

Warszawa, 28 września 2015 r.

Prof. nzw. dr hab. Witold Pleskacz  
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych  
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki  
Politechnika Warszawska



**OPINIA O ROZPRAWIE DOKTORSKIEJ  
DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,  
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ  
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**Dissertation title: Low Power A/D Converters for Multichannel Integrated Circuits  
(oryginalny tytuł rozprawy w jęz. angielskim)**

**Tytuł rozprawy: Niskomocowe przetworniki A/C dla potrzeb wielokanałowych układów  
scalonych (tłumaczenie z jęz. angielskiego)**

**Autor rozprawy: mgr inż. PIOTR OTFINOWSKI**

- 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)?**

Podjęte w pracy zagadnienia naukowe dotyczą poszukiwań i badań nowych rozwiązań konstrukcyjnych niskomocowych przetworników analogowo-cyfrowych dla detektorów półprzewodnikowych. Detektory te służą do rejestracji pojedynczych fotonów lub cząstek w eksperymentach fizyki wysokich energii HEP (ang. *High Energy Physics*) lub w obrazowaniu rentgenowskim. Autor skoncentrował się na hybrydowych systemach detekcyjno-pomiarowych, w których osobno występują krzemowe matryce detektorów pikselowych (lub detektory paskowe) oraz wielokanałowe układy odczytowe ROIC (ang. *Read-Out Integrated Circuits*). Zadaniem układów odczytowych jest równoległe przetwarzanie sygnałów pochodzących z detektorów. Są one realizowane w postaci specjalizowanych układów scalonych ASIC, w których przetworniki analogowo-cyfrowe są zasadniczym elementem składowym. Zaprojektowanie dedykowanego układu odczytowego, który by posiadał dużą liczbę kanałów oraz uwzględniał stochastyczną naturę sygnałów wejściowych, jest dużym wyzwaniem dla współczesnej mikroelektroniki. Wynika to przede wszystkim z bardzo dużych ograniczeń narzuconych na zajętość powierzchni oraz pobór mocy przez pojedynczy kanał odczytowy.

Wskm

Zajętość powierzchni pojedynczego kanału odczytowego musi odpowiadać wymiarom pojedynczego detektora w matrycy, który typowo wynosi od 50  $\mu\text{m}$  do 200  $\mu\text{m}$ . Natomiast limit poboru mocy przez pojedynczy kanał odczytowy jest wynikiem ilorazu maksymalnego dopuszczalnego zużycia mocy przez cały specjalizowany układ scalony i liczby kanałów odczytowych. W przypadku układów pikselowych typowo ograniczenie to wynosi kilkadziesiąt  $\mu\text{W}$  na kanał. Dodatkowym wyzwaniem jest zapewnienie wysokiej powtarzalności parametrów wszystkich kanałów w całym układzie odczytowym.

Spełnienie powyższych wymagań spowodowało potrzebę opracowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych (architektur) przetworników analogowo-cyfrowych, które mogłyby być zastosowane w wielokanałowych układach odczytowych. Stało się to zarazem podstawowym celem rozprawy. Nowe przetworniki A/C, przy założeniu umiarkowanej rozdzielczości (4-8 bitów) i szybkości próbkowania rzędu kilku milionów próbek na sekundę, miały umożliwić niezależny pomiar amplitudy impulsu w każdym kanale układu odczytowego oraz charakteryzować się bardzo małym poborem mocy i małą powierzchnią. Ze względu na istniejące naturalne wahania parametrów procesu produkcji układów scalonych, dodatkowym celem pracy było opracowanie nowych technik kalibracji, odpowiednich do zastosowań w wielokanałowych układach odczytowych.

Zarówno założenia jak i cel pracy zostały jasno sformułowane przez Autora. Rozprawa ma charakter konstrukcyjno-doświadczalny. Główne eksperymenty polegały na poszukiwaniu nowych rozwiązań układowych przetworników A/C, symulacjach komputerowych ich schematów elektrycznych, zaprojektowaniu topografii masek produkcyjnych z uwzględnieniem istniejących elementów pasożytniczych oraz przeprowadzeniu pomiarów wyprodukowanych prototypów układów scalonych.

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

W pracy przeprowadzono właściwą analizę źródeł oraz przedstawiono dotychczasowe rozwiązania literaturowe i powszechnie stosowane w przemyśle mikroelektronicznym. Omówiono ich ograniczenia, zalety i wady oraz wyciągnięto odpowiednie wnioski. Wykaz cytowanych źródeł obejmuje 49 publikacji drukowanych i internetowych, takich jak: książki, czasopisma, materiały konferencyjne, opracowania przeglądowe, informatory o eksperymentach naukowych i specyfikacje techniczne. Wśród tych pozycji 9 publikacji jest autorstwa Doktoranta. Przeprowadzona analiza źródeł świadczy o bardzo dobrej znajomości zagadnień dotyczących przetworników analogowo-cyfrowych oraz o kompetencjach Autora w zakresie projektowania specjalizowanych układów scalonych VLSI w nowoczesnych technologiach CMOS.



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

Cel pracy polegający na zaprojektowaniu, wykonaniu i przeprowadzeniu pomiarów nowych rozwiązań konstrukcyjnych niskomocowych przetworników analogowo-cyfrowych, z przeznaczeniem do zastosowań w wielokanałowych systemach pomiarowych, został zrealizowany. Można tutaj wyróżnić trzy odrębne autorskie opracowania:

1. Projekt 5-bitowego wielokanałowego systemu do pomiaru amplitudy sygnałów. Zastosowano w nim matryce przetworników równoległych A/C (typu *flash*) z nowatorskim układem korekcji napięcia niezrównoważenia komparatora. Zaproponowana konstrukcja kalibrującego przetwornika cyfrowo-analogowego umożliwia zmniejszenie jego powierzchni przy zachowaniu liniowości. Rozwiązanie zostało zaimplementowane w 128-kanałowym układzie scalonym do odczytu paskowych detektorów krzemowych.
2. Projekt 7-bitowego przetwornika A/C z sukcesywną aproksymacją zrealizowanego na przelączanych pojemnościach. Został on zoptymalizowany pod kątem zajmowanej powierzchni na strukturze krzemowej. Osiągnięte małe wymiary układu  $90\ \mu\text{m} \times 95\ \mu\text{m}$ , dla technologii 180 nm CMOS, umożliwiają zastosowanie rozwiązania w pikselowych systemach odczytowych.
3. Projekt równoległego 4-bitowego przetwornika A/C (typu *flash*) o bardzo małej powierzchni, z dynamicznym zapamiętywaniem napięcia niezrównoważenia. Rozwiązanie to zostało zaimplementowane w dwóch technologiach CMOS o wymiarze charakterystycznym 180 nm i 40 nm, z myślą do przyszłych zastosowań w pikselowych systemach obrazowania rentgenowskiego.

Realizację celu pracy Autor osiągnął w sposób następujący:

1. Zaproponował nowe konstrukcje odpowiednich przetworników A/C, w których położono nacisk na niski pobór mocy i małą powierzchnię.
2. Wykonał symulacje komputerowe schematów elektrycznych opracowanych przetworników.
3. Zaprojektował topografie masek produkcyjnych przetworników z uwzględnieniem elementów pasywnych.
4. Dokonał pomiarów wyprodukowanych prototypów układów scalonych. Wyniki pomiarów pokazały słuszność przyjętej koncepcji nowych przetworników A/C oraz poprawność metody ich projektowania.

**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?**

Samodzielnym i oryginalnym dorobkiem Autora są nowe rozwiązania układowe trzech typów przetworników A/C do zastosowań w wielokanałowych układach odczytowych. Podczas ich konstruowania położono szczególny nacisk na małą zajętość powierzchni i niski pobór

*Wsk*

mocy.

Pierwsze rozwiązanie, dla 5-bitowego wielokanalowego systemu do pomiaru amplitudy sygnałów, zawiera matryce przetworników równoległych A/C (typu *flash*) z nowatorskim układem korekcji napięcia niezrównoważenia komparatora. Układ korekcji zbudowany jest z dwustopniowego (zgrubnego i precyzyjnego), kalibrującego przetwornika cyfrowo-analogowego, który umożliwia znaczne zmniejszenie powierzchni układu. Matryca zaprojektowanych przetworników A/C została z powodzeniem zrealizowana w postaci specjalizowanego układu scalonego STS-XYTER.

Drugie rozwiązanie zawierające 7-bitowy przetwornik A/C z sukcesywną aproksymacją charakteryzuje się wysoką liniowością, małym poborem mocy i wyjątkowo małą powierzchnią w stosunku do innych światowych rozwiązań. Na szczególną uwagę zasługuje zestawienie uzyskanych parametrów układu z wynikami prac innych autorów (tab. 3.6). Osiągnięte parametry umożliwiają zastosowanie tego przetwornika w wielu różnych systemach pomiarowych.

Trzecie rozwiązanie jest 4-bitowym, równoległym przetwornikiem A/C (typu *flash*), z dynamicznym zapamiętywaniem napięcia niezrównoważenia. Charakteryzuje się ono bardzo małą powierzchnią i jest dedykowane dla bardzo szybkich detektorów pikselowych do obrazowania promieniowania rentgenowskiego.

Recenzowana praca stanowi samodzielne i oryginalne w skali światowej rozwiązanie postawionych przez Doktoranta zagadnień. Jej wyniki były przedstawione w wielu komunikatach i artykułach naukowych (o cyrkulacji międzynarodowej) oraz były prezentowane na konferencjach międzynarodowych.

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

Rozprawa została napisana w języku angielskim. Zapewne było to podyktowane chęcią Doktoranta i jego Promotora rozpowszechniania uzyskanych wyników badań na arenie międzynarodowej, co jest sprawą zrozumiałą i pozytywną. W związku z tym pracy została nadana forma raportu naukowo-technicznego – typowa dla opracowań naukowych publikowanych w języku angielskim. Praca jest poprawna pod względem językowym i redakcyjnym, odpowiada wymogom stawianym publikacjom naukowo-technicznym. Użyta terminologia jest prawidłowa. Praca została napisana starannie, w jasnym układzie logicznym. Cele pracy przedstawiono precyzyjnie i konsekwentnie je zrealizowano. Autorskie koncepcje nowych rozwiązań układowych zostały przedstawione w sposób komunikatywny. Autor prawidłowo sformułował założenia, cele pracy oraz wnioski końcowe.



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

Recenzent nie dostrzega wad rozprawy w jej zakresie merytorycznym, w części projektowej i doświadczalnej. Słabych stron jest niewiele i nie mają istotnego wpływu na wartość naukową rozprawy. Pewien niedosyt budzi krótkie omówienie wagi podjętych zagadnień naukowych, które z pewnością nie należą do gatunku prostych i łatwych do rozwiązania. Jej szersze i głębsze omówienie zdecydowanie bardziej by uwypukliło znaczenie osiągniętych wyników. Prawdopodobnie sposób prezentacji wagi podjętych zagadnień naukowych wynikał z przyjętej formy rozprawy napisanej w języku angielskim. Dodatkowo brak jest obszernej analizy wpływu zaburzeń procesu technologicznego produkcji układów scalonych na parametry zaprojektowanych przetworników A/C. Dodatkowym atutem byłoby przedstawienie wrażliwości układów na zmiany temperatury struktury krzemowej i napięcia zasilania.

Praca nie jest również pozbawiona drobnych błędów edytorskich i interpunkcyjnych.

Przykładowo:

- brak rozwinięcia skrótów CCD, MAPS i DEPFET przy pierwszym ich użyciu na str. 2 (aczkolwiek są one wyjaśnione w wykazie na str. 1);
- brak wyjaśnienia w tekście pracy skrótu THD użytego na rys. 2.1;
- brak przecinków przed słowem *which* („... step is obtained which amplitude is proportional...” na str. 3 oraz „... measuring only 95  $\mu\text{m}$  x 95  $\mu\text{m}$  which is one of the best...” na str. 49);
- brak przecinków przy użyciu wtrącenia („... when switching between these two codes...” na str. 28);
- brak kropki po wzorze (3.7) w miejsce przecinka.

Reasumując należy zaznaczyć, że zauważone słabe strony rozprawy nie obniżają jej wartości naukowej.

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

Uzyskane wyniki badań naukowych mają bardzo dużą przydatność dla nauk technicznych. Opracowane w ramach rozprawy nowe układy niskomocowych przetworników analogowo-cyfrowych CMOS stanowią istotny wkład w rozwój tego obszaru techniki. Ze względu na bardzo małą powierzchnię są one szczególnie przydatne dla projektantów wielokanałowych układów odczytowych realizowanych w postaci specjalizowanych układów scalonych ASIC. Jednym z praktycznych rezultatów rozprawy jest opracowany z udziałem Doktoranta układ scalony STS-XYTER, wyprodukowany w technologii UMC CMOS 180 nm. Jest on 128-kanałowym układem odczytowym dla paskowego detektora krzemowego. Układ ten będzie wykorzystany w eksperymencie programu badawczego CBM (*Compressed Baryonic Matter*), przygotowywanym przez FAIR (*Facility for Antiproton and Ion Research*) w Darmstadt, Niemcy.

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

- a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
- b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
- c/ spełniająca wymagania
- d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem
- e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Abstrahując od uwag wymienionych w punkcie 6. recenzji, należy stwierdzić, że Pan mgr inż. Piotr Otfinowski prezentując nowe rozwiązania układowe niskomocowych przetworników analogowo-cyfrowych oraz metodę ich projektowania w nowoczesnych technologiach wytwarzania układów scalonych wykazał się zdolnościami i umiejętnościami do prowadzenia prac badawczych. Uważam, że przedstawiona do recenzji praca pt. „Niskomocowe przetworniki A/C dla potrzeb wielokanałowych układów scalonych” spełnia wymagania, stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy, z wyraźnym nadmiarem. Wniosuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

W. Sleska

podpis