



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

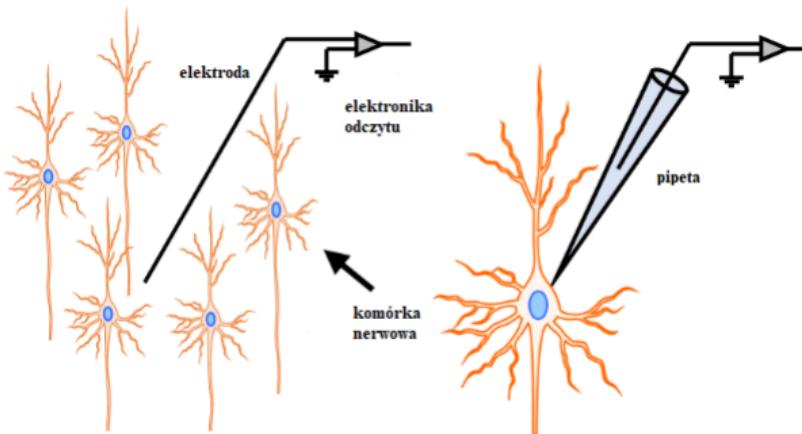
# Część I

## Tematyka pracy

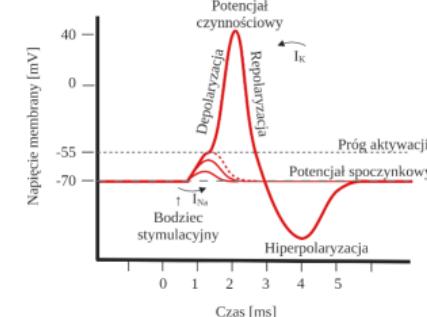
## Wstęp

## Techniki pomiarowe wewnętrz i zewnętrzkomórkowe w neurobiologii

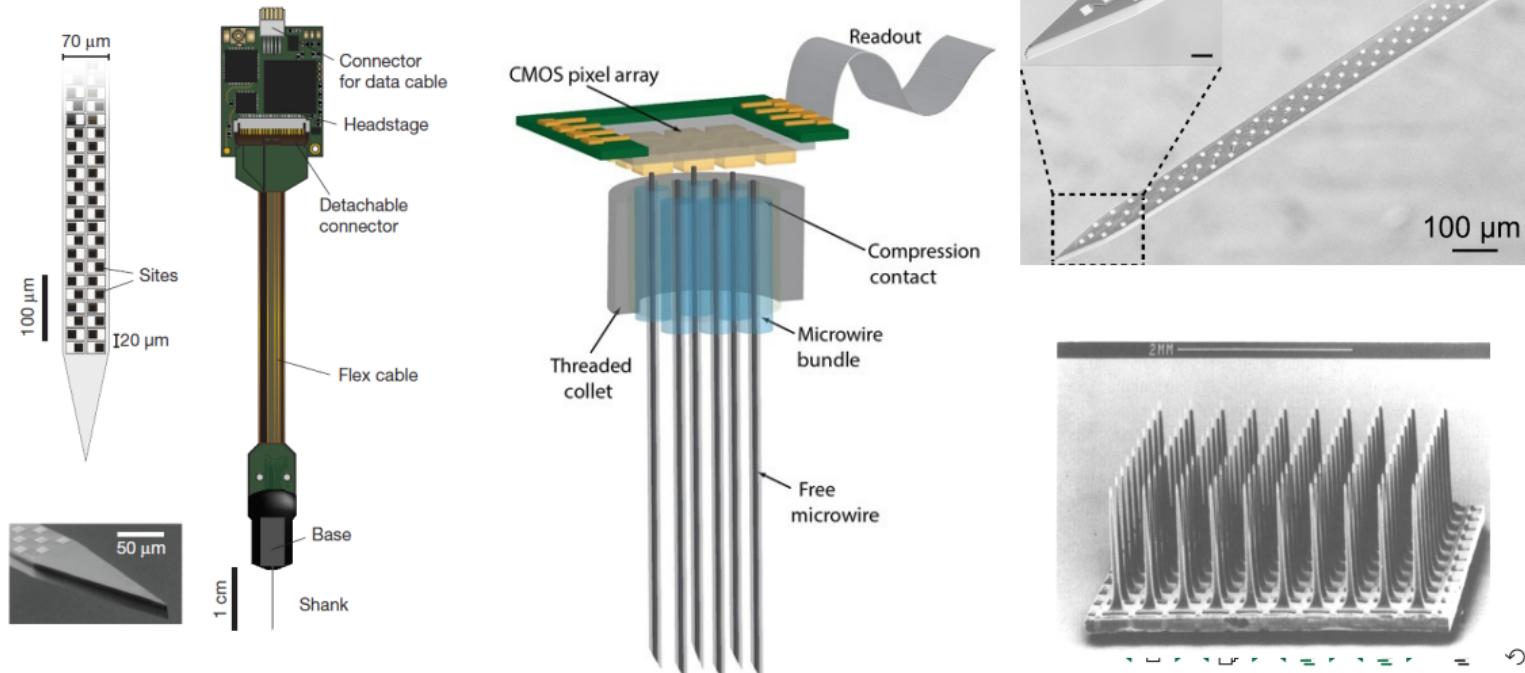
- różne amplitudy sygnałów
  - inwazyjność badań
  - obszar badań



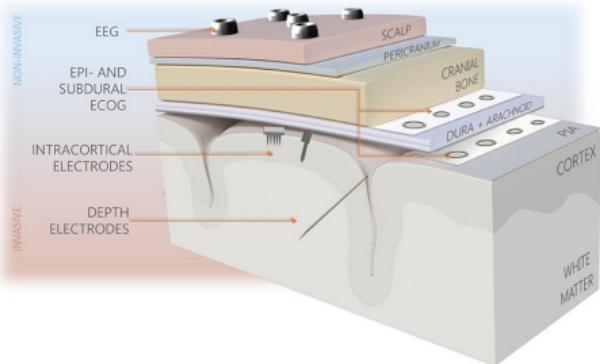
## Potencjał czynnościowy



# Kierunki rozwoju współczesnych systemów pomiarowych i matryc mikroelektrodowych

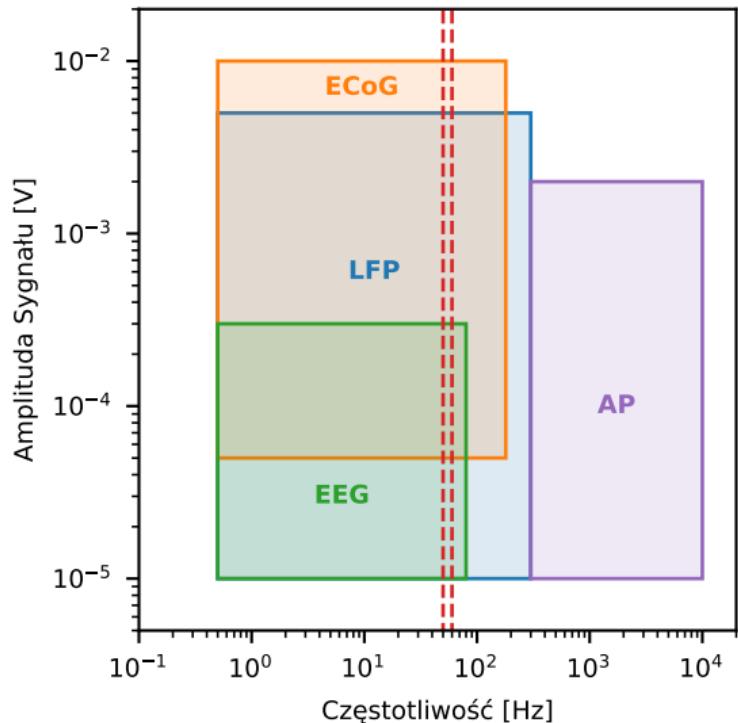


# Zakresy amplitud i częstotliwości sygnałów neuronowych

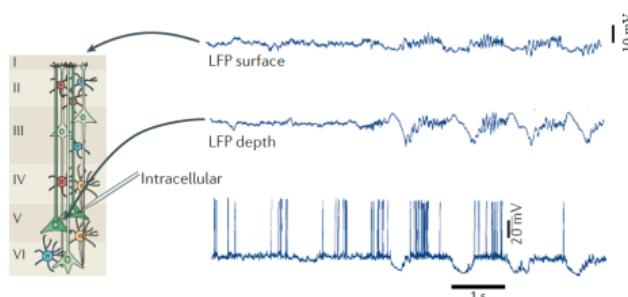
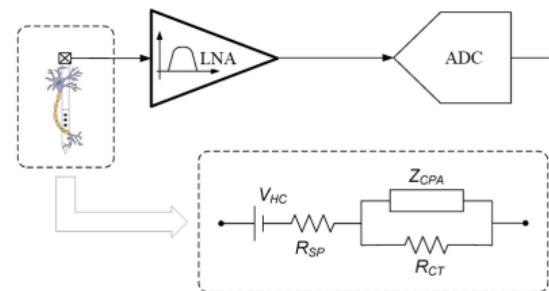


## Metody rejestracji

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



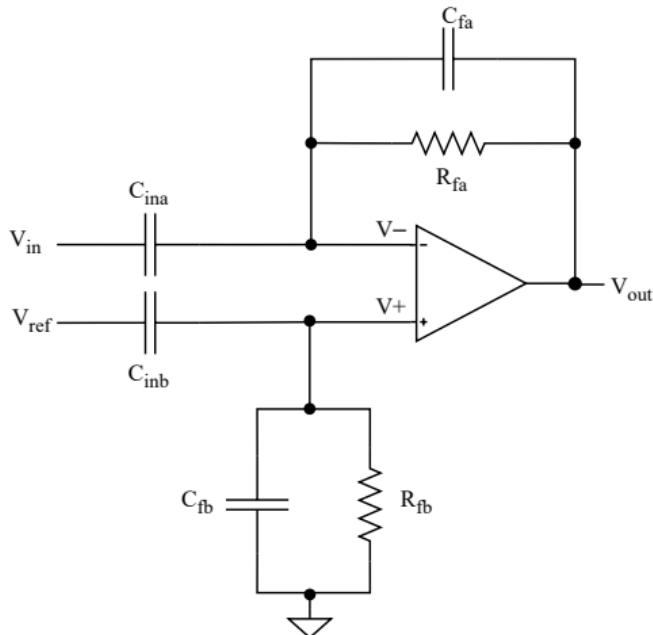
# Kanał rejestracji neuronowej z wykorzystaniem elektrod zewnętrzkomórkowych



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<sub>pp</sub> dla LFP i od 50 µV dla AP
- Skalowalność systemu – tysiące kanałów dla przyszłych systemów

# Sprzężenie zmiennoprądowe



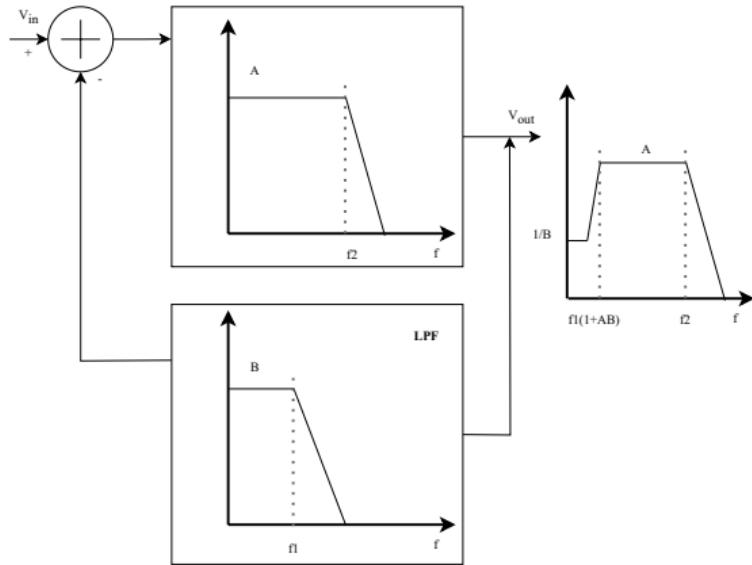
## Wyzwania związane z sprzężeniem AC

- 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

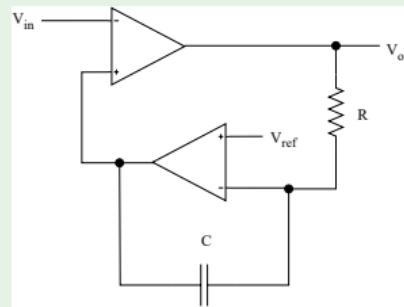


## Wyzwania związane z sprzężeniem DC

- Duża wrażliwość na offset
  - Pobór mocy

Zalety

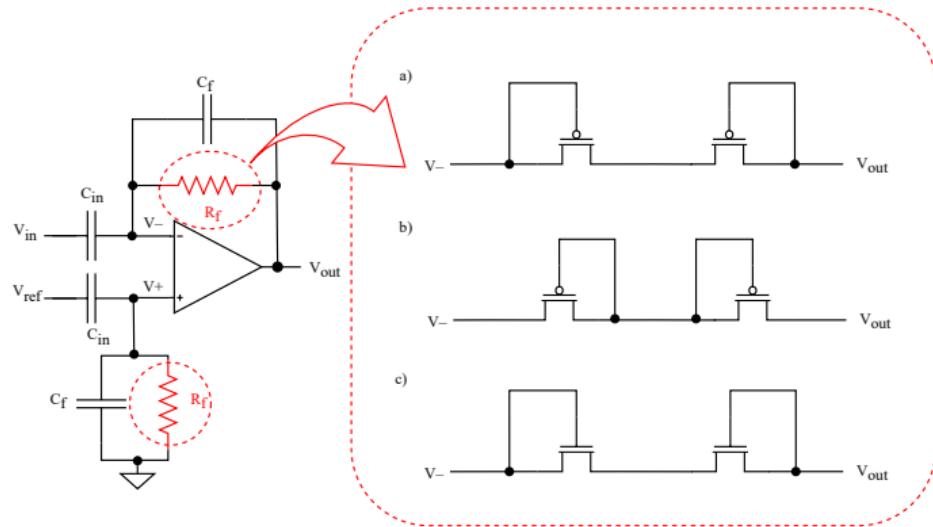
- Brak konieczności używania dużych rezystancji w pętli sprzężenia zwrotnego



## Część II

### Liniowy pseudo-rezystor

# Podstawowe rozwiązania pseudo-rezystorów

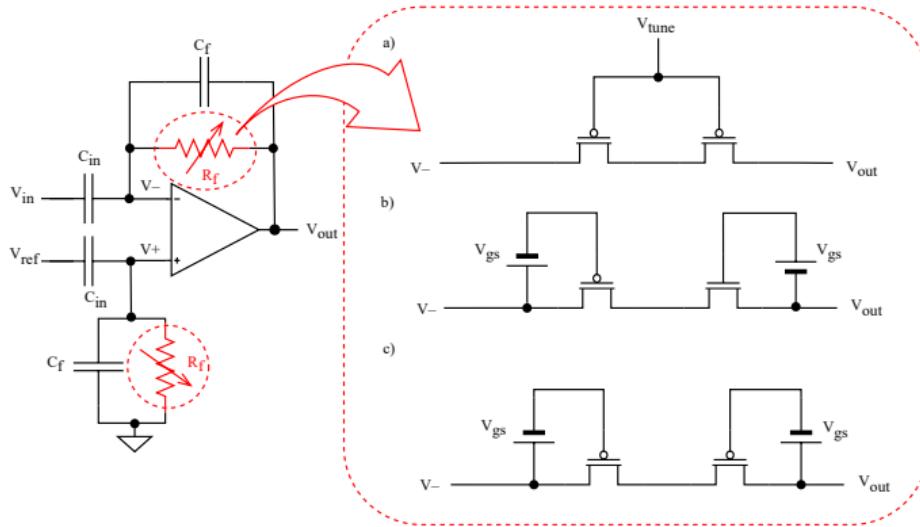


## Wady

- stała rezystancja
- brak możliwości regulacji częstotliwości granicznej

# Podstawowe rozwiązania pseudo-rezystorów - regulowana wartość rezystancji

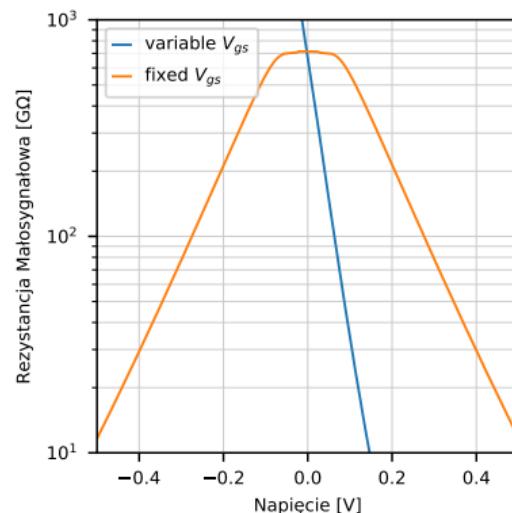
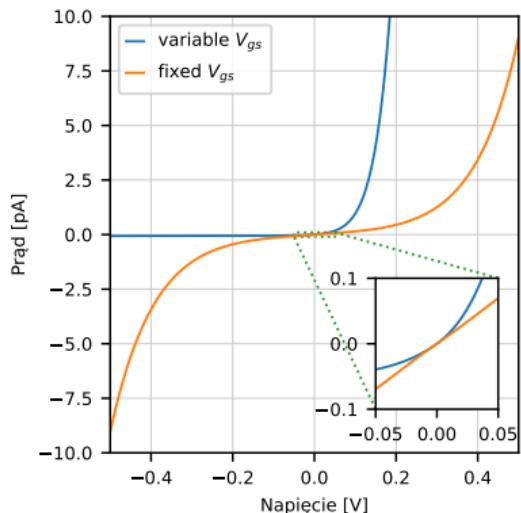
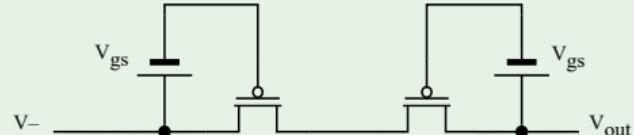
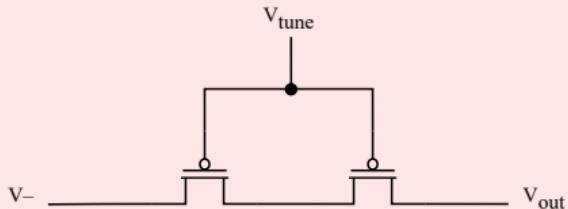
## Regulacja częstotliwości granicznej



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

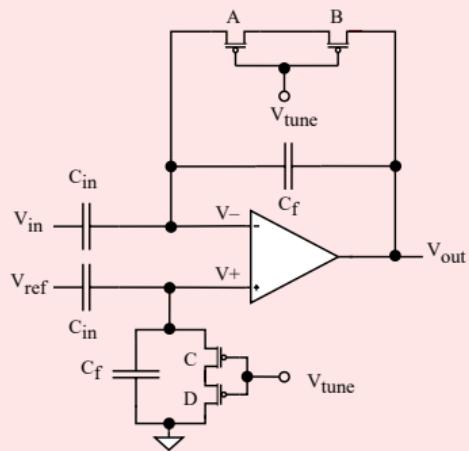
Zachowanie stałego napięcia pomiędzy bramką, a źródłem niezależnie od sygnału wejściowego

# Analiza stałoprądowa

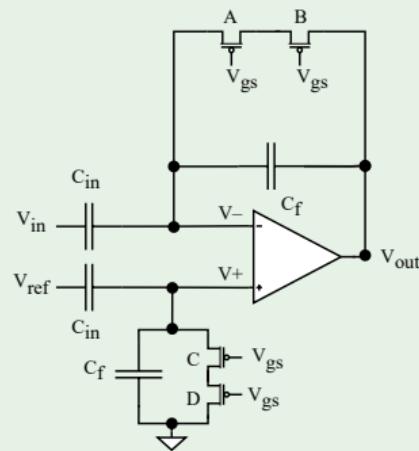


# Architektura wzmacniacza neuronowego wykorzystującego sprzętowanie zmiennoprądowe w różnych implementacjach pseudo-rezystorów

Zmienne napięcia na bramce –  
*variable –  $V_{gs}$*



Sąłe napięcia na bramce –  
*fixed –  $V_{gs}$*

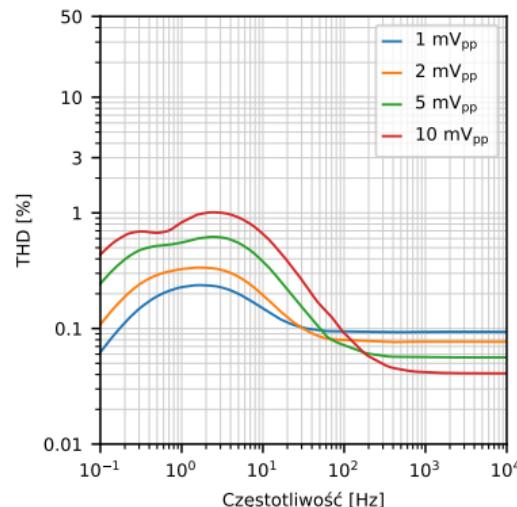
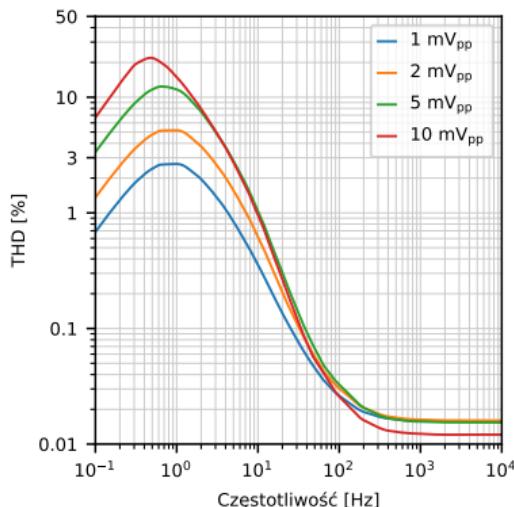


# Analiza Transient sprzeżenia AC

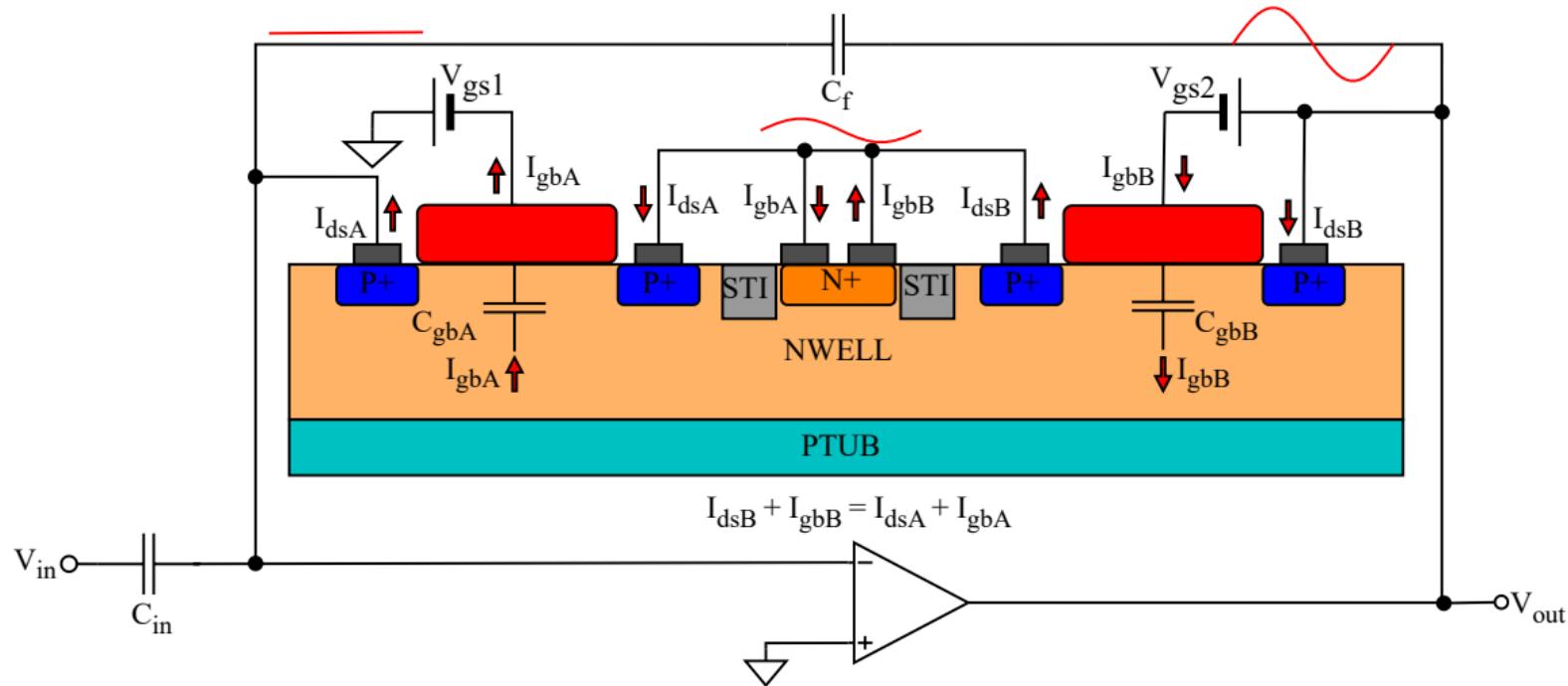
## Ustawienia symulacji

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

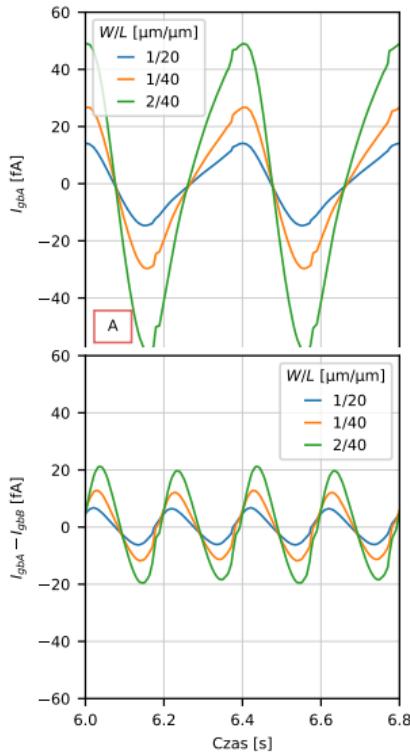
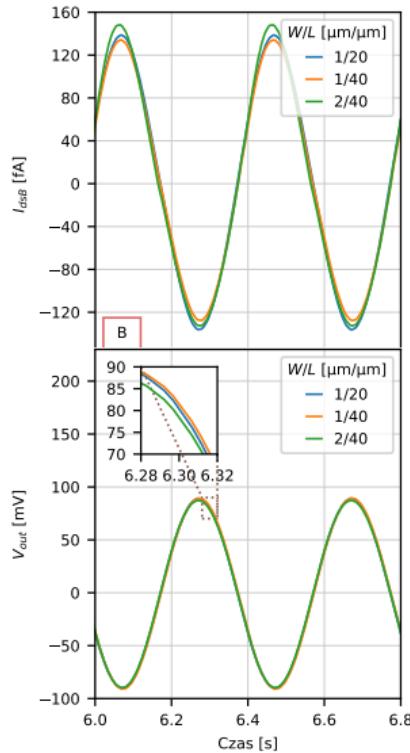
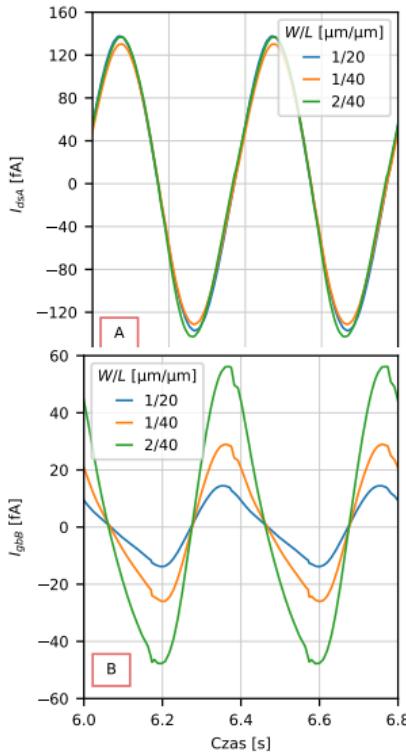
$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{+\infty} U_k^2}}{U_1}$$



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

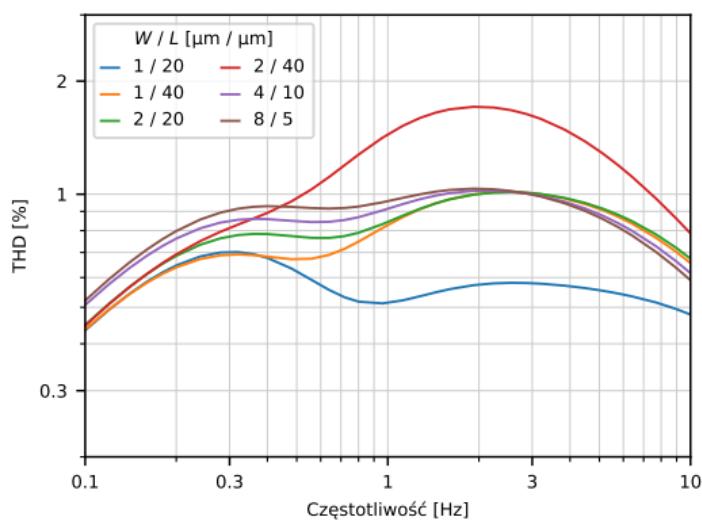


# Wpływ pojemnościowych prądów bramki pseudo-rezystorów na zniekształcenia w technologii 180 nm

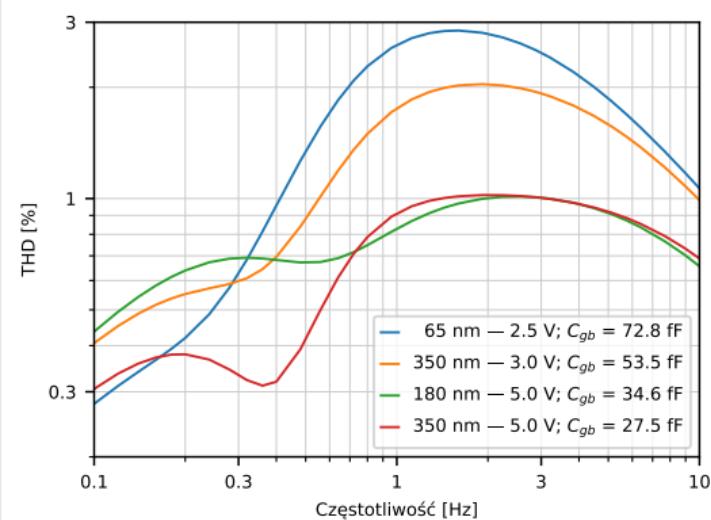


# Skalowanie zniekształceń z powierzchnią bramki i grubością tlenku tranzystorów tworzących pseudo-rezystory

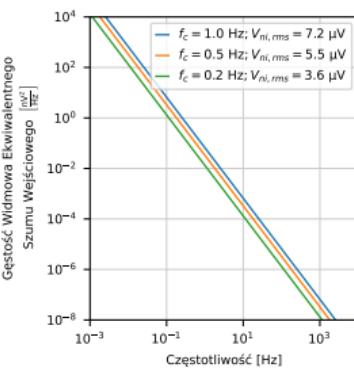
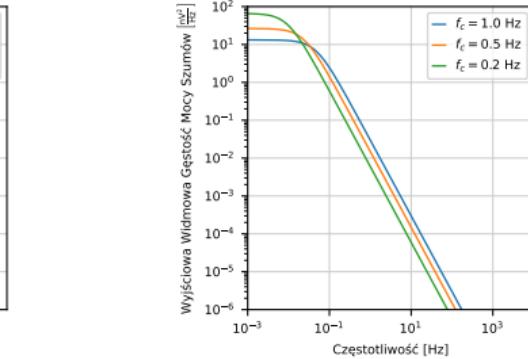
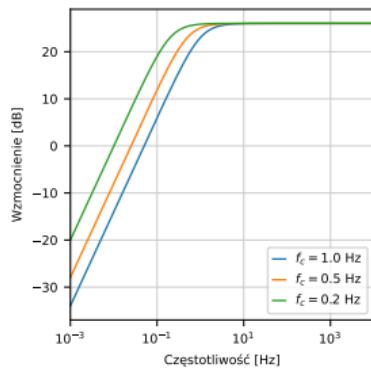
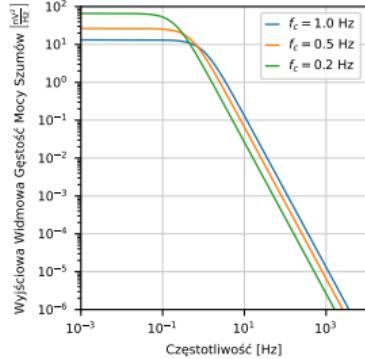
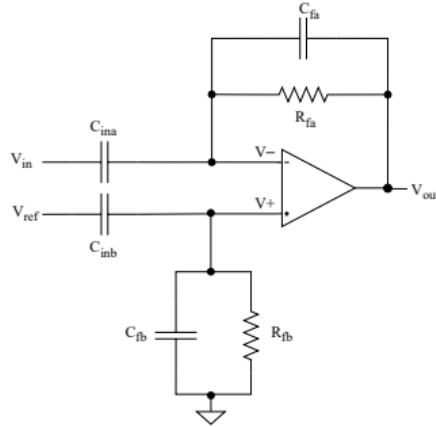
Powierzchnia bramki – technologia 180 nm



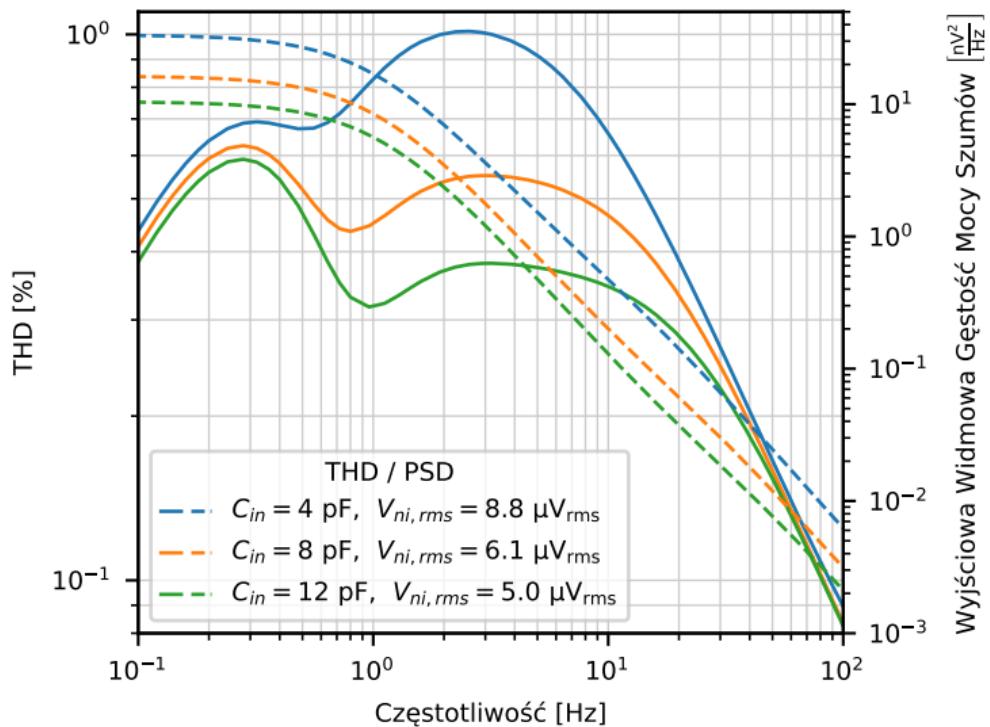
Zależność od technologii



# Szumy



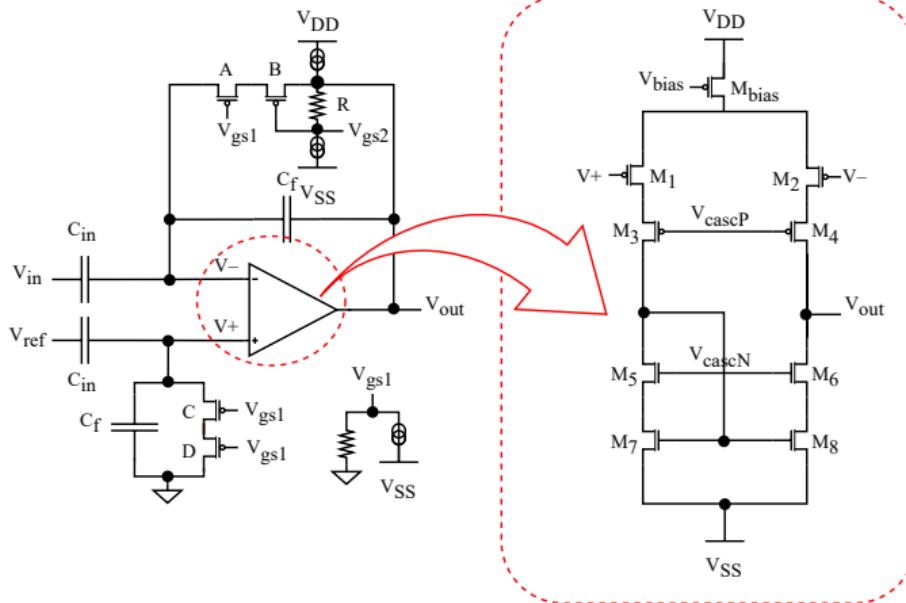
# Wpływ pojemności wejściowych na szумy i zniekształcenia



## Część III

Operacyjny wzmacniacz transkonduktancyjny

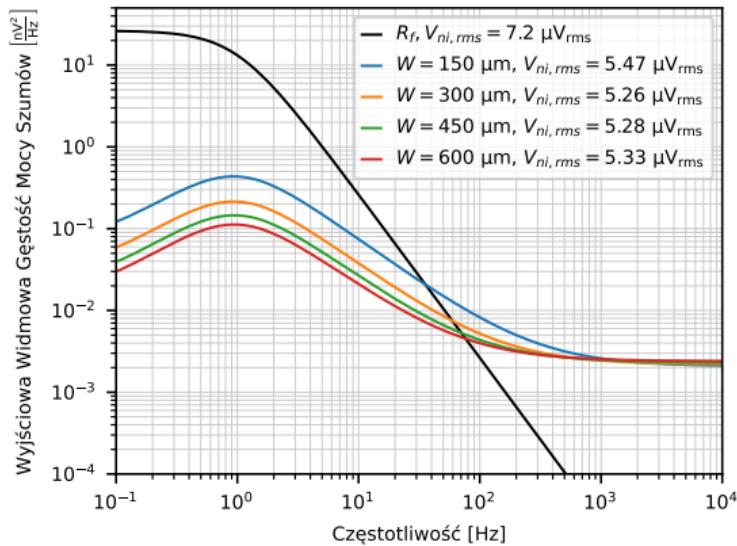
# Implementacja teleskopowej kaskody ze zintegrowanym sprzężeniem AC

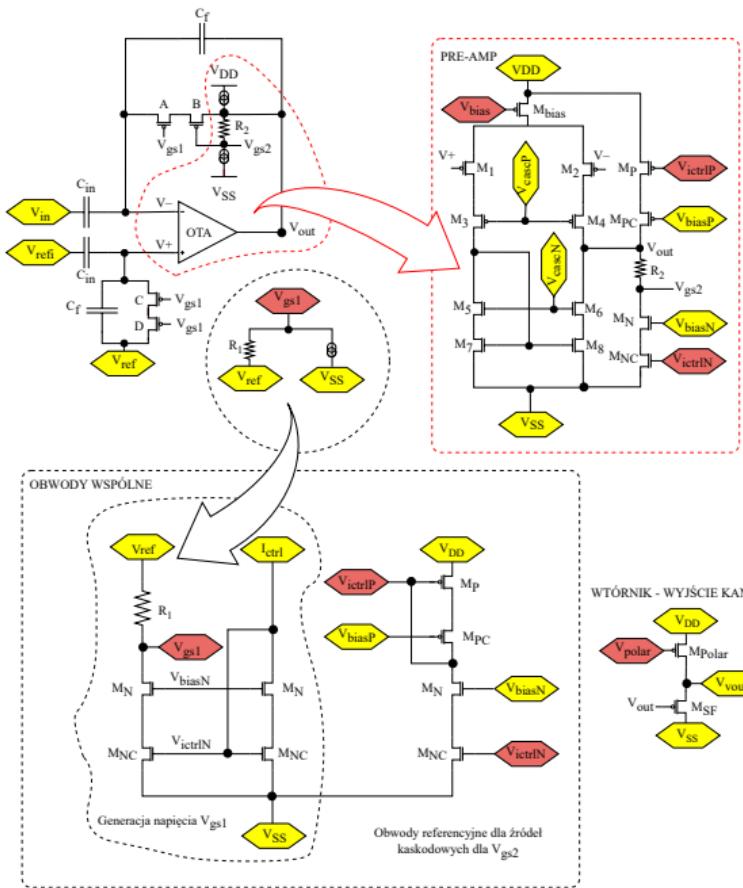


## Kluczowe wymagania

- optymalizacja szumowa
- powierzchnia
- pobór mocy

# Analiza szumowa pary różnicowej



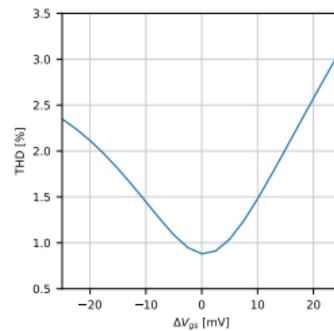
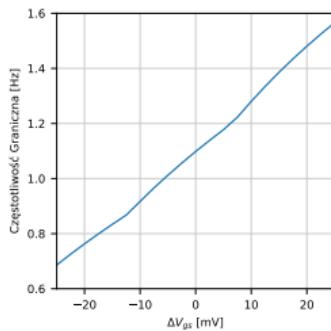
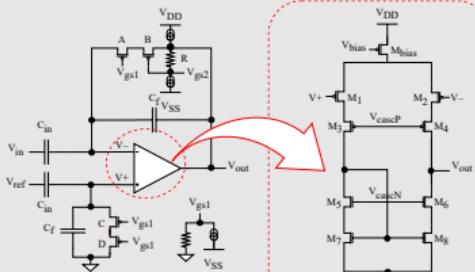


Przedwzmacniacz z  
wejściowym obwodem  
sprzęgającym AC oraz obwody  
polaryzujące

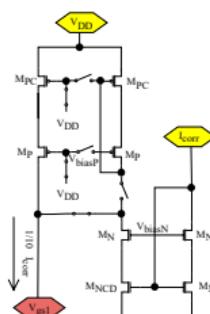
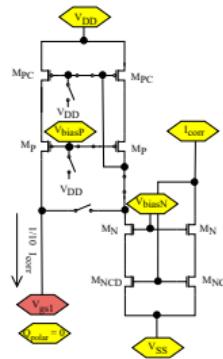
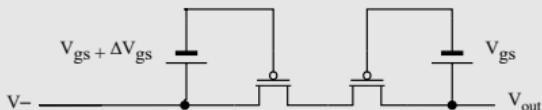
Kluczowe tranzystory	<i>W</i> [ $\mu\text{m}$ ]	<i>L</i> [ $\mu\text{m}$ ]
<i>M<sub>bias</sub></i>	10	10
<i>M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub></i>	300	1
<i>M<sub>3</sub>, M<sub>4</sub></i>	20	2
<i>M<sub>5</sub>, M<sub>6</sub></i>	5	5
<i>M<sub>7</sub>, M<sub>8</sub></i>	4	48

## Blok korekcji

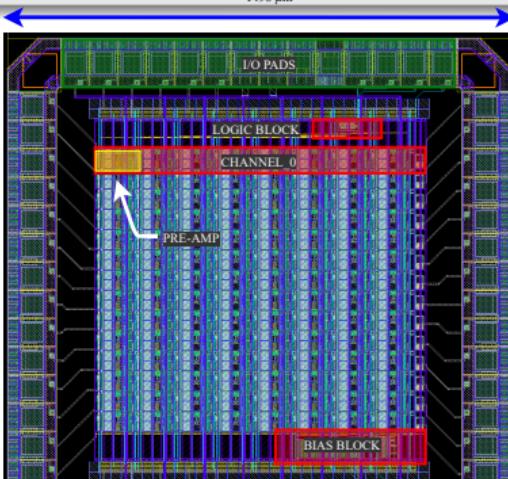
## Projekt kanału



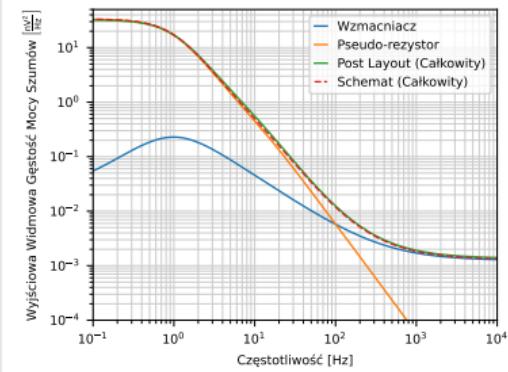
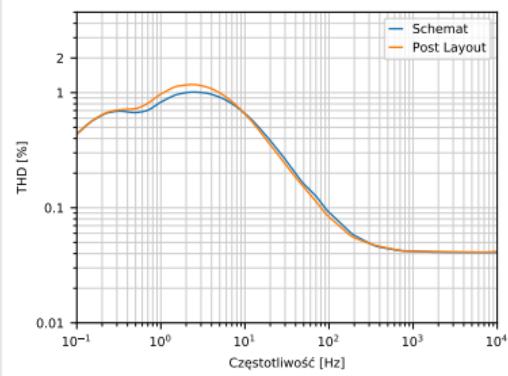
## Wyzwania do rozwiązania



- 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 –  
 $C_{in}/C_f = 4/200 \text{ pF/fF}$



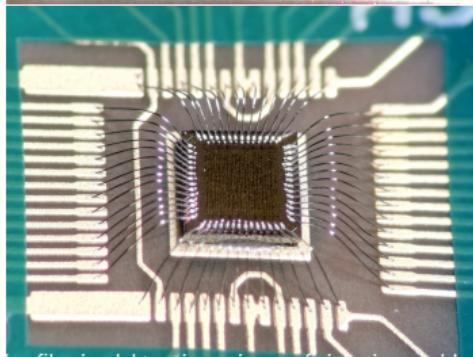
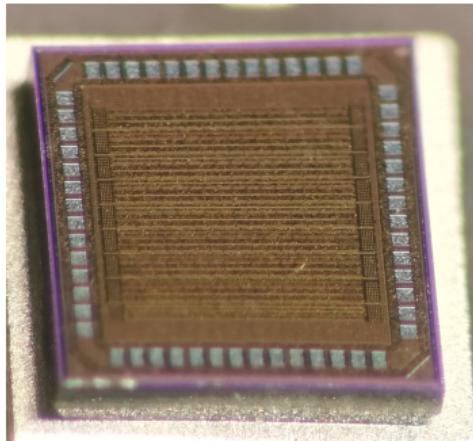
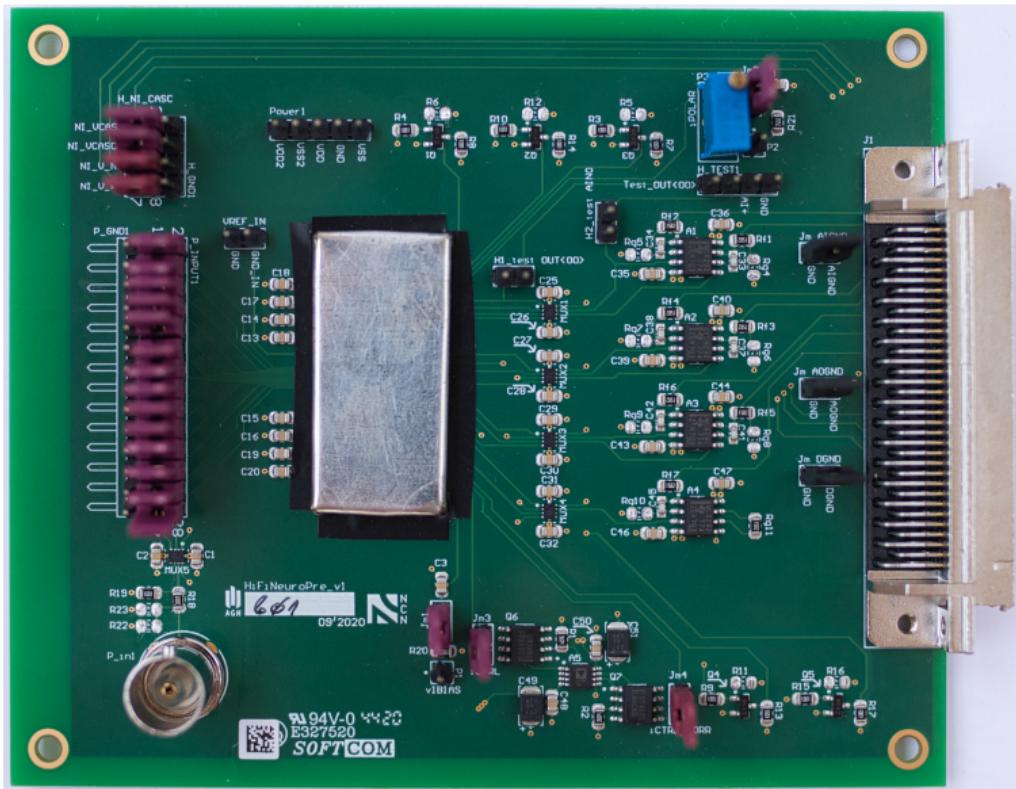
## Symulacje Post-Layout



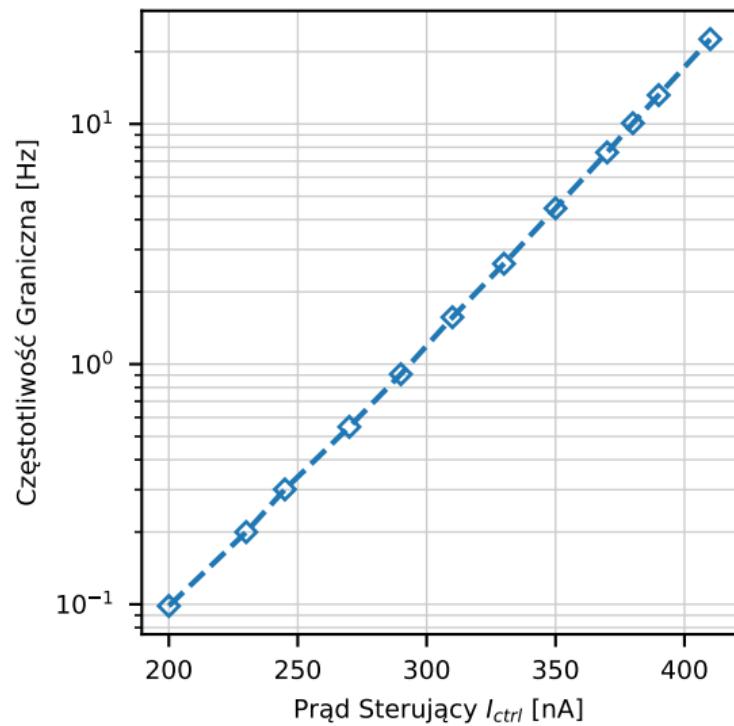
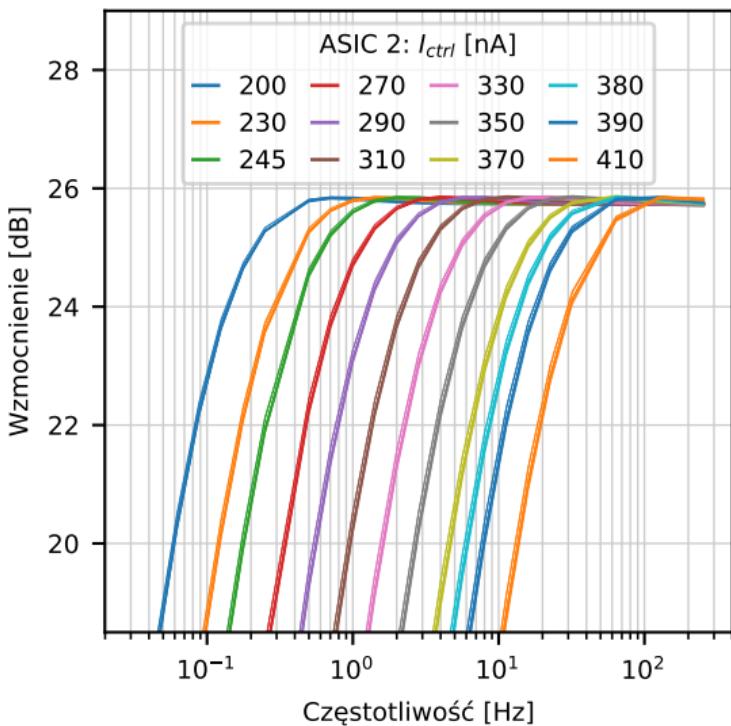
## Część IV

Weryfikacja elektroniczna i neurofizjologiczna układu scalonego HiFiNeuroPre

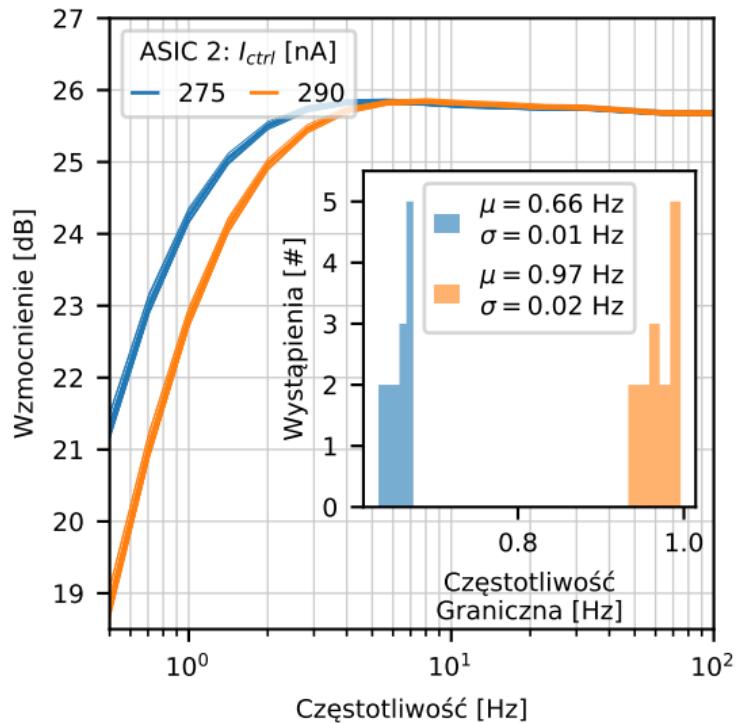
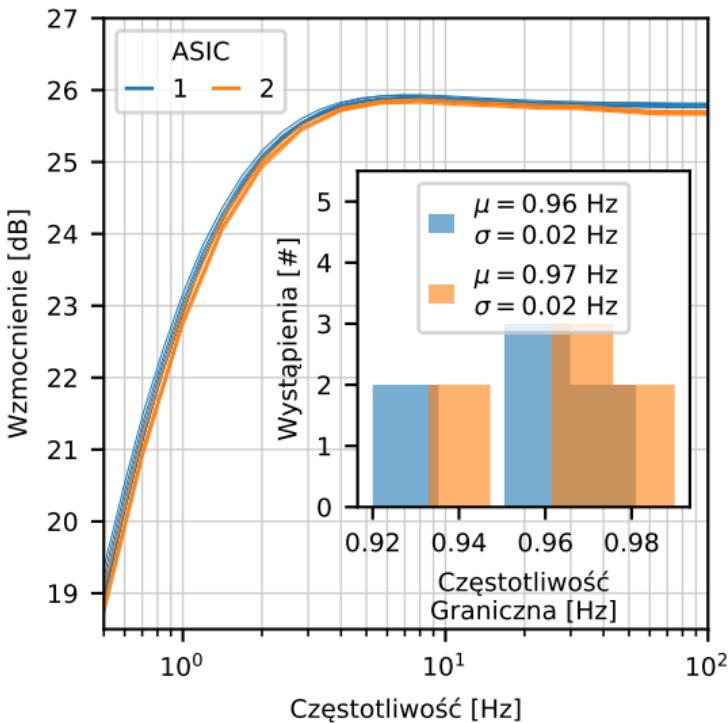
## System testowy



# Wzmocnienie, częstotliwość graniczna

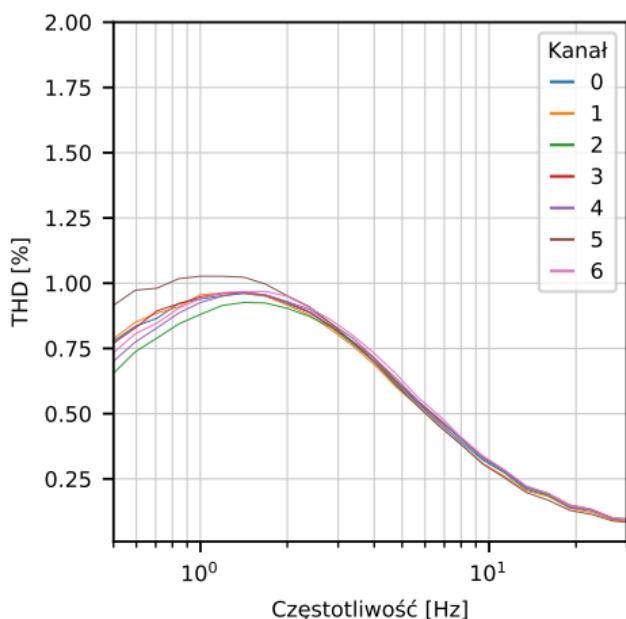


# Jednorodność kanałów

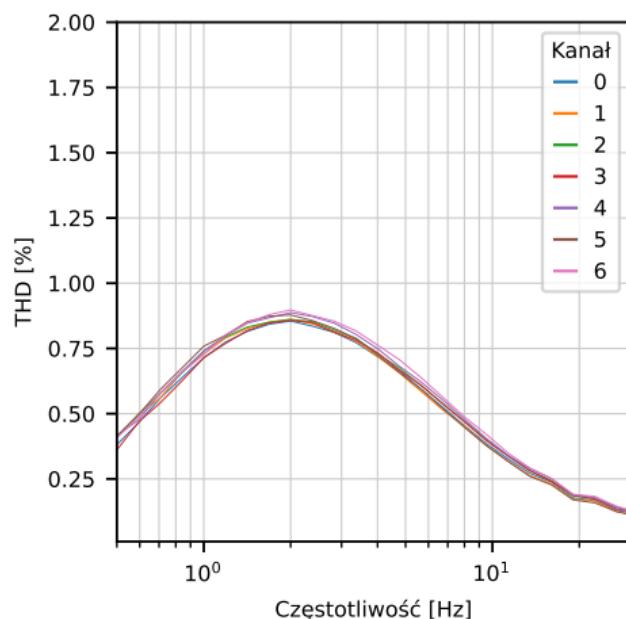


# Pomiary zniekształceń harmonicznych – wpływ korekty

Brak globalnej korekty

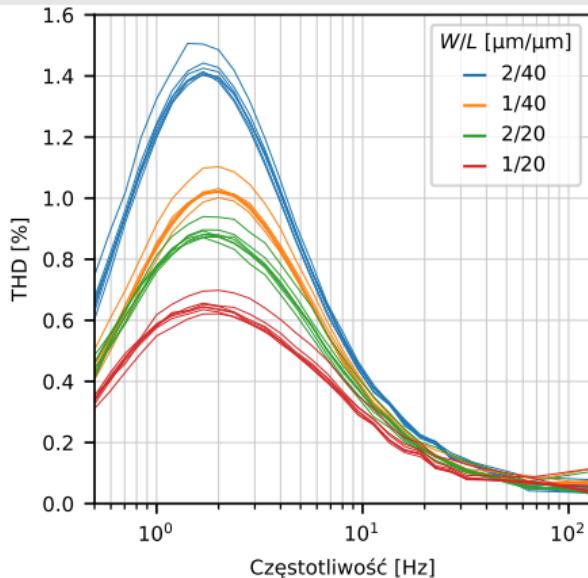


Korekta globalna

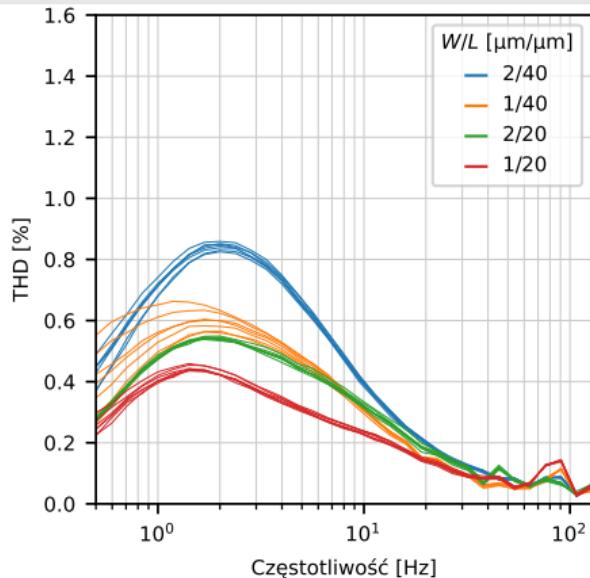


# Konfiguracje przedwzmacniacza

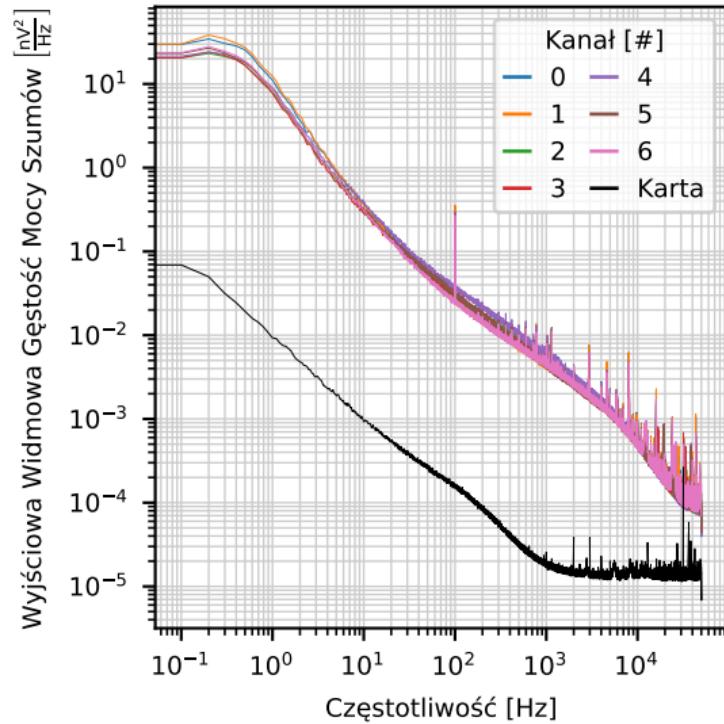
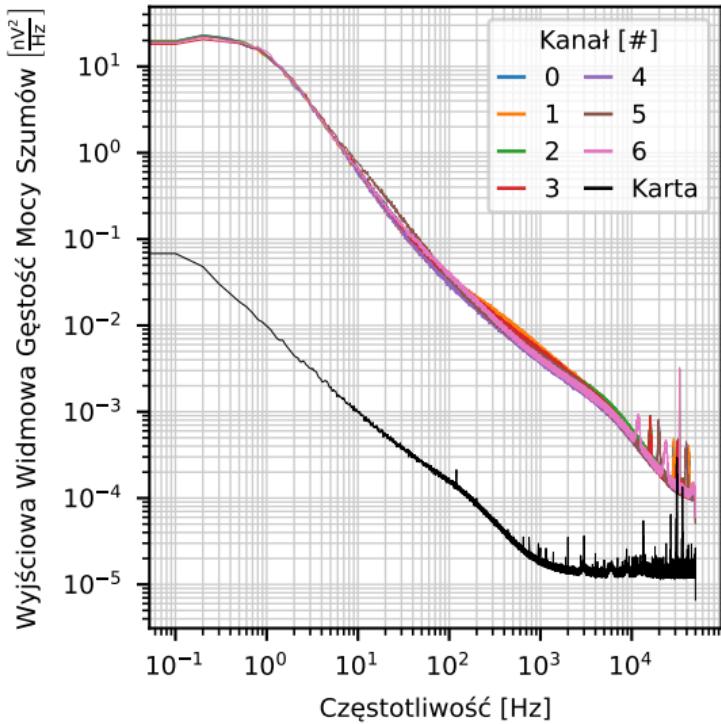
Symetryczna konfiguracja



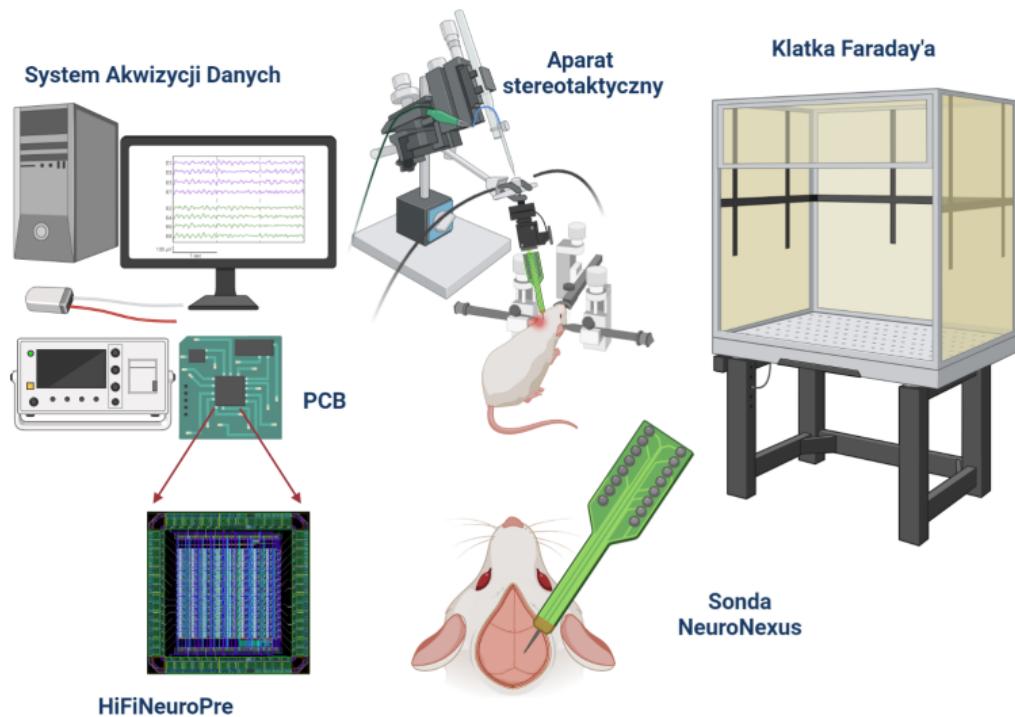
Drugi wariant przedwzmacniacza z większymi pojemnościami wejściowymi

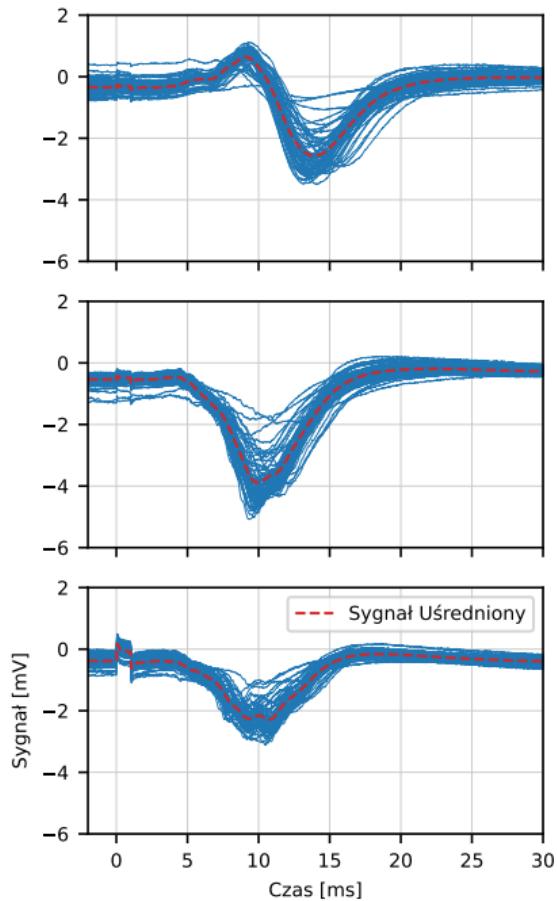


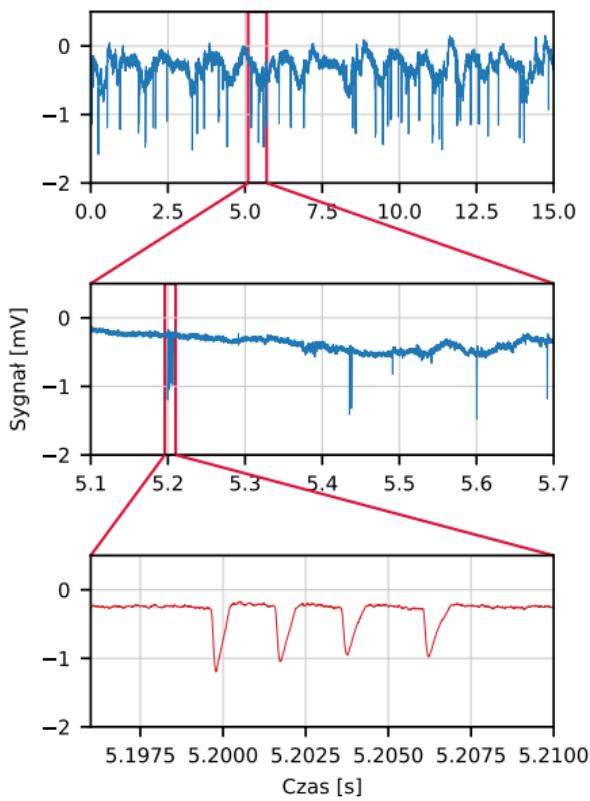
# Pomiary szumów



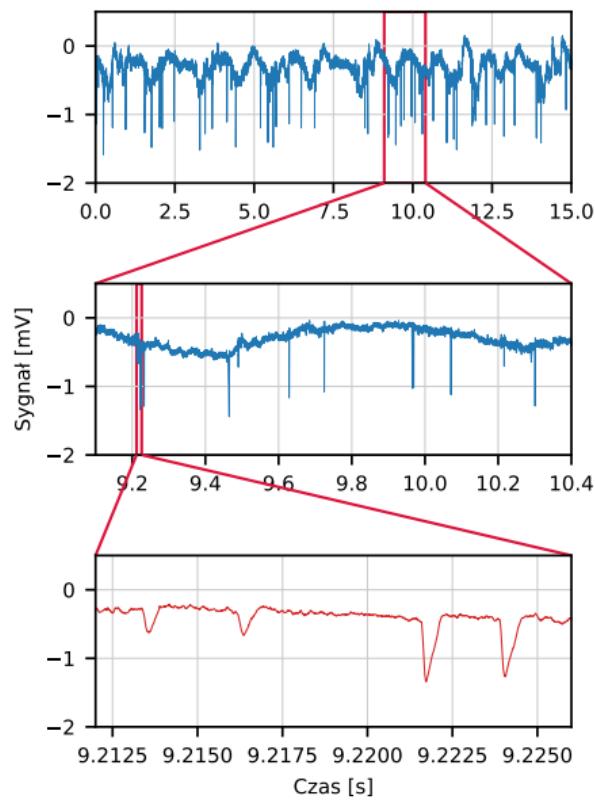
# System pomiarowy do akwizycji sygnałów neurobiologicznych







(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