

dr hab. inż. Andrzej Pfitzner, prof. PW
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki
Politechniki Warszawskiej

Warszawa, 11 września 2023 r.

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY WYDZIAŁU FIZYKI I INFORMATYKI STOSOWANEJ
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

Tytuł rozprawy: Opracowanie wielokanałowego układu scalonego w technologii CMOS do rejestracji aktywności neuronalnej oraz jego aplikacja w funkcjonalnych badaniach mózgu.

(Development of a multichannel CMOS integrated circuit for recording neuronal activity and its application in functional brain research)

Autor rozprawy: mgr inż. Beata TRZPIL-JURGIELEWICZ

- 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)?**

Przedmiotem rozprawy jest zaprojektowanie przedwzmacniacza w postaci układu scalonego spełniającego wymagania wynikające z rejestracji sygnałów neuronowych. Wymagania te dotyczą przede wszystkim redukcji zniekształceń nieliniowych, szumów i poboru mocy. Autorka skoncentrowała się na realizacji pseudo-rezystora w obwodzie sprzężenia zwrotnego wzmacniacza zapewniającej odpowiednio mały współczynnik zniekształceń harmonicznym w całym zakresie częstotliwości interesującym w badaniach mózgu. Praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny, obejmuje bowiem zaprojektowanie wzmacniacza, szereg analiz opartych na symulacjach i jego weryfikację doświadczalną.

Autorka nie sformułowała tezy rozprawy, co wynika ze specyfiki pracy, natomiast celem praktycznym było opracowanie takiego rozwiązania konstrukcyjnego przedwzmacniacza, aby umożliwić skuteczną realizację zintegrowanego narzędzia do badań mózgu przez zespół Katedry Oddziaływań i Detekcji Częstotek AGH.

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

Bibliografia rozprawy liczy 191 pozycji (w tym dwie publikacje własne współautorskie) i świadczy o znajomości literatury przedmiotu.

Obszerny przegląd literatury zajmuje ok. 40% tekstu rozprawy i zawiera wprowadzenie do tematyki rejestracji sygnałów neurobiologicznych w rozdziałach: 1. *Sygnały neuronowe* oraz 2. *Systemy do rejestracji aktywności elektrycznej aktywności elektrycznej żywych tkanek nerwowych*. W szczególności, przedstawiono stosowane rodzaje przedwzmacniaczy w torze odczytowym oraz zasygnalizowano problemy dotyczące technik realizacyjnych i parametrów elektrycznych istotnych dla prawidłowej rejestracji sygnałów, w tym minimalizacji zniekształceń nieliniowych, poziomu szumów, eliminacji składowej stałej, doboru pasma przenoszenia. Przegląd ten świadczy o wiedzy Autorki oraz pełni rolę genezę pracy i stanowi podstawę wyboru kaskody teleskopowej jako operacyjnego wzmacniacza transkonduktancyjnego do realizacji przedwzmacniacza ze sprzężeniem zmiennoprądowym oraz wykorzystania w nim pseudo-rezystorów. Wnioski z przeglądu źródeł są istotne i sformułowane bardzo dobrze.

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

Dla osiągnięcia celu pracy Autorka zasadnie zaadaptowała wybrany wzmacniacz operacyjny ze sprzężeniem AC oczekując niższego poziomu szumów wejściowych a także redukcji zniekształceń harmoniczných przez opracowanie odpowiedniej linearyzacji pseudo-rezystora w postaci tranzystorów MOS w pętli sprzężenia zwrotnego.

Sposób rozwiązania zadania można uznać za wzorcowy biorąc pod uwagę sekwencję poszczególnych etapów realizacyjnych. Po przeglądzie literaturowym prawidłowo zostały zaplanowane studia wykonalności wybranego układu oparte na symulacjach koncentrujących się na badaniach szumów i zniekształceń w funkcji częstotliwości sygnału dla określonych parametrów konstrukcyjnych tranzystorów i warunków polaryzacji. Uwzględniono też w tych badaniach rozrzuty produkcyjne posługując się symulacją Monte-Carlo. Wyniki przeprowadzonych analiz zostały umiejętnie wykorzystane do zaprojektowania przedwzmacniacza scalonego, a następnie przed prototypowaniem wykonano „*post-layout simulation*” z uwzględnieniem elementów pasożytniczych. Do implementacji projektu w krzemie wybrano technologię SOI (XFAB 180 nm), co pozwala zredukować ewentualne sprzężenia przez podłoże. Weryfikację doświadczalną wykonano w dwóch etapach. Najpierw w specjalnie zaprojektowanym systemie pomiarowym wyznaczono interesujące parametry zrealizowanego układu *HiFiNeuroPre* dla różnych wariantów pojemności wejściowej i elementów pętli sprzężenia zwrotnego stwierdzając dobrą zgodność zmierzonych parametrów z przewidywaniami wynikającymi z symulacji. Ostatnim etapem było wykorzystanie zaprojektowanego układu z systemem akwizycji danych w eksperymencie neurofizjologicznym przeprowadzonym w Instytucie Biologii Doświadczalnej im. Marceliego Nenckiego w Warszawie. Eksperyment ten potwierdził przydatność opracowanego układu w badaniach neurobiologicznych ze względu na odpowiednią dokładność rejestracji sygnałów w interesujących pasmach częstotliwości: dla potencjałów polowych (1 Hz – 100 Hz) i dla potencjałów czynnościowych (300 Hz – 10 kHz).

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?

Szereg wyników wykonanych badań opublikowano na 5 konferencjach i w czasopiśmie *Sensors* (open access - MDPI). Wprawdzie są to prace współautorskie, ale o znaczącym udziale Autorki rozprawy świadczy to, że we wszystkich występuje na pierwszej pozycji, a współautorami są promotorzy. Zgodnie z odpowiednią informacją do artykułu „*Analysis and reduction of nonlinear distortion in ac-coupled cmos neural amplifiers with tunable cutoff frequencies*” (*Sensors* 2021), który przedstawia projekt układu i większość wyników badań symulacyjnych, wkład doktorantki jest autorski w przeprowadzeniu tych badań i zaprojektowaniu układu scalonego, a w opracowaniu schematu elektrycznego wzmacniacza i analizie wyników - pierwszoplanowy.

Wprawdzie koncepcja wykorzystania transkonduktancyjnego wzmacniacza operacyjnego ze sprzężeniem zmiennoprądowym i wykorzystaniem pseudorezystorów jest znana, wykonane analizy pozwoliły zaprojektować przedwzmacniacz o ulepszonych parametrach. W szczególności zaprojektowano nową realizację pseudo-rezystorów ze stałym napięciem polaryzacji bramek tworzących je dwóch tranzystorów p-MOS połączonych szeregowo, co pozwoliło zmniejszyć zniekształcenia harmoniczne (mierzone współczynnikiem THD). W celu zmniejszenia powierzchni układu napięcia polaryzacji bramek pseudo-rezystora na wejściu nieodwracającym wzmacniacza i bramki jednego tranzystora w pętli sprzężenia (dołączonego do wejścia odwracającego) jest generowane wspólnie dla wszystkich kanałów. Polaryzację bramki drugiego tranzystora w tej pętli stanowi spadek napięcia na rezystorze polikrystalicznym lokalnym dla każdego kanału. Dla zmniejszenia rozrzutu parametrów pseudo-rezystorów opracowano odpowiedni układ korekcyjny.

Opracowany wzmacniacz charakteryzuje się niskimi zniekształceniami nieliniowymi w szerokim zakresie częstotliwości sygnału (1 Hz – 10 kHz) i amplitud (do 10 mVpp), co oznacza jego przydatność w całym interesującym zakresie częstotliwości sygnałów neuronowych. Zredukowanie THD do poziomu poniżej 1% dla niskich częstotliwości (zakres LFP) stanowi istotne osiągnięcie na tle rozwiązań standardowych znanych z literatury. Przy tym niewielki jest poziom szumów, powierzchnia układu i pobór mocy.

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

Koncepcję eksperymentów symulacyjnych, wykorzystane metody oraz analizy i wnioski przedstawiono w sposób przejrzysty, a układ pracy jest wyważony i logiczny. Rozprawa napisana jest zwięźle, a chociaż niektóre zagadnienia są przedstawione bardzo skrótowo nie przeszkadza to w lekturze. Należy podkreślić, że dobre przedstawienie poszczególnych zagadnień nie było łatwe, ze względu na ich mnogość i skomplikowane współzależności.

Autorka nie ustrzegła się usterek edytorskich. W tekście pracy jest relatywnie dużo literówek, występują też drobne błędy gramatyczne, co świadczy prawdopodobnie o nadmiernie pospiesznym finalizowaniu rozprawy. Innych niedociągnięć jest niewiele, np.: na rysunkach 3.13 i 3.14 na osi odciętych skala częstotliwości obejmuje zakres od 0.1 Hz do 100 Hz, podczas gdy w podpisie podano pasmo 1 Hz – 10 kHz. Ponadto tabela 4.3 jest wadliwie zbudowana i bez dodatkowego opisu nieczytelna.

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

Rozprawa nie ma istotnych wad. Słabą stroną są wspomniane wyżej usterki edytorskie, które nie umniejszają wartości merytorycznej pracy.

Celem rozprawy jest zaprojektowanie układu do rejestracji sygnałów neurobiologicznych co narzuca pewne ogólne wymagania przedstawione w przeglądzie literatury. Zwykle jednak wymagania projektowe formułowane są *explicite* w formie granicznych wartości istotnych parametrów, lecz takich na dla pracy nie określono. W tej sytuacji pierwszorzędного znaczenia nabiera porównanie wartości osiągniętych parametrów zaprojektowanego wzmacniacza z danymi dostępnymi z literatury. Brak zestawienia porównawczego w formie tabeli budzi pewien niedosyt. Wprawdzie standardowo w odniesieniu do zniekształceń harmoniczných wartość THD podawana jest zwykle dla częstotliwości 1 kHz, a nie w szerszym zakresie, to jednak takie zestawienie byłoby zasadne uwzględniając zarówno ogólne stwierdzenia jak i wartości innych parametrów.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych?

Recenzent korzysta ze wzorca recenzji od lat stosowanego na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych PW, stąd powyższe zawężające brzmienie pytania. Trzon pracy obejmujący projekt układu i jego charakteryzację mieści się w obszarze elektroniki (elektroniki biomedycznej), jednak granica z dziedziną nauk ścisłych i przyrodniczych nie jest ostra. Chociaż rozprawa ma pewne cechy interdyscyplinarne recenzent może sformułować następujące uwagi:

- W projekcie przedwzmacniacza rozwiązanie dotyczące realizacji pseudo-rezystora w pętli sprzężenia zwrotnego ma znaczenie uniwersalne i może być wykorzystane z powodzeniem przy projektowaniu wzmacniacza do różnych zastosowań.
- W pracy wykonano na szeroką skalę rzetelne badania symulacyjne dotyczące zniekształceń harmoniczných i szumów, a ich wyniki zostały potwierdzone doświadczalnie. Zagadnienia te, a zwłaszcza problemy redukcji szumów i poboru mocy występują powszechnie w projektowaniu wielu systemów elektronicznych, więc również ta część pracy może być przydatna dla projektantów i dla analizy tych efektów fizycznych.
- W szczególności, wyniki przeprowadzonych badań mogą być użyteczne przy konstruowaniu różnych urządzeń sensorowych, nabierających coraz większego znaczenia wobec rozwoju inżynierii internetu rzeczy, a także wykorzystane w pokrewnych zastosowaniach wzmacniaczy w aktywnych czujnikach pikselowych.

8. Konkluzja

W opinii recenzenta rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w art. 187 Ustawy z dnia 14 marca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce. **Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Beaty Trzpil-Jurgielewicz do publicznej obrony rozprawy.**

A. Trzpis