytywnie wyróżnia się na tle typowych osiągnięć prezentowanych w rozprawach doktorskich.

## 5. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pana mgr inż. Dominika Górni pt. „Pikselowe detektory promieniowania z in-situ przetwarzaniem sygnałów, i z wyzwalanymi zdarzeniami, zoptymalizowanymi pod kątem przepustowości sposobami odczytu” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą z dnia 20.07.2018, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wniosuję do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

Ponadto wniosuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej. Swój wniosek uzasadniam ponadprzeciętnym poziomem osiągnięć naukowo-projektowych oraz dorobkiem publikacyjnym pana mgr inż. Dominika Górni. Należy podkreślić, że prace badawczo-projektowych zostały przeprowadzone z dużą rzetelnością, Autor nie ograniczył się tylko do rozważań teoretycznych ale dokonał doświadczalnej weryfikacji za pomocą pomiarów prototypowych układów scalonych, które sam zaprojektował. Wyniki prac zostały opublikowane w renomowanych czasopismach, a mianowicie: 3 publikacje w *Journal of Instrumentation* (IF=1.3), w których pan mgr inż. Dominika Górni jest pierwszym współautorem oraz jednej publikacji w *Journal of Synchrotron Radiation* (IF=2.4), w której jest trzecim współautorem. O dużym znaczeniu praktycznym osiągnięć pana mgr inż. Dominika Górni świadczy fakt, że jest on pierwszym współtwórcą praw patentowych na system odczytu sterowany zdarzeniami z arbitrażem bez priorytetów dla wielokanałowych źródeł danych, które przyznano w Stanach Zjednoczonych Ameryki, Europie, Australii, Japonii i w zakresie międzynarodowym.

Grzegorz Blahiewicz