

dr hab. inż. Dariusz Makowski, profesor uczelni

Łódź, dn. 14.01.2021 r.

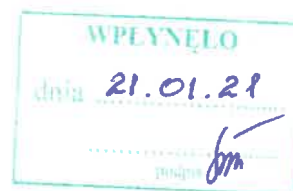
tytuł, stopień, imię i nazwisko

data

Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych

Politechnika Łódzka

miejsce pracy



## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Dla Rady Dyscypliny

Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej  
im. Stanisława Staszica w Krakowie

Tytuł rozprawy: „Low noise integrated circuits for radiation imaging with high-speed digital interface”.

„Niskoszumowe scalone układy z szybkim interfejsem cyfrowym do obrazowania promieniowania”.

Autor rozprawy: mgr inż. Weronika Zubrzycka

- 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)?**

Rozprawa doktorska dotyczy ważnej i aktualnej tematyki projektowania niskoszumnych układów odczytowych dedykowanych dla krzemowych detektorów paskowych wykorzystywanych w Fizyce Wysokich Energii (HEP, High Energy Physics), optymalizacji kluczowych parametrów takich jak: szumy, zwiększenie maksymalnej częstotliwości rejestracji zdarzeń, wpływu układu zasilania, konfiguracji drzewa zegarowego, zmniejszenie poboru mocy, minimalizacji przesłuchów, czy też odporności na szkodliwe warunki środowiskowe obejmujące podwyższone promieniowania radiacyjne i temperaturę. Od detektorów wykorzystywanych w nowoczesnych eksperymentach fizyki wielkiej skali, pracujących w warunkach podwyższonego promieniowania, wymaga się rejestracji milionów zdarzeń na sekundę oraz transmisji gigabajtów danych, co wymusza użycia specjalizowanej metodyki projektowania układów scalonych ASIC (Application Specific Integrated Circuits) oraz złożonych systemów akwizycji i przetwarzania danych. Tematyka badań naukowych, którą podjęła Doktorantka, jest niezwykle aktualna i w wielu zagranicznych laboratoriach badawczych takich jak: CERN, FAIR, PSI, DESY, SOLEIL,

APS, jak również polskich, np. Solaris, TUL czy AGH prowadzone są intensywne prace w tym zakresie.

Rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny. Badania naukowe prowadzone przez Autorkę dotyczą projektowania oraz optymalizacji kluczowych parametrów układów odczytowych detektorów paskowych takich jak: redukcji szumów, optymalizacji konfiguracji poszczególnych kanałów odczytowych w zależności od zmiennych warunków pracy jak również wpływu zakłóceń (zarówno wewnętrznych, związanych z elektroniką, jak i pochodzących od zewnętrznych komponentów), zmienną temperaturą, obecnością prądów upływu oraz zmiennymi parametrami pracy układu w związku z efektami wywołanymi przez radiację. W pracy poruszono również zagadnienia dotyczące pomiaru oraz zapewnienia jednorodności parametrów w wielokanałowych układach pomiarowych złożonych z kilkunastu tysięcy torów pomiarowych (opracowanie zintegrowanego środowiska/układu do pomiaru potencjałów oraz napięć zasilania wewnątrz układu) oraz przedstawiono badania dotyczące wykorzystania gigabitowych interfejsów szeregowych do transmisji sygnałów z detektorów odczytowych narażonych na wpływ promieniowania. Autorka podjęła próbę wykorzystania nowoczesnej, aczkolwiek niezwyfikowanej w zastosowaniach fizyki wielkich energii, 28 nm technologii produkcji układów scalonych.

Zakres pracy obejmuje zarówno część teoretyczną, projektową oraz bogatą część eksperymentalną. W pracy przedstawiono rezultaty badań 3 układów ASIC: dwóch układów będących wielokanałowymi układami odczytowymi (technologia CMOS 180 nm) oraz układu analogowej pętli fazowej (technologia CMOS 28 nm) dedykowanej do budowy nadajnika gigabitowego przeznaczonego do pracy w obecności silnych pól radiacyjnych.

Zagadnienie naukowe omawiane w pracy zostało sformułowane w 4 tezach zamieszczonych w rozdziale 1.7 na stronie 57:

1. Differential charge processing can be efficient in low-noise systems with the tight area and specific environmental constraints. Differential charge processing in the read-out electronics for detectors is rarely used due to higher power dissipation, larger area occupancy and intrinsically higher noise. However, this assumption is true only if the clean supply voltage can be provided. There are applications where the use of differential or pseudo-differential charge processing architectures may become beneficial. These applications include tracking detection stations where the power supply induced interference coupling is not negligible, cannot be externally filtered due to magnetic field and influences the electronics performance significantly. – The expected radiation dose and high magnetic field prevents the use of the commercial off-the-shelf low noise DC-DC converters/linear voltage regulators and ferrite-based inductors.

2. It is possible to improve the noise performance in the harsh and variable environment with varying and complex dominant noise sources contribution by in-depth analysis and simulation of the longitudinal and transverse architecture of the detector and connection to the read-out electronics and by employing configurability in the read-out electronics, especially in the shaping filters to adapt and a better match to the external conditions.

3. Stable operation of the Charge Sensitive Amplifier (CSA) with high feedback resistance while providing fast input charges processing in the presence of extensive leakage current of the unknown and variable amount and flowing direction, can be obtained by the combination of digitally-assisted fast reset with the leakage current compensation techniques.

4. Using newer technologies in the design of data transmitting circuitry is beneficial in terms of speeding up the operation and data transmission which is required in the complex read-out

systems generating a huge amount of data but also can decrease the sensitivity of the circuit to the radiation related effects (Total Irradiation Dose) and enable employing acceptably effective Single Event Effects mitigation techniques without compromising the available area and possible operating speed.

Rozprawa doktorska składa się z 6 rozdziałów poprzedzonych wykazem skrótów, krótkim wprowadzeniem, wykazem literatury oraz pojedynczego załącznika. Układ merytoryczny pracy obejmuje część teoretyczną oraz właściwą część badawczą. W drugiej części pracy Autorka opisuje 3 projekty prototypowych układów scalonych obejmujące badania eksperymentalne dowodzące słuszności postawionych tez.

Wprowadzenie zawiera opis struktury pracy. Rozdziały pierwszy i drugi stanowią wprowadzenie teoretyczne do pracy oraz literaturowy przegląd rozwiązań wykorzystywanych w fizyce wysokich energii do projektowania układów odczytowych.

W pierwszej części rozdziału 1 Autorka przedstawia zwięzły opis efektów radiacyjnych występujących w systemach pomiarowych, układach akwizycji danych wykorzystywanych w fizyce wysokich energii, podstawy pomiarów radiacyjnych, wykorzystywanych detektorów oraz elektroniki układów odczytowych. W drugiej części zawarty został krótki opis eksperymentu CBM (Compressed Baryonic Matter) przygotowywanego w ośrodku naukowo-badawczym FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research, Darmstadt, Niemcy), opis wykorzystywanych obecnie układów odczytowych w eksperymentach HEP, problemów występujących podczas projektowania takich układów ze szczególnym uwzględnieniem negatywnego wpływu promieniowania oraz sposoby projektowania układów odczytowych oraz dedykowanych do transmisji danych, pętli synchronizacji fazowej pracujących w warunkach podwyższonego promieniowania radiacyjnego. W końcowej części rozdziału zostały sformułowane oraz opisane cztery tezy rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 2 Autorka opisuje metodykę projektowania, sposoby optymalizacji oraz wyniki badań kluczowych parametrów analogowych układów odczytowych dedykowanych dla detektorów paskowych, wzmacniaczy kształtujących sygnał oraz układu monitorującego napięcia polaryzacji. Rozdział zakończony jest krótkim podsumowaniem oraz wnioskami z badań.

W rozdziale 3 opisano projekt, symulacje oraz wyniki badań laboratoryjnych pierwszego prototypu 8-kanalowego układu odczytowego SMX\_mini dedykowanego dla dwustronnych detektorów krzemowych spełniającego wymagania eksperymentu CMB. Autorka przedstawiła wyniki symulacji oraz wyniki pomiarów układu dla dwóch trybów pracy: asymetrycznego, różnicowego oraz wnioski.

W rozdziale 4 Autorka opisała projekt, rezultaty symulacji oraz wyniki badań drugiego prototypu układu odczytowego PRINCSA, w którym zaimplementowane zostały rozwiązania pozwalające na optymalizację szumów układu oraz innych ważnych parametrów. Układ został zaprojektowany z wykorzystaniem sprzętowych rozwiązań RHBD (Radiation Hardening By Design) zwiększających jego odporność na promieniowanie jonizujące (TID). Układ pozwolił na przeprowadzenie badań 3 kanałów asymetrycznych, 3 pseudo-różnicowych, układów polaryzacji i kalibracji, szybkiej (40 ns) i wolnej (250 ns) ścieżki kształtowania impulsów.

W rozdziale 5 Autorka opisała projekt oraz wyniki symulacji głównych bloków oraz układu pętli synchronizacji fazowej (Phase Locked Loop, PLL) dedykowanej dla projektu gigabitowego układu nadawczo-odbiorczego zdolnego tolerować błędy miękkie SEE.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie przeprowadzonych badań, testów oraz wpływające z nich wnioski i osiągnięcia Autorki pracy.

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

Autorka odwołuje się w pracy do 131 pozycji literaturowych. Bibliografia obejmuje prace od roku 1939 (1 pozycja), przy czym ponad 91% stanowią prace opublikowane po roku 2000, co świadczy o aktualności zagadnień podjętych w rozprawie oraz dobrej znajomości aktualnej literatury. W bibliografii znajduje się ponad 40% publikacji pochodzących z czasopism z listy filadelfijskiej oraz ponad 10 pozycji książkowych.

Należy podkreślić bardzo dobry wstęp teoretyczny (rozdziały 1 i 2) napisany przez doktorantkę oraz liczne odwołania do wartościowej literatury obejmującej pozycje książkowe.

W pracy dokonano szczegółowej analizy efektów radiacyjnych występujących w układach wykorzystywanych w fizyce wysokich energii. Doktoranta opisała podstawy pomiarów radiacyjnych, detektorów, elektroniki układów odczytowych oraz problemów występujących podczas projektowania takich układów ze szczególnym uwzględnieniem negatywnego wpływu promieniowania, jak również sposoby projektowania układów odczytowych oraz dedykowanych do transmisji danych, pętli synchronizacji fazowej pracujących w warunkach podwyższonego promieniowania radiacyjnego. W rozdziale zamieszczono również analizę oraz porównanie podstawowych parametrów 6 układów odczytowych dedykowanych dla detektorów paskowych zaprojektowanych w nowoczesnych technologiach półprzewodnikowych (90 nm – 350 nm). W drugiej części pracy Autorka opisała metodykę projektowania, sposoby optymalizacji oraz wyniki badań kluczowych parametrów analogowych układów odczytowych dedykowanych dla detektorów paskowych, wzmacniaczy kształtujących sygnał oraz układu monitorującego napięcia polaryzacji.

Wnioski wynikające z przeglądu są przejrzyste i przekonujące oraz zostały prawidłowo wykorzystane przez Autorkę w części badawczej pracy.

Wśród cytowanych prac znajduje się 13 pozycji autorstwa lub współautorstwa Doktorantki. Trzy publikacje pochodzą z listy JCR (w 2 doktorantka występuje na pierwszym miejscu): Journal of Instrumentation (IF=1,454) oraz Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A (IF=1,265). Kolejne 4 publikacje zostały opublikowane w czasopismach SPIE oraz trzy w materiałach konferencji MIXDES. Lista publikacji zawiera również trzy raporty (GSI oraz opis układu STS/MUCH-XYTER).

Dokładna liczba publikacji napisanych z udziałem doktorantki oraz rodzaj publikacji jest trudny do oszacowania ze względu na niewłaściwe formatowanie odwołań do literatury oraz brakujące informacje. Informacje dotyczące publikacji Autorki zamieszczone z rozdziale 6 (Summary and conclusions) trochę ułatwiają analizę napisanych prac, jednak nadal pozostawiają wątpliwości.

Doktorantka prezentowała wyniki badań naukowych na konferencjach: IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, International Workshop on Radiation Imaging Detectors, International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MOS-Ak India oraz spotkaniach roboczych CBM Collaboration Meeting.

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

Głównym zadaniem Doktorantki było przeprowadzenie badań naukowych nad układami odczytowymi detektorów paskowych w celu poprawy ich parametrów oraz zbadanie nowych rozwiązań układowych i technologii projektowania układów scalonych dedykowanych do transmisji danych pracujących w warunkach podwyższonego promieniowania radiacyjnego.

Autorka zaprojektowała oraz przeprowadziła badania 3 układów scalonych. Dwa pierwsze układy dedykowane są do akwizycji sygnałów z detektorów paskowych. Zostały zaprojektowane z uwzględnieniem wymagań eksperymentu CBM. Trzeci układ jest elementem składowym gigabitowego interfejsu do transmisji danych cyfrowych.

Doktorantka przeprowadziła szczegółową analizę oraz optymalizację krytycznych parametrów układu odczytowego takich jak: parametry wejściowe układu integracji ładunku (CSA), układ kompensacji prądów upływu (Krummenachera), układ filtrowania i kształtowania impulsów, zaprojektowała oraz scharakteryzowała dwie architektury układów symetryczną oraz architekturę różnicową. Charakteryzacja układów SMX\_mini oraz PRINCESA w szczególności obejmowała:

- Wyznaczenie oraz optymalizację kluczowych parametrów układu pod względem minimalizacji szumów układu, dobrane komponentów układu kształtowania impulsów
- Symulacje sygnału wyjściowego zaprojektowanego układu oraz symulacje końcowe (post-layout) dla wariantu asymetrycznego i różnicowego
- Pełną charakteryzację wyprodukowanego układu obejmującą: wyznaczenie charakterystyk wyjściowych, przejściowych układu wzmacniacza oraz kształtowania impulsów dla różnych wariantów oraz paramentów układu, wyznaczenie stałej czasowej układu CSA, charakteryzacja układu Krummenachera
- Pomiary szumów układu dla różnych wariantów oraz paramentów układu z uwzględnieniem wpływu zakłóceń pochodzących z systemu zasilania
- Zbadanie układu kalibracyjnego dla różnych wariantów układu oraz sprzężenia zwrotnego, polaryzacji, ładunków impulsów

Wykonane pomiary pozwoliły na weryfikację poprawnego działania układów oraz wykorzystanych rozwiązań sprzętowych, wyznaczenie rzeczywistych parametrów, które Autorka optymalizowała, np. szumy układu, wpływ zakłóceń wprowadzanych przez układ zasilania. Wykonane pomiary pokazują przewagę symetrycznego układu różnicowego przy akceptowalnym poziomie wytwarzanej mocy (mniejsze szumy w przypadku zakłóconego zasilania), co dowodzi słuszności tezy 1, 2 oraz 3.

Celem drugiej części doktoratu było zweryfikowanie oraz zbadanie rozwiązań układowych wykonanych w technologii 28 nm pod kątem projektowania układów niewrażliwych na wpływ promieniowania. Autorka zaprojektowała testową pętlę synchronizacji fazowej (PLL) wykorzystującą rozwiązania zmniejszające jej podatność na błędy miękkie SEE. Natomiast ochronę przed efektem dawki całkowitej zapewnia wybrana technologia 28 nm.

Parametry układów zostały odpowiednio zmodyfikowane oraz zastosowano dodatkowe mechanizmy pozwalające na zwiększenie odporności układów na wpływ promieniowania,

np.: redundancję (układ replikujący) w przypadku pompy ładunkowej, zmodyfikowany układ VCO oraz oscylatora referencyjnego z odpowiednio zaprojektowanymi układami negatorów (zwiększone pojemności tranzystorów), użycie układu DICE (Dual Interlocked Storage Cell) w przypadku detektora fazy oraz układu dzielnika częstotliwości. Autorka przeprowadziła symulacje układowe, symulacje końcowe komponentów składowych zaprojektowanej pętli synchronizacji fazowej obejmujące następujące układy: pompę ładunkową, oscylator sterowany napięciem, detektor fazy oraz dzielnik częstotliwości oraz symulacje funkcjonalne zaprojektowanej pętli, które potwierdzają poprawne działanie układu.

Autorka dokonała przeglądu literaturowego oraz prawidłowo wykorzystwała nowoczesne rozwiązania układowe opisane w literaturze pozwalające na sprzętowe uodpornienie układów na wpływ efektów SEE, co w połączeniu z wybraną 28 nm technologią produkcji układów pozwalana na eliminację negatywnego wpływu TID. Przeprowadzone symulacje dowodzą prawidłowego działania układu oraz słuszności tezy 4.

Pewien niedosyt pozostawia brak badań radiacyjnych zaprojektowanego układu PLL czy choćby symulacji wpływu promieniowania oraz efektów SEE zakłócających prawidłowe działanie układu. Autorka bazuje na sprawdzonych w literaturze rozwiązaniach układowych jednak takie podejście nie pozwala na oszacowanie w jakich warunkach układ będzie pracował poprawnie, tj. wyznaczenie maksymalnej dawki promieniowania jonizującego, czy też maksymalnej fluencji cząstek generujących błędy SEE.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że metoda badań przyjęta przez Doktorantkę jest jak najbardziej prawidłowa i świadczy o jej dojrzałości naukowej. Tezy rozprawy sformułowane przez Autorkę zostały udowodnione, natomiast w rozdziałach 2-5 zawarto cenne wskazówki przydatne podczas projektowania i optymalizacji układów dedykowanych dla HEP oraz pracujących w warunkach podwyższonego promieniowania.

Należy podkreślić, że wyniki badań zostały opublikowane w 3 czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej (Journal of Instrumentation oraz Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section), co również świadczy o wysokim poziomie przeprowadzonych badań. W 2 pracach doktorantka występuje jako pierwszy autor.

#### **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?**

Za oryginalne osiągnięcie Autorki w odniesieniu do obecnego stanu wiedzy należy zaliczyć przede wszystkim przeprowadzenie pełnej analizy układów odczytowych detektorów paskowych obejmującej komponenty układu odczytowego, detektora oraz układu zasilania, co pozwoliło na dalszą optymalizację parametrów układów. Efektem przeprowadzonych badań było zaprojektowanie 2 testowych analogowych układów scalonych.

Do samodzielnego i oryginalnego dorobku Autorki należy ponadto zaliczyć:

- Projekt obejmujący schematy elektryczne oraz maski produkcyjne (layout), symulacje oraz pomiary 2 układów scalonych: SMX\_mini oraz PRINCSA
- Opracowanie nowej konfigurowalnej architektury pozwalającej na optymalne dopasowanie struktury oraz parametrów układu odczytowego w celu minimalizacji szumów (ENC) w zależności od topologii systemu pomiarowego (różne długości przewodów oraz parametry detektora)

- Przeprowadzenie analizy przydatności układu różnicowego (pseudoróżnicowego) przetwarzania ładunku oraz jego zastosowania do projektowania układów pracujących w trudnych warunkach fizyki wysokich energii (przesłuchy między kanałami, szumy w układzie zasilania, parametry pasożytnicze połączeń)
- Opracowanie nowej zależności projektowania stopnia wejściowego zapewniającej dopasowanie pojemności detektora do układu odczytowego uwzględniającej pojemności pasożytnicze wyprowadzeń i kontaktów
- Opracowanie oraz implementację rozwiązania układowego obejmującego metodę kompensacji prądu upływu wykorzystującą układ Krummenachera oraz sygnał szybkiego rozładowywania pojemności układu CSA dla obu polaryzacji układu
- Opracowanie wbudowanego układu kalibracji ładunku toru pomiarowego wspierającego obie polaryzacje
- Projekt układu diagnostycznego do monitorowania wewnętrznych potencjałów polaryzacji układu
- Opracowanie stanowiska testowego obejmującego testowe obwody drukowane oraz stanowisko to automatyzacji testów z użyciem środowiska LabView oraz standardów VISA

Doktoranta podjęła próbę symulacji oraz wykonała projekt układu pętli synchronizacji fazowej odpornej na wpływ promieniowania jonizującego oraz błędów SEE w technologii CMOS 28 nm. Podkreślić należy optymalne wykorzystanie metod chroniących analogowo-cyfrowe bloki pętli synchronizacji fazowej przez błędami SEE.

Oceniając rozprawę doktorantki w stosunku do stanu wiedzy zawartej w literaturze stwierdzam, że stanowi ona cenny wkład w badania dotyczące projektowania odczytowych układów scalonych dedykowanych dla detektorów paskowych.

Wart podkreślenia jest fakt, że doktorantka samodzielnie zaprojektowała czterowarstwowe obwody drukowane, zbudowała urządzenia elektroniczne niezbędne do przeprowadzenia testów, analiz oraz badań eksperymentalnych. Doktorantka opracowała również oprogramowanie w środowisku LabView oraz aplikacje sterujące oraz zbierające dane pracujące na komputerze PC.

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

Struktura rozprawy doktorskiej jest poprawna i przejrzysta. Praca napisana jest w poprawnym języku angielskim, sporadycznie zdarzają się błędy językowe, np. niewłaściwe użycie przedimków lub ich brak. Niepoprawnie sformatowane odwołania do literatury z licznymi brakami oraz niekompletna lista autorów uniemożliwiający sprawne odnalezienie publikacji. W niektórych przypadkach niemożliwe jest nawet odnalezienie publikacji Autorskich doktorantki, np. pozycja 37), co niewątpliwie utrudnia analizę napisanej pracy.

Praca zawiera 135 czytelnych rysunków, w tym wykresów, diagramów, schematów i zdjęć obrazujących wyniki przeprowadzonych badań. Praca została napisana w przemyślany sposób, podział rozdziałów jest logiczny i konsekwentny.

Rezultaty badań, wyniki praktycznych eksperymentów zostały przeprowadzone głównie w laboratorium mikroelektroniki AGH. Rezultaty badań oraz wnioski zostały przedstawione w sposób przejrzysty i przekonujący.

Praca doktorska dotyczy projektowania odczytowych układów scalonych odpornych na wpływ promieniowania jonizującego, niejonizującego oraz występowanie błędów pojedynczych. Pewien niedosyt pozostawia brak wyników eksperymentalnych badań, czy też symulacji obrazujących poprawną pracę zaprojektowanych układów scalonych w warunkach podwyższonego promieniowania radiacyjnego. Przeprowadzenie badań radiacyjnych pokazujących właściwości zaprojektowanych układów pozwalających na tolerowanie błędów SEE, czy też efektów dawki całkowitej TID znacznie zwiększyłyby atrakcyjność pracy.

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

W pracy dostrzeżono pewną liczbę błędów, głównie edytorskich, które nie mają znaczącego wpływu na wartość merytoryczną pracy doktorskiej. W pracy występują niepoprawnie sformatowane odwołania do literatury z licznymi brakami uniemożliwiającymi odnalezienie publikacji, np. niekompletna lista autorów. W niektórych przypadkach niemożliwe jest nawet odnalezienie publikacji Autorskich Doktorantki (pozycja 37), co niewątpliwie utrudnia analizę napisanej pracy oraz osiągnięć. Proszę Autorkę o przedstawienie pełnej listy publikacji autorskich.

W wielu przypadkach przebiegi prezentowane na wykresach rysowane są podobnym kolorem, co skutecznie utrudnia ich interpretację, np. rysunek 46, 47, 56, czy też 58.

Kolejnym problemem są powielone oraz niekonsekwentne rozwinięcia skrótów oraz akronimów, np. Galactic cosmic rays (GCR), Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) na stronie 10, High-Energy Physics (HEP) na stronie 11, data acquisition (DAQ) na stronie 19, Equivalent Noise Charge (ENC) na stronie 23. Skrótory pisane są zwykle wielkimi literami, jednak czasami występują wyjątki, np. strona 19.

Sporadycznie w pracy brakuje spacji rozdzielającej jednostkę i wartość (strona 63, strona 85, strona 95, strona 101). Ostatni podrozdział (Summary) rozdziału 2 posiada niewłaściwy numer (1..).

Powyższe pomyłki są łatwe do wychwycenia i nie wpływają negatywnie na wartość merytoryczną pracy.

W przypadku układu różnicowego przetwarzania ładunku Doktorantka nie wykorzystwała układu Krummenachera kompensacji prądów upływu. Rodzi się, więc pytanie jak wzrosłby stopień skomplikowania układu oraz zużycie energii w przypadku dodania tego układu w wersji różnicowej i czy nadal taka konstrukcja byłaby atrakcyjna z punktu zużycia mocy oraz użycia w złożonych projektach HEP. Prosiłbym Autorkę o komentarz.

W rozdziale 4 (strona 99) Autorka opisała prototyp układu odczytowego PRINCSA zaprojektowanego z wykorzystaniem sprzętowych rozwiązań RHBD zwiększających jego odporność na promieniowanie jonizujące (TID). Natomiast w pracy brakuje informacji dotyczących użytych rozwiązań oraz ich skuteczności. Prosiłbym o komentarz dotyczący wpływu tych rozwiązań na parametry układu (szumy, symetrie torów różnicowych, rozrzuty, szybkość pracy). Czy układ został podany testom radiacyjnym i jakie były ich wyniki?

Wykorzystanie nowoczesnych technologii nanometrowych CMOS (28 nm) znacznie upraszcza projektowanie układów odpornych na wpływ promieniowania jonizującego, w



których efekty dawki całkowitej TID praktycznie nie występują. Natomiast zmniejszenie rozmiarów tranzystorów powoduje znaczne zwiększenie występowania błędów pojedynczych SEE oraz błędów wielokrotnych MBU (Multiple Bit Upset). Czy podczas projektowania pętli synchronizacji fazowej błędy MBU zostały wzięte pod uwagę? Jaki stopień ochrony zapewniają użyte przez Doktorantkę mechanizmy ochrony bloków pętli przed błędami wielokrotnymi i czy były symulowane podczas projektowania układu.

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

Należy podkreślić praktyczne znaczenie pracy oraz znaczącą przydatność wyników badań dla nauk technicznych.

W ramach przeprowadzonych prac Autorka podjęła się zrozumienia, optymalizacji oraz zbadania parametrów układów odczytowych detektorów paskowych wykorzystywanych w eksperymentach HEP. W pracy zawarto wartościowe informacje pozwalające na projektowanie oraz optymalizację parametrów takich układów w różnych konfiguracjach obejmujących również rzadko stosowaną architekturę różnicową. W pracy zawarto analizy oraz wyniki licznych eksperymentów wykonanych z zaprojektowanymi przez Autorkę układami.

Układy odczytowe zostały zaprojektowane z uwzględnieniem wymagań eksperymentu CMB (FAIR, Niemcy), co pozwala w przyszłości na wykorzystanie wyników badań przy projektowaniu układów odczytowych dla tego eksperymentu.

Drugą część pracy stanowią badania nad układami o zwiększonej odporności na promieniowanie. Doktorantka zamieściła zwięzły opis efektów radiacyjnych występujących w układach analogowych i cyfrowych oraz informacje dotyczące projektowania takich układów. Autorka pokazała możliwość wykorzystania 28 nm technologii do projektowania analogowo-cyfrowych układów wykorzystywanych w nowoczesnej elektronice o zwiększonej odporności na wpływ promieniowania. Wyniki badań mogą zostać wykorzystane do opracowania układów nadawczo-odbiorczych przeznaczonych do transmisji sygnałów cyfrowych z dużą przepustowością pracujących w warunkach podwyższonego promieniowania radiacyjnego.

Praca doktorska może być również przydatna podczas projektowania innych układów scalonych dedykowanych do zastosowań w fizyce wielkiej skali.

### **8. Ocena końcowa**

Uważam, że przedstawiona do recenzji praca zawiera wartościowy i oryginalny dorobek naukowy. Wysoko oceniam poziom merytoryczny pracy.

Rozprawa mgr inż. Weroniki Zubrzyckiej ma charakter teoretyczno-doświadczalny. Doktorantka wykazała się bardzo dobrą znajomością budowy analogowo-cyfrowych układów odczytowych dedykowanych do obrazowania promieniowania oraz znajomością wpływu promieniowania na pracę układów elektronicznych. Opracowała oryginalne metody usprawniające działanie układów odczytowych detektorów paskowych oraz układów wykorzystywanych do transmisji sygnałów cyfrowych w warunkach podwyższonego promieniowania radiacyjnego.

W podsumowaniu stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Weroniki Zubrzyckiej pt. „Niskoszumowe scalone układy z szybkim interfejsem cyfrowym do obrazowania promieniowania”, napisana w dyscyplinie elektronika, spełnia warunki określone w art. 13

ust.1 ustawy o stopniach i tytule naukowym. Wnioskuje, zatem o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Doceniając osiągnięcia Autorki, wysoki poziom naukowy rozprawy oraz praktyczną użyteczność uzyskanych wyników badań dla potrzeb eksperymentów fizyki wysokich energii wnioskuję o wyróżnienie przedstawionej rozprawy.

**Podpis**

*Danuta Makowska*