



Akademia Górnictwo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
AGH University of Science
and Technology

AGH

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

mgr inż. Beata TRZPIL-JURGIELEWICZ

promotorzy:

prof. dr hab. inż. Władysław DĄBROWSKI

dr inż. Paweł HOTTOWY

Plan prezentacji

- 1 Systemy do rejestracji aktywności elektrycznej żywych tkanek nerwowych
- 2 Projekt liniowego pseudo-rezystora w zakresie $G\Omega$
- 3 Operacyjny wzmacniacz transkonduktancyjny
- 4 Weryfikacja elektroniczna i neurofizjologiczna układu scalonego HiFiNeuroPre

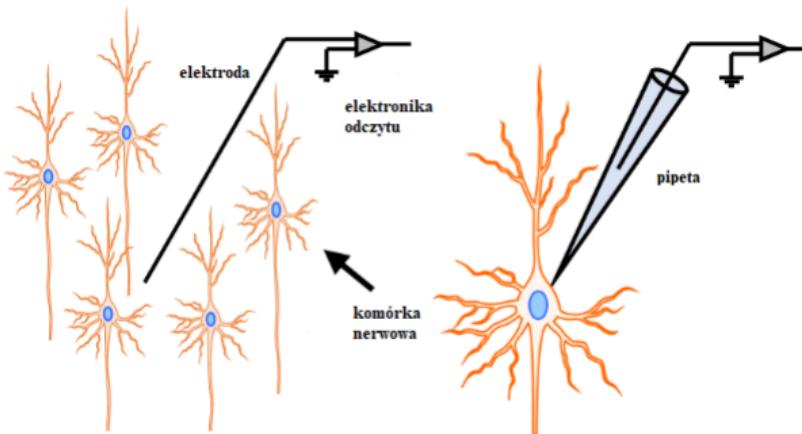
Część I

Tematyka pracy

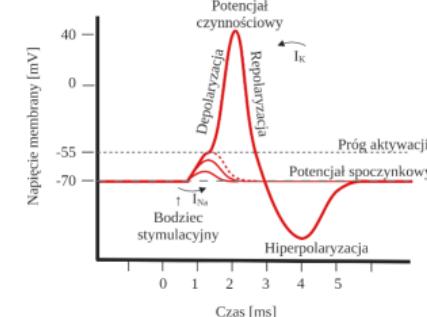
Wstęp

Techniki pomiarowe wewnętrz i zewnętrzkomórkowe w neurobiologii

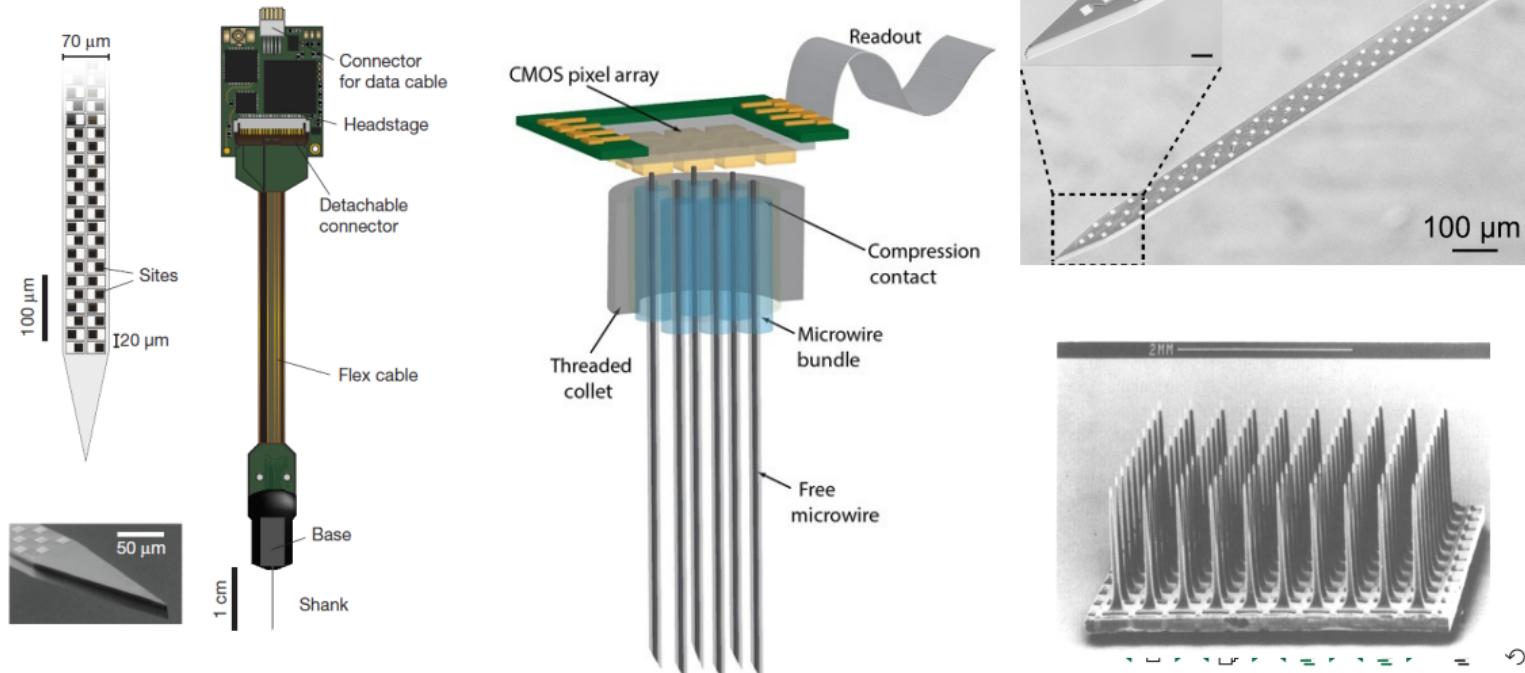
- różne amplitudy sygnałów
 - inwazyjność badań
 - obszar badań



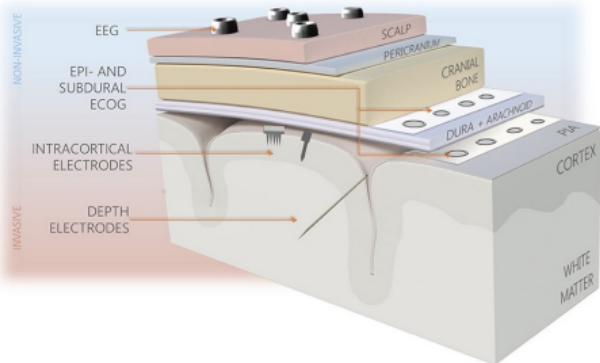
Potencjał czynnościowy



Kierunki rozwoju współczesnych systemów pomiarowych i matryc mikroelektrodowych

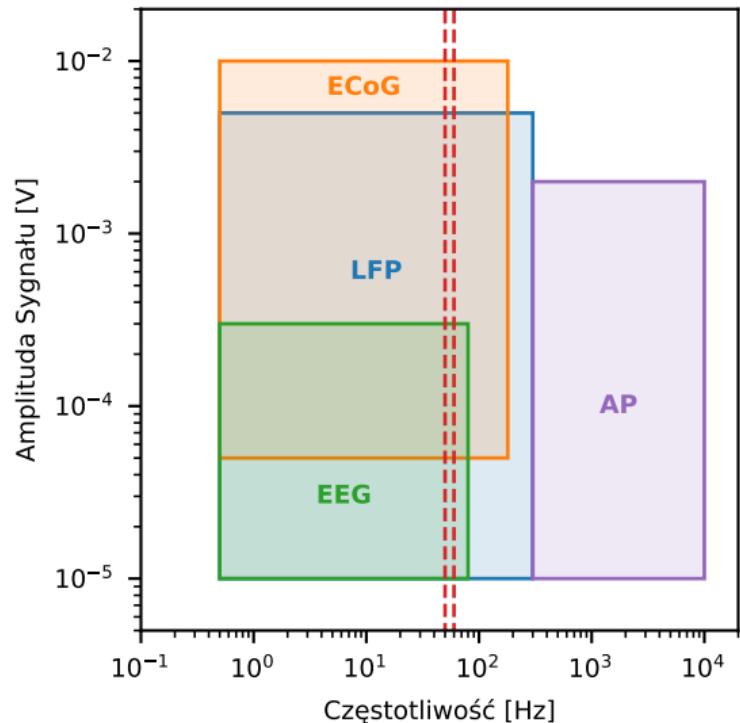


Zakresy amplitud i częstotliwości sygnałów neuronowych

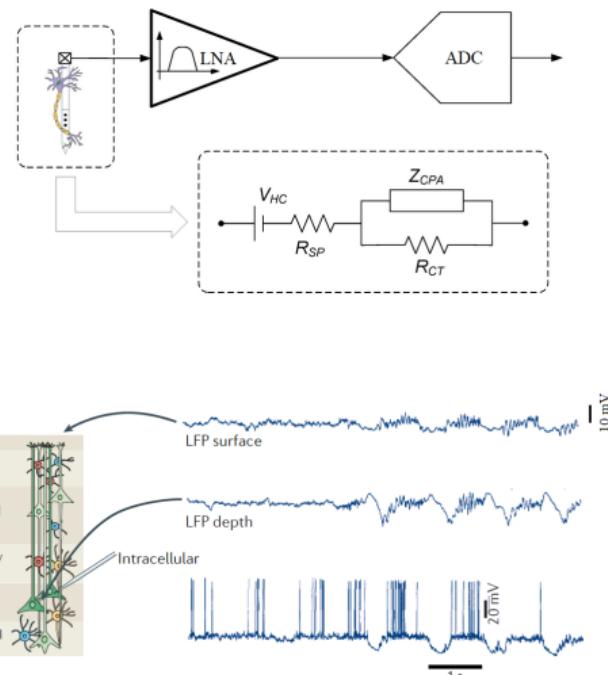


Metody rejestracji

- LFP – Local Field Potential
- AP – Action Potential
- ECoG – Electrocorticography
- EEG – Electroencephalography



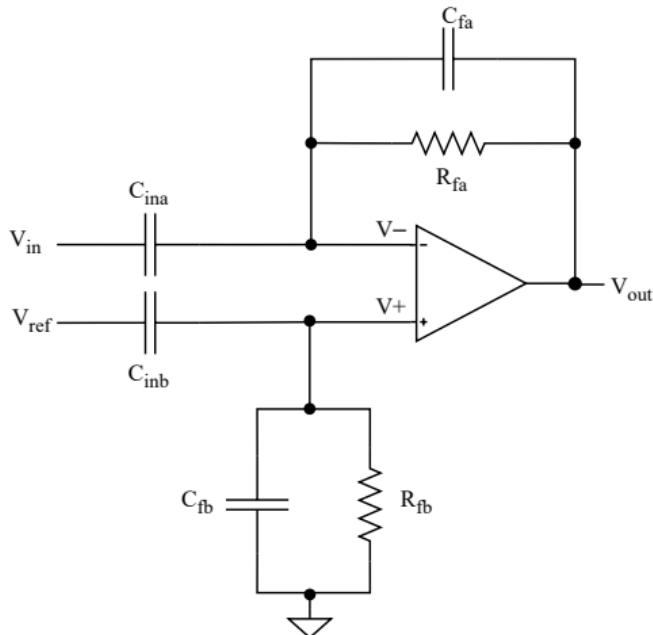
Kanał rejestracji neuronowej z wykorzystaniem elektrod zewnętrzkomórkowych



Wymagania stawiane interfejsom neuroelektronicznym umożliwiającym rejestrację sygnałów LFP i AP

- Offset stały na styku elektrody – do 1 V do 2 V
- Szумy $< 5 \mu\text{V}$ dla pasma LFP i AP
- Liniowość rejestrowanego sygnału
- Pobór mocy – limit ogrzewania tkanki mózgowej – mniej niż 1 °C
- Zróżnicowane sygnały: amplituda do 10 mV_{pp} dla LFP i od 50 µV dla AP
- Skalowalność systemu – tysiące kanałów dla przyszłych systemów

Sprzężenie zmiennoprądowe



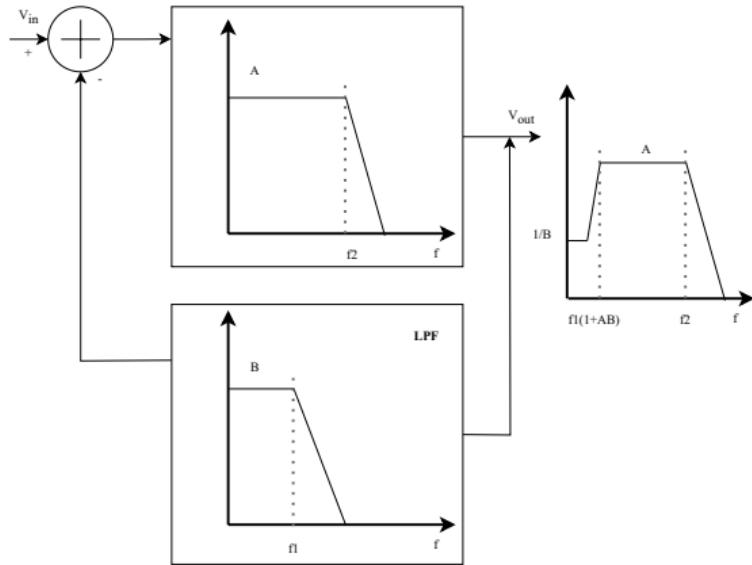
Wyzwania związane z sprzężeniem AC

- Niska dolna częstotliwość graniczna rzędu $\sim 1 \text{ Hz}$
- Pojemności w technologii CMOS są rzędu $f\text{F} \cdot \mu\text{m}^{-2}$
- Rezystancja sprzężenia zwrotnego w zakresie $T\Omega$

Zalety

- Usunięcie składowej stałej od elektrody niezależnie od jej wartości
- Wydajność szumowa i poboru mocy

Sprzężenie stałoprądowe

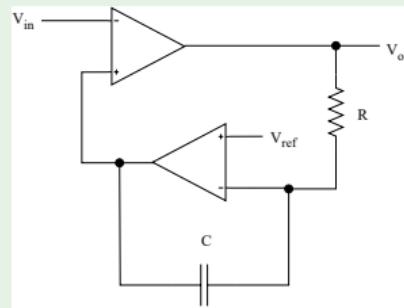


Wyzwania związane z sprzężeniem DC

- Duża wrażliwość na offset
 - Pobór mocy

Zalety

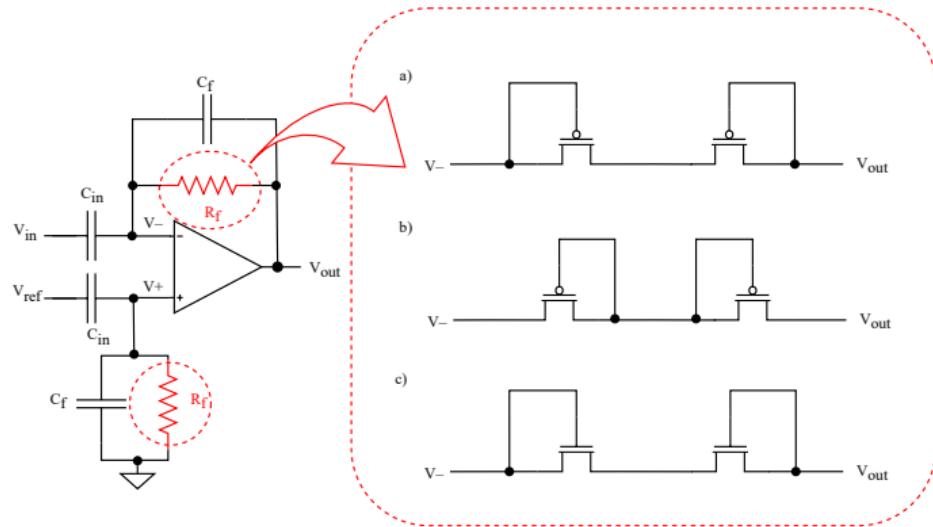
- Brak konieczności używania dużych rezystancji w pętli sprzężenia zwrotnego



Część II

Liniowy pseudo-rezystor

Podstawowe rozwiązania pseudo-rezystorów

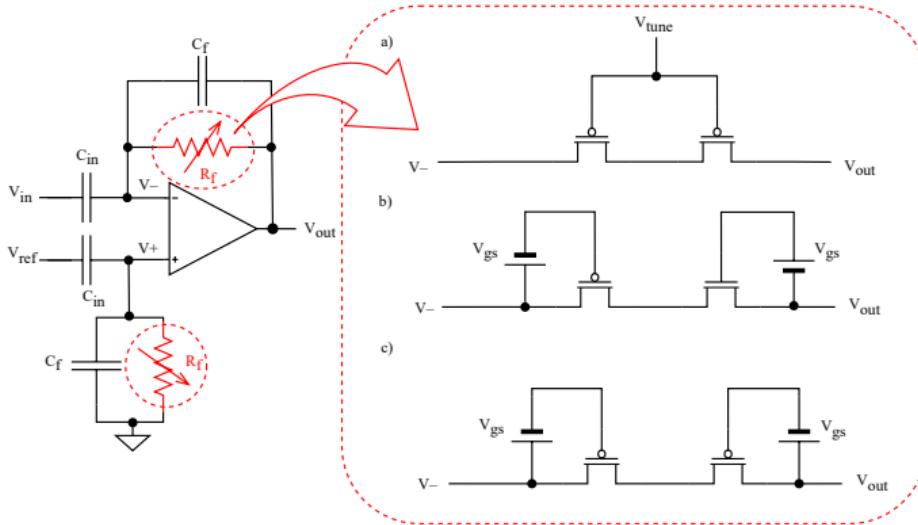


Wady

- stała rezystancja
- brak możliwości regulacji częstotliwości granicznej

Podstawowe rozwiązania pseudo-rezystorów - regulowana wartość rezystancji

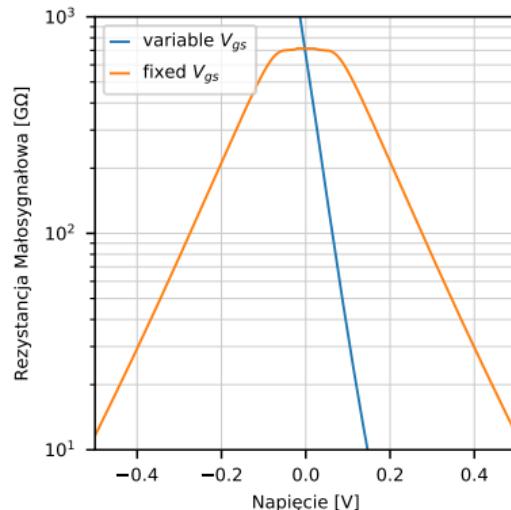
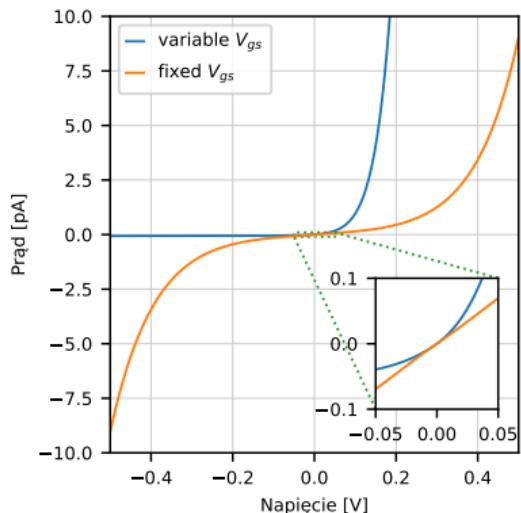
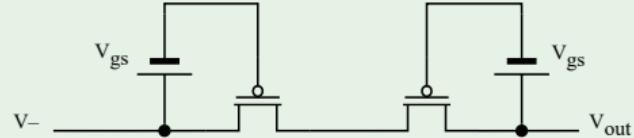
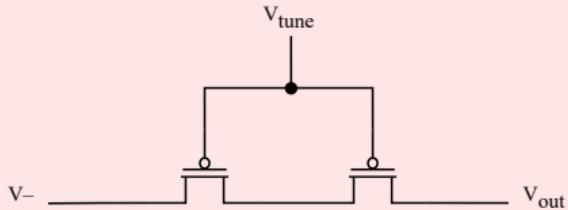
Regulacja częstotliwości granicznej



Zmieniające się napięcie panujące pomiędzy bramką a źródłem tranzystora w zależności od sygnału wejściowego

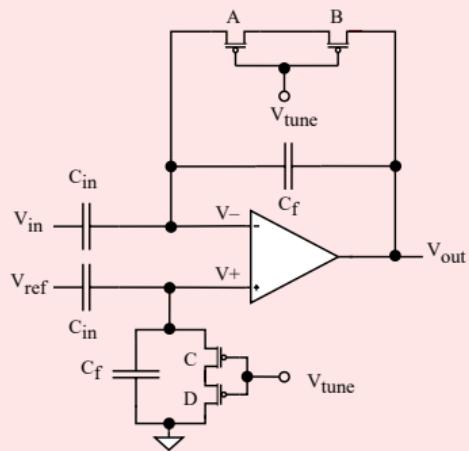
Zachowanie stałego napięcia pomiędzy bramką, a źródłem niezależnie od sygnału wejściowego

Analiza stałoprądowa

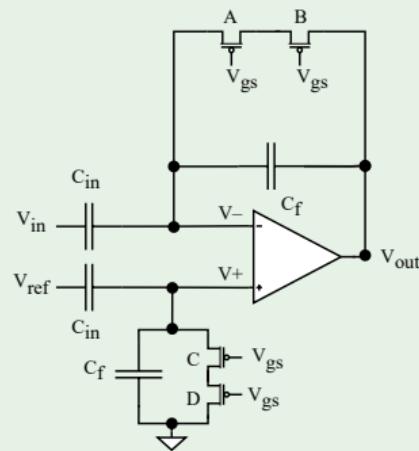


Architektura wzmacniacza neuronowego wykorzystującego sprzętowanie zmiennoprądowe w różnych implementacjach pseudo-rezystorów

Zmienne napięcia na bramce –
variable – V_{gs}



Sąłe napięcia na bramce –
fixed – V_{gs}

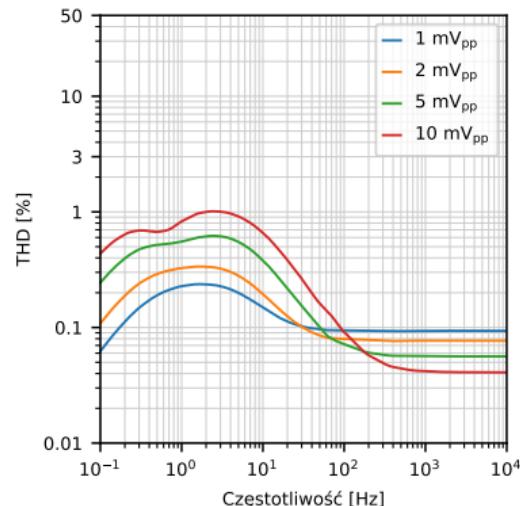
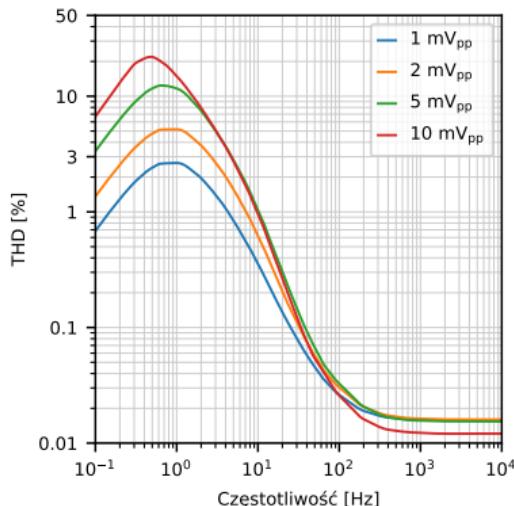


Analiza Transient sprzeżenia AC

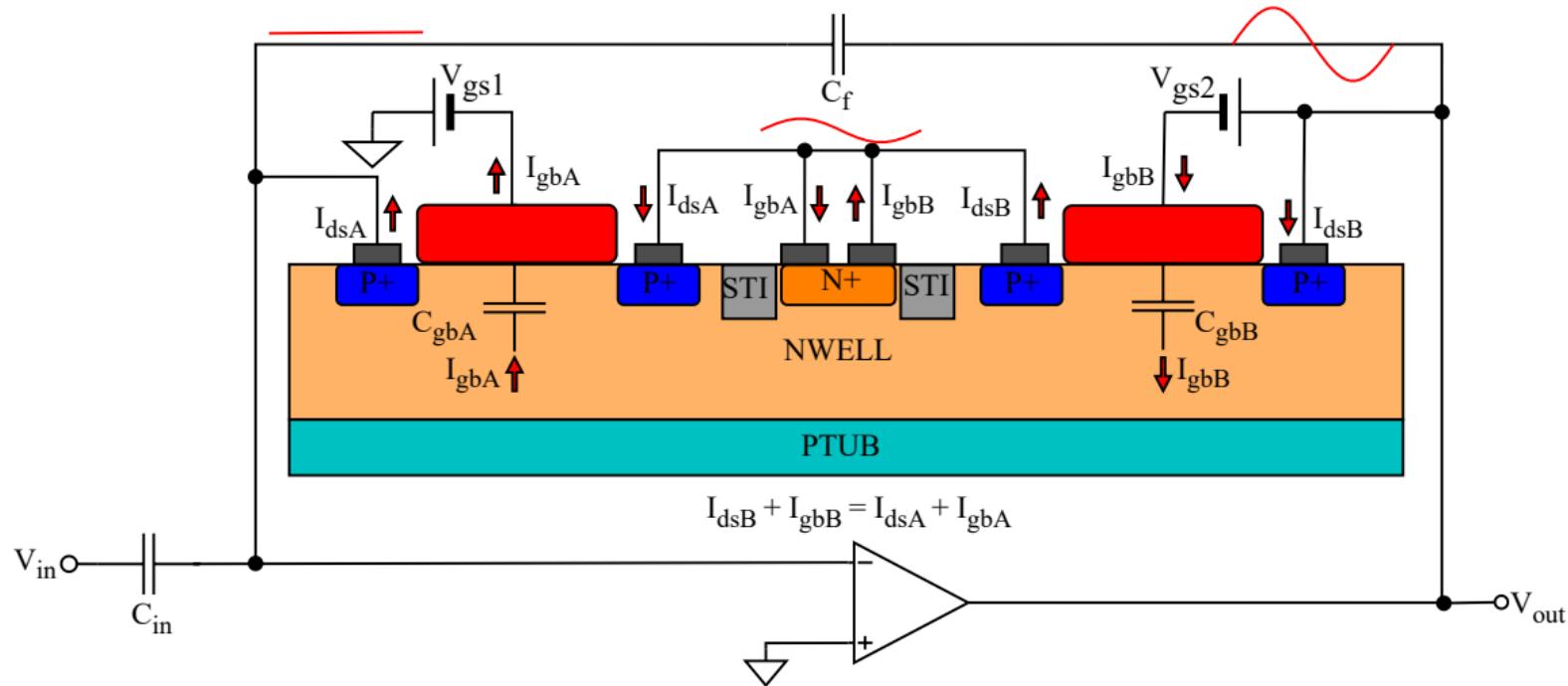
Ustawienia symulacji

- Częstotliwość graniczna dla sprzeżenia AC $\sim 1 \text{ Hz}$

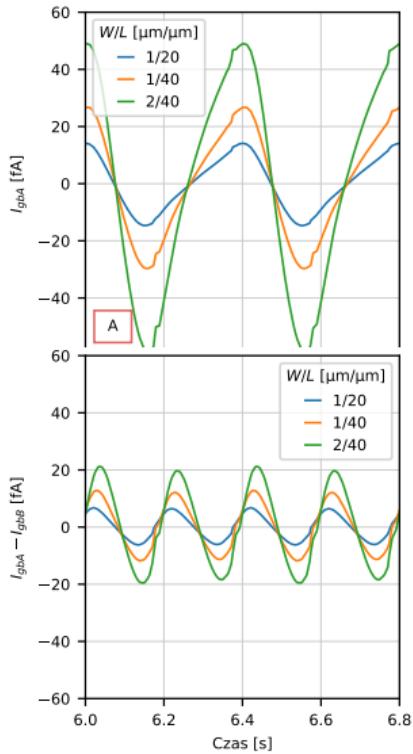
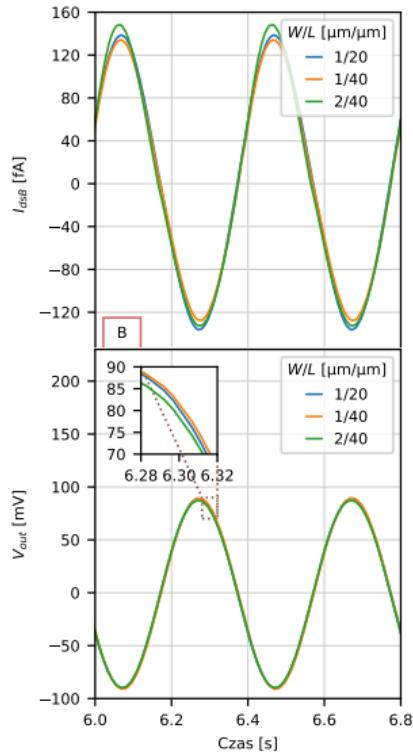
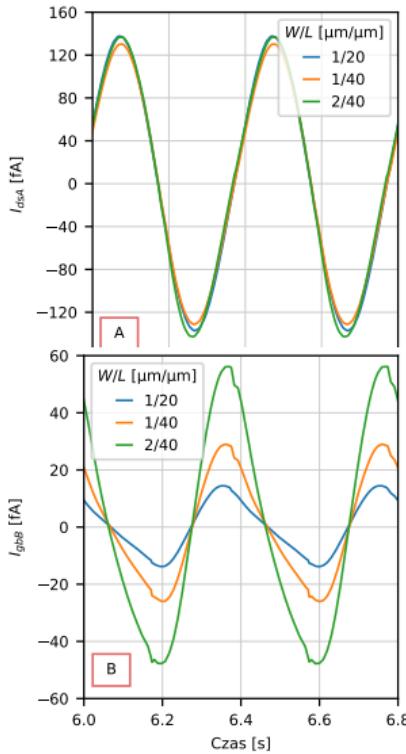
$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{+\infty} U_k^2}}{U_1}$$



Projekt przedwzmacniacza z modelem pseudo-rezystora w technologii 180 nm XFAB

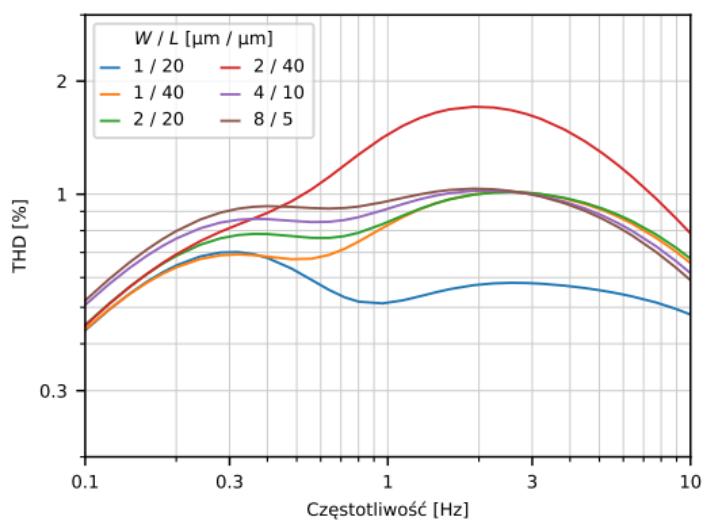


Wpływ pojemnościowych prądów bramki pseudo-rezystorów na zniekształcenia w technologii 180 nm

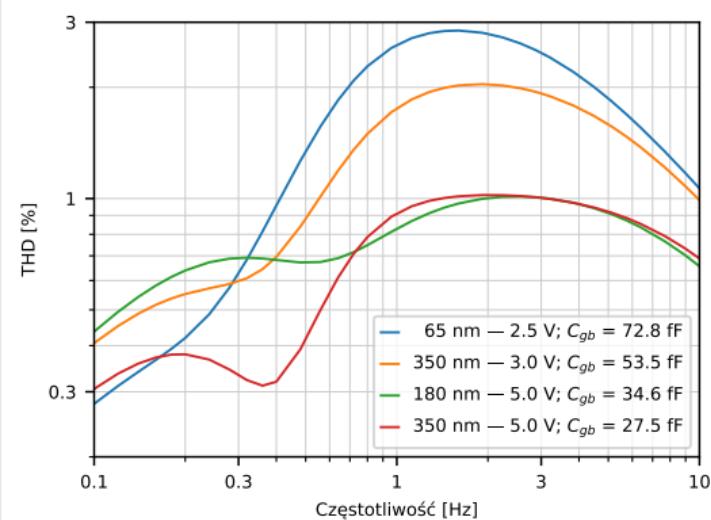


Skalowanie zniekształceń z powierzchnią bramki i grubością tlenku tranzystorów tworzących pseudo-rezystory

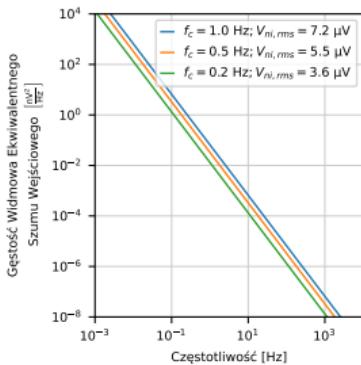
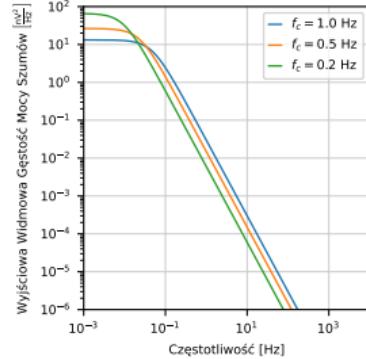
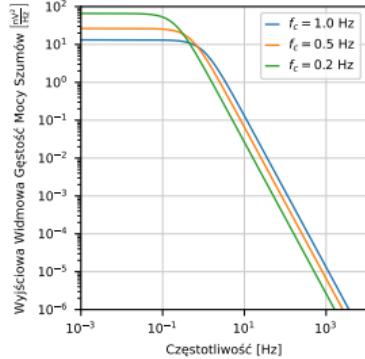
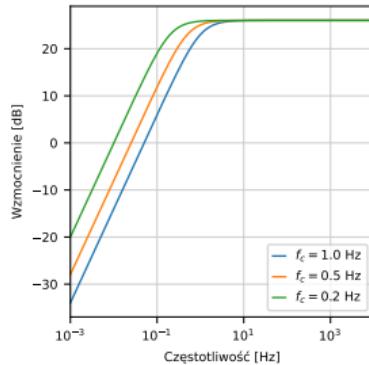
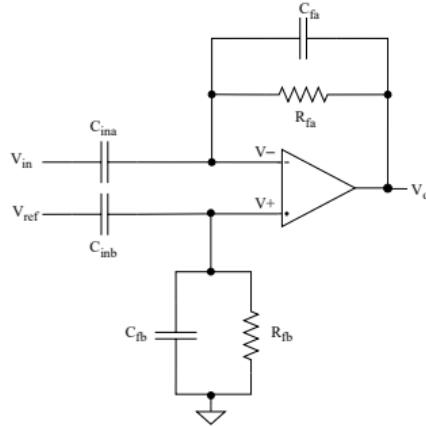
Powierzchnia bramki – technologia 180 nm



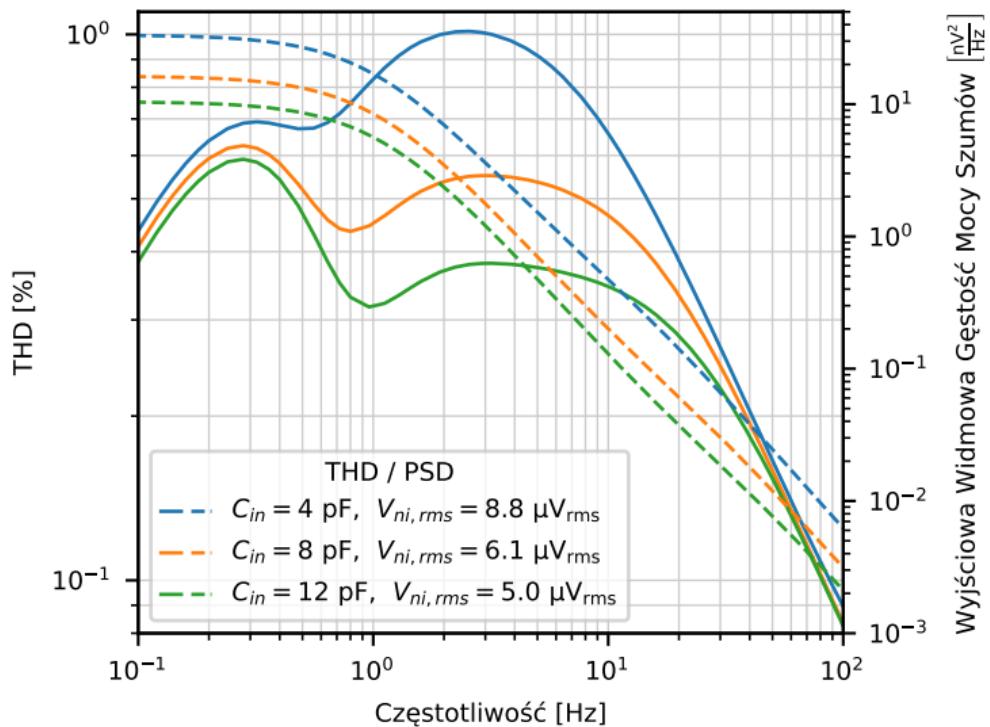
Zależność od technologii



Szumy



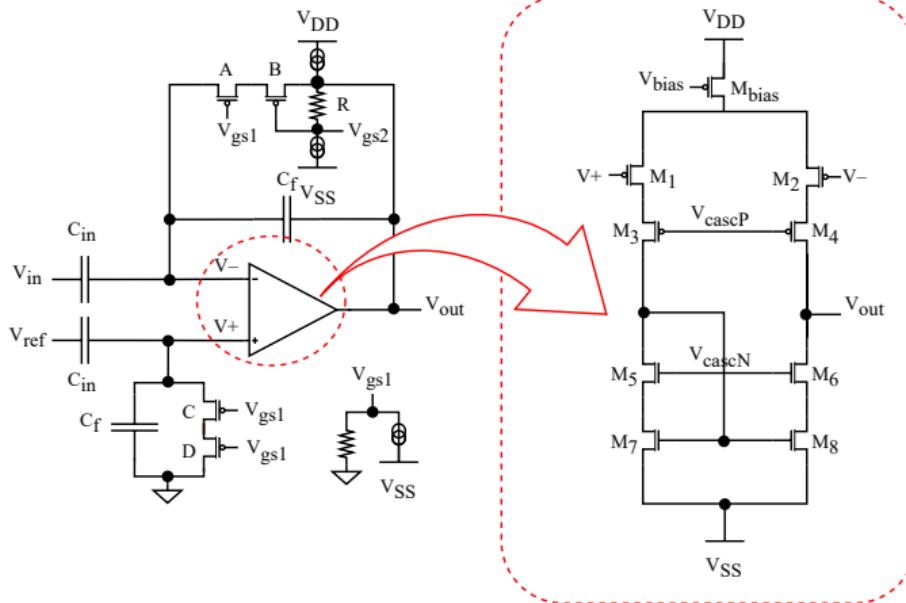
Wpływ pojemności wejściowych na szумy i zniekształcenia



Część III

Operacyjny wzmacniacz transkonduktancyjny

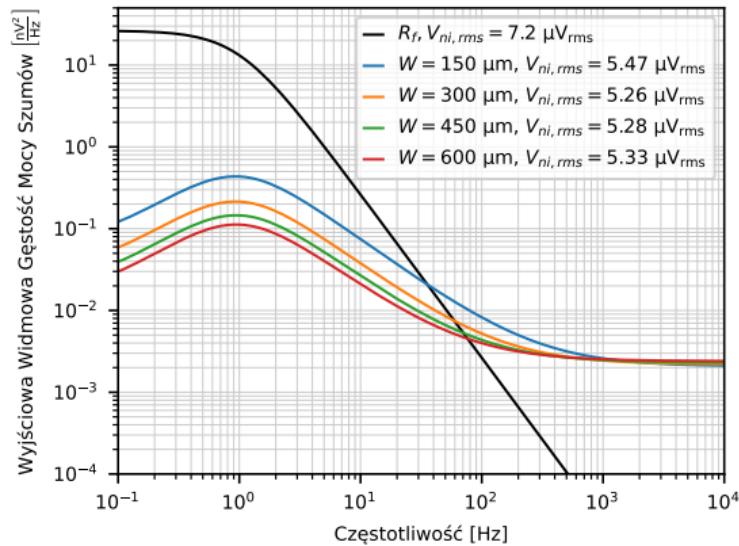
Implementacja teleskopowej kaskody ze zintegrowanym sprzężeniem AC

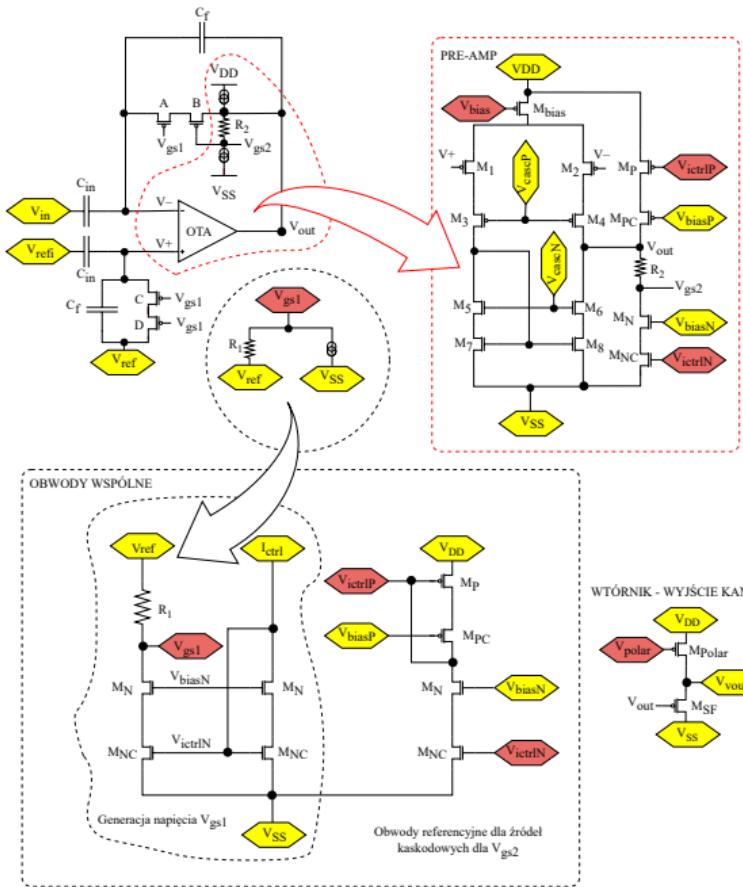


Kluczowe wymagania

- optymalizacja szumowa
- powierzchnia
- pobór mocy

Analiza szumowa pary różnicowej



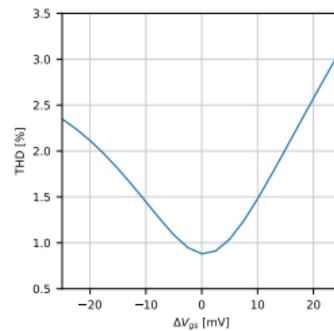
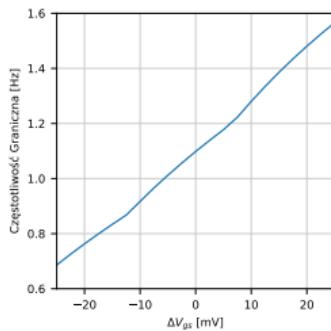
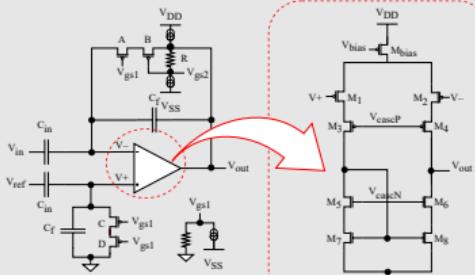


Przedwzmacniacz z
wejściowym obwodem
sprzęgającym AC oraz obwody
polaryzujące

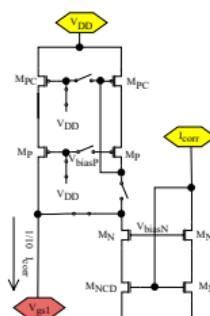
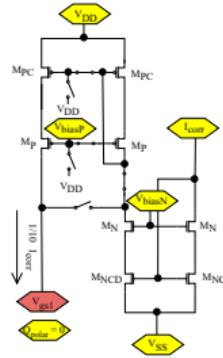
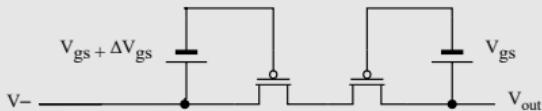
Kluczowe tranzystory	W [μm]	L [μm]
M_{bias}	10	10
M_1, M_2	300	1
M_3, M_4	20	2
M_5, M_6	5	5
M_7, M_8	4	48

Blok korekcji

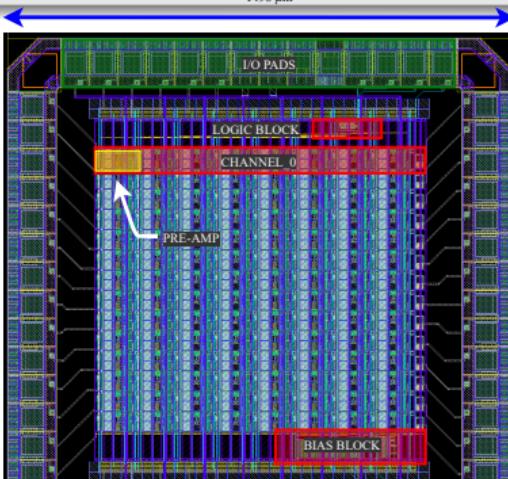
Projekt kanału



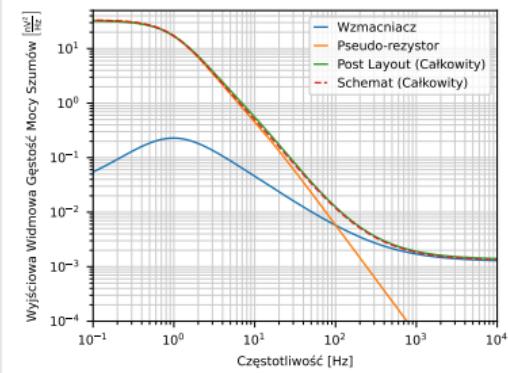
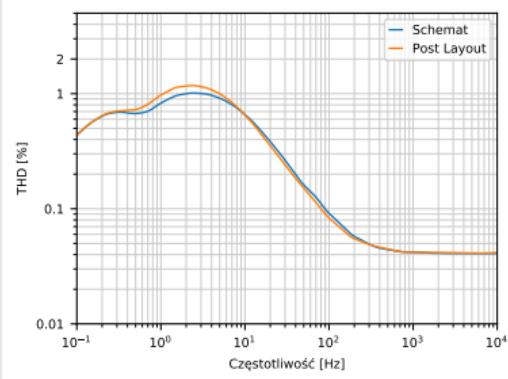
Wyzwania do rozwiązania



- 8 wersji przedwzmacniacza
- 14 kanałów pomiarowych
- cztery wersje rozmiarów tranzystorów PMOS tworzących pseudo-rezystory – odpowiednio W/L :
2/40, 1/40, 2/20, 1/20 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$
- 2 konfiguracje pojemności –
 $C_{in}/C_f = 4/200 \text{ pF/fF}$



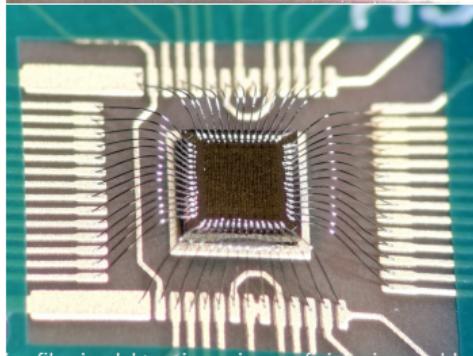
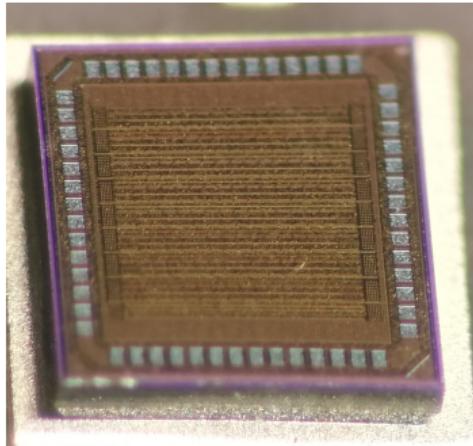
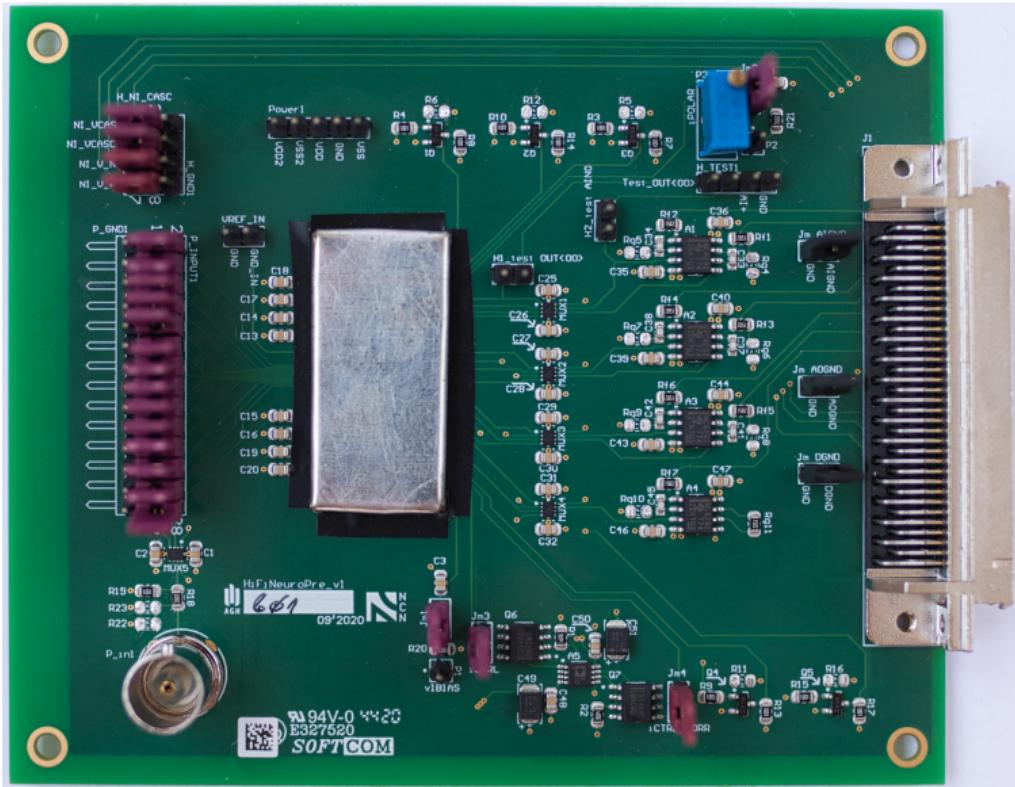
Symulacje Post-Layout



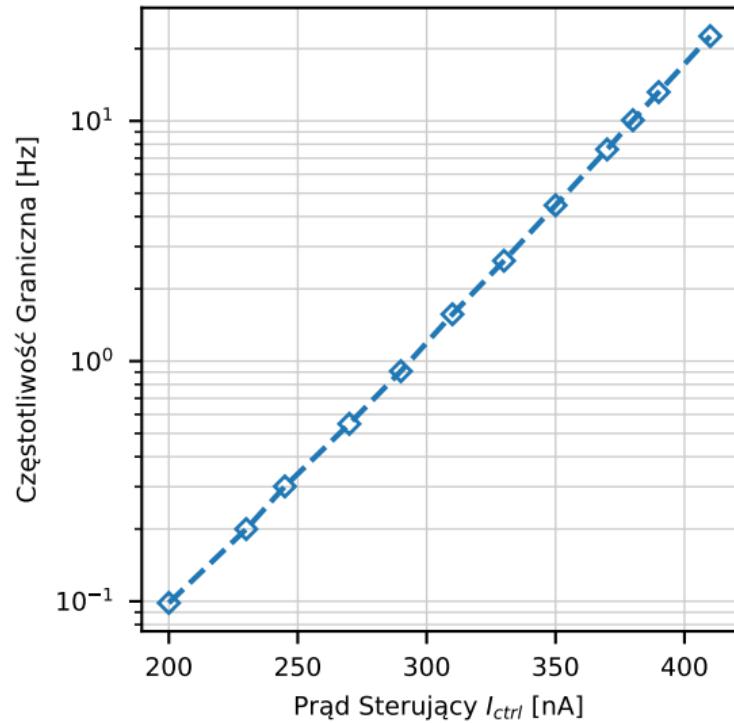
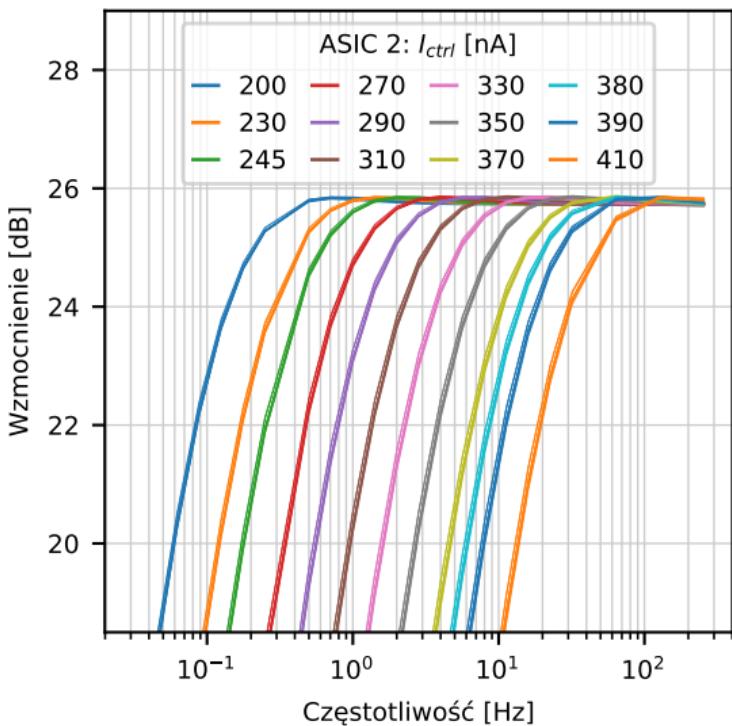
Część IV

Weryfikacja elektroniczna i neurofizjologiczna układu scalonego HiFiNeuroPre

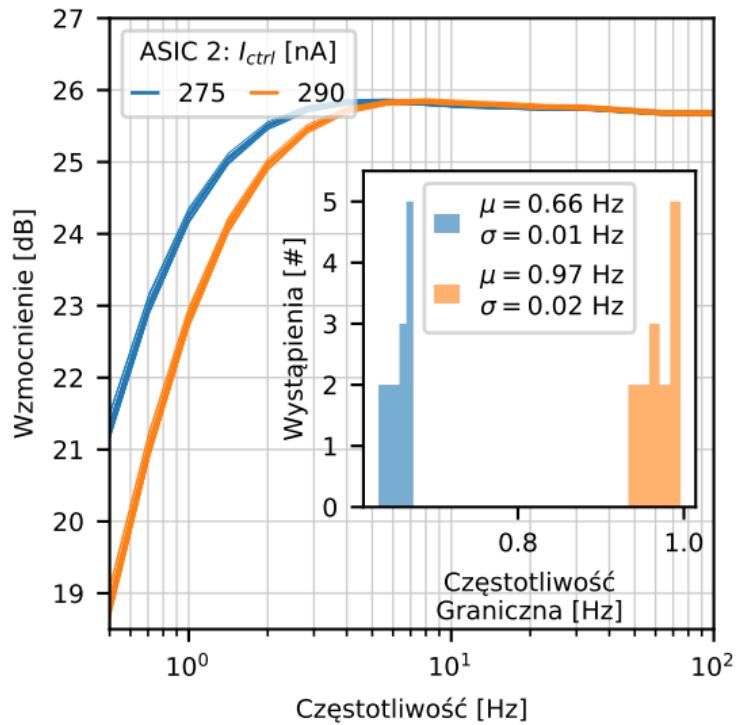
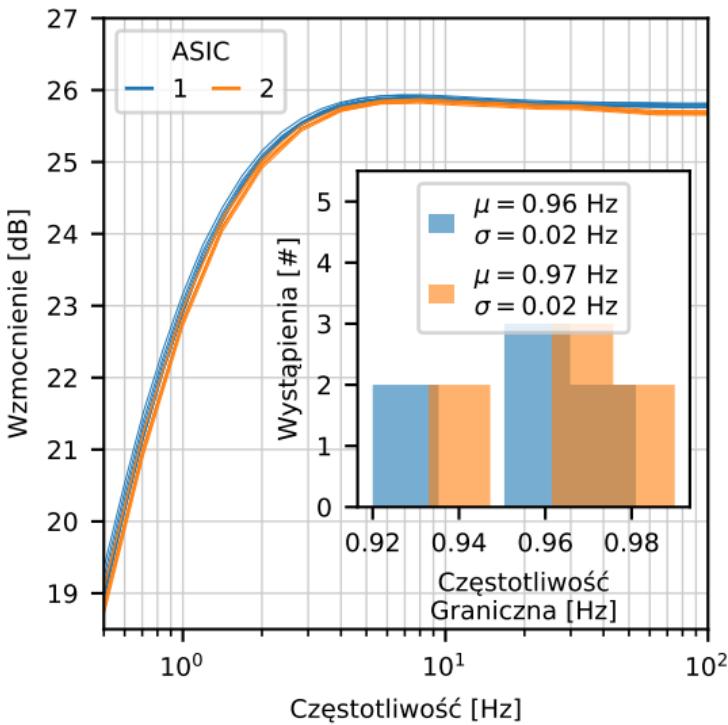
System testowy



Wzmocnienie, częstotliwość graniczna

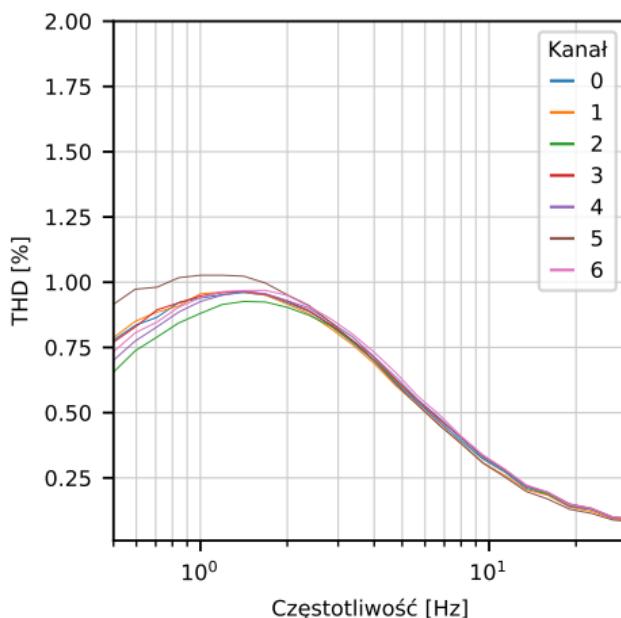


Jednorodność kanałów

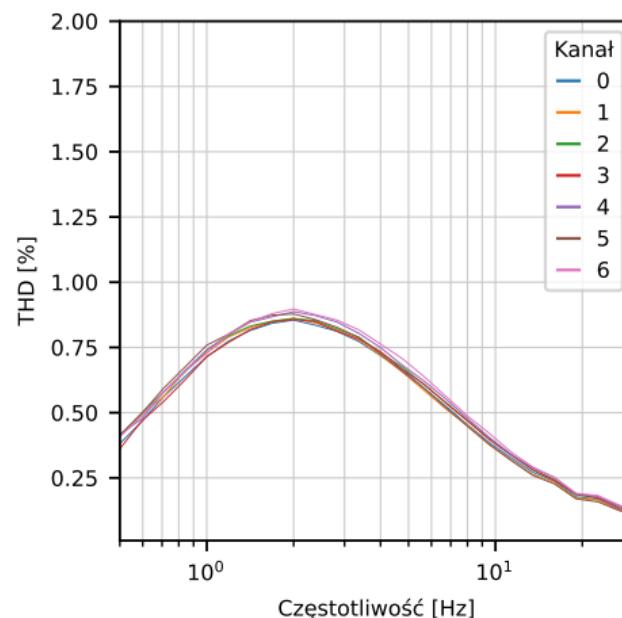


Pomiary zniekształceń harmonicznych – wpływ korekty

Brak globalnej korekty

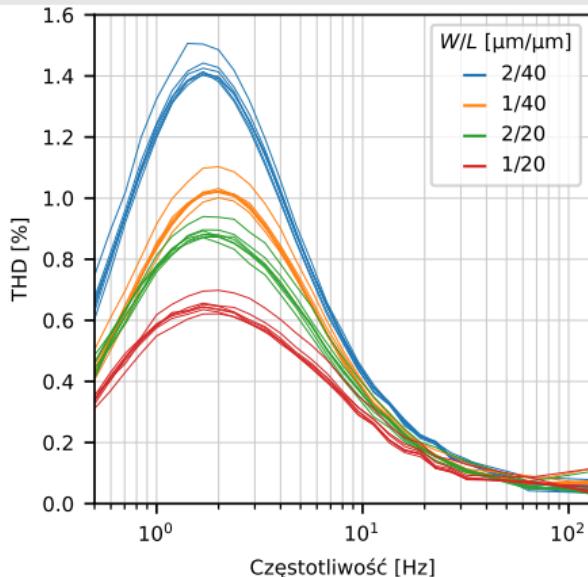


Korekta globalna

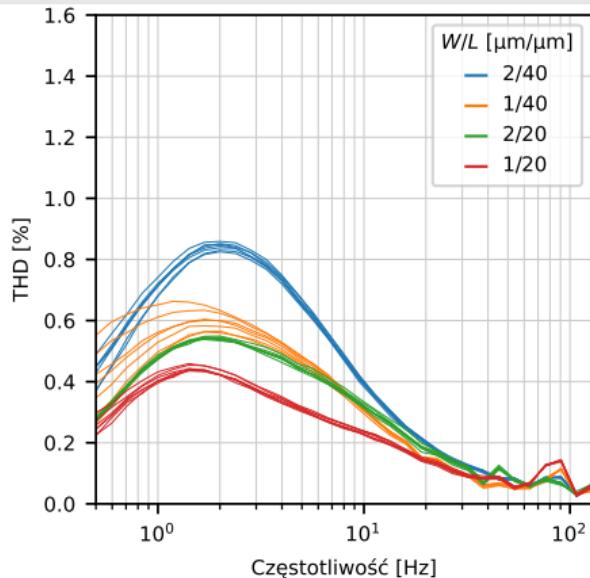


Konfiguracje przedwzmacniacza

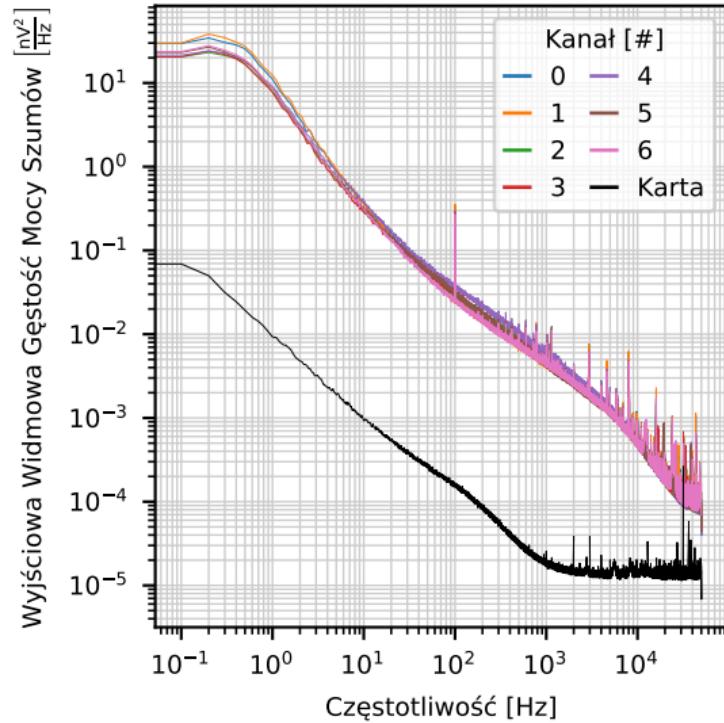
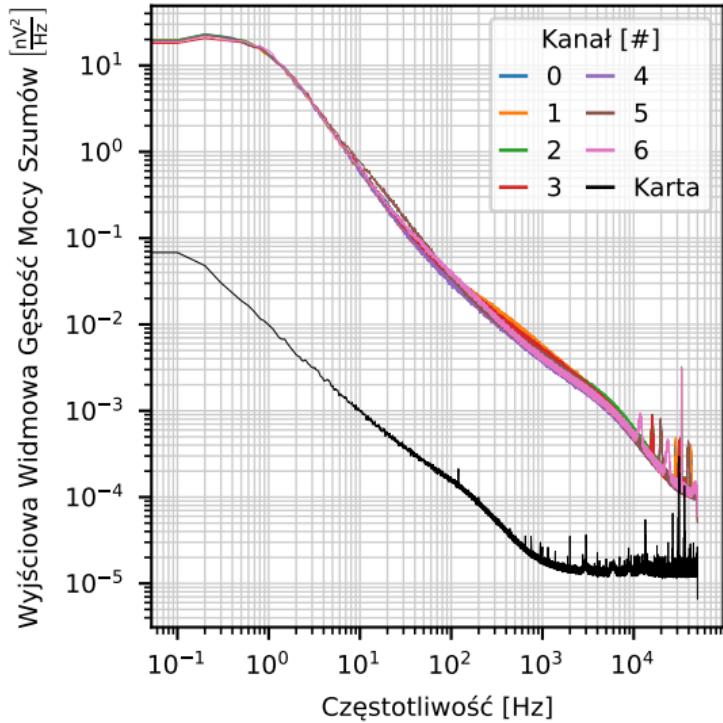
Symetryczna konfiguracja



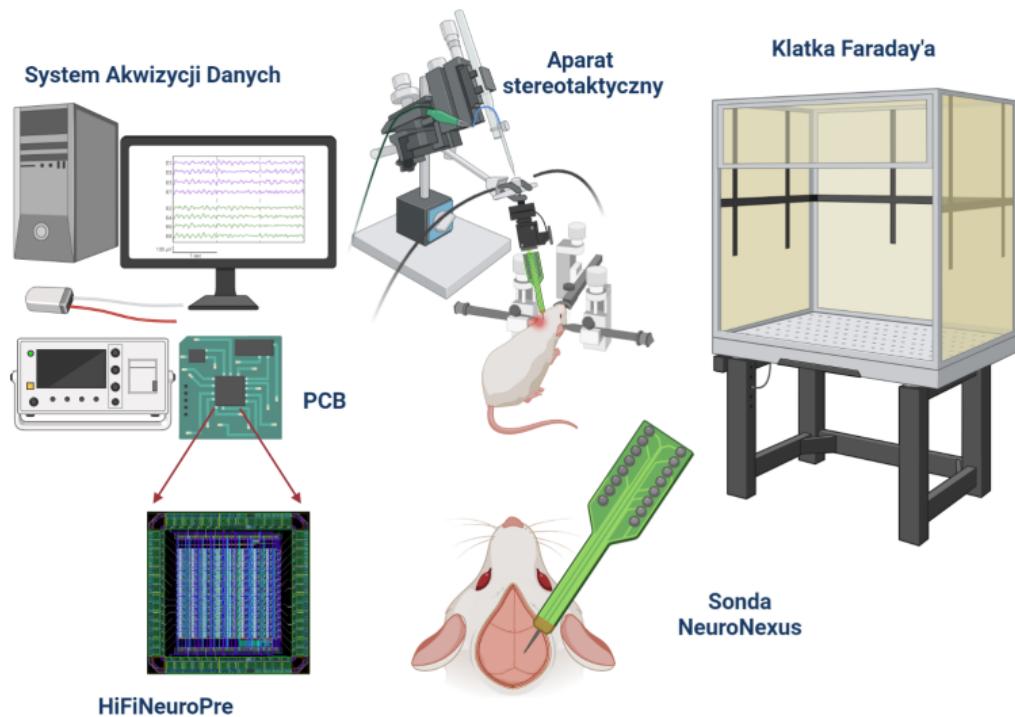
Drugi wariant przedwzmacniacza z większymi pojemnościami wejściowymi

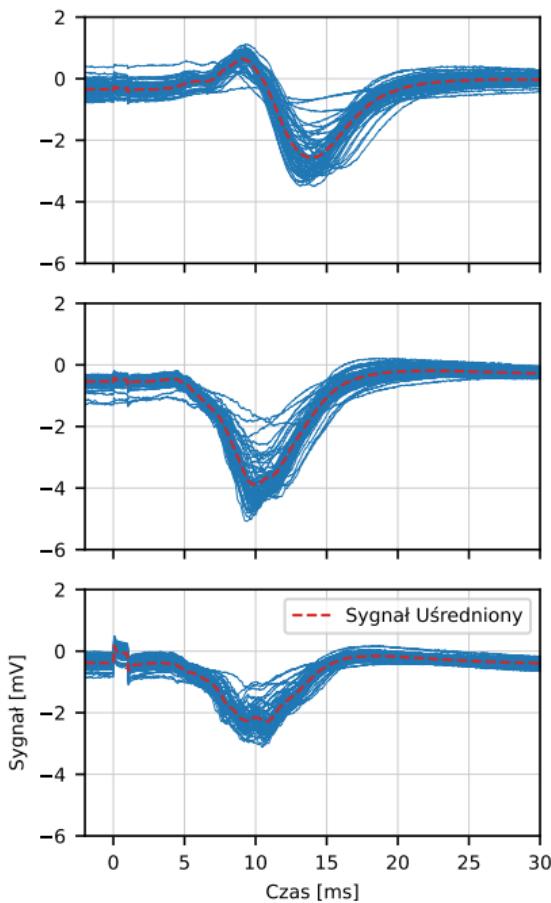


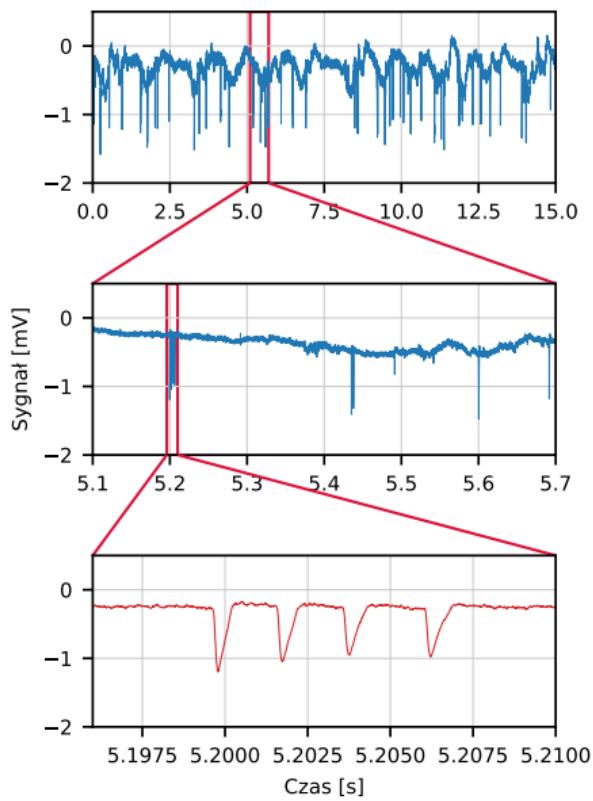
Pomiary szumów



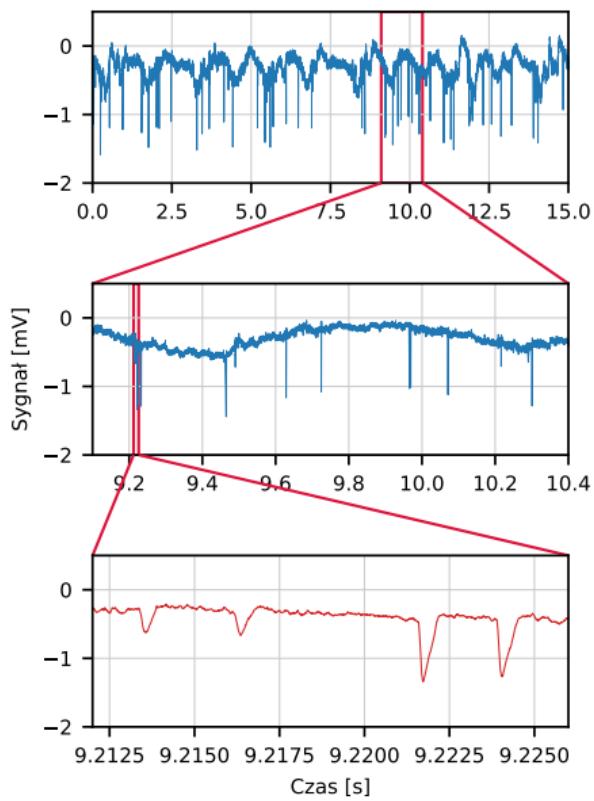
System pomiarowy do akwizycji sygnałów neurobiologicznych







(a)



(b)

Część V

Podsumowanie

Podsumowanie testów elektronicznych

Tabela 1: Parametry przedwzmacniacza na podstawie pomiarów weryfikacyjnych

Parametr	Wartość
Napięcia zasilania	$\pm 1,8 \text{ V}$
Całkowity prąd	$2 \mu\text{A}$
Pobór mocy dla pojedynczego kanału	$7,2 \mu\text{W}$
Wzmocnienie z zamkniętą pętlą sprzężenia	25,9 dB
Zakres dolnej częstotliwości granicznej	0,1 Hz do 20 Hz
Ekwiwalentny szum wejściowy w zakresie LFP	$7,5 \mu\text{V}_{\text{rms}}$
Ekwiwalentny szum wejściowy w zakresie AP	$6,7 \mu\text{V}_{\text{rms}}$
Zniekształcenia harmonioyczne THD – $10 \text{ mV}_{\text{pp}}$ 1,68 Hz	0,94 %
Pole powierzchni pojedynczego przedwzmacniacza	$0,0071 \text{ mm}^2$

Podsumowanie

- analiza nieliniowości wejściowego obwodu sprzęgającego, który jest odpowiedzialny za ustawienie dolnej częstotliwości granicznej;
- największe zniekształcenia występują dla częstotliwości sygnałów w okolicy dolnej częstotliwości granicznej;
- zaproponowano i zaimplementowano w opracowanym układzie scalonym nowe rozwiązanie dla pseudo-rezystorów stosowanych w obwodzie sprzęgającym;
- opracowany testowy układ scalony zawiera 14 kanałów, każdy kanał został opracowany w ośmiu wersjach umożliwiających weryfikację różnych wariantów projektowych;
- zostały wykonane kompletne testy elektroniczne;
- przeprowadzono eksperiment neurobiologiczny.

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

mgr inż. Beata TRZPIL-JURGIELEWICZ

promotorzy:

prof. dr hab. inż. Władysław DĄBROWSKI

dr inż. Paweł HOTTOWY

Część VI

Odpowiedzi

dr hab. Andrzej Pfitzner, prof. PW

[...] 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 Cząstek AGH.

[...] W tekście pracy jest relatywnie dużo literówek, występują też drobne błędy gramatyczne, co świadczy prawdopodobnie o nadmiernie pospieszonym 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.

[...] Zwykle jednak wymagania projektowe formułowane są explicite w formie granicznych wartości istotnych parametrów, lecz takich na dla pracy nie określono. W tej sytuacji pierwszorzędnego 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 harmonicznych 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.

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] W przypadku przedstawionej pracy Autorka precyzyjnie przedstawiła główny cel pracy oraz wyszczególniła kolejny etapy pracy prowadzące do realizacji celu głównego. Niestety w pracy nie zauważylem wyszczególnionych tez pracy. **Jakie są zatem cele pracy? Czy tezy pracy zostały udowodnione?**

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] Omówiono również inne koncepcje eliminacji składowej stałej: technikę wzmacniaczy z modulacją [...] oraz zastosowanie wzmacniacza o małym lub jednostkowym wzmacnieniu i przetwornika analogowo-cyfrowego o dużej rozdzielczości. Z uwagi na rosnącą popularność tego ostatniego rozwiązania w przypadku akwizycji sygnałów biologicznych i biomedycznych uważam, że ta część rozdziału powinna być bardziej szczegółowa.

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] Struktura rozprawy jest logiczna, jednak w pracy występuje pewna (moim zdaniem stanowczo zbyt liczna) liczba uchybień edycyjnych (tekstowych, językowych), np. forma gramatyczna, powtórzenia, brak przedimków lub słów itp.

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] W pracy występuje dość obszerna część medyczno-biologiczna służąca w zasadzie do uzasadnienia podziału sygnałów na dwie grupy LFP i AP o odpowiednich charakterystykach (pasmo i zakres amplitud). Materiał ciekawy i ważny z punktu widzenia pracy, ale być może mógłby być krótszy.

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] Niektóre używane w pracy określenia moim zdaniem są nietypowe, głównie dotyczy to określenia "**układ odczytu**" zamiast wzmacniacz. [...] Podobnie użycie słowa "**zaadresowany**". Wyrażenie "**mniejsze multipleksery**" (str. 34) jest mało precyzyjne, a właściwie w użytym kontekście nieprawidłowe. Również definicja wyrażenia "**front-end**" (str. 35) budzi moje wątpliwości. Użycie wyrażenia "**może zostać drastycznie zmniejszona**" wydaje mi się również niezbyt fortunne. Autorka rozprawy dosyć często używa wyrażenia **offset wyjściowy**, moim zdaniem jednak poprawnie powinno się używać wyrażenia **offset napięcia wyjściowego**.

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] ***Impedancja mikroelektrody jest ważnym parametrem dla rejestracji zewnętrzkomórkowej, ponieważ określa szумy elektrody oraz tłumienie sygnału.*** – w jaki sposób impedanca określa te parametry?

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] Wzmacniacz LNA występuje w każdym kanale, skąd następnie sygnał jest przesyłany poprzez MUX z podziałem czasu. Wadą tego rozwiązania jest to, że gdy liczba kanałów wzrasta, częstotliwość próbkowania ADC również wzrasta, co powoduje większy pobór mocy. - Częstotliwość próbkowania powinna być zależna od właściwości próbkowanego (rejestrowanego) sygnału, a nie zależeć od architektury systemu.

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] Niektóre fragmenty tekstu są dla mnie niezrozumiałe lub budzą pewne wątpliwości [...] Z punktu widzenia minimalizacji poboru mocy najkorzystniejsza jest polaryzacja tranzystorów w zakresie słabej inwersji, ponieważ w tym zakresie transkonduktancji do prądu polaryzacji tranzystora jest największy [48].

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] Niektóre fragmenty tekstu są dla mnie niezrozumiałe lub budzą pewne wątpliwości [...] ale przy stałym stosunku $C_{in}/C_f = 20V/V$

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] Niektóre fragmenty tekstu są dla mnie niezrozumiałe lub budzą pewne wątpliwości [...] Jak wspomniano wcześniej, w docelowym rozwiązaniu przewiduje się zastosowanie drugiego stopnia wzmacniającego. Przy założeniu, że kolejny stopień będzie miał wysoką impedancję wyjściową, może on być sterowany bezpośrednio z kaskody o wysokiej impedancji wyjściowej. Dla celów testowych potrzebujemy jednak stopnia wyjściowego o relatywnie niskiej impedancji wyjściowej, który skutkowałby zwiększeniem poboru mocy układu prototypowego.

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] Wzór 2.2 na str. 88 – brak liczby 4 w mianowniku pod pierwiastkiem, nie wszystkie składowe wzoru są wyjaśnione i opisane.

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] W pracy przyjęto wzmacnienie dla pierwszego stopnia projektowanego wzmacniacza na poziomie $K = 20V/V$. Czy w kontekście możliwości pojawienia się składowej stałej napięcia na wejściu wzmacniacza spowodowanego zjawiskami zachodzącymi na styku tkanka-elektroda wartość ta nie jest zbyt duża i czy nie będzie powodowała nasycenia stopnia wejściowego wzmacniacza?

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] W pracy skupiono się na analizie własności i projektowaniu rezystora półprzewodnikowego, nieco mniej zajmując się samym wzmacniaczem – który jest najważniejszym elementem pracy. W szczególności dotyczy to parametru CMRR wzmacniacza. Podobnie niewiele uwagi poświęconu napięciu offsetu wzmacniacza, chociaż jego obecność jest widoczna we wszystkich zarejestrowanych przebiegach. Tu przydatne byłoby jakieś oszacowanie. Konsekwencją takiego podejścia jest dość zwięzły opis samej struktury wzmacniacza i jego własności tu przydałaby się nieco bardziej obszerna analiza.

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] Wybór współczynnika THD do oceny parametrów wzmacniacza jest poprawny, ale w mojej opinii w pracy trochę za mało uwagi poświęcono innym, dość istotnym parametrom wzmacniacza mających wpływ na jakość rejestrowanych sygnałów np. takich jak liniowość fazy, odpowiedź na skok jednostkowy czy szybkość narastania (SR – ang. slew rate).

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] Teza o dużym znaczeniu współczynnika THD dla niskoczęstotliwościowych składowych sygnałów nie jest poparta odpowiednimi przykładami uzasadniającymi to znaczenie. Jednak wymagałoby to dokładniejszej analizy własności rejestrowanych sygnałów neuronalnych, co jednak wykracza poza zakres pracy.

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] Zastanawiający jest brak w analizach widmowych zarejestrowanych sygnałów, składowych sieci i ich harmonicznych. Być może zostały użyte filtry typu **notch**, ale nie wspomniano o tym w pracy.