


Poznań, 30-09-2023

dr hab. inż. Paweł Śniatała, prof. PP  
Wydział Informatyki i Telekomunikacji  
Politechniki Poznańskiej  
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań  
pawel.sniatala@put.poznan.pl

S E K R E T A R I A T  
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia ..... 12. 10. 2023 .....  
Zarejestrowano pod nr .....  
Podpis ..... 

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Piotra Kaczmarczyka

### „MICRO-POWER LOW-AREA MULTICHANNEL INTEGRATED CIRCUITS FOR PRECISE MEASUREMENTS OF IONIZING RADIATION ENERGY”

wykonana na podstawie umowy zawartej z Akademią Górniczo-Hutniczą im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej.

#### 1. Charakterystyka wyboru tematu i przedmiot rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Kaczmarczyka są zagadnienia związane z implementacją hybrydowego detektora pikselowego pracującego w trybie zliczania pojedynczych fotonów (Single Photon Counting – SPC). Zliczanie fotonów to technika, w której pojedyncze fotony są zliczane przy użyciu detektora pojedynczych fotonów (SPD – Single Photon Detector). Detektor jednofotonowy emituje impuls sygnału dla każdego wykrytego fotonu. Wydajność zliczania zależy od wydajności kwantowej i strat elektronicznych systemu.

Hybrydowe pikselowe detektory promieniowania z bezpośrednią konwersją fotonów na ładunki pracujące w trybie zliczania pojedynczych fotonów zyskują coraz większą uwagę ze względu na ich wysoki zakres dynamiczny i bezszumowe obrazowanie. Zliczanie fotonów eliminuje szum wzmocnienia, w którym stała proporcjonalności między sygnałem analogowym a liczbą fotonów zmienia się losowo. W ten sposób współczynnik nadmiaru szumu detektora zliczającego fotony wynosi jedność, a osiągalny stosunek sygnału do szumu dla stałej liczby fotonów jest generalnie wyższy niż w przypadku tego samego detektora bez

zliczania fotonów. Detektory zliczające fotony z możliwością rozróżniania energii zostały opracowane na potrzeby medycznej rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT) i obrazowania rentgenowskiego (XR). Wykorzystując mechanizmy detekcji, które całkowicie różnią się od obecnych detektorów integrujących energię i mierzących informacje o materiale obrazowanego obiektu, detektory te nie tylko pozwalają na redukcję dawek promieniowania w badaniach CT i XR, ale także otwierają możliwości nowych zastosowań, takich jak np. obrazowanie molekularne.

Podsumowując tę część recenzji, należy wysoko ocenić aktualność poruszanych w rozprawie zagadnień i trafny wybór obszaru badań, który wpisuje się w zakres bieżąco dyskutowanych problemów badawczych.

## **2. Ocena merytoryczna rozprawy**

Rozprawa doktorska została skonstruowana jako zbiór siedmiu publikacji poprzedzonych szesnastostronicowym wprowadzeniem oraz załączoną bibliografią składającą się z 79 pozycji literaturowych. Z wyjątkiem jednej publikacji, pozostałe elementy rozprawy (wstęp i publikacje) są w języku angielskim. Na zbiór przedstawionych do oceny publikacji składają się:

- 2 publikacje wydane w materiałach międzynarodowej konferencji MIXDES (2019 i 2023) poz.[1,6]
- 5 publikacji w czasopismach w tym
  - 2 publikacje w czasopiśmie „Journal of Instrumentation” 2022 i 2023. (100pkt)
  - 1 publikacja w czasopiśmie „International Journal of Microelectronics and Computer Science” 2018.
  - 1 publikacja w „Przeglądzie Elektrotechnicznym” 2020 (70pkt)
  - 1 publikacja w „IEEE Transaction on Circuits and Systems p Part II: Express Briefs” (w recenzji).

Na wstępie doktorant nakreślił w sposób ogólny obszar naukowy, w który wpisuje się tematyka rozprawy. Przedstawił aktualne rozwiązania realizujące funkcje hybrydowego detektora SPC, które podzielił na 3 główne techniki: wykorzystanie wielu dyskryminatorów, rozwiązanie oparte na przetworniku analogowo-cyfrowym oraz użycie asynchronicznej pętli kompensacji zebranego ładunku przy pomocy impulsów prądowych.

Doktorant jasno sformułował pięć problemów badawczych i przedstawił ich rozwiązania. Do najważniejszych dokonań autor zaliczył:

1. Zaprojektowanie dyskryminatora pracującego w trybie czasu ciągłego o małym poborze mocy, który zapewnia znaczącą redukcję zależności pomiędzy czasem reakcji oraz poziomem sygnału względem progu reakcji [1]. Zastosowano nowatorskie rozwiązanie, polegające na wykorzystaniu w strukturze dyskryminatora, a dokładnie w pętli sprzężenia zwrotnego wzmacniacza, konwertera ujemno-impedancyjnego (NIC – Negative Impedance Converter). Zaproponowane rozwiązanie zmniejszyło sześciokrotnie czas przetwarzania przy jednoczesnym zwiększeniu poboru mocy tylko o 31% w stosunku do standardowych rozwiązań (pobór mocy  $3.8 \mu\text{W}$  przy częstotliwości pracy 10 MHz). Układ zaprojektowany w technologii CMOS 28 nm, zajmuje  $15 \mu\text{m}^2$  i pozwala zliczyć impulsy o częstotliwości do 1.25 GHz.
2. Zaprojektowanie dynamicznego komparatora, będącego głównym elementem konwertera A/D [2]. Układ, zaprojektowany w technologii CMOS 28 nm, zajmuje  $25 \mu\text{m}^2$  i pobiera 17.7 fJ energii dla pojedynczego cyklu porównania. Czas konwersji wynosi 250 ps, co umożliwia pracę z zegarem o częstotliwości 4 GHz.
3. Opracowanie nowej struktury i zaprojektowanie w technologii CMOS 28 nm dwustopniowego dynamicznego komparatora z możliwością kalibracji napięcia niezrównoważenia w dziedzinie czasu. Główną zaletą przedstawionego rozwiązania, jak podaje Autor w pracy [4], jest możliwość minimalizacji napięcia niezrównoważenia bez dodatkowego obciążania pojemnościami pierwszego stopnia układu. Dzięki zastosowaniu regulowanej przez użytkownika linii opóźniającej, możliwe jest zmniejszenie napięcia niezrównoważenia o  $\pm 15 \text{ mV}$ , co pozwala skutecznie zniwelować istniejące w zaprojektowanym układzie rozrzuty i utrzymać szybkość odpowiedzi komparatora odpowiednią do pracy z częstotliwością 2 GHz. Zaproponowane rozwiązanie zostało praktycznie zweryfikowane w układzie przetwornika A/C zrealizowanego w strukturze SAR i wykonanego w technologii CMOS 28 nm [2]. Należy w tym miejscu podkreślić fakt weryfikacji poprawności działania układu poprzez wykonanie odpowiednich pomiarów. W przypadku układów scalonych jest to niezależne wyzwanie inżynierskie, polegające na opracowaniu i wykonaniu odpowiedniego środowiska pomiarowego, które samo w sobie jest często skomplikowanym układem elektronicznym. Przebadany układ przetwornika A/C pozwala na rozróżnienie 256 poziomów energii z szybkością konwersji 10 MS/s.

Nieliniowość całkowita (INL - Integrated Non Linearity) wynosi  $\pm 0.5$  LSB, natomiast nieliniowość różnicowa (DNL - differential nonlinearity)  $\pm 0.3$  LSB. Układ zajmuje obszar  $30 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$  i pobiera  $45 \mu\text{W}$  mocy.

4. Opracowanie narzędzia wspomagającego optymalizację wzmacniacza ładunkowego opartego na strukturze inwertera kaskadowego (Cascode-Inverter-Based Charge Sensitive Amplifier). Procedura oparta została na metodzie  $g_m/I_d$  i wykorzystuje algorytm optymalizacji rojem cząsteczek PSO (Particle Swarm Optimization PSO). Doktorant przedstawia opracowane przez siebie rozwiązanie w publikacji [6]. Praktyczną weryfikacją przydatności i poprawności opracowanego narzędzia jest wykorzystanie go do obliczenia rozmiarów tranzystorów w realizacji 12-bitowego przetwornika A/C zrealizowanego w technologii CMOS 28 nm. Układ został wykonany i przetestowany, co zostało opisane w pracy [7].
5. W pracy [5] doktorant zaprezentował projekt wzmacniacza, który zawierał autorski układ resetu. Zaproponowane rozwiązanie okazało się precyzyjnym, szybkim i automatycznym układem zerowania/resetu, który spełnia dwie funkcje: przywraca wyjściowy poziom napięcia wzmacniacza CSA (Charge Sensitive Amplifier) z poziomu mierzonego impulsu do poziomu bazowego oraz resetuje przetwornik A/C. Opracowany układ został zweryfikowany symulacyjnie (post layout simulation).

Struktura pracy i załączonych publikacji jest jasna i klarowna.

Zauważono jedynie 3 drobne błędy edytorskie:

- str. xi: symbol  $C_{DS}$  – błędnie wyjaśniony lub miał być  $C_{DG}$ ,
- str. xi: symbole  $N_h$  oraz  $N_e$  zamienione miejscami,
- str. 3 wiersz 13 od dołu: symbole  $N_h$  oraz  $N_e$  zamienione miejscami,

### **3. Wnioski końcowe**

Pan mgr inż. Piotr Kaczmarczyk w recenzowanej rozprawie doktorskiej przedstawił rozwiązania kilku znaczących problemów badawczych związanych z implementacją hybrydowego detektora pikselowego pracującego w trybie zliczania pojedynczych fotonów. Niewątpliwie przedstawione rezultaty pracy Doktoranta są oryginalne i wartościowe, oraz stanowią istotny wkład w przedmiotowej dziedzinie. Istotnym walorem prezentowanych wyników jest ich praktyczna weryfikacja w postaci pomiarów wyprodukowanych układów

scalonych. Jak wiadomo proces projektowania, wyprodukowania i na końcu weryfikacji pomiarowej jest długi, i jak wspominałem powyżej, wymaga nie tylko rozwiązania problemów badawczych, ale również znajomości praktyki inżynierskiej elektronika. Należy w tym miejscu zauważyć, że praca wykonana przez doktoranta była częścią pracy całego zespołu, co również świadczy o istotnej w przypadku badacza obszarów mikroelektroniki, umiejętności pracy zespołowej.

Podsumowując niniejszą recenzję stwierdzam, że praca pt.: „Mikromocowe, niskopowierzchniowe, wielokanałowe układy scalone przeznaczone do precyzyjnego pomiaru energii promieniowania jonizującego” (ang. „MICRO-POWER LOW-AREA MULTICHANNEL INTEGRATED CIRCUITS FOR PRECISE MEASUREMENTS OF IONIZING RADIATION ENERGY” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie elektronika, odpowiadającej dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne wg klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu MNiSzW z dnia 11 października 2022 roku w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz.U.2022 poz.2202) i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Piotra Kaczmarczyka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*Paweł Sznajda*

