



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

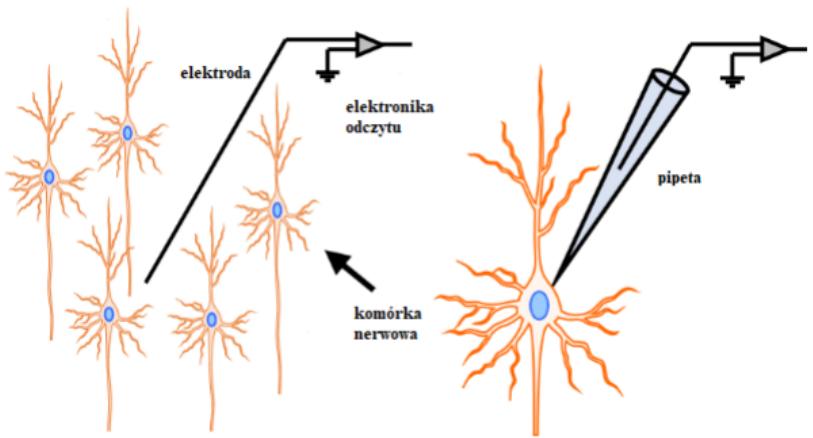
# Część I

## Tematyka pracy

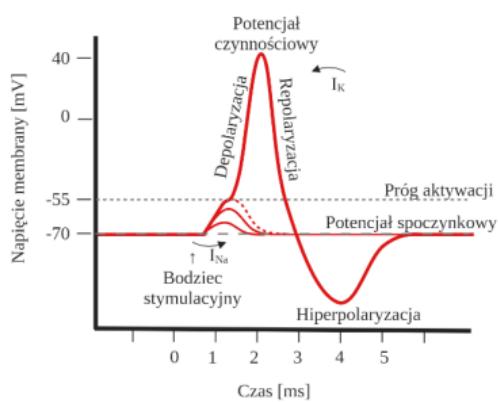
# Wstęp

## Techniki pomiarowe wewnętrz i zewnątrzkomórkowe w neurobiologii

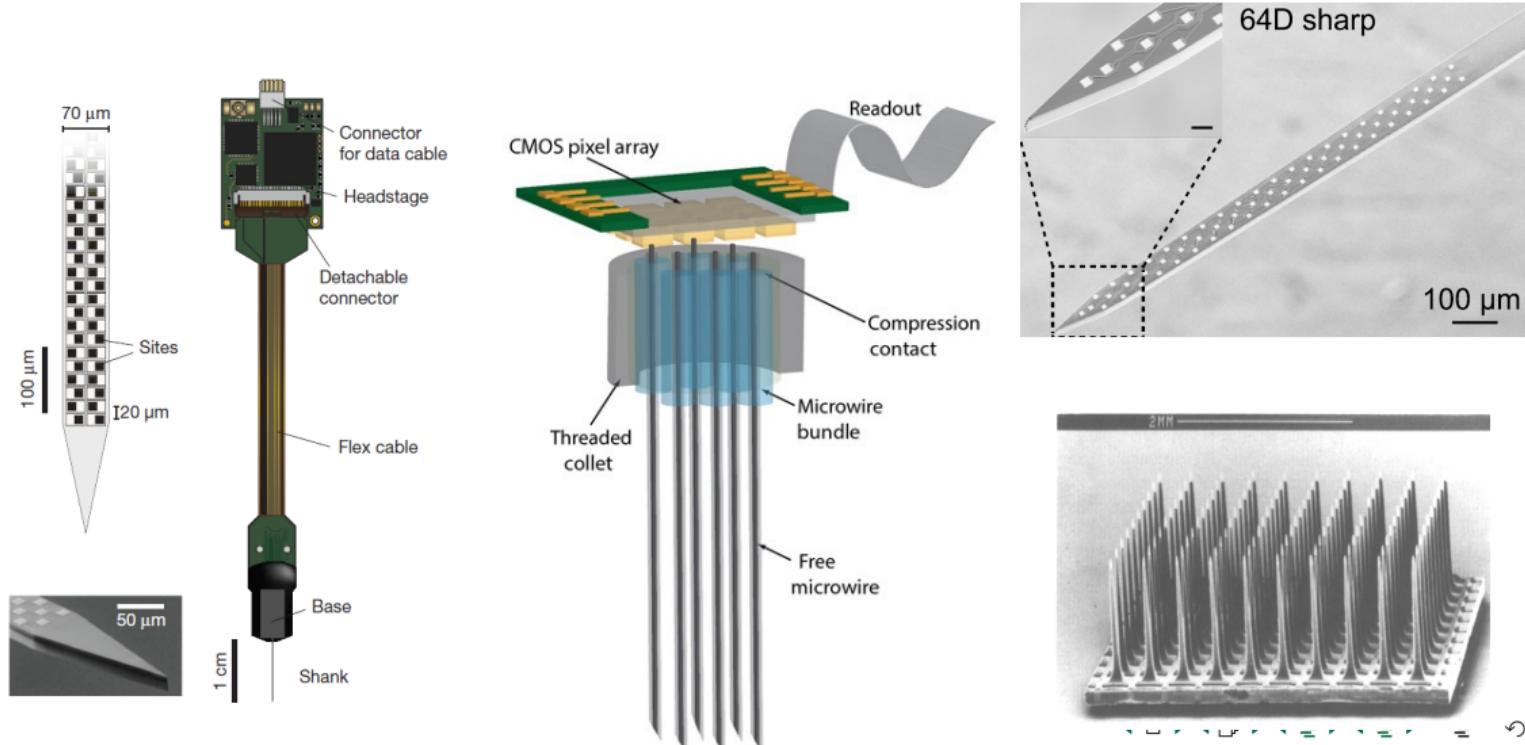
- różne amplitudy sygnałów
- inwazyjność badań
- obszar badań



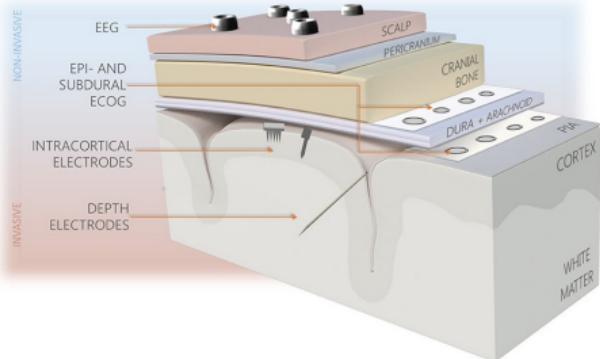
## Potencjał czynnościowy



# Kierunki rozwoju współczesnych systemów pomiarowych i matryc mikroelektrodowych

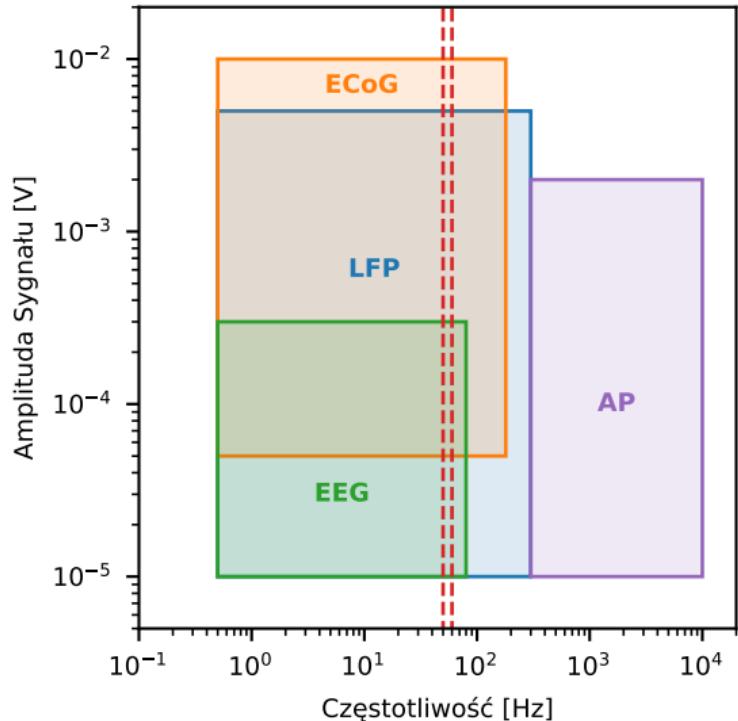


# Zakresy amplitud i częstotliwości sygnałów neuronowych

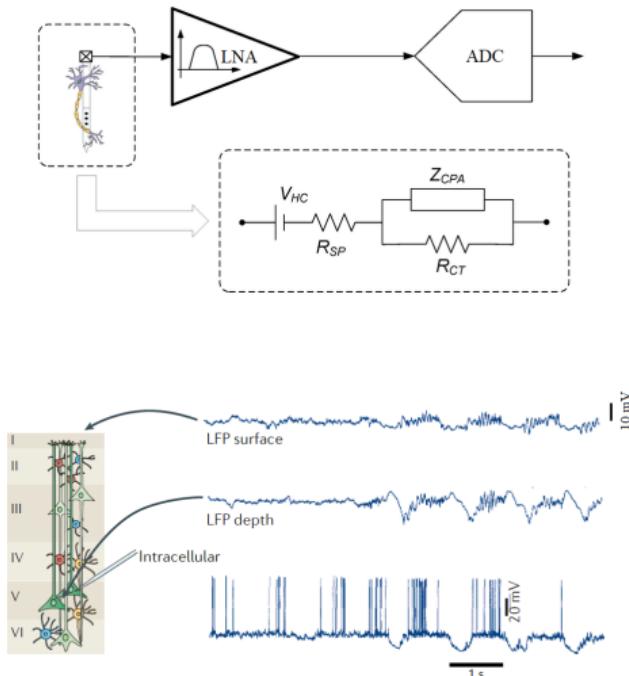


## Metody rejestracji

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



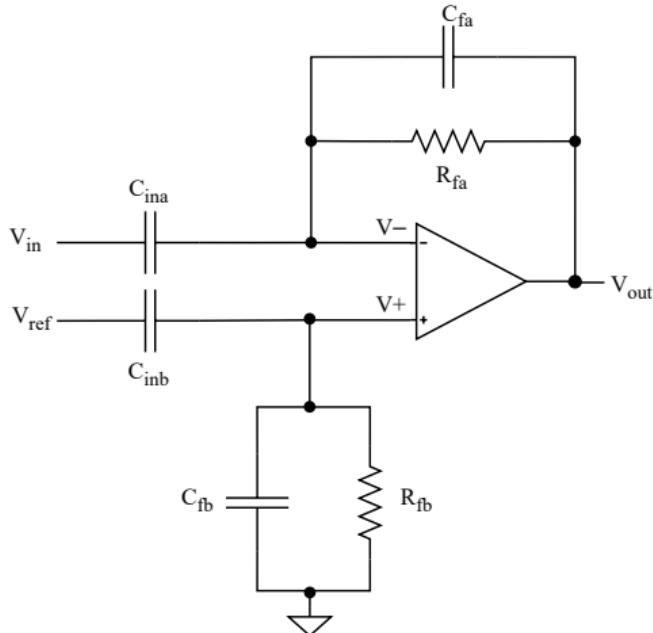
# Kanał rejestracji neuronowej z wykorzystaniem elektrod zewnętrzkomórkowych



Wymagania stawiane interfejsom neuroelektronicznym umożliwiającym rejestrację sygnałów LFP i AP

- Offset stały na styku elektrody – nawet 1 V do 2 V
- Szумy < 5  $\mu$ V dla pasma LFP i AP
- Liniowość rejestrowanego sygnału w całym paśmie
- Pobór mocy
- Zróżnicowane sygnały: amplituda do 10 mV<sub>pp</sub> dla LFP i > 50  $\mu$ V dla AP
- Skalowalność systemu – tysiące kanałów dla przyszłych systemów

# Sprzężenie zmiennoprądowe



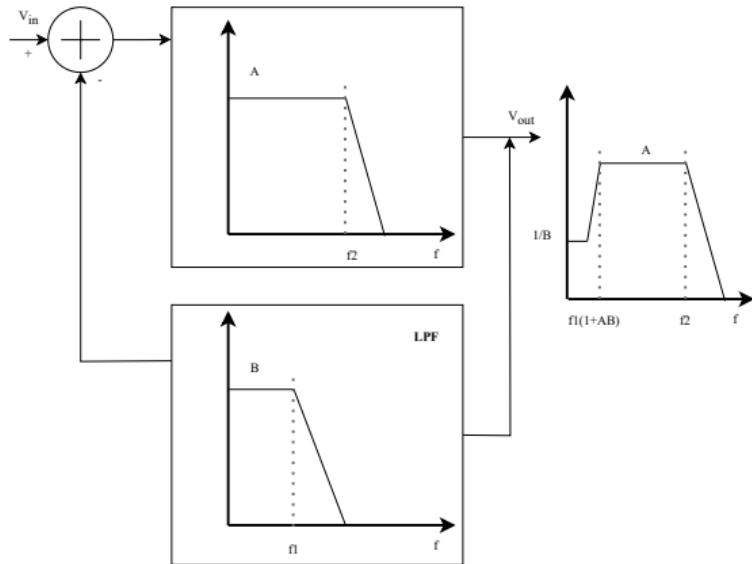
## Wyzwania związane z sprzężeniem AC

- 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

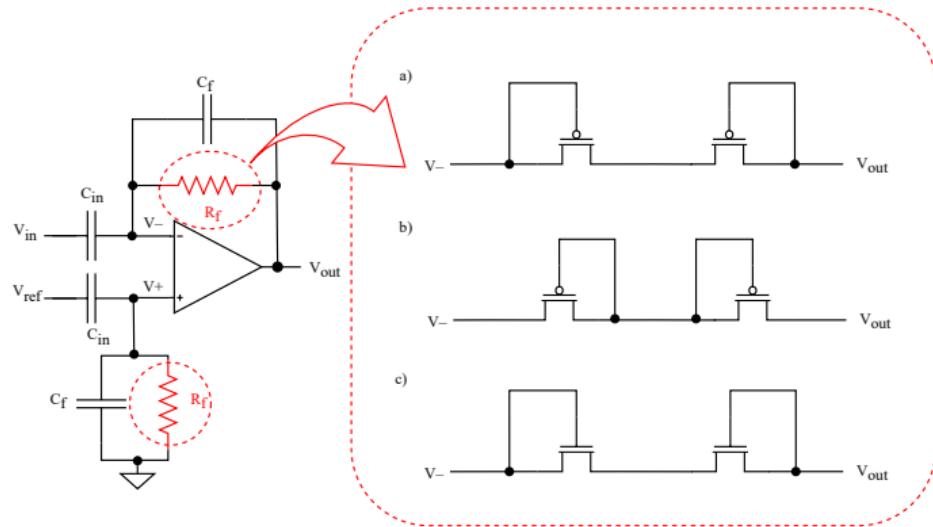
## Zalety

- Brak konieczności używania dużych rezystancji w pętli sprzężenia zwrotnego
-

## Część II

### Liniowy pseudo-rezystor

# Podstawowe rozwiązania pseudo-rezystorów

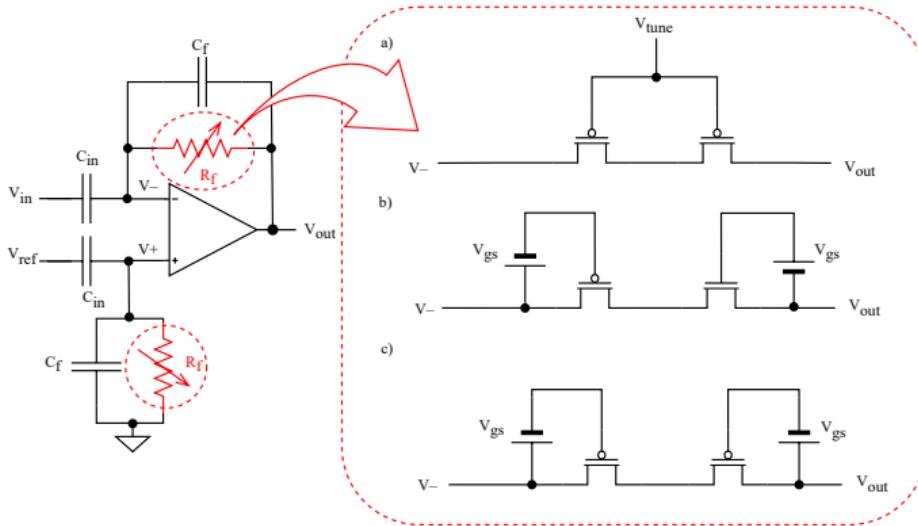


## Wady

- stała rezystancja
- brak możliwości regulacji częstotliwości granicznej

# Podstawowe rozwiązania pseudo-rezystorów - regulowana wartość rezystancji

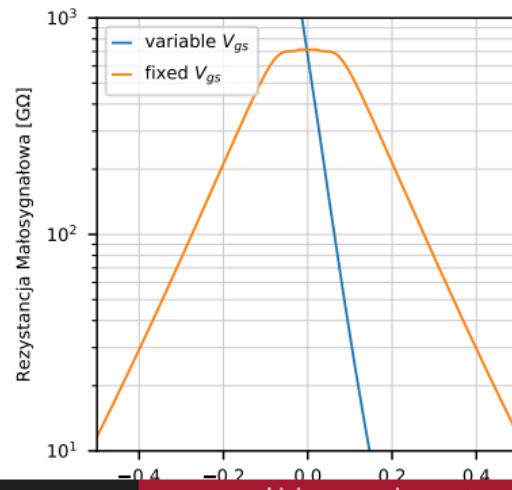
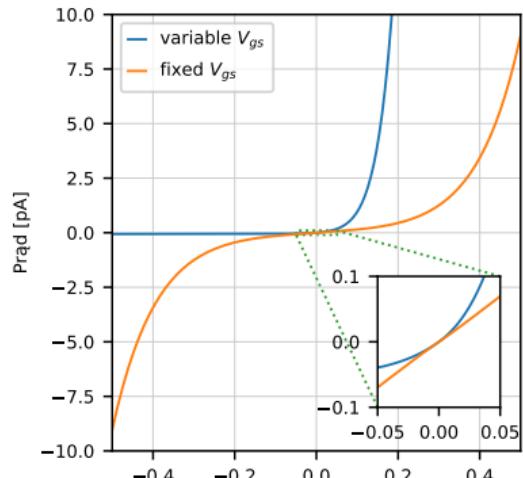
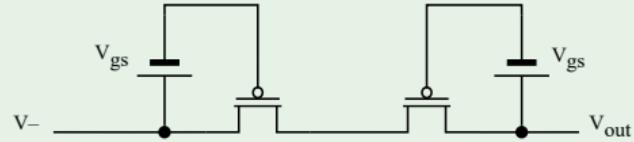
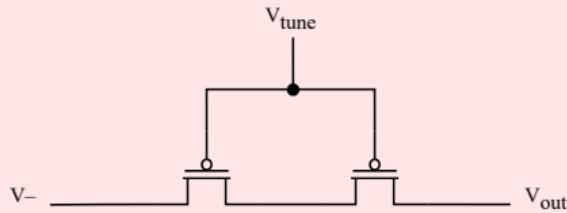
## Regulacja częstotliwości granicznej



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

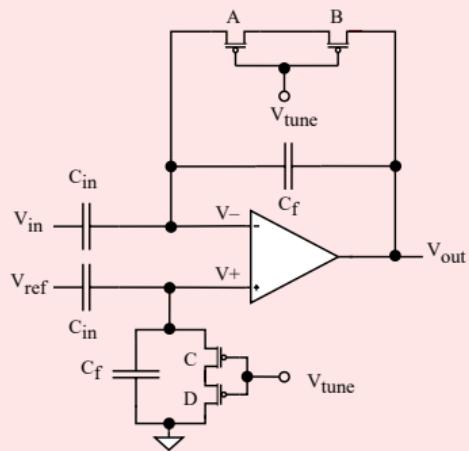
Zachowanie stałego napięcia pomiędzy bramką, a źródłem niezależnie od sygnału wejściowego

# Analiza stałoprądowa

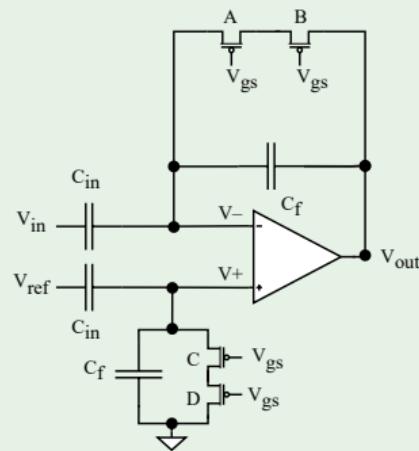


# Architektura wzmacniacza neuronowego wykorzystującego sprzętowanie zmiennoprądowe w różnych implementacjach pseudo-rezystorów

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



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

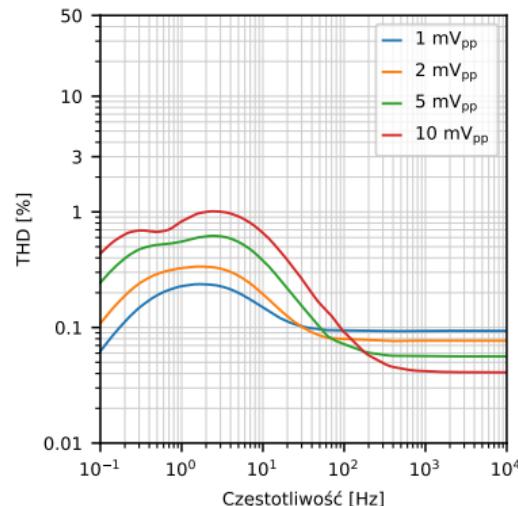
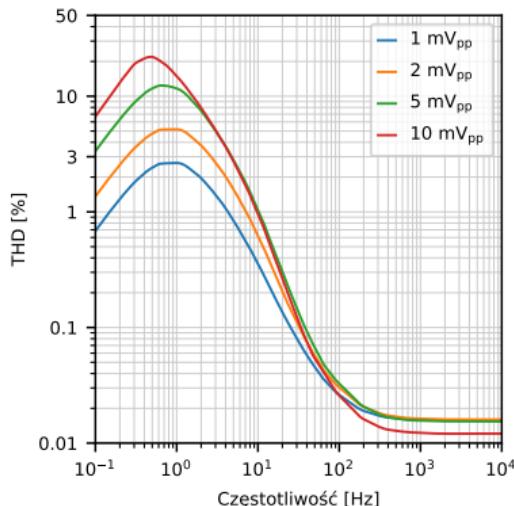


# Analiza Transient sprzeżenia AC

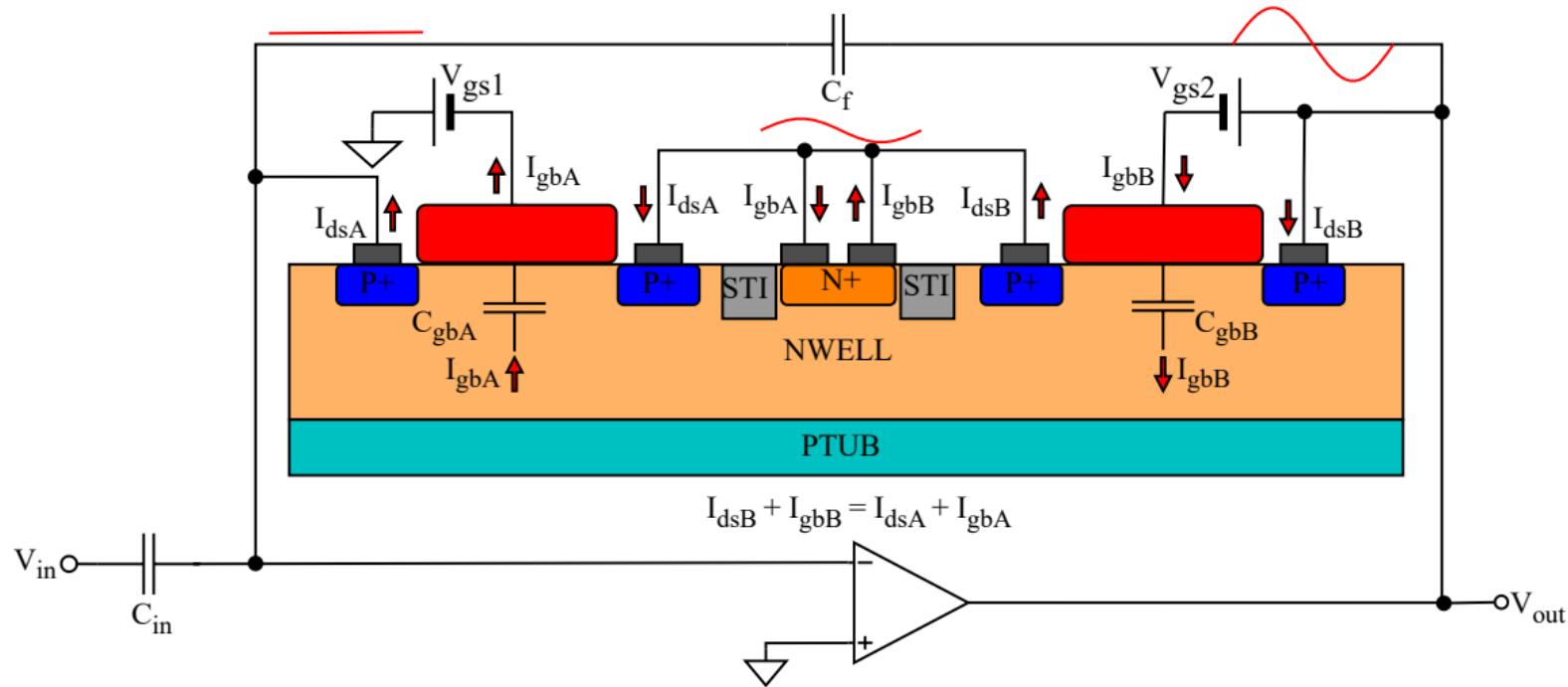
## Ustawienia symulacji

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

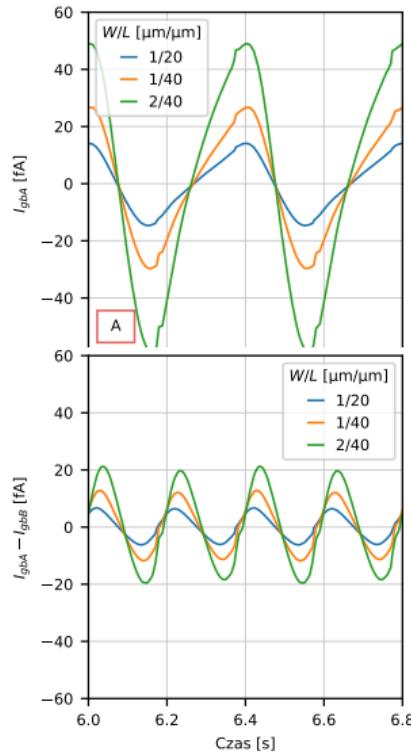
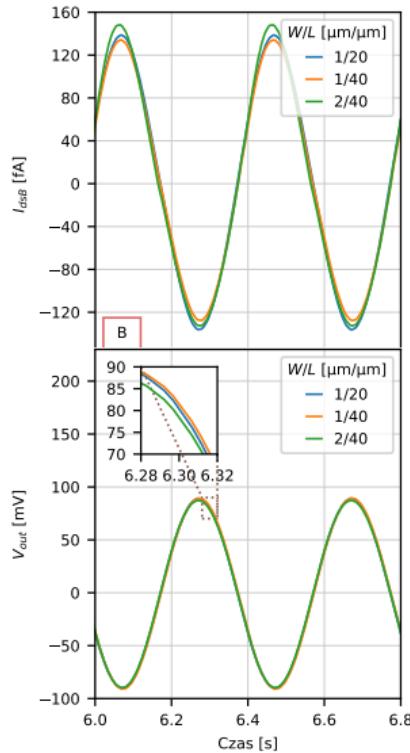
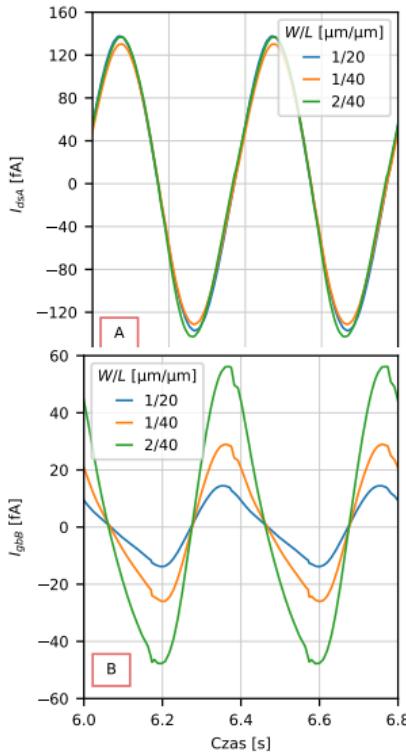
$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{+\infty} U_k^2}}{U_1}$$



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

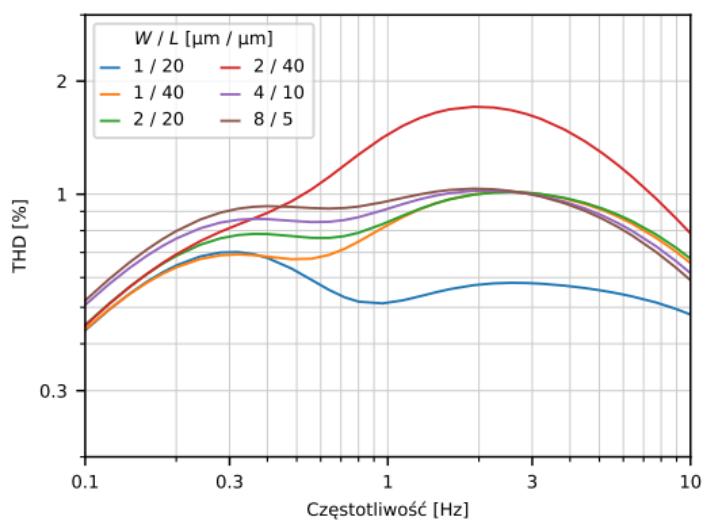


# Wpływ pojemnościowych prądów bramki pseudo-rezystorów na zniekształcenia w technologii 180 nm

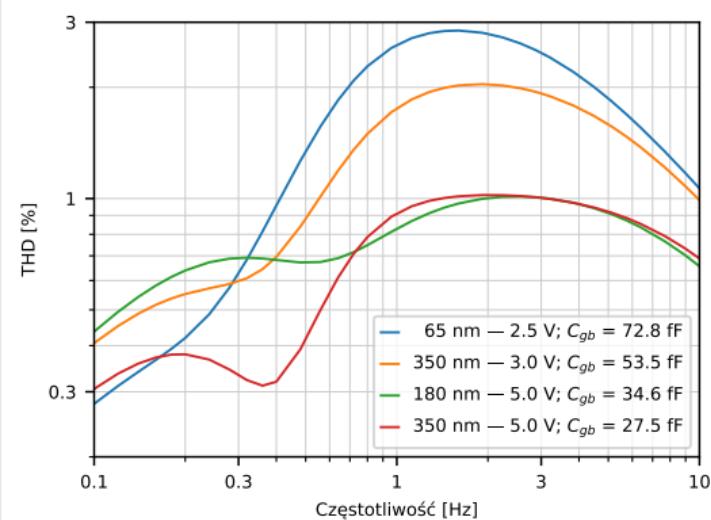


# Skalowanie zniekształceń z powierzchnią bramki i grubością tlenku tranzystorów tworzących pseudo-rezystory

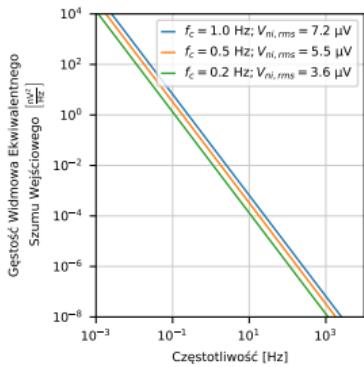
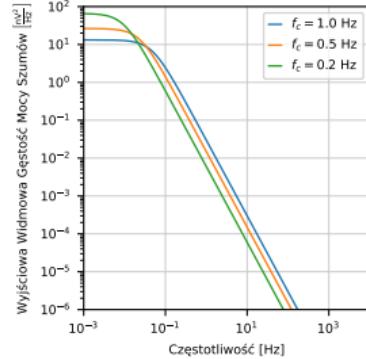
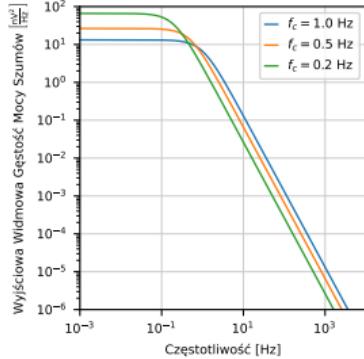
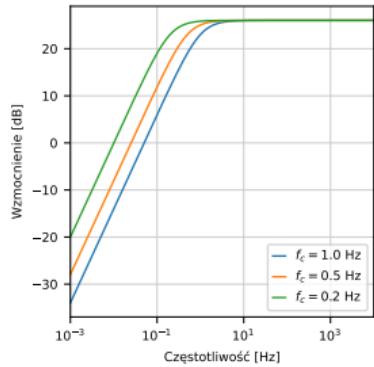
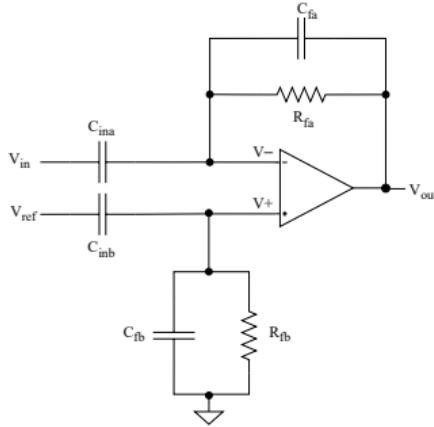
Powierzchnia bramki – technologia 180 nm



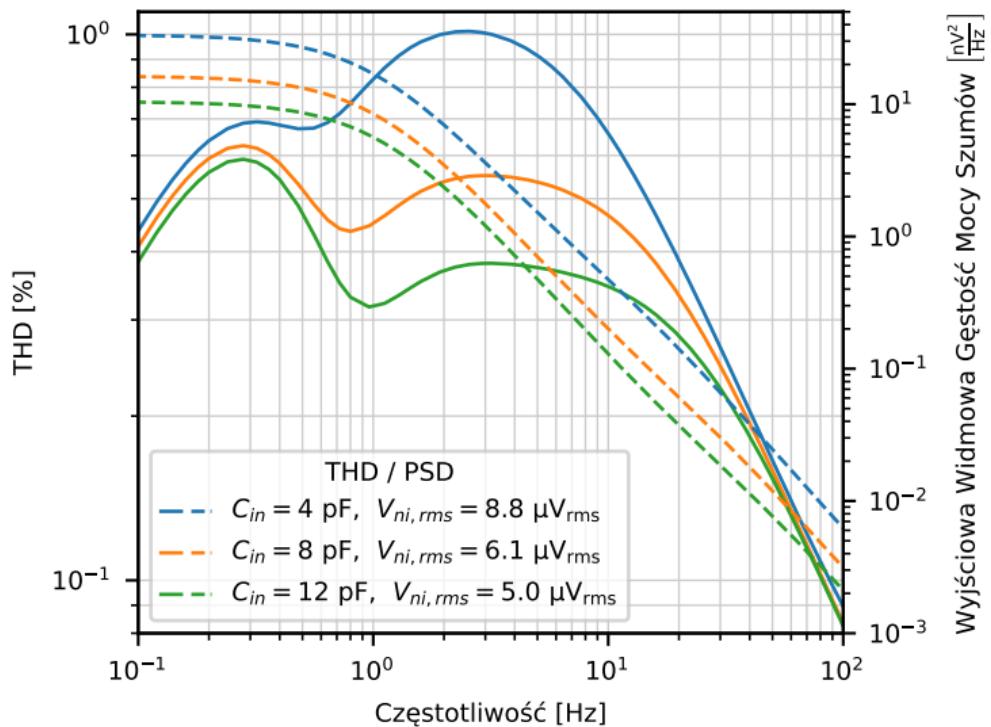
Zależność od technologii



# Szumy



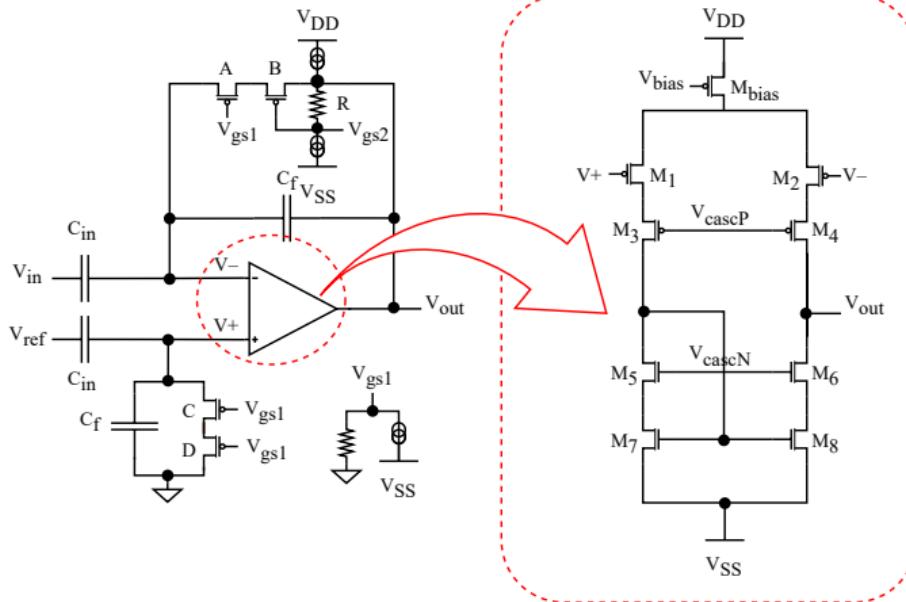
# Wpływ pojemności wejściowych na szумy i zniekształcenia



## Część III

Operacyjny wzmacniacz transkonduktancyjny

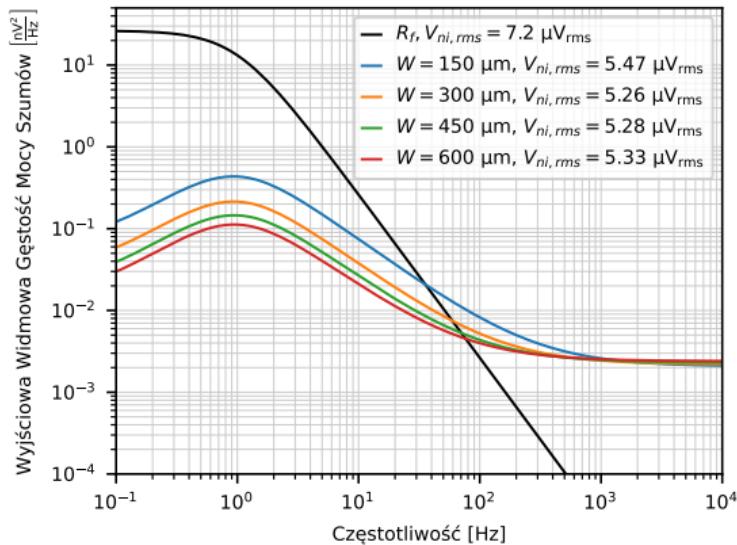
Implementacja teleskopowej kaskody ze zintegrowanym sprzężeniem AC

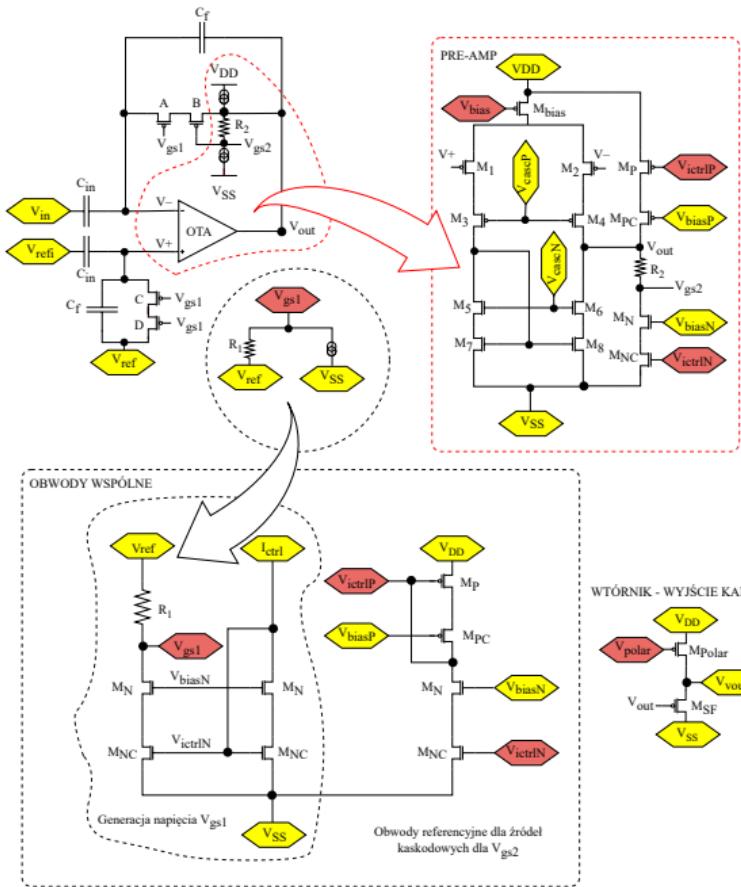


## Kluczowe wymagania

- optymalizacja szumowa
  - powierzchnia
  - pobór mocy

# Analiza szumowa pary różnicowej



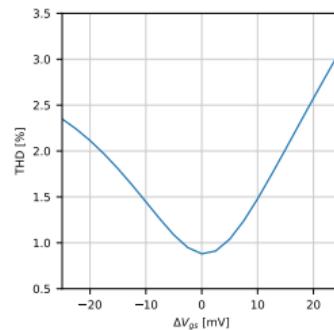
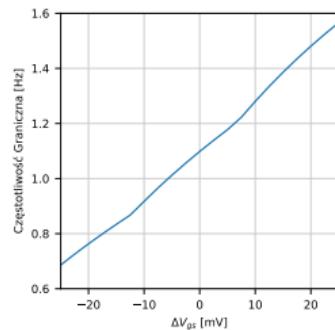
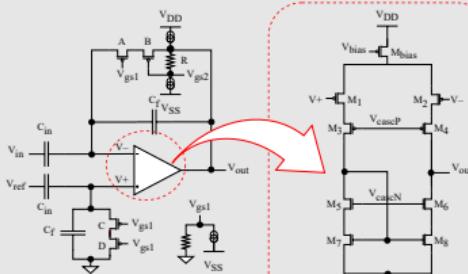


Przedwzmacniacz z  
wejściowym obwodem  
sprzęgającym AC oraz obwody  
polaryzujące

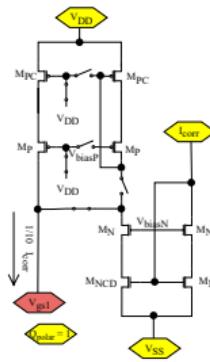
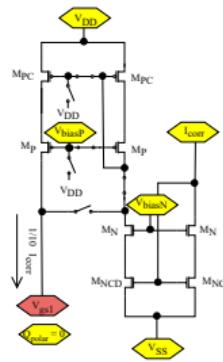
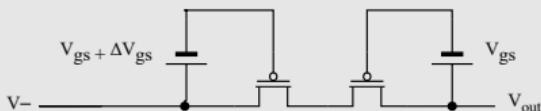
Kluczowe tranzystory	$W$ [ $\mu\text{m}$ ]	$L$ [ $\mu\text{m}$ ]
$M_{bias}$	10	10
$M_1, M_2$	300	1
$M_3, M_4$	20	2
$M_5, M_6$	5	5
$M_7, M_8$	4	48

# Efekty niedopasowania – blok korekcji

## Projekt kanału

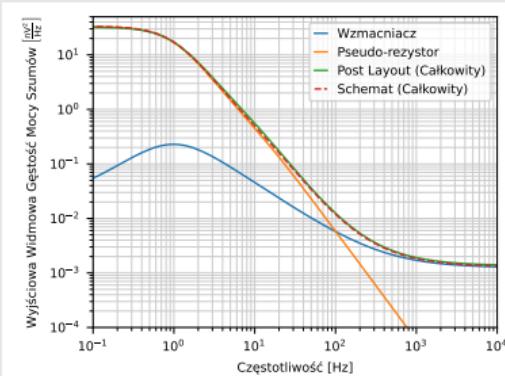
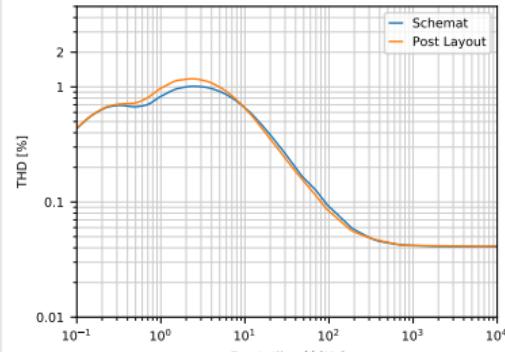
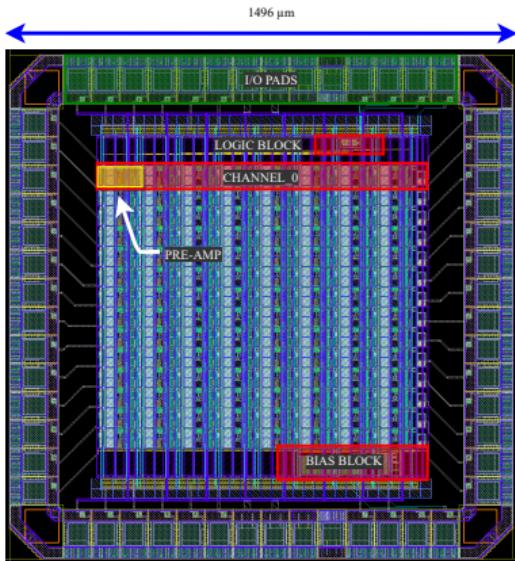


## Wyzwania do rozwiązania



## Symulacje Post-Layout

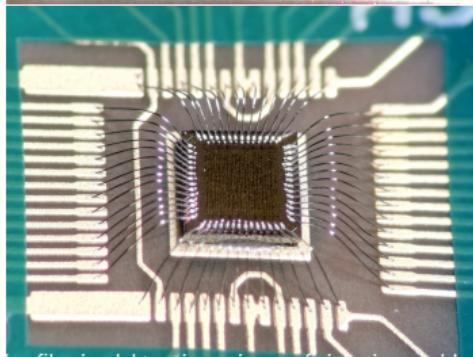
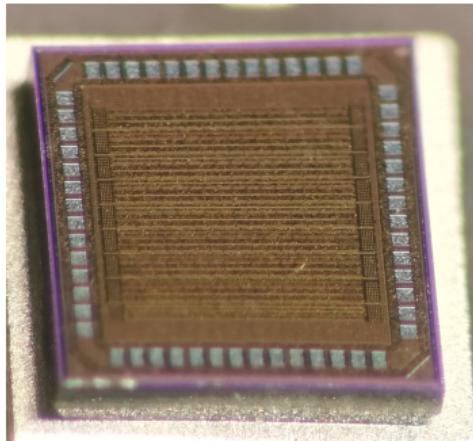
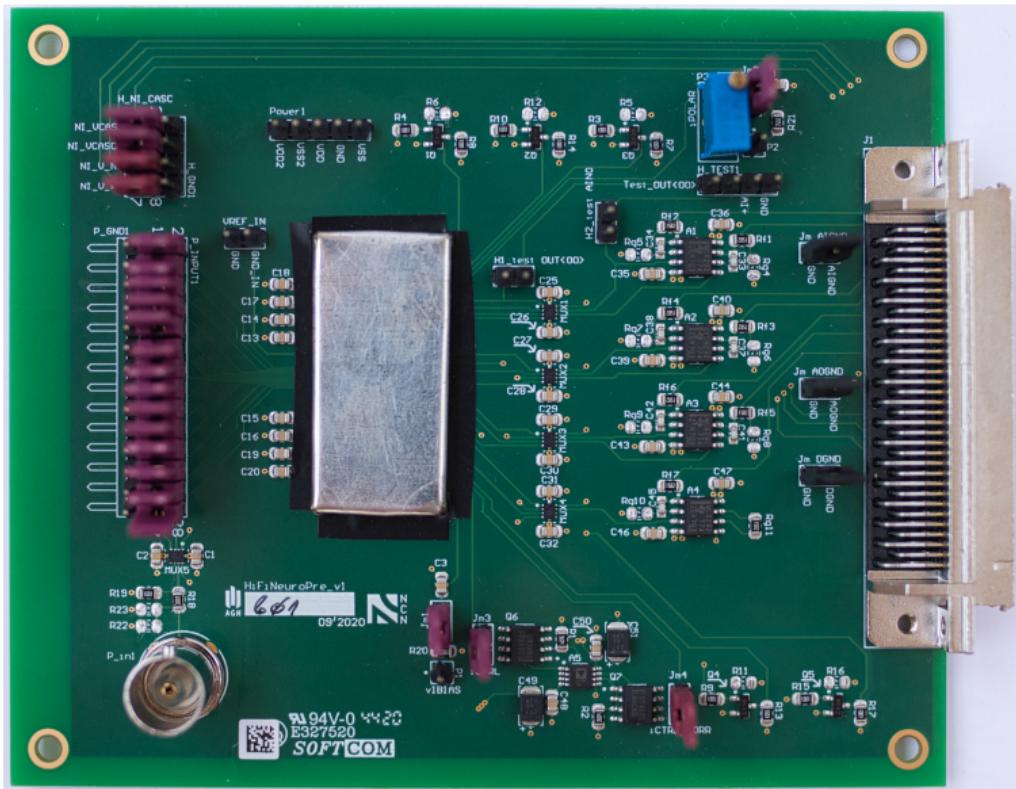
- 8 wersji przedwzmacniacza
- 14 kanałów pomiarowych



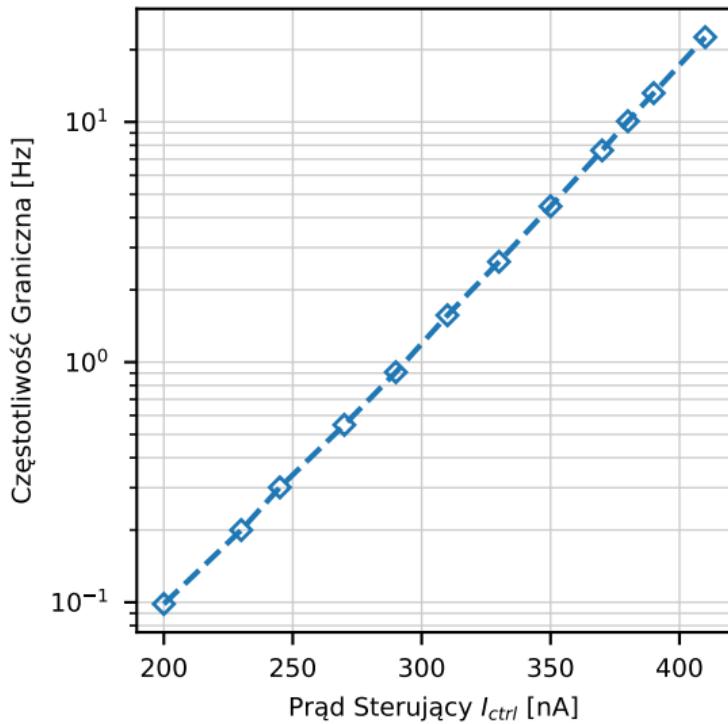
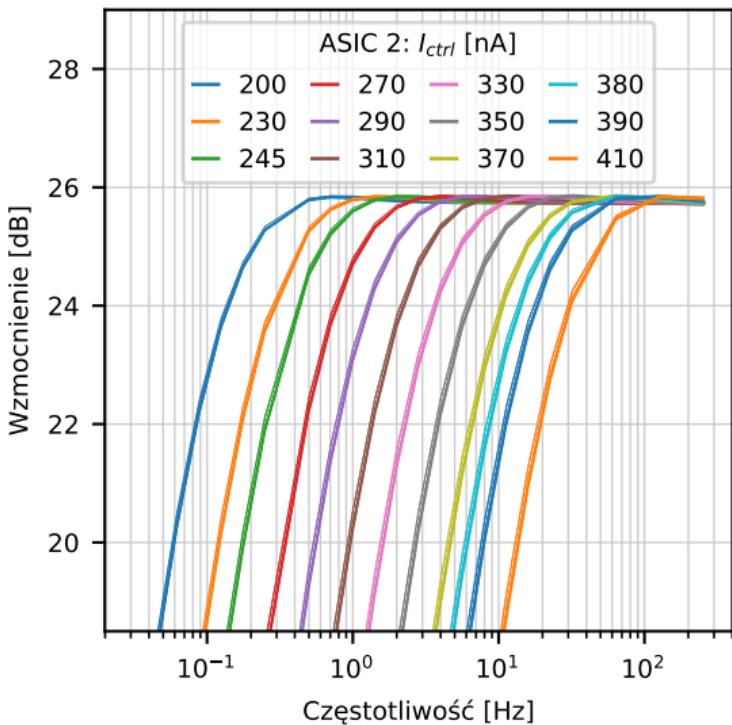
## Część IV

Weryfikacja elektroniczna i neurofizjologiczna układu scalonego HiFiNeuroPre

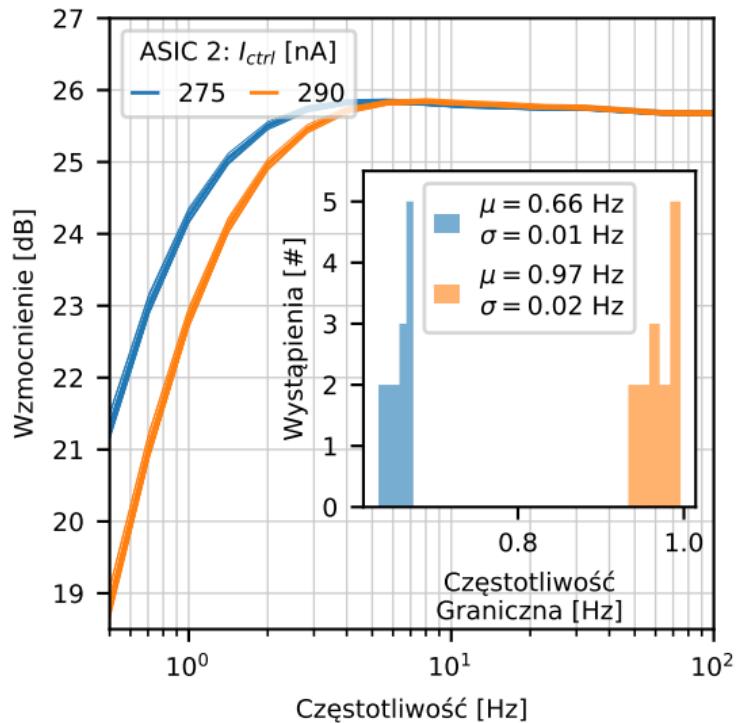
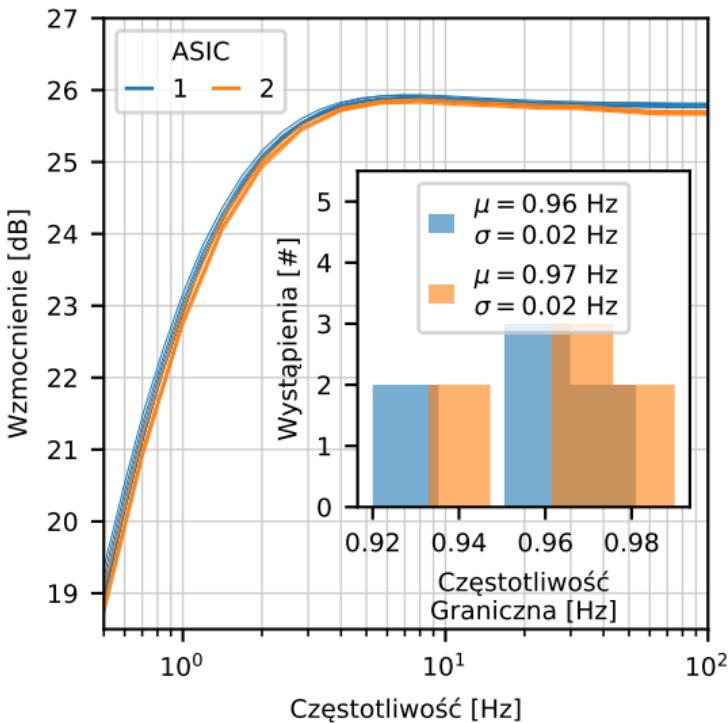
## System testowy



# Wzmocnienie, częstotliwość graniczna

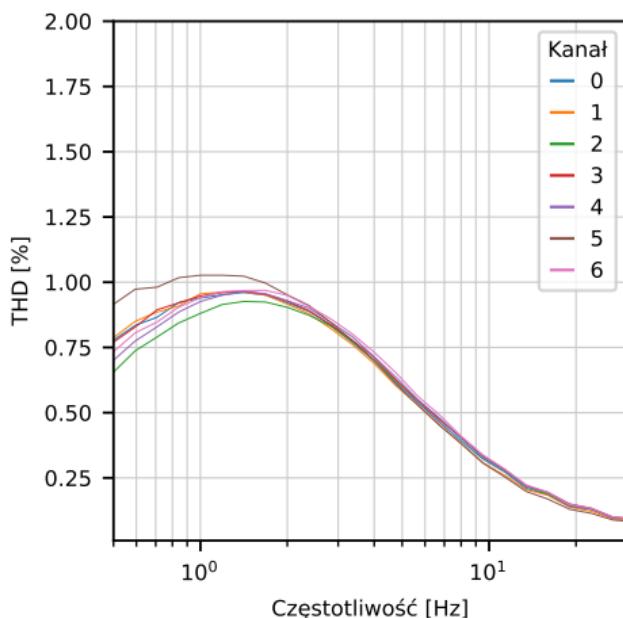


# Jednorodność kanałów

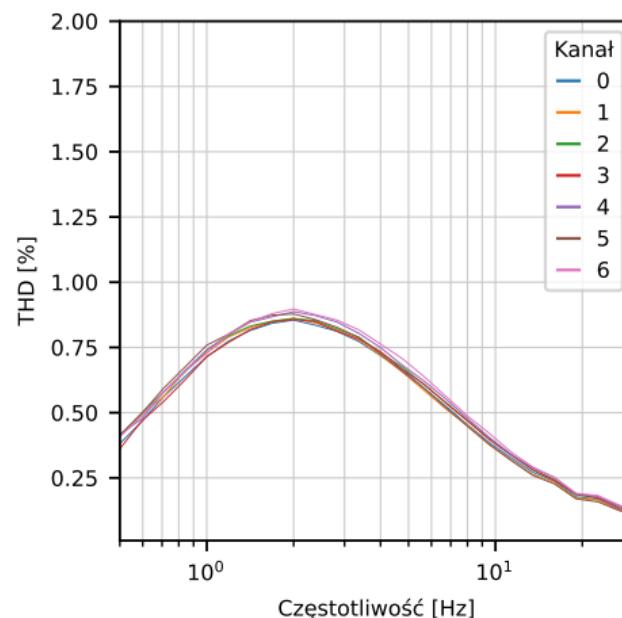


# Pomiary zniekształceń harmonicznych – wpływ korekty

Brak globalnej korekty

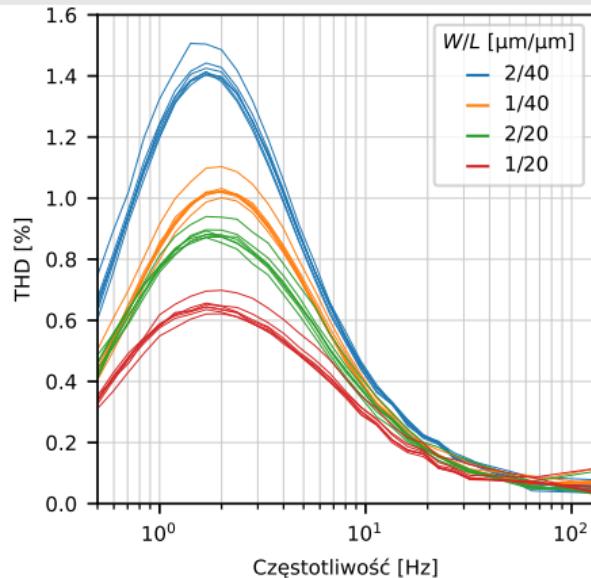


Korekta globalna

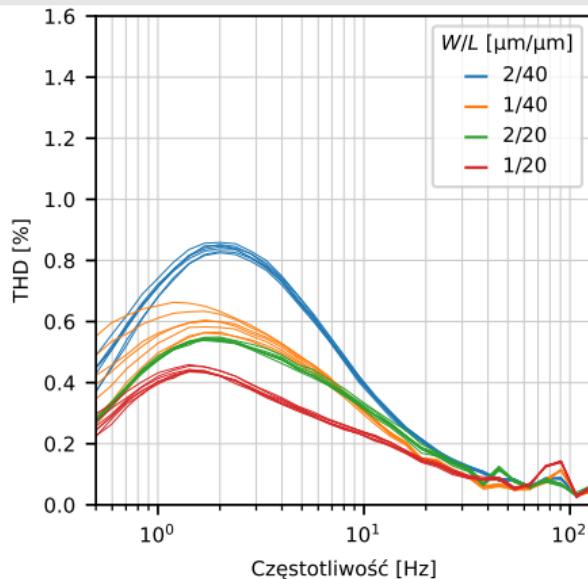


# Konfiguracje przedwzmacniacza

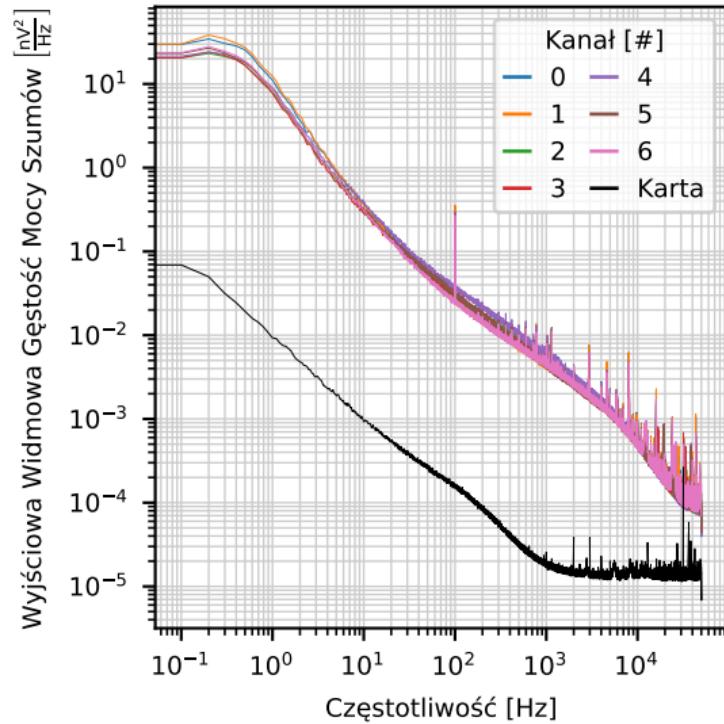
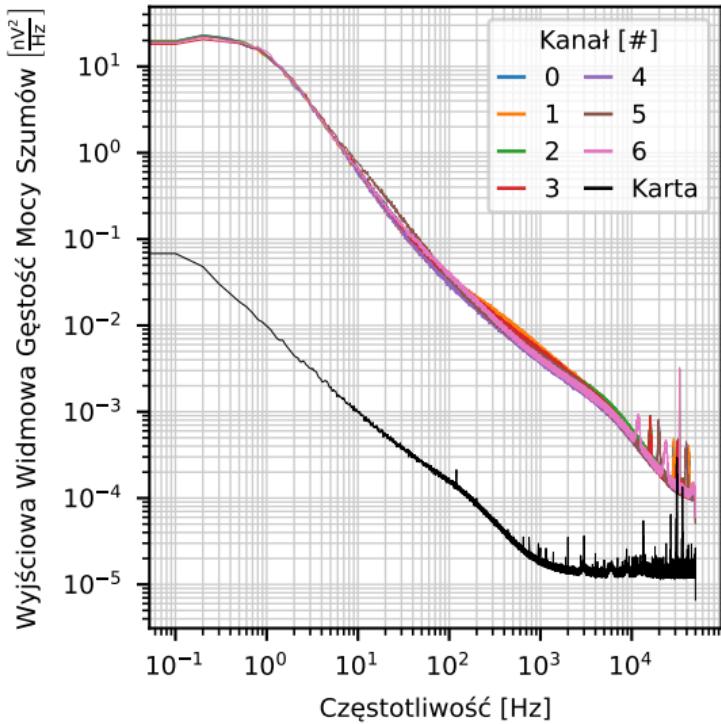
## Symetryczna konfiguracja



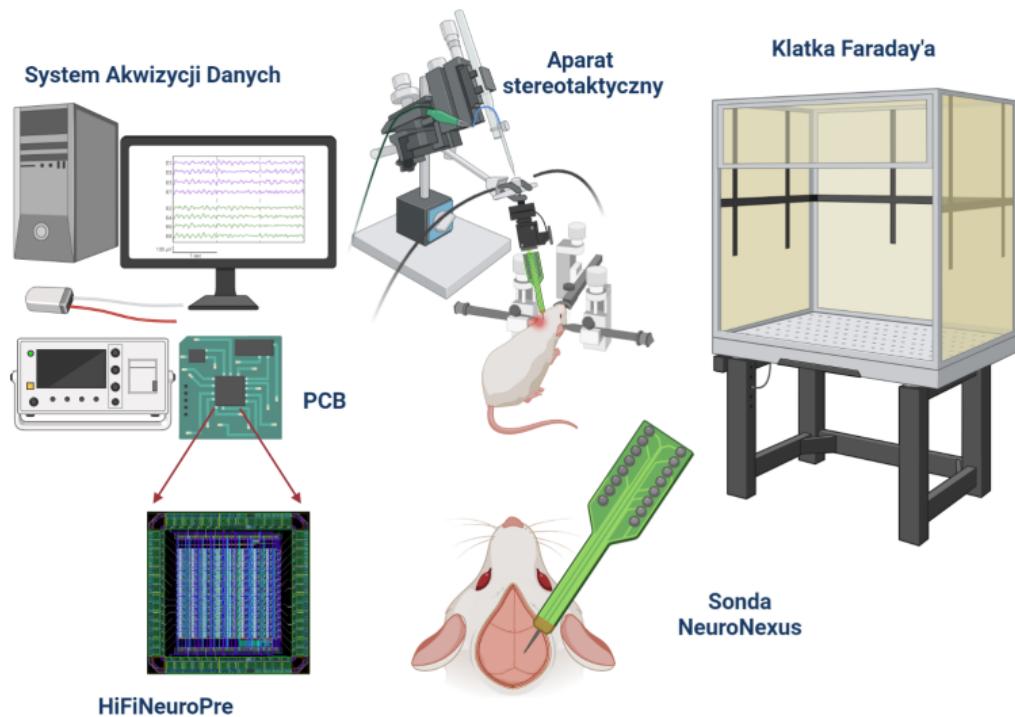
## Drugi wariant przedwzmacniacza z większymi pojemnościami wejściowymi

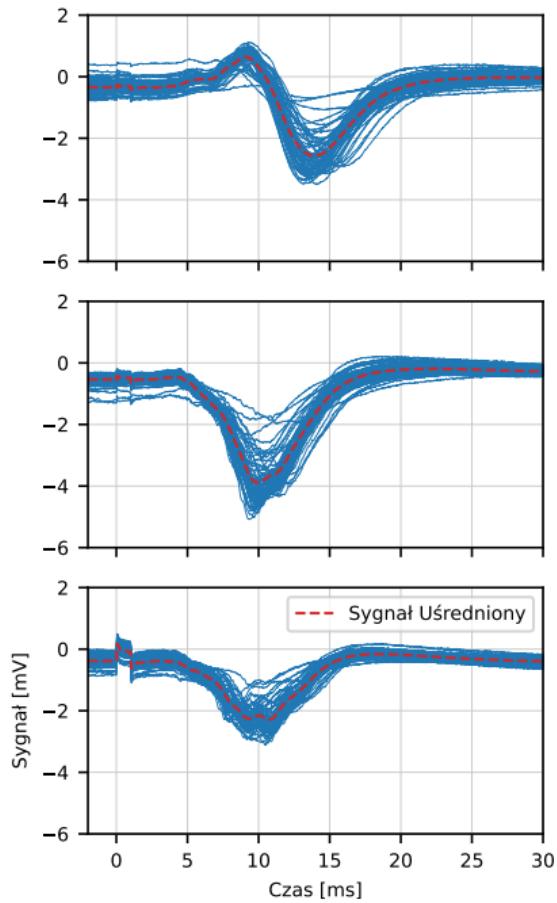


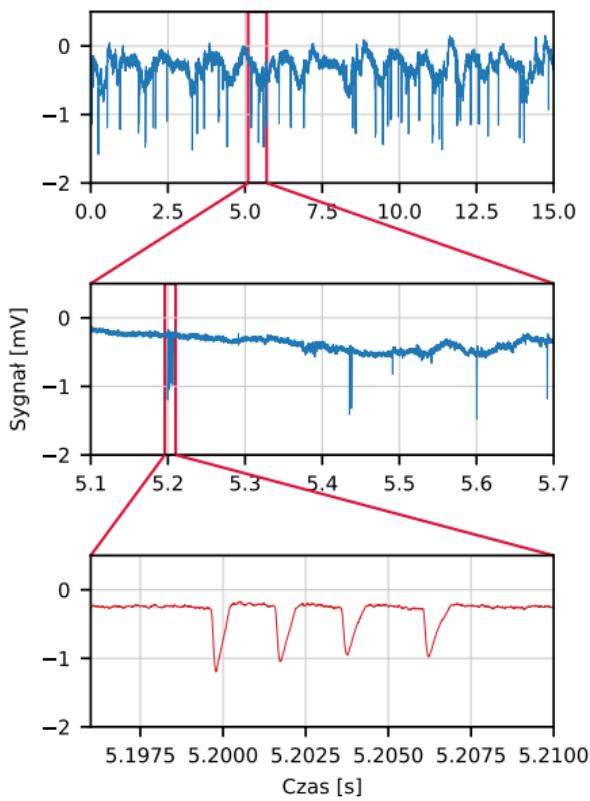
# Pomiary szumów



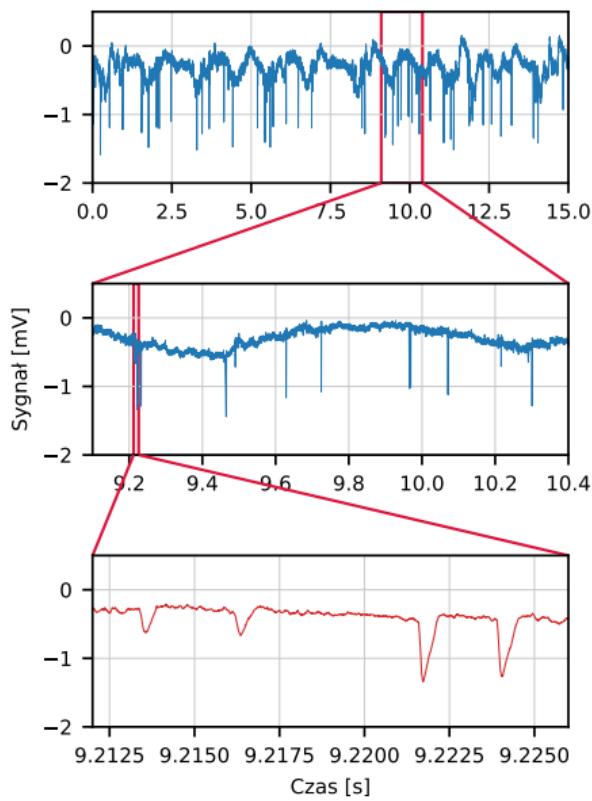
# System pomiarowy do akwizycji sygnałów neurobiologicznych







(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	$0,0071 \text{ mm}^2$

# Wnioski

