



Rzeszów, 02.12.2024 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Michała Babija
pt. „Wielokanałowy system pomiaru ładunków w zakresie femtokulombów
do zastosowań w detektorach promieniowania rentgenowskiego”**

Doktorat wdrożeniowy

Promotor: prof. dr hab. inż. Karol Malecha

Recenzja przygotowana na podstawie

***Uchwały nr 26/2/RDND02/2024-2028 Rady Dyscypliny Naukowej
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
z dnia 14 października 2024 r.***

***w sprawie wyznaczenia recenzentów w postępowaniu w sprawie nadania stopnia
doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie naukowej
automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne
Panu mgr. inż. Michałowi Babijowi***

1. Charakterystyka tematyki rozprawy doktorskiej

W dniu 28 października 2024 r. otrzymano do recenzji pracę mgr inż. Michała Babija pt. „Wielokanałowy system do pomiaru ładunków w zakresie femtokulombów do zastosowań w detektorach promieniowania rentgenowskiego”, która stanowi podstawę prowadzonego na Politechnice Wrocławskiej (PWr) postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Postępowanie dotyczy doktoratu wdrożeniowego, którego tematyka została ulokowana w obszarze konstrukcji i praktycznego zastosowania detektorów cząstek elementarnych (MPGD – ang. *Micro-Pattern Gaseous Detectors*).

Istotą pracy jest synteza nowoczesnych urządzeń, wykorzystywanych do rejestracji naładowanych cząstek, które między innymi charakteryzują się dużą rozdzielczością przestrzenną, wysoką odpornością na promieniowanie oraz możliwością pracy przy dużych częstościach oddziaływań. W tym obszarze, Autor skupił swoją szczególną uwagę na strukturach gazowych powielaczy elektronów (GEM – ang. *Gas Electron Multiplier*), które aktualnie stanowią najczęściej stosowane konstrukcje detektorów cząstek elementarnych. Jest to spowodowane tym, że otwory detekcyjne mikrostruktur GEM zapewniają dokładną lokalizację powstałych elektronów, co prowadzi do uzyskania dużej rozdzielczości przestrzennej tego typu urządzeń. Materiały używane w ich konstrukcji są odporne na uszkodzenia powodowane promieniowaniem, co jest istotne w eksperymentach wysokich energii. Ponadto, struktury gazowych powielaczy elektronów mogą funkcjonować przy dużych częstotliwościach, dzięki czemu nadają się do rejestracji torów naładowanych cząstek w eksperymentach o znacznej intensywności zdarzeń, jakie między innymi są prowadzone w Wielkim Zderzaczu Hadronów (LHC – ang. *Large Hadron Collider*). Dodatkowo, zastosowanie wielu warstw takich struktur zmniejsza ryzyko wyładowań i awarii urządzeń, co umożliwia ich zastosowania w środowisku, w którym prace naprawcze są znacząco utrudnione. W tym obszarze możliwe jest ich stosowanie np. do detekcji promieniowania rentgenowskiego i gamma w instrumentach lokowanych w przestrzeni kosmicznej. Wysoki poziom czułości detektorów GEM umożliwia także ich zastosowanie w obrazowaniu medycznym, np. w tomografii emisyjnej (PET – ang. *Positron Emission Tomography*) oraz w radiografii rentgenowskiej, gdzie do syntezy obrazów o dużej rozdzielczości stosuje się bezpieczne dla pacjenta dawki promieniowania. Te same zalety są także wykorzystywane w systemach skanowania bagażu i kontroli bezpieczeństwa, gdzie istota gazowych powielaczy elektronów jest wykorzystywana do detekcji materiałów wybuchowych i promieniotwórczych, co dodatkowo stymuluje rozwój badań materiałowych (analiza struktury materiałów, np. poprzez detekcję promieniowania rentgenowskiego).

Dzięki wymienionym cechom, konstrukcja detektorów MPGD ze strukturami gazowych powielaczy elektronów odgrywa kluczową rolę w rozwoju współczesnych technologii wykonywania ich komponentów oraz technik detekcyjnych, jakie znajdują praktyczne zastosowanie w fizyce cząstek elementarnych, astrofizyce oraz w medycynie. To sprawia, że przedstawioną do oceny pracę charakteryzuje wysoki stopień innowacyjności i oryginalności w zakresie podjętego tematu.

2. Charakterystyka układu pracy, struktury podziału treści, kolejności rozdziałów

Do recenzji dostarczono pracę w formie książkowej, której główną (stanowiącą przedmiot recenzji) treść zawarto na 116 stronach, wliczając w to:

- 20 stron z numeracją rzymską, obejmujących tytuł, podziękowania, polsko i anglojęzyczne streszczenie oraz spisy: treści, rysunków, tabel i akronimów;
- 96 stron z numeracją arabską, na których zawarto treść pięciu numerowanych rozdziałów oraz bibliografię.

Uzupełnienie pracy stanowią 93 strony dodatku, w którym zawarto kopie sześciu wysoko punktowanych artykułów z czasopism naukowych zawartych w bazie WoS (jednego w procesie recenzji i pięciu opublikowanych, w których Doktorant jest jednym z autorów), a także oświadczenia współautorów.

Oceniając organizację recenzowanego materiału można stwierdzić, że układ pracy, jej struktura, podział treści i kolejność rozdziałów są prawidłowe, a przedstawione założenia zostały odpowiednio sformułowane w tekście. Pewną nieścisłość w tym względzie wprowadza połączenie różnych numeracji stron, co powoduje, że w spisie treści pojawiają się oznaczenia XI, XVII oraz XIX. W ocenie recenzenta zastosowanie jednolitej numeracji arabskiej byłoby wystarczające dla prawidłowego poruszania się po tekście (także w jego elektronicznej wersji). Ponadto, drobnym błędem technicznym w podziale treści jest pozostawienie samodzielnego rozdziału 2.2.1 bez (co najmniej) jego kontynuacji pod numerem 2.2.2. Poza tym, dobrą praktyką w pracach technicznych jest zamieszczanie (np. w jednej sekcji) wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów. W recenzowanej pracy Autor zamieścił tylko jedną część takiego wykazu w postaci spisu akronimów. Wprawdzie aparat matematyczny pracy nie jest rozbudowany (Rozdział 3.3), to jednak dochowanie tej zasady ułatwiłoby kontrolowanie jednolitego oznaczania zmiennych we wzorach, w tekście, na rysunkach i w tabelach.

3. Ocena merytoryczna

Przedstawiona do oceny praca została wpisana w niełatwą formułę doktoratu wdrożeniowego, w którym łączone są badania naukowe z praktycznymi potrzebami otoczenia społeczno-gospodarczego. W tym kontekście Autor postanowił rozwiązać oryginalny problem naukowy, którego nadrzędnym celem było „*opracowanie konstrukcji i technologii wytwarzania miniaturowego i wielokanałowego systemu pomiaru ładunków oraz miniaturowych płyt odczytu do zastosowań w detektorach promieniowania rentgenowskiego*”. Tak sformułowane zagadnienie badawcze niewątpliwie wpisuje się w potrzeby komercyjnych i naukowych misji kosmicznych ze względu na ich niski koszt i różnorodność zastosowania. Kluczową rolę odgrywa tutaj konstrukcja nanosatelitów, w której należy uwzględnić wiele specyficznych potrzeb i ograniczeń, między innymi wynikających z ich niewielkich rozmiarów geometrycznych, zasilania zapewniającego np. nieprzerwaną kilkuletnią pracę, prawidłowości pracy pokładowych systemów komunikacji

i sterowania, wymagającego środowiska pracy, a także użytecznego ładunku (sensorów, kamer, aparatury badawczej i in.). Przykłady takich działań można zaobserwować we współczesnych misjach o różnym zastosowaniu, np. w zakresie: obserwacji pogody kosmicznej (projekt SWING Europejskiej Agencji Kosmicznej – ang. *Space Weather Ionosphere Nanosat Generation*), monitorowania zakłóceń pasma radiowego (N3SS – ang. *Nanosat Network for Spectrum Surveillance*), a także nowoczesnych technik komunikacyjnych (GenMat-1 i NoClip-1). W tym względzie tematyka i cel pracy, związany z miniaturyzacją systemu pomiarowego do zastosowań w detektorach promieniowania rentgenowskiego, został szczególnie ukierunkowany przez Autora na praktyczne zastosowanie w obszarze nanosatelitów o rozmiarach 1 U ($10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$), które znajdują coraz większe zastosowanie w badaniach kosmicznych i edukacji. Mogą o tym świadczyć różne inicjatywy, np. NASA w ramach projektów CubeSat, CEPESA SAT-1, czy Spacemanic Veronika.

Podbudowę teoretyczną dla omawianych zagadnień stanowiła charakterystyka komponentów, które determinują proces syntezy zapowiedzianego w temacie systemu pomiarowego (Rozdział 2). W tym względzie w pierwszej kolejności Autor dokonał odpowiedniej charakterystyki typów gazowych detektorów cząstek elementarnych, których miniaturyzacja pozwala na ich stosowanie w niewielkich instalacjach naukowych i przemysłowych (Rozdział 2.1). Po krótkim rysie historycznym, w tej części pracy odnotowywany jest przegląd konstrukcji oraz technologii wytwarzania komponentów detektorów MPGD. W pierwszej kolejności uwaga została zwrócona na gazowe struktury mikro siatek (Micromegas, Micromegas Bulk, InGrid). Następnie szczegółowo zostały omówione znane struktury gazowych powielaczy elektronów, które stanowią główny obszar prac badawczych Autora. W tym przypadku Doktorant zwrócił swoją uwagę na to, że folie typowych komercyjnie dostępnych detektorów GEM są produkowane zaledwie przez kilka firm na świecie, na podstawie opatentowanej metody trawienia miedziowanej folii poliimidowej (MCV – ang. *Micro Chemical Vias*). W kolejnej omawianej modyfikacji detektorów typu THGEM (Thick GEM, znanych także pod nazwą LEM – ang. *Large Electron Multiplier*) Autor zwrócił uwagę na możliwość wiercenia (a nie trawienia) otworów w tanim materiale podłożowym, jakim jest typowy laminat miedziowany FR4. W tym jednak przypadku uzyskiwana niewielka rozdzielczość przestrzenna tych detektorów (o rząd mniejsza od klasycznych struktur GEM), ogranicza możliwości ich zastosowania. W dalszej kolejności zostały omówione struktury detektorów budowanych z wykorzystaniem szkła (znane pod nazwą Glass GEM, G-THGEM lub G-GEM), a także z ceramiki (Ceramic GEM) z wykorzystaniem technologii LTCC (ang. *Low Temperature Cofired Ceramics*). Przedmiotowy przegląd uzupełniono omówieniem struktur detektora studniowego (μRWell) oraz μPIV . W konstrukcji typu μRWell stosowane są warstwy o dużej rezystancji powierzchniowej, które ograniczają powstawanie dużych wyładowań, zapewniając zwiększenie wzmocnienia oraz niezawodności działania detektora. Z kolei w konstrukcji typu μPIC cały wysokoczuły detektor można wykonać z wykorzystaniem technologii PCB na tanim laminacie FR4.

W przeglądowej części pracy Autor słusznie skupił swoją uwagę także na elektronicznym układzie pomiaru ładunków stosowanym w detektorach GEM (Rozdział 2.2). W tym względzie szczegółowo porównał parametry oraz zalety i wady układów scalonych stosowanych w detektorach GEM (AVP25, VMM3, TIGER oraz GEMROC). Mając na uwadze istotę realizowanego doktoratu wdrożeniowego, a także praktyczne zastosowanie autorskiego rozwiązania

mikrosystemu w satelitach o rozmiarach 1 U, w opinii recenzenta Autor słusznie rozważył komercyjną dostępność układów ASIC, ich sposób montażu, szybkość działania czy pobór mocy. Rozważania te zostały uzupełnione analizą dwóch opracowanych systemów wykorzystywanych do budowy detektorów GEM. Pierwszy z nich (SRS) został opracowany na potrzeby projektów CERN dla rozległych instalacji zawierających tysiące układów odczytu. Pomimo tego, że ten system może zostać skonfigurowany do pracy z jedną płytą odczytu, to jednak nie nadaje się on do planowanych przez Autora zastosowań kosmicznych. Alternatywę dla autorskiego rozwiązania może stanowić system detektora 100x100 mm², jaki został zbudowany przez zespół z AGH, z dwoma układami ASIC GEMROC. W tym jednak względzie, pomimo kilku zalet, Autor słusznie zauważa, że nadal poszukiwane jest rozwiązanie o mniejszych rozmiarach geometrycznych.

Podsumowanie dokonanego przeglądu stanowi omówienie konstrukcji i technologii wykonania struktur zbierających ładunki (CCS – ang. *Charge Collection Structure*), czyli tzw. płyt odczytu (Rozdział 2.3). W tym względzie Autor dokonał analizy jednowymiarowych przewodzących struktur paskowych prostych i zygzakowatych, koncepcji dwuwymiarowych z paskami XY (w tym także rezystancyjnych, które zapewniają zmniejszenie liczby wymaganych kanałów), przewodzących paskowo-pikselowych oraz pikselowych, a także struktur wielowymiarowych XYU i UVW, które wpływają na lepszą rozdzielczość przestrzenną oraz częstość zdarzeń detektora. Z dokonanego przeglądu wynika, że płyty odczytu typowo wykonuje się z powszechnie dostępnych laminatów miedziowanych FR4 i folii poliimidowych. Niemniej jednak rozwiązania te nie są odporne na wysoką temperaturę, materiał podłożowy utrudnia wykonanie hermetycznego detektora, a sama metoda produkcji jest chroniona patentem.

Mając na uwadze omówione zagadnienia, dla osiągnięcia nadrzędnego celu pracy, w opinii recenzenta jak najbardziej słuszna wydaje się realizacja cząstkowych zadań omawianych w kolejnych rozdziałach pracy. W pierwszej kolejności należy do nich zaliczyć proces syntezy elektronicznego układu pomiaru ładunków, dedykowanego dla konstruowanego detektorem GEM (Rozdział 3). Podstawą dla realizacji autorskiej koncepcji było przyjęcie założeń, które wynikały z dokonanego przeglądu literatury, doświadczeń Doktoranta zebranych w środowisku naukowym i przemysłowym, a także planowanego zastosowania detektora w aplikacjach kosmicznych (np. w postaci pojedynczego modułu nanosatelity CubeSat o rozmiarze 1 U). Na podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorant zaplanował modułową konstrukcję swojego urządzenia, która umożliwi konfigurację większych rozmiarów geometrycznych detektora GEM, żeby w ten sposób uzasadnić przyjętą nazwę SGEM (ang. *Segmental GEM*). Propozycja Doktoranta stanowi odpowiedź na ograniczenia aplikacyjne omówionych systemów SRS oraz AGH.

Zaproponowana struktura detektora SGEM wynika z przedstawionego schematu blokowego, w którym wyodrębniono kilka bloków funkcjonalnych: paskową lub pikselową płytę odczytu, moduły przetwornika ładunków i zasilania, układ sterujący z interfejsem komunikacyjnym do komputera oraz płytę główną (bazową). W tym miejscu należy zaznaczyć, że w pracach badawczych Autor skorzystał z komercyjnie dostępnych zasilaczy niskiego (DC) i wysokiego napięcia (HV), a także układu sterującego, który stanowił cyfrowy system akwizycji danych (zbudowany na układzie FPGA Xilinx Artix 7), jaki jest częścią detektora V2.0 firmy Techtra.

W kontekście koniecznej do osiągnięcia miniaturyzacji urządzenia, a także pracy projektowanego detektora SGEM w trudnych warunkach środowiskowych (np. w zastosowaniach kosmicznych), słusze okazało się wykonanie jego niektórych komponentów z wykorzystaniem technologii LTCC. W tym przypadku, w pierwszej kolejności Autor podjął trud opracowania i wykonania ceramicznych układów wejściowych (Rozdział 3.3), w konstrukcji których kluczowy okazał się problem zastosowania zagrzebanych rezystorów o dużej rezystancji (rzędu 0,25-1 M Ω oraz 25-100 M Ω), bez stosowania procesu ich laserowej korekcji (Rozdział 3.2). W ramach tych prac badawczych Autor dokonał charakteryzacji wybranych do przedmiotowego projektu past rezystancyjnych (DuPont serii 1700, 2000 i CF000 oraz Herause serii 7000), korzystając z bardzo dobrego zaplecza aparaturowego i wieloletnich doświadczeń Katedry Mikrosystemów (KM) Politechniki Wrocławskiej (m. in. w zakresie procesu DP951). Wykonanie tych prac zostało podyktowane tym, że wybrane pasty są dedykowane do wykonywania rezystorów powierzchniowych, a nie zagrzebanych. W efekcie tego etapu zostały opracowane i wykonane w technologii LTCC precyzyjne układy wejściowe, które zapewniają prawidłową polaryzację części pomiarowej systemu z uwzględnieniem jej zabezpieczenia przed nadmiernym prądem. Sporym problemem tych prac technologicznych okazały się rozwarstwienia i delaminacje wewnątrz pięciowarstwowych ceramicznych układów wejściowych, w których rezystory polaryzujące i zabezpieczające wejścia systemu pomiarowego zostały wykonane na trzech z nich. Ich wartości zostały wyznaczone na podstawie prostych obliczeń wynikających z wcześniej przyjętych założeń projektowych detektora SGEM. W tym względzie Autor wykazał się dociekliwością w pokonaniu tych problemów dla ostatecznego zapewnienia pełnej integralności wykonywanych układów, w których rezystancje zagrzebanych wysokoomowych rezystorów mieściły się w pierwotnie założonych granicach odchyień standardowych ich wartości. Należy tutaj podkreślić, że w projektowanym układzie Doktorant zastosował złącze (FX10A-168P-SV), które jest typowo stosowane w detektorach opracowanych przez CERN i inne ośrodki naukowe. Takie podejście ma zapewnić swego rodzaju kompatybilność autorskiej konstrukcji z alternatywnymi rozwiązaniami dostępnymi w innych ośrodkach badawczych.

Układ elektroniczny systemu pomiarowego detektora SGEM został zaprojektowany z wykorzystaniem dwóch modułów umieszczonych na osobnych wielowarstwowych obwodach drukowanych wykonanych w technologii PCB (Rozdział 3.4). W pierwszym z tych układów (w module przetwornika ładunków oznaczonym jako „SGEM 256CH READOUT Version: 1.0, 2022, TTA TECHTRA”) przewidziano zastosowanie 256-kanalowego przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC) Texas Instruments (TI) DDC2256A, co zapewnia po 128 linii sygnałowych na oś X i Y detektora SGEM. Pomijając rozwiązanie opracowane przez CERN, autorski układ pomiarowy charakteryzuje największa liczba kanałów spośród dostępnych urządzeń tego typu. Ze względu na jego wysoką skalę integracji, ten moduł elektroniczny Doktorant opracował z wykorzystaniem dwunastowarstwowego obwodu drukowanego PCB. Na drugim – czterowarstwowym obwodzie drukowanym umieszczono szczegółowo opisane w pracy, kolejno uruchamiane bloki modułu zasilania i BIAS, które w efekcie mają zapewnić niezakłóconą pracę detektora pomiarowego. Na wyróżnienie w tym względzie zasługują ponadprzeciętne umiejętności Doktoranta dotyczące projektowania i montażu zaawansowanych układów elektronicznych.

W kolejnej części realizowanych prac badawczych, Autor dokonał charakterystyki procesu walidacji i uruchomienia poszczególnych bloków funkcjonalnych detektora GEM (Rozdział 3.5). Przedmiotowe działania zostały wykonane w komorze antyradiacyjnej w celu eliminacji zewnętrznych zakłóceń. W tym zakresie wpieryw szczegółowo przetestowano działanie bloków funkcjonalnych układu zasilania. W następnej kolejności wykonano pomiary w zakresie działania modułu przetwornika ładunków. Ten etap na początku wykonano pozostawiając niepodłączone układy wejściowe. W kolejnym kroku pomiary zrealizowano po podłączeniu autorsko opracowanej płyty odczytu PCB. W przeprowadzonych pomiarach dla każdego kanału wyznaczano amplitudę i wartość skuteczną szumu opracowanego detektora SGEM. Na tej podstawie możliwe było wyznaczenie dla każdego kanału odchylenia wartości mierzonego ładunku względem jego wartości średniej. Po wykonaniu tych czynności Autor dokonał pełnej integracji opracowanego detektora ze stosem trzech folii GEM, komorą gazową i dzielnikiem wysokonapięciowym, podłączonym do zewnętrznego zasilacza HV CEAN DT5470, na którego wyjściu skonfigurowano 7 poziomów napięcia wyjściowego, jakie zapewniają właściwą polaryzację poszczególnych elementów detektora. Na tej podstawie dokonano kondycjonowania pracy systemu pomiarowego z jednoczesną obserwacją zjawiska spontanicznych wyładowań wewnątrz detektora. Szkoda, że te wyniki – choć istotne z punktu widzenia delikatnej struktury detektora GEM – nie znalazły swojego odzwierciedlenia w tekście. W efekcie przeprowadzonych w tym etapie działań, Autor przedstawił w pracy wyniki przykładowego widma energetycznego zarejestrowanego przez detektor SGEM, a także radiogramy z eksperymentalnych prześwietleń, jakie zostały zrealizowane z wykorzystaniem lampy rentgenowskiej (MOXTEK Magnym TUB00083), która została skonfigurowana na pracę z niewielką mocą. Do rekonstrukcji obrazów wykorzystano aplikację i algorytm firmy Techtra, które są integralną częścią produkowanych przez tę spółkę detektorów GEM. Nie podważając w żaden sposób wartości naukowej recenzowanego dzieła, już na tym etapie pewien niedosyt może budzić przeprowadzona przez Autora jedynie jakościowa analiza obrazów zaprezentowanych w postaci eksperymentalnych radiogramów.

W ostatniej części pracy Autor omówił i dokonał porównania wyników prac z dwóch zrealizowanych projektów płyt odczytu typu XY, których potencjał może być wykorzystany w detektorach GEM o niewielkich rozmiarach geometrycznych (Rozdział 4). Pierwsze z tych płyt (Rozdział 4.1) wykonano z ceramiki LTCC w ramach prac badawczych, które dotyczyły syntezy modularnych detektorów GEM (MGEM – ang. *Modular GEM Detectors*). Przedsięwzięcie to było realizowane ze współudziałem Doktoranta w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju z Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój (POIR.04.01.02-00-0080/17). Z kolei druga płyta odczytu (Rozdział 4.2) została wykonana w technologii PCB dla celu jej wykorzystania z autorskim detektorem SGEM, jaki omówiono we wcześniejszej części pracy doktorskiej. Pomimo różnicy konstrukcyjnej i technologicznej opracowanych płyt odczytu, jak również wykorzystywanych z nimi detektorów, jednakowe rozmiary geometryczne ich aktywnego obszaru, a także zbliżony raster – zapewniły Autorowi porównanie uzyskanych wyników pomiarów.

Pierwszy z tych projektów dotyczył opracowania i wykonania płyt odczytu w technologii LTCC, która ma istotny potencjał do jej wykorzystania w trudnych warunkach środowiska kosmicznego, a ponadto może zapewnić pożądaną przez Doktoranta miniaturyzację części

detekcyjnej projektowanego urządzenia. Ze względu na dotychczasowy brak doniesień literaturowych na ten temat, Doktorant opracował płyty ceramiczne w dwóch rozmiarach aktywnego pola odczytu ($20 \times 20 \text{ mm}^2$ oraz $70 \times 70 \text{ mm}^2$) przy wielowarstwowym druku na pojedynczym podłożu (SS) oraz w strukturze wykonanej z wielu warstw folii LTCC (MS). Ostatecznie, ze względu na wykryte liczne zwarcia linii pomiarowych w próbkach SS, w finalnych badaniach wykorzystano testowe płyty odczytu LTCC wykonane metodą MS w dwóch rozmiarach $20 \times 20 \text{ mm}^2$ (o zmniejszonym rastrze) i $70 \times 70 \text{ mm}^2$, które porównywano z wynikami uzyskanymi dla komercyjnie dostępnej poliimidowej płyty CERN. W tym przypadku badania wykonano z wykorzystaniem komercyjnie dostępnego elektronicznego układu pomiarowego detektorów GEM firmy Techtra (GEM 256ch Readout V2.0). Działania te wymagały od Doktoranta dodatkowego opracowania i wykonania głównych (bazowych) płyt PCB oraz adaptera dla próbek o rozmiarach $20 \times 20 \text{ mm}^2$, które zapewniły integrację całego detektora testowego. Na podkreślenie zasługuje fakt dopracowania przez Doktoranta procesu technologicznego w zakresie wytwarzania ceramicznych płyt odczytu, których jakość, rozmiary i wytrzymałość dają szansę na komercjalizację w zakresie ich zastosowania w misjach kosmicznych.

W drugim przypadku zaprojektowane przez Doktoranta w Altium Designer czterowarstwowe płyty odczytu PCB, dedykowane dla autorskiego detektora SGEM, zostały wytworzone na typowym laminacie miedziowanym FR4 przez zewnętrzną europejską firmę specjalizującą się w produkcji obwodów drukowanych (Multi Board Ltd.). Ten wybór jest słuszny zarówno w kontekście jakości wykonywania precyzyjnych obwodów PCB, jak również w odniesieniu do planu komercjalizacji autorskiego systemu pomiarowego, co z kolei jest istotne dla doktoratu wdrożeniowego. Wykonany projekt płyt odczytu PCB zapewnił Doktorantowi uzyskanie porównywalnej rozdzielczości przestrzennej w odniesieniu do komercyjnych rozwiązań CERN. Ponadto, w konstrukcji Doktoranta przewidziano możliwość łączenia opracowanych płyt w większe płaszczyzny detekcyjne, znacząco rozszerzając potencjalny obszar ich praktycznego zastosowania.

Ze względu na wykorzystanie różnych elektronicznych układów (MGEM dla płyt LTCC i SGEM dla próbek PCB), oddzielnie w obu omawianych przypadkach Doktorant przeprowadził finalne badania porównawcze w zakresie: ilościowej charakterystyki szumowej detektora z wykonanymi płytami odczytu, jakościowej oceny uzyskanych radiogramów w złożonych systemach pomiarowych, a także rozkładu ładunków pomiędzy elektrodami opracowanych płyt odczytu w odniesieniu do komercyjnego rozwiązania CERN. Przeprowadzona analiza uzyskanych wyników w zakresie opracowanych płyt odczytu pozwoliła Doktorantowi na właściwe syntetyczne podsumowanie zalet i wad obu zrealizowanych projektów (Rozdział 4.3). Odniesienie tej oceny do całej koncepcji pozwoliło na podsumowanie (Rozdział 5), którego kluczowym wnioskiem jest to, że możliwe było dokonanie syntezy wielokanałowego systemu pomiarów ładunków w zakresie femtokulombów, który w finalnej konstrukcji detektora promieniowania rentgenowskiego SGEM ma potencjał aplikacyjny w obszarze projektów kosmicznych, takich np. jak jednomodułowe nanosatelity. Takie stwierdzenie mogłoby stanowić tezę, której nie wyodrębniono w recenzowanym dziele. Niemniej jednak, ten brak w żaden sposób nie obniża wartości naukowej wykonanych i opisanych prac.

4. Charakterystyka doboru i wykorzystania źródeł

W trakcie kolejno omawianych zagadnień, Autor przywołał odpowiednią liczbę 96 pozycji prawidłowo wyselekcjonowanych i aktualnych odnośników literaturowych, do których przede wszystkim należy zaliczyć artykuły w czasopismach naukowych, komunikaty konferencyjne, monografie, a także dokumentacje techniczne czy doniesienia internetowe. Największa część z tych źródeł (do pozycji [79]) znalazła swoje odzwierciedlenie w ramach tematycznego przeglądu, jaki dokonano w rozdziale 2. W trakcie prowadzonej narracji, szczególnie w obszarze autorskiej części rozdziału 3 i 4, Doktorant przywołał także swój współautorski dorobek publikacyjny złożony z sześciu wysoko punktowanych artykułów z czasopism naukowych zawartych w bazie WoS (jednego w procesie recenzji [81] i pięciu opublikowanych [32, 80, 90, 91, 93]). Jak już wspomniano, kopie tych artykułów (razem z oświadczeniami współautorów) stanowią 93 strony dodatku zawartego na końcu pracy doktorskiej. Drobne niedociągnięcie w tym obszarze stanowi na s.33 jedno nieoznaczone powołanie [?], które najprawdopodobniej powinno się odnosić do pozycji [81], jaka znajduje się w spisie literatury, ale jeszcze nie została opublikowana.

5. Uwagi ogólne

Na podstawie lektury pracy doktorskiej, w opinii recenzenta nasuwają się uwagi, które powinny zostać wyjaśnione przez Autora.

1. W początkowej części pracy brakuje uogólnionego schematu blokowego zarówno gazowego detektora cząstek elementarnych (szczególnie z wykorzystaniem gazowych powielaczy elektronów), jak również całego systemu pomiarowego, który miał podlegać miniaturyzacji m. in. dla celu jego zastosowania w branży kosmicznej. Takie schematy, po pierwsze, pozwoliłyby na łatwe definiowanie kluczowych elementów omawianych w poszczególnych częściach pracy, a także odniesienie się do miejsc, które były istotne z punktu widzenia celu realizowanych badań. Po drugie, uogólnienie konstrukcji detektorów cząstek elementarnych łatwiej byłoby skorelować z zaproponowanymi schematami blokowymi autorskiej koncepcji SGEM (Rys. 3.1 i 3.2).
2. W odniesieniu do publikacji [29] jakie ma zalety/wady opracowana przy współudziale Doktoranta ceramiczna struktura wzmacniająca wykonana w technologii LTCC, której szczegóły można np. odnotować w publikacji [32]? Jakie są możliwości wykorzystania tej koncepcji w omawianym miniaturowym systemie pomiarowym?
3. W trakcie przeglądu elektronicznych układów scalonych wykorzystywanych do pomiaru ładunku w detektorach GEM (Rozdział 2.2), podczas omawiania modelu APV25 Autor wskazał poziom szumu wejściowego standardowej konstrukcji detektora o rozmiarach 100x100 mm² przy pojemności wejściowej 0 pF. Podobna stwierdzenie powtarza się podczas charakterystyki układu scalonego VMM3 z tą uwagą, że pojemność wejściowa 0 pF jest odnoszona do odłączonego detektora. W praktyce nie istnieje możliwość uzyskania zerowej pojemności. W każdym nawet najbardziej zaawansowanym technicznie projekcie zawsze występuje pewna

wartość pojemności pasożytniczej wynikająca z fizycznych właściwości zastosowanych elementów i wykonanych połączeń (nawet przy odłączonych podzespołach). Proszę o komentarz w tej kwestii.

4. Dlaczego w pracy doktorskiej (Rozdział 3.3), pomimo zastosowania 256-kanalowego przetwornika analogowo-cyfrowego TI DDC2256A, odniesienie zostało zrobione do 64-kanalowego modelu TI DDC264, który jednak ma inne parametry ADC?
5. Jakie jest powiązanie opracowanego przez Autora i opisanego w rozprawie doktorskiej modułu do przekształcania ładunku na wartość cyfrową (Rozdział 3.4) z opracowanym na tym samym układzie TI DDC2256A rozwiązaniem zawartym w specyfikacji: *TECHTRA: 256 Channel Readout Board V2.0 for GEM Detector, User's Manual, Rev. 1, Techtra 2021*? Proszę także o odniesienie się Autora do Jego wkładu w rozwiązanie firmowe z punktu widzenia zrealizowanego doktoratu wdrożeniowego. Pytanie zostało sprowokowane tym, że – po pierwsze - Autor w opublikowanych artykułach każdorazowo wskazuje swoją podwójną afiliację (jedna z nich dotyczy firmy Techtra), a po drugie – wykonany w ramach doktoratu układ jest oznaczony jako „*SGEM 256CH READOUT Version: 1.0, 2022, TTA TECHTRA*” (Rys. 3.12-b). Ponadto, w czasie przygotowywania niniejszej recenzji trudno było dokonać nawet częściowej weryfikacji tych informacji (np. na podstawie odniesienia [82]), ponieważ strona www spółki Techtra (<http://techtra.pl>) była całkowicie blokowana przez oprogramowanie antywirusowe, co było spowodowane zagrożeniem przez zawarte na niej złośliwe oprogramowanie typu JavaScript zakwalifikowane jako koń trojański JS/Agent.SEC.
6. Omawianie szczegółów elektronicznego układu pomiarowego (Rozdział 3.4) jest mało zrozumiałe, ponieważ w pracy doktorskiej brakuje (np. w dodatkach) jego schematu. Jeżeli układ ten nie jest chroniony prawami osób trzecich (np. firmy Techtra), to powinien on zostać zamieszczony, przynajmniej w kluczowych częściach, których dotyczy przedmiotowy opis. Ponadto, czytelność wielu szczegółów technologicznych zawartych w układach wykonanych przez Autora (Rozdział 3 i 4) można było znacząco podnieść poprzez dodanie opisów na wzór z rysunków 2.16 lub 2.17.
7. W rozprawie doktorskiej w bardzo pobieżny sposób dokonano jedynie jakościowej analizy wyników zaprezentowanych w postaci radiogramów uzyskanych przy wykorzystaniu różnych płyt odczytu. Wynik ten podsumowuje np. stwierdzenie ze s. 59, cyt. „*Uzyskany radiogram jest bardzo dobrej jakości. Jakość obrazka jest porównywalna z radiogramami wykonanymi przy użyciu komercyjnego detektora Techtra V2.0 oraz płyty odczytu opracowanej w CERN*”. Czy Autor rozważał lub przeprowadził jakiegokolwiek działania związane z analizą obrazu, np. z wykorzystaniem metod transformacyjnych, topologicznych, opartych na cechach uzyskanych radiogramów, poprzez porównanie ich struktur gradientów, czy nawet z zastosowaniem głębokiego uczenia?
8. Skoro istotą rozprawy (wynikającą z głównego celu pracy) jest miniaturyzacja systemu pomiarowego (detektora SGEM) dla jego zastosowania wewnątrz pojedynczego modułu satelity CubeSat 1 U, to w jaki sposób będzie można podejść do problemu zasilacza nisko i szczególnie wysokonapięciowego? Proszę tutaj odnieść się także do problemu tętnień

w kontekście konieczności budowy przetwornic. W jaki sposób może to wpłynąć na prezentowany poziom szumu opracowanego detektora SGEM? Wprawdzie nie to było głównym celem pracy, jednak w kontekście doktoratu wdrożeniowego taka dyskusja wydaje się zasadna.

9. Jeżeli jest dostępny materiał zdjęciowy, proszę o przedstawienie i omówienie stanowisk, jakie zostały wykorzystane do testów oraz finalnych badań opracowanego systemu pomiarowego (Rozdział 3.5). Przy tej okazji warto pokazać omawiany przykład wykresu prądu HV dla spontanicznych wyładowań wewnątrz detektora, skoro na s.58 wyraźnie stwierdzono, że podczas testów takie zjawiska zaobserwowano.
10. Skąd wynika wartość natężenia pola elektrycznego zestawiona w tabeli 3.4 i jak została wyznaczona?
11. Jaką ścieżkę komercjalizacji chciałby podjąć Autor dla zrealizowanego opracowania? Proszę o krótką charakterystykę działań i perspektywę ich realizacji.

6. Ocena formalnej strony pracy

Pomimo napotkanych błędów, praca została wykonana dość starannie pod względem technicznym, co świadczy o opanowaniu przez Autora podstawowych zasad przygotowywania tekstów technicznych. Wyszczególnione w tej sekcji błędy w żaden sposób nie obniżają wartości merytorycznej doktoratu i wysokiej oceny całości wykonanych prac. Niemniej jednak dla przejrzystości recenzji, w tej sekcji wyszczególniono językowe oraz edytorskie uwagi szczegółowe.

W pierwszej grupie można wyodrębnić typowe błędy stylistyczne, w tym np.: s.2 „*śledząc rozwój sektora kosmicznych*”, s.8 „*Obraz mikroskopowy wycinka folii GEM z widocznym przekrojem została przedstawiona na rysunku 2.5 a)*”, „*Większość wytworzonych elektronów (...) jest transferowane w stronę (...)*”, s. 10 „*W tym przypadku otwory są wiercone a nie trawione, oraz materiałem bazowym jest laminat FR4 (...)*”, s.15 „*Dane są w formie 38 bitowej przekazywane są do koncentratora za pomocą dwóch niezależnych linii, każda o częstotliwości 200 MHz - dane wyjściowe są w formie cyfrowej*”, s.16 „*Obraz mikroskopowy struktury układu TIGER została przedstawiona*”, s.34-35 „*Zazwyczaj elementy te są one dobierane (...)*”.

W pracy widoczny jest też problem z rozróżnieniem słowa technika i technologia, które w języku polskim oznaczają co innego (w odróżnieniu do ang. *technology*, które łączy obie definicje). Słowo technika to inaczej metoda (np. technika detekcji sygnału). Z kolei technologia odnosi się do procesu produkcyjnego/wytwórczego (np. układy zostały przygotowane z wykorzystaniem technologii LTCC). Ponadto, w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych powinno się używać właściwego słownictwa typu waga/masa, rozmiar/wymiar, obudowany – nieobudowany/opakowany – nieopakowany, ilość/liczba, mocno/bardzo itp. Przykładowo waga to przyrząd do pomiaru ciężaru ciał. Z kolei masa, to wielkość fizyczna określająca zachowanie się ciała pod wpływem działających na niego sił. Następnie, struktury ASIC mogą być obudowane (np. przeznaczone do montażu powierzchniowego) lub nieobudowane (przeznaczone do montażu drutowego). W tym przypadku opakowany/nieopakowany może dotyczyć zabezpieczenia

komponentu na czas transportu. Liczba dotyczy rzeczy policzalnych, natomiast ilość – niepoliczalnych. W tym kontekście, w niektórych zdaniach w pracy jednocześnie pojawia się kilka z wymienionych błędów.

W pracy można także zauważyć błędy logiczne, do których trzeba zaliczyć tautologie typu: s.1 wymiary/wymiarów, przedstawiający/przedstawiony, s.2 układ/układem, miniaturowego/miniaturowych (w celu pracy), s.4 opisano/z opisem, s.5 detektor/detektorów, s.9 GEM/GEM, s.42 układ/układu, s.53 zaprezentowano/zaprezentowania i wiele innych. W takich przypadkach warto korzystać z synonimów lub po prostu upraszczać zdania. Tego typu błędy są także widoczne w podpisach rysunków złożonych z części a i b. W tym miejscu należy jeszcze dodać, że powołania na rysunki warto robić jako wtrącenia do tekstu w nawiasach. Dzięki temu w tekście pracy nie trzeba za każdym razem powtarzać opisu, jaki już znajduje się w podpisie pod rysunkiem. Taka konstrukcja tekstu byłaby krótsza, bardziej przejrzysta, a przede wszystkim zrozumiała dla czytelnika w postaci związku przyczynowo skutkowego. Ponadto, nie należy także wskazywać miejsca rysunku „powyżej/poniżej”, ponieważ numer jednoznacznie to określa.

W pracy można zauważyć typowe błędy personifikacji (np. rysunek przedstawia) czy też osobową formę treści (np. s.36 „wykorzystujemy”, s.43 „podstawiamy”, s.59 „otrzymujemy” oraz „jesteśmy”). Problematiczna jest też interpunkcja. W tym przypadku, łączny spójnik „oraz” nie powinien być poprzedzany przecinkiem, a ten błąd powtarzany jest kilkadziesiąt razy. Prawdopodobnie wynika on z naleciałości języka angielskiego, kiedy „oraz” jest stosowane jako polski odpowiednik angielskiego „and” poprzedzonego przecinkiem. Ponadto, Autor nie wstawia przecinków przed spójnikami podrzędnymi, takimi jak „który”, „że”, „ponieważ”, „gdy” (brak rozdzielenia zdania nadrzędnego od podrzędnego). To samo dotyczy braku przecinków przed spójnikiem „a” łączącym wyrażenia lub zdania współrzędne. Brakuje także właściwych znaków interpunkcyjnych w wypunktowaniach i innych miejscach, w których należy zachować ciągłości zdania (np. po dwukropku).

Odnosząc się do błędów edytorskich można wyszczególnić następujące uwagi szczegółowe:

- wszystkie skróty lub definicje powinny być wyjaśniane jednokrotnie, przy ich pierwszym przywołaniu w tekście (np. ASIC, SGEM, MCV, PCB, płyty odczytu);
- formatowanie oznaczeń i jednostek powinno być jednorodne i zgodne z obowiązującymi zasadami. W tym kontekście zmienne skalarnie należy formatować kursywą, a jednostki – bez kursywy. Czasami Autorowi zdarza się prawidłowo formatować jednostki (np. mW na s.15 czy s.17, a także fC oraz kHz na s.17), jednak w większości przypadków robi to niewłaściwie (zapisując je kursywą lub częściowo kursywą, np. w przypadku wykorzystania przedrostka „μ”);
- rysunki, tablice, punktacje czy wzory nie mogą kończyć rozdziałów (Rys. 2.1, 2.11, 2.17, 3.6, 3.16, 3.21, Tab. 3.3, Tab. 4.3 i in.). Po takich elementach wymagany jest akapit tekstu. Podobnie, rysunki i tablice należy rozdzielać akapitem tekstu (np. Rys. 4.9 i Tab. 4.2);
- należało zadbać o jednolite formatowanie wyjaśnień anglojęzycznych akronimów;
- wartość wielkości i jej jednostka powinna być zapisane w jednej linii (np. s.11, s.12, s.15);
- właściwym symbolem mnożenia jest „·”, a nie „*” (s.9, 43);
- jednostkę od wartości wielkości należy separować spacją za wyjątkiem stopni i procentów;

- niektóre rysunki są nieczytelne ze względu na zbyt małą czcionkę i niewidoczne szczegóły (np. Rys. 2.1, 2.25, 3.6, 3.7-b);
- rysunek 3.16 powinien stanowić część c) dla Rys. 3.15;
- rysunek nie może być zlokalizowany w środku zdania (s.47-48 Rys. 3.10);
- warto byłoby zadbać o eliminację tzw. wdów;
- należało skorygować drobne literówki (np. s.13 „Zdjęcie”, s.50 „ih”, s.43 i s.72 „,gdzie”).

7. Podsumowanie

Przedstawiona do oceny praca została wpisana w niełatwą formułę doktoratu wdrożeniowego, w którym łączone są badania naukowe z praktycznymi potrzebami otoczenia społeczno-gospodarczego. W ocenie recenzenta, Doktorant spełnił wszystkie wymogi stawiane takim pracom, co zapewnia jej praktyczne zastosowanie i znaczenie dla sektora pozauczelnianego. W tym kontekście, po pierwsze, zrealizowane w przedmiotowym zakresie prace zostały ukierunkowane na problem praktyczny. Po drugie, były one prowadzone w obszarze działalności gospodarczej spółki Techtra przy bezpośredniej kooperacji z Doktorantem. Po trzecie, autorska konstrukcja detektora SGEM została ukończona na VI poziomie gotowości technologicznej, więc może podlegać procedurze komercjalizacji, zapewniając w przyszłości mierzalne korzyści biznesowe, np. firmie Techtra. Po czwarte, chociaż praca ma charakter praktyczny, to zdecydowanie zawiera innowacyjne elementy, które przyczyniają się do interdyscyplinarnego rozwoju poszczególnych obszarów dziedziny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Jej odpowiedni poziom naukowy w tym względzie został potwierdzony publikacjami cząstkowych wyników w wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Po piąte, w trakcie realizacji pracy Doktorant zapewnił sobie nowe kompetencje poprzez zdobycie praktycznych umiejętności i doświadczenia w środowisku przemysłowym. Na podkreślenie zasługuje także fakt, że wypracowane przez Doktoranta rozwiązania są możliwe do wdrożenia w relatywnie krótkim czasie z zachowaniem efektywności kosztowej, co oznacza dostosowanie metod badawczych do potrzeb przemysłu.

Podsumowując praca doktorska pt. *„Wielokanałowy system pomiaru ładunków w zakresie femtokulombów do zastosowań w detektorach promieniowania rentgenowskiego”* autorstwa mgr inż. Michała Babija dotyczy istotnego problemu naukowego oraz wdrożeniowego, a jej temat wpisuje się w aktualne kierunki badań w dziedzinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Autor wykazał się dogłębną znajomością literatury przedmiotu, umiejętnością stosowania odpowiednich metod badawczych oraz samodzielnością w formułowaniu wniosków. Przedstawiona rozprawa spełnia wymogi formalne i merytoryczne stawiane pracom doktorskim, a wyniki badań wnoszą istotny wkład w rozwój wiedzy w danej dziedzinie. Pomimo sformułowanych pytań i drobnych uwag uznaję, że nie wpływają one na ogólną wartość naukową rozprawy. W związku z powyższym rekomenduję dopuszczenie tej pracy doktorskiej do publicznej obrony.

Piotr Jankowski - Mihułowicz