



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

# Część I

## Tematyka pracy

# Cele pracy

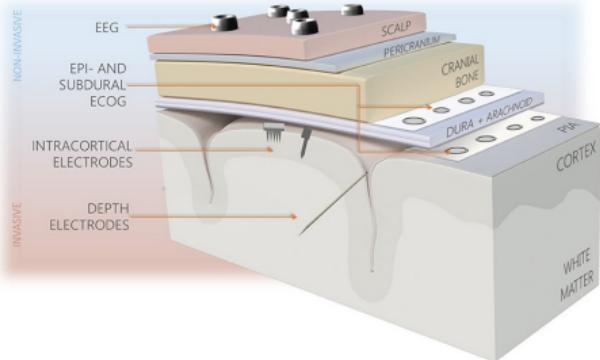
Celem projektu przedstawionego w niniejszej pracy było opracowanie przedwzmacniacza należącego do toru odczytowego dedykowanego do sondy neuronalnej umożliwiającej rejestrację sygnałów mózgowych.

## Główne zadania

- Kompleksowa analiza zniekształceń nieliniowych we wzmacniaczach neuronalnych
- Optymalizacja kluczowych parametrów przedwzmacniaczy neuronalnych
- Projekt układu scalonego, obwodu drukowanego oraz systemu akwizycji danych
- Wykonanie testów elektronicznych oraz analiza parametrów i charakterystyk opracowanego układu scalonego
- Udział w eksperymentach neurobiologicznych i analiza zebranych danych

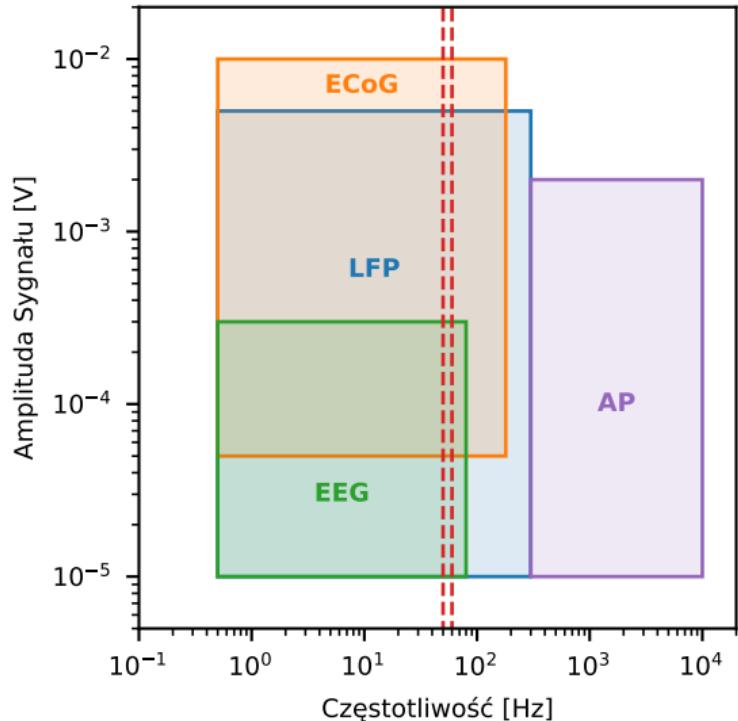
Przeprowadzone badania miały charakter eksploracji parametrów przedwzmacniacza oraz oceny możliwości zbudowania efektywnego układu na potrzeby przyszłego systemu łączącego rejestrację i stymulację elektryczną komórek nerwowych w mózgu na dużą skalę pomiarową.

# Zakresy amplitud i częstotliwości sygnałów neuronowych



## Metody rejestracji

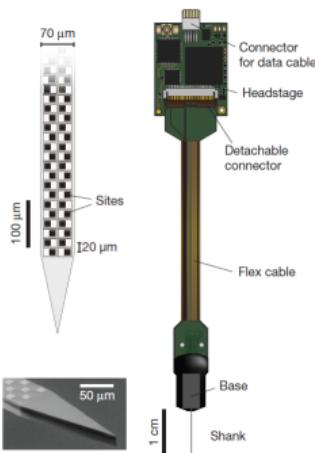
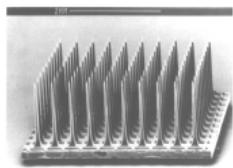
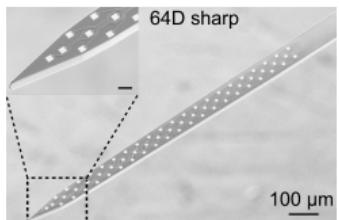
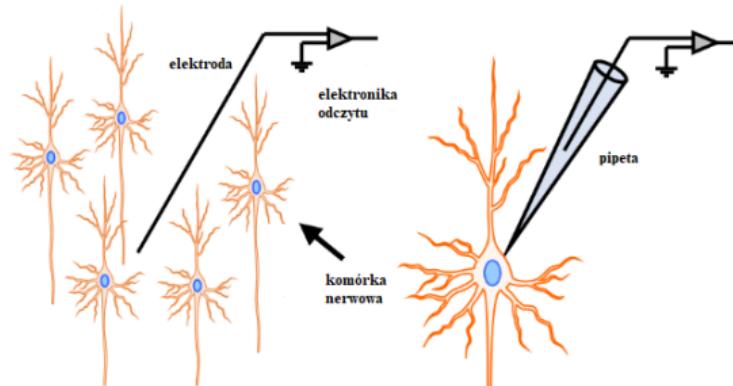
- LFP – Local Field Potential
- AP – Action Potential
- ECoG – Electrocorticography
- EEG – Electroencephalography



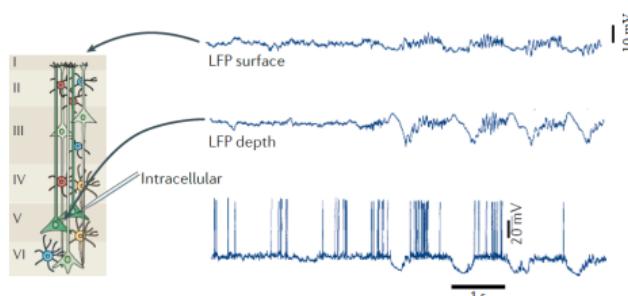
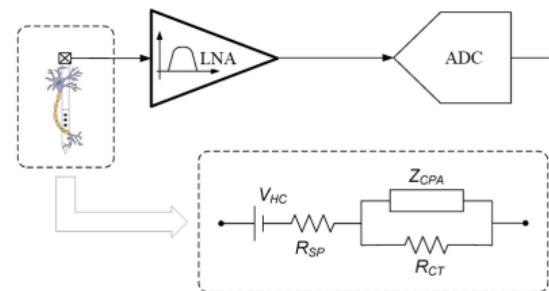
# Kierunki rozwoju współczesnych systemów pomiarowych i matryc mikroelektrodowych

## Techniki pomiarowe wewnętrz i zewnątrzkomórkowe w neurobiologii

- różne amplitudy sygnałów
- inwazyjność badań
- obszar badań



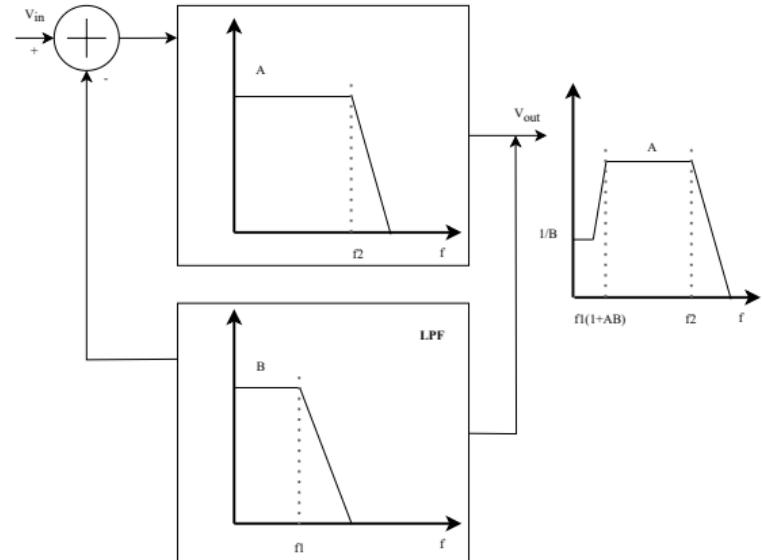
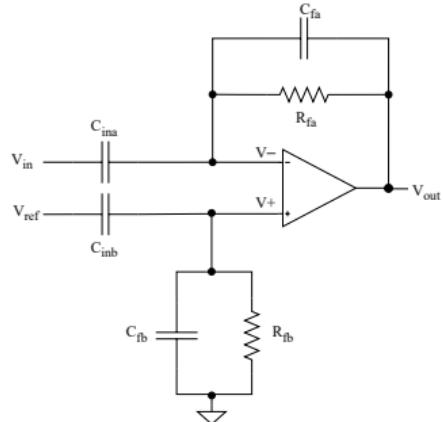
# Kanał rejestracji neuronowej z wykorzystaniem elektrod zewnętrzkomórkowych



Wymagania stawiane interfejsom neuroelektronicznym umożliwiającym rejestrację sygnałów LFP i AP

- Stały offset napięcia 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  $1^\circ\text{C}$
- Zróżnicowane sygnały: amplituda do  $10 \text{ mV}_{\text{pp}}$  dla LFP i od  $50 \mu\text{V}$  dla AP
- Skalowalność systemu – tysiące kanałów dla przyszłych systemów

# Sprzężenie zmiennoprądowe i stałoprądowe



- Całkowite usunięcie offsetu napięcia stałego na elektrodzie
- Konieczność implementacji filtru górnoprzepustowego z częstotliwością graniczną rzędu  $\sim 1 \text{ Hz}$
- Pojemności w CMOS  $\sim \text{fF} \cdot \mu\text{m}^{-2}$
- Rezystancja sprzężenia zwrotnego  $\sim \text{T}\Omega$

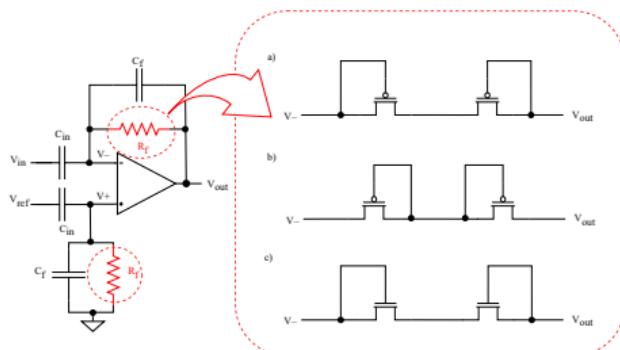
- Alternatywne podejście do eliminacji składowej stałej napięcia na styku elektrody i tkanki

## Część II

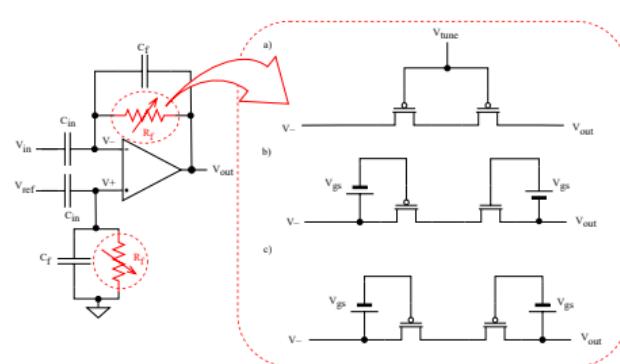
Liniowy pseudo-rezystor i operacyjny wzmacniacz  
transkonduktancyjny

# Podstawowe rozwiązania pseudo-rezystorów

Zastosowanie tranzystorów jako elementów rezystancji, zwanych pseudo-rezystorami, jest powszechną praktyką w projektowaniu obwodów analogowych dla przypadków, w których bierne rezystory nie są odpowiednie ze względu na wartości wymaganych rezystancji lub powierzchnie takich elementów.



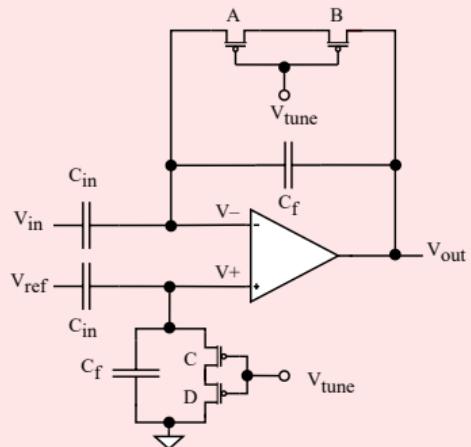
brak możliwości regulacji wartości rezystancji



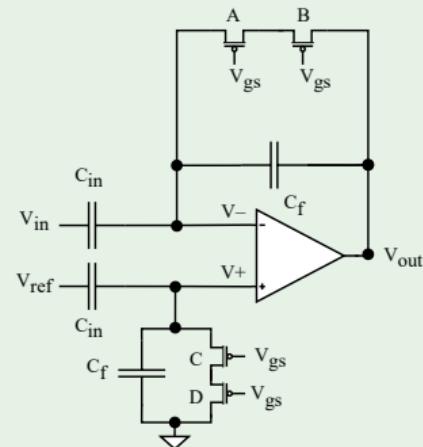
możliwość regulacji wartości rezystancji za pomocą modyfikacji napięcia panującego na bramce tranzystora

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

Zmieniające się napięcie pomiędzy bramką a źródłem tranzystora w zależności od sygnału wejściowego – *variable* –  $V_{gs}$



Sąłe napięcia pomiędzy bramką, a źródłem niezależnie od sygnału wejściowego – *fixed* –  $V_{gs}$



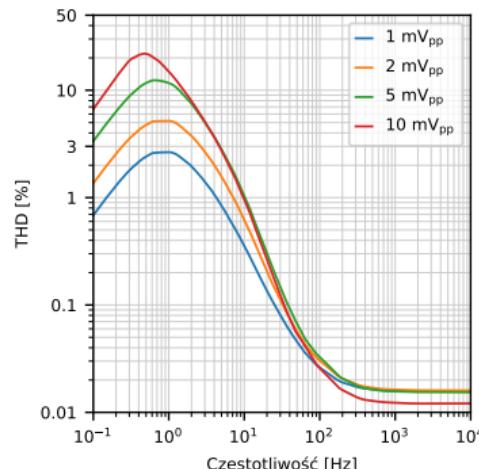
# Analiza liniowości pseudo-rezystorów

## Ustawienia symulacji

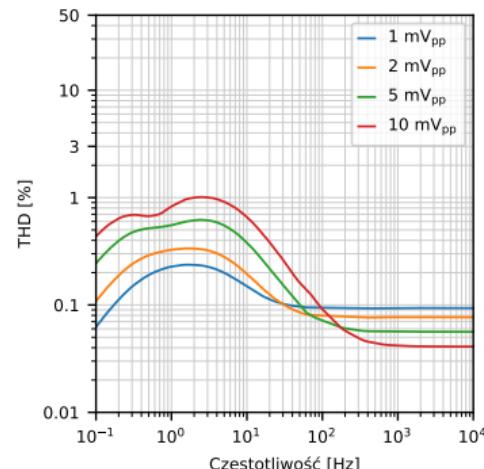
- Badanie odpowiedzi układu w dziedzinie czasu na wymuszenia sinusoidalne
- Częstotliwość graniczna dla układów z sprzężeniem AC  $\sim 1$  Hz
- Analiza: Transformata Fouriera – wyznaczenie współczynnika THD – miara liniowości rejestrowanego sygnału

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

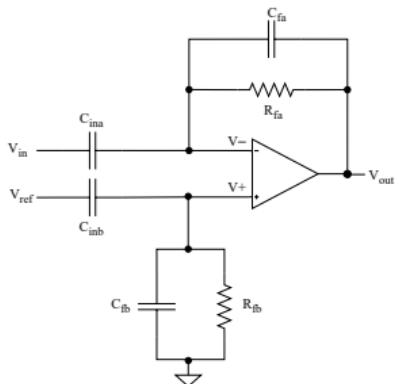
variable –  $V_{gs}$



fixed –  $V_{gs}$

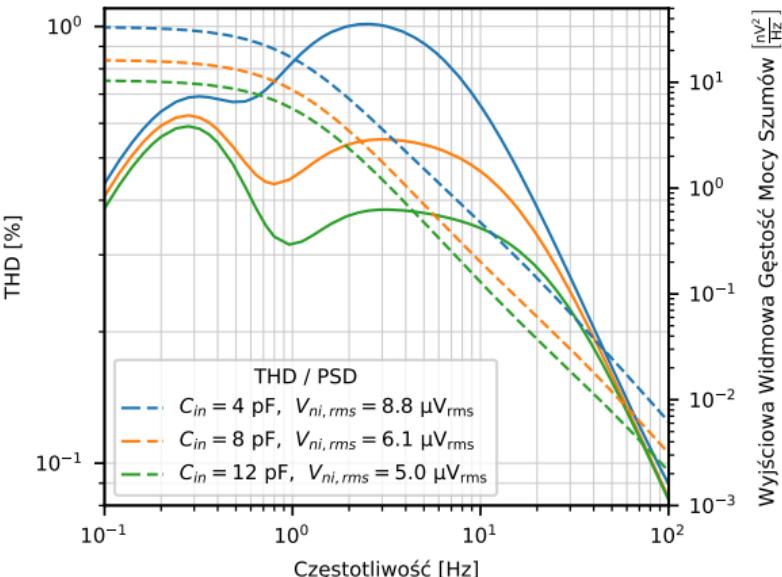


# Wpływ pojemności wejściowych na szумy i zniekształcenia

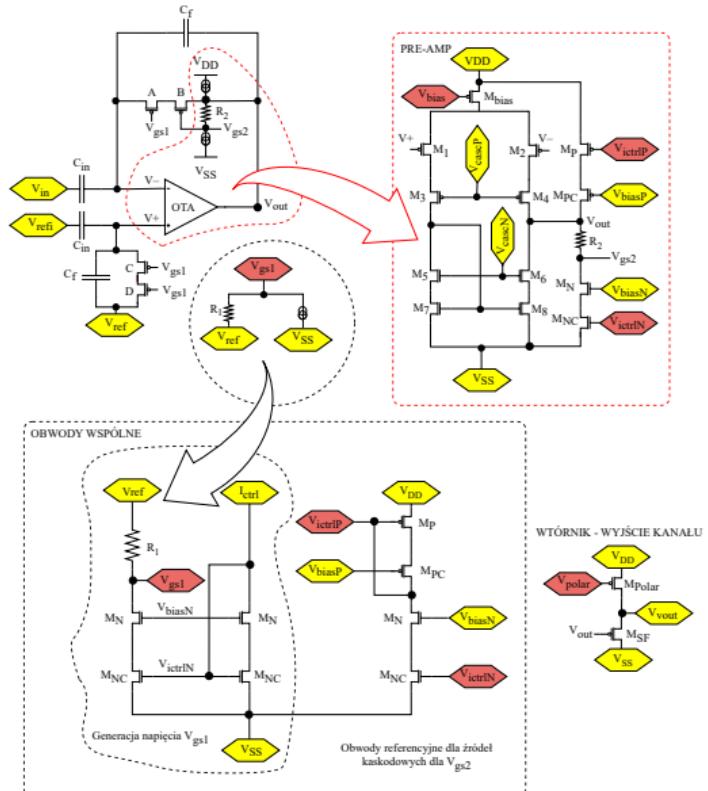


## Parametry

- Różne wartości  $C_{in}$ , oraz  $C_f$  przy stałym stosunku wzmacnienia  $Gain = 20 \text{ V} \cdot \text{V}^{-1}$
- Wartości  $R_f$  dostosowane dla każdej symulacji niezależnie tak, aby uzyskać tę samą częstotliwość graniczną 1 Hz
- Ekwiwalentne szumy wejściowe mierzone w paśmie 1 Hz – 10 kHz



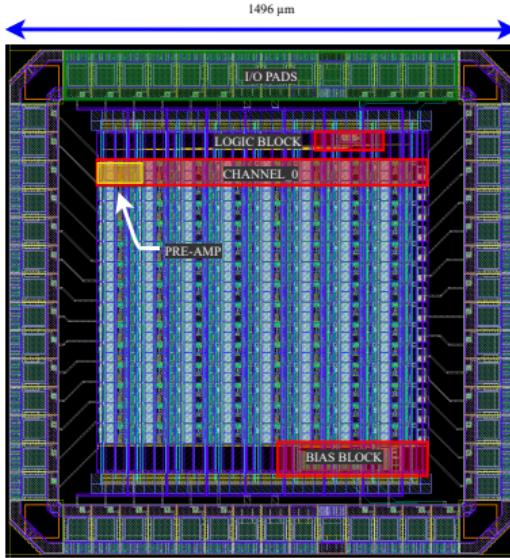
# Przedwzmacniacz z wejściowym obwodem sprzęgającym AC



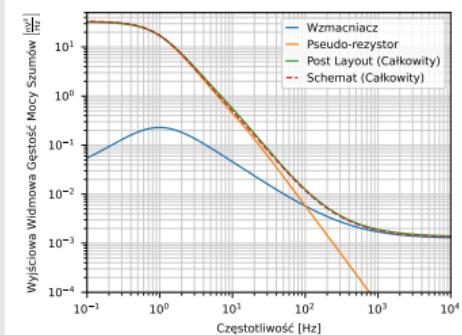
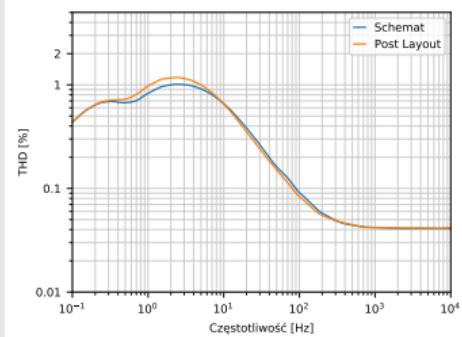
- Konfiguracja teleskopowej kaskody jako aktywny OTA
- Polaryzacja pary różnicowej w obszarze podprogowym pracy tranzystora
- Napięcie zasilania  $\pm 1,8 \text{ V}$

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

- 8 wersji przedwzmacniacza i 14 kanałów
- 4 wersje tranzystorów PMOS tworzących pseudo-rezystory –  $W/L$ :  
 $2/40, 1/40, 2/20, 1/20 \mu\text{m}/\mu\text{m}$
- 2 konfiguracje pojemności –  
 $C_{in}/C_f = 4/200, 8/400 \text{ pF/fF}$



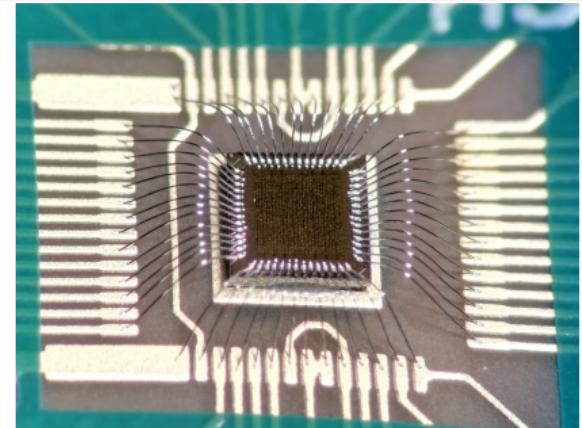
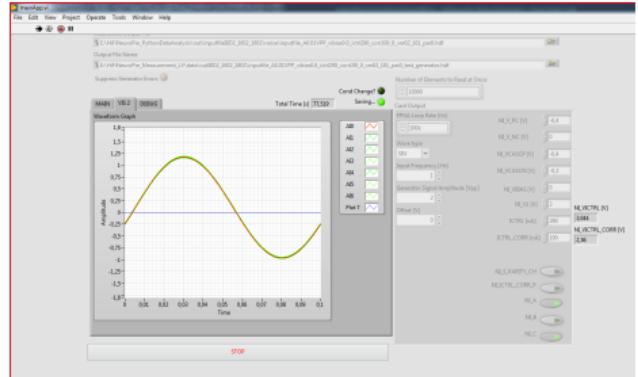
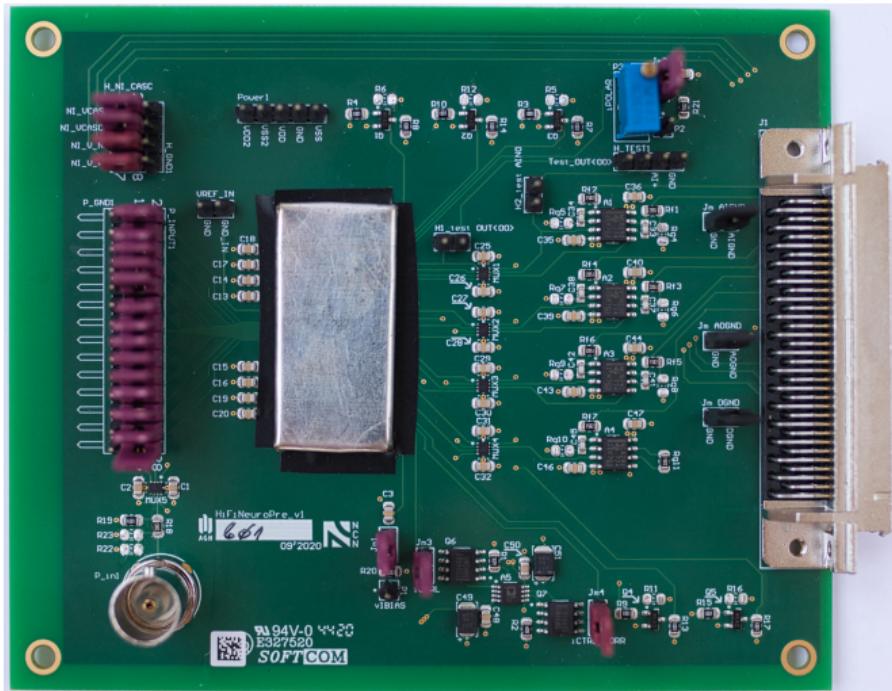
## Symulacje Post-Layout



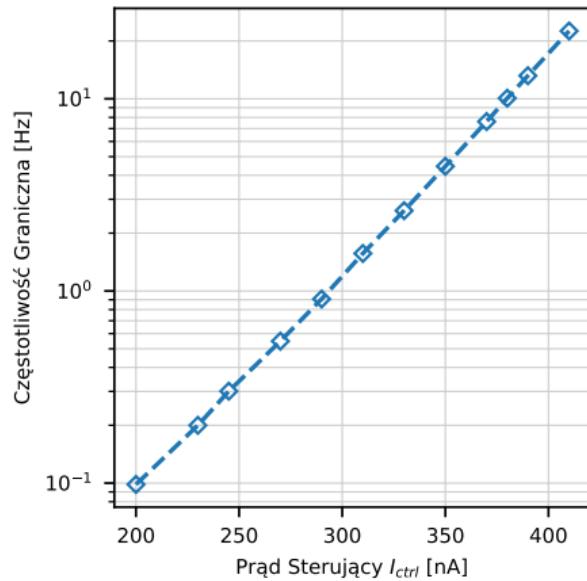
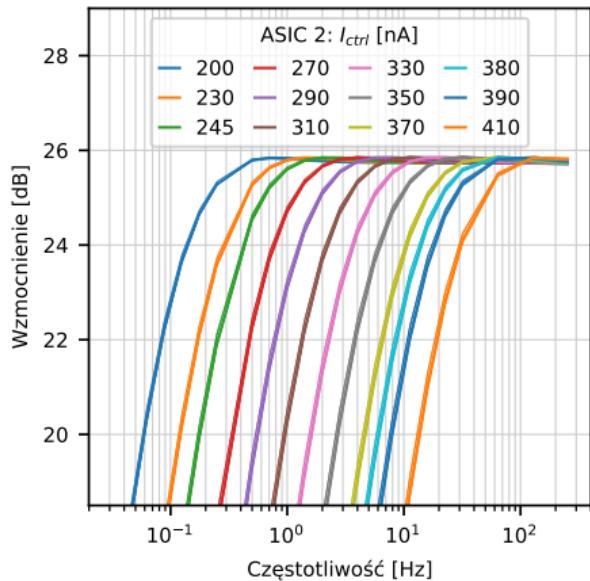
## Część III

Weryfikacja elektroniczna i neurofizjologiczna układu scalonego HiFiNeuroPre

# Zaprojektowane komponenty systemu testowego



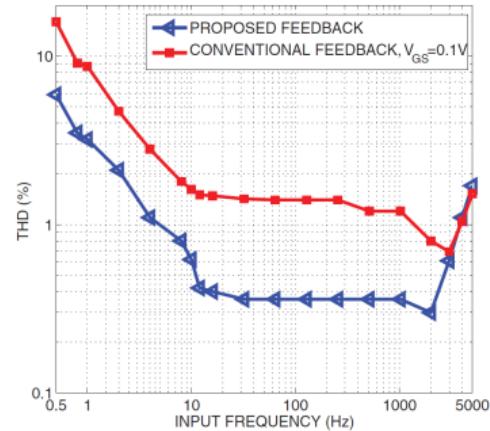
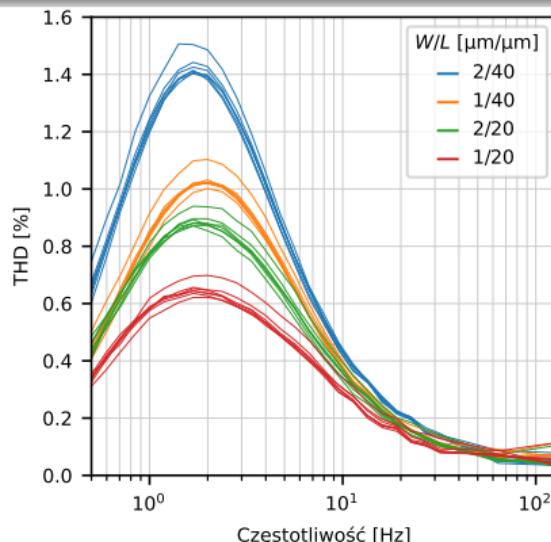
# Regulacja częstotliwości granicznej



- częstotliwość graniczna regułowana w zakresie od 0,1 Hz do 20 Hz
- jednorodność kanałów

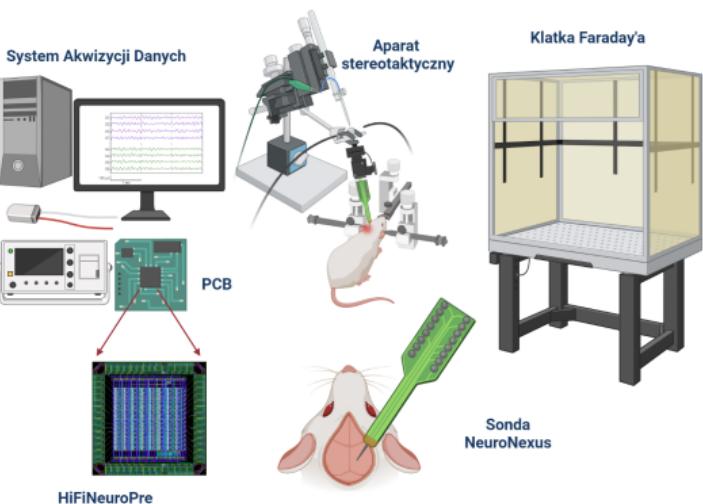
# Pomiary zniekształceń

- porównywalny protokół pomiarowy do symulacji – amplituda sygnału sinusoidalnego:  $10 \text{ mV}_{\text{pp}}$
- zmierzony poziom zniekształceń niższy niż w symulacjach



Rysunek: Symulacje THD dla sygnału sinusoidalnego o amplitudzie:  $1,4 \text{ mV}_{\text{pp}}$ . Na podstawie K. Abdelhalim and R. Genov, doi: 10.1109/ISCAS.2012.6271415

Schemat eksperymentu z wykorzystaniem systemu pomiarowego

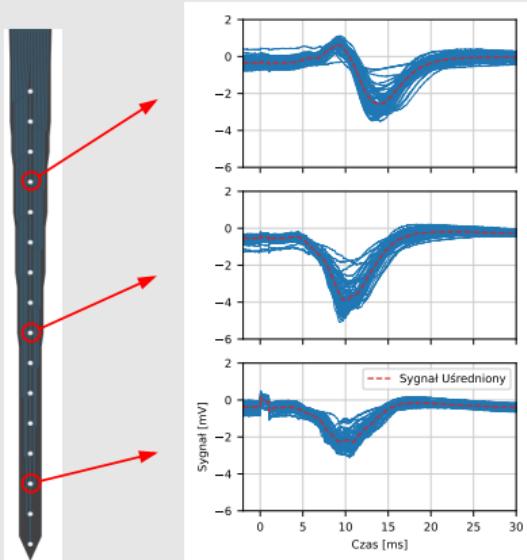


- Sonda komercyjna firmy Neuronexus  
– 16 elektrod na trzepieniu sondy
  - Wymuszona aktywność: Sonda w obszarze kory mózgowej na głębokości 1,4 mm pod powierzchnią mózgu
  - Spontaniczna aktywność: Sonda w obszarze wzgórza a głębokości 6 mm pod powierzchnią mózgu

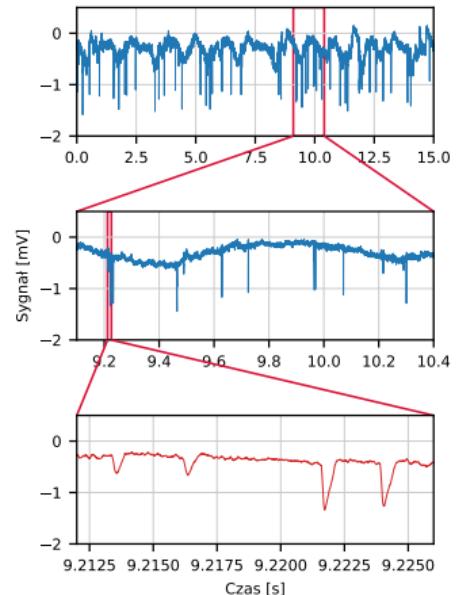


# Aktywność neuronalna zarejestrowana przez HiFiNeuroPre

- Stymulacja zewnętrzna aplikowana cyklicznie w różnych odstępach czasu – od 3 s do 5 s;
- 60 powtórzeń stymulacji w danym cyklu pomiarowym
- Kilka cykli pomiarowych dla różnych ustawień sprzętu



## Zapis spontanicznej aktywności neuronalnej



# Część IV

## 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 V

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 skutecną realizację zintegrowanego narzędzia do badań mózgu przez zespół Katedry Oddziaływań i Detekcji Cząstek AGH.

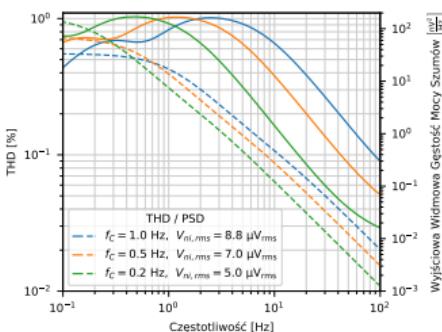
dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

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

Tezy pracy są tożsame z celem pracy i explicite nie zostały sformułowane w ramach odrębnych stwierdzeń. Zdaję sobie po uwagach, że byłby to przydatne podczas czytania, chociaż uważałam to w momencie za nienaturalne z wyżej wymienionego powodu.

[...] 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.

[...] 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.



Zależność współczynnika THD od częstotliwości oraz rozkładu PSD na wyjściu dla różnych ustawień granicznej przy stałej wartości  $C_{in} = 4 \text{ pF}$  i wzmacnieniu  $20 \frac{\text{V}}{\text{V}}$ . Amplituda sygnału:  $10 \text{ mV}_{pp}$ . Wartości napięcia  $V_{gs}$  były ustawione dla każdej symulacji niezależnie, aby uzyskać wymagane wartości dolnej częstotliwości granicznej. Na wykresie **w legendzie** zostały **podane** ekwiwalentne szумy wejściowe w paśmie 1 Hz – 10 kHz dla poszczególnych rozwiązań.

Ekwiwalentne szumy wejściowe dla różnych parametrów przedwzmacniacza [ $\mu V_{rms}$ ]. Dla każdego prądu polaryzyjącego i częstotliwości granicznej przedstawiono ekwiwalentne szumy wejściowe dla dwóch zakresów częstotliwości: 1-300 Hz (pasmo LFP) i 300 Hz – 10 kHz (pasmo AP).

Częstotliwość graniczna [Hz]	Prąd polaryzujący wzmacniacz [ $\mu A$ ]	2		4		6	
		LFP	AP	LFP	AP	LFP	AP
1,0	2	9,16	6,18	9,03	4,60	9,02	3,93
0,5	2	7,49	6,15	7,29	4,57	7,26	3,90
0,2	2	5,66	6,13	5,44	4,55	5,41	3,87
1,0	4	–	–	–	–	–	–
0,5	4	–	–	–	–	–	–
0,2	4	–	–	–	–	–	–
1,0	6	–	–	–	–	–	–
0,5	6	–	–	–	–	–	–
0,2	6	–	–	–	–	–	–

[...] 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.

Powodem dla którego nie zostały podane sztywne wartości dotyczące systemu wynika z tego, że celem projektu było zbadanie możliwości zbudowanie takiego wzmacniacza. Natomiast specyficzne wymagania są zależne od zastosowanie. Celem pracy było zbadanie i zrozumienie ograniczeń wynikających z technologii oraz możliwości zakresu parametrów jakie są osiągalne niż celowanie w jeden konkretny zestaw parametrów. W zależności z jakimi elektrodami przeprowadza się eksperyment te wymagania mogą być różne ponieważ powierzchnia, moc i szумy są parametrami, które się wymieniają - zestaw który z parametrów jest bardziej krytyczny zależy od elektrod i eksperymentów.

[...] 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.

Rozumiem, że w kontekście rosnącej popularności rozwiązań opartych o wzmacniacz o małym lub jednostkowym wzmacnieniu i przetwornikom analogowo-cyfrowym ubogi fragment w rozdziale dotyczącym obecnego stanu wiedzy bddzi niedosyt. Rozwiązanie te jednak tyczą się głównie zastosowań związanych z rejestracją sygnałów EEG. Układy te charakteryzują się innymi wymaganiami dotyczącymi ilości kanałów pomiarowych, rozmiarów oraz technologii w której są wykonywane, dlatego zdecydowano się nie poszerzać o ten aspekt pracy szczególnie, że w przypadku systemów dedykowanych rejestracji mikroelektrodowej aplikowanych wewnątrz mózgu nie jest to kierunek wiodący dlatego nie poszerzano pracy o ten aspekt.

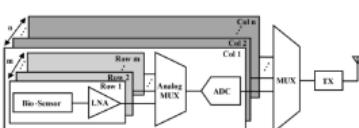
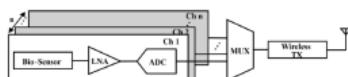
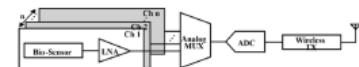
dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] 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.

Chociaż obszerna część medyczno-biologiczna w przedstawionej pracy może się wydawać długą chiałam podkreślić, że jej rozmiar był wynikiem interdyscyplinarnego charakteru projektu i chęci przedstawienia wszechstronnej wiedzy różnej grupie odbiorców. Ta obszerność miała pozwolić na lepsze zrozumieni charakterystyk sygnałów LFP i AP oraz zwiększyć użyteczność badań do innych zastosowań poprzez sporwadzenie wymagań biologicznych do rozumianych pojęć używanych w grupie projektantów elektroniki. Rozumiem jednak że część mogłaby być krótsza.

[...] 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 użytkować wyrażenia **offset napięcia wyjściowego**.

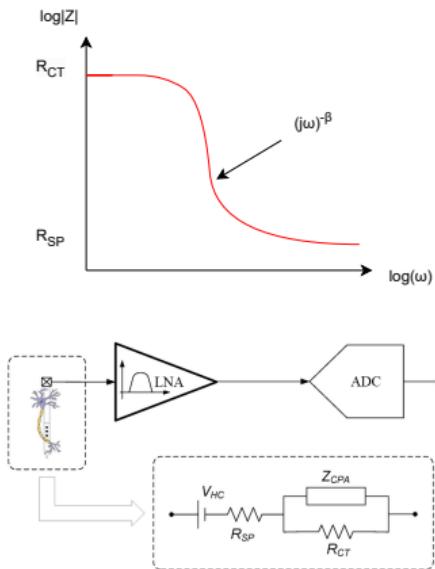
Układ odczytu jest pojęciem szerszym aniżeli wzmacniacz, który jest częścią układu odczytowego. Pojęcie może być niefortunne i lepsze byłoby używanie określenia tor odczytu opisując drogę sygnału. Dodatkowo pojęcie *Front End* jest powszechnie używane w kontekście struktur scalonych opisując fragment toru odczytowego, który odpowiada za wstępne przetworzenie sygnału. Pojęcie mniejsze multipleksery jest niefortunne - chodziło o multipleksery obejmujące mniejszą liczbę kanałów wejściowych. Dzięki mniejszej liczbie kanałów można wykorzystywać niższe częstotliwości zegarów odpowiedzialnych za próbkowanie sygnału.



[...] 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.

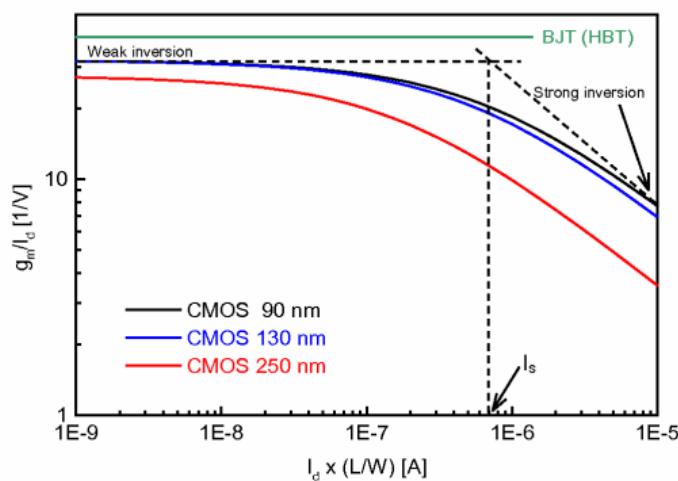
Oczywiście częstotliwość próbkowania jest zdeterminowana charakterystyką sygnału zgodnie z twierdzeniem Nyquista. W powyższym stwierdzeniu nieumiejętnie próbowało przekazać, że częstotliwość wielokanałowego ADC zależy od architektury, a konkretnie od ilości obsługiwanych kanałów w przetworniku. Jeżeli użyjemy ADC obsługujące jeden kanał jego częstotliwość próbkowania jest tożsama z częstotliwością próbkowania kanału, ale w przypadku wielokanałowego ADC jego częstotliwość systemu musi być skalowanie odpowiednio większa i stąd doszło do słabego wytłumaczenia zagadnienia.

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



Impedancja przy niskich częstotliwościach ma charakter rezystancyjny, Wartość  $R_{CT}$  (rezystancja elektrochemiczna) jest duża i dla szumów nie ma znaczenia podobnie jak wartość pojemności warstwy podwójnej. Szum termiczny zależy od parametru  $R_{SP}$  (rezystancja rozproszona), który w modelu jest w szeregowym połączeniu ścieżki sygnału, i parametr ten zależy on od rozmiaru elektrody. Podobnie w przypadku niskich częstotliwości jeżeli impedancja jest duża w stosunku do impedancji wejściowej pierwszego elementu toru odczytowego czyli w tym przypadku wzmacniacza otrzymujemy dzielnik napięciowy, który może powodować atenuację sygnału.

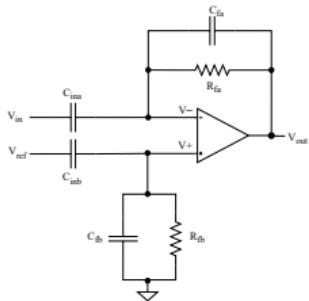
[...] Niektóre fragmenty tekstu są dla mnie niezrozumiałe lub budzą pewne wątpliwości [...] Z punktu widzenia minimalizacji poboru mocy najkorzystniejsza jest polaryzacja tranzystorów w zakresie słabej inwersji, ponieważ w tym zakresie transkonduktancji do prądu polaryzacji tranzystora jest największy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



Szумy termiczne kanału tranzystora są odwrotnie proporcjonalne do transkonduktancji dlatego zależy nam na dużej wartości tego parametru. Wartość tego parametru jest ściśle związana z wartością prądu polaryzacji tranzystora, która przekłada się pobór mocy, dlatego ważne jest jak uzyskać daną transkonduktancję przy minimalnym prądzie. Na rysunku przedstawiono stosunek transkonduktancji do prądu drenu w funkcji znormalizowanego prądu drenu dla trzech technologii i na podstawie tego można zobaczyć, że najkorzystniejszy jest obszar podprogowy.

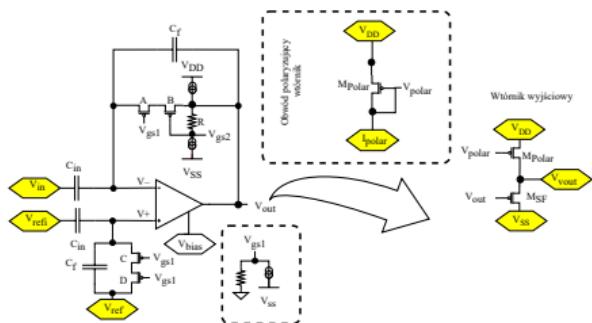
[...] Niektóre fragmenty tekstu są dla mnie niezrozumiałe lub budzą pewne wątpliwości [...] ale przy stałym stosunku  $C_{in}/C_f = 20V/V$

[...] 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?



"ale przy stałym stosunku  $C_{in}/C_f = 20V/V$ " oczywiście jest niefortunno pomyłką wynikającą z tego, że stosunek pojemności określa wzmacnienie, które wynosi  $K = 20V/V$ . Jednak w przypadku stosunku pojemności należało użyć właściwych jednostek. Sprzężenie zmiennoprądowe zapewnia usunięcie składowej stałej, dlatego nie ma obawy o nasycenie wzmacniacza jak w przypadku sprzężenia stałoprądowego.

[...] 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.**



Powyższe zdania stanowią uchybienie edytorskie i powinno być. Ostatnie zdanie nie jest już również potrzebne. [...] Jak wspomniano wcześniej, w docelowym rozwiązaniu przewiduje się zastosowanie drugiego stopnia wzmacniającego. Przy założeniu, że kolejny stopień będzie miał wysoką impedancję **wejściową**, może on być sterowany bezpośrednio z kaskody o wysokiej impedancji wyjściowej.

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

$$NEF = v_{ni,rms} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot I_{tot}}{V_t \cdot 4k \cdot T \cdot \Delta f \cdot \pi}}, \quad (1)$$

gdzie  $v_{ni,rms}$  ekwiwalentne szумy wejściowe (IRN), a  $I_{tot}$  to prąd całkowity płynący przez obwód wzmacniacza,

$\Delta f$  Jest to efektywna szerokość pasma szumowego wzmacniacza. Reprezentuje zakres częstotliwości, w którym rozważa się szum wzmacniacza.

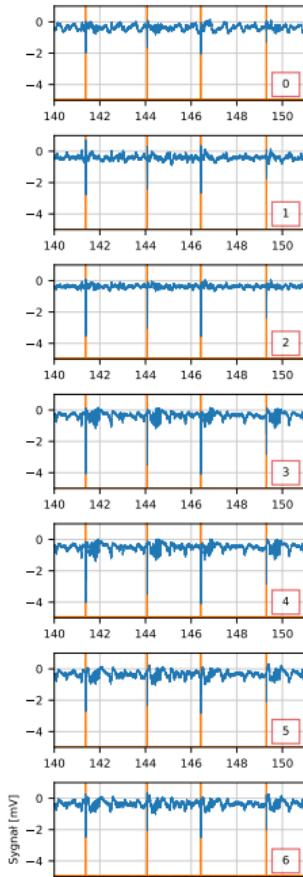
$V_t$  To napięcie termiczne, zazwyczaj wyrażane jako  $kT/q$ , gdzie "k" to stała Boltzmanna, "T" to temperatura w kelwinach, a "q" to ładunek elektronu.

[...] 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.

[...] 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).

Celem w tej pracy była głównie analiza nieliniowości pseudo-rezystora, dlatego skupiono się na opisie tej struktury i jej własności. Przy projektowaniu wzmacniacza powyższe parametry były brane pod uwagę, razem z innymi parametrami jak szумy czy offset co uznano za standardową procedurę optymalizacji pary różnicowej natomiast nie zostały szczegółowo opisane.

Parametry, jak slew rate, odpowiedź na skok jednostkowy czy też liniowość fazy zostały wzięte pod uwagę przy projekcie. Te aspekty nie zostały detalicznie opisane ponieważ nie uznano tych parametrów za krytyczne ze względu na zakres pracy wzmacniacza (pasmo rejestrowanych sygnałów) jak również trudne do osiągnięcia na akceptowalnym poziomie.



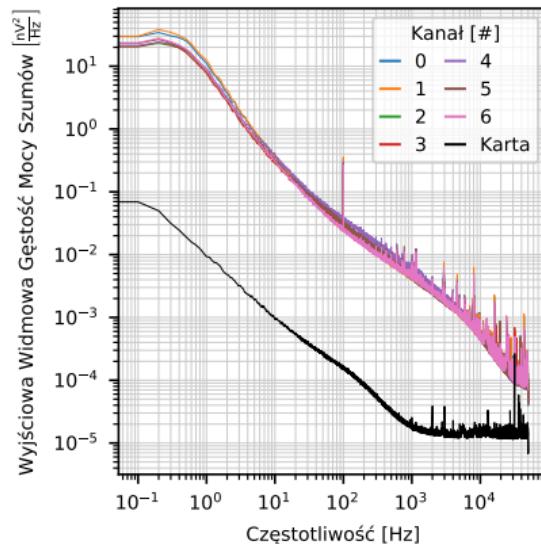
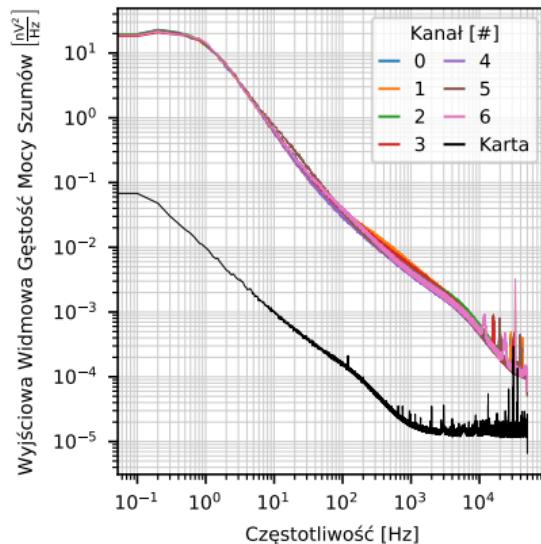
W przypadku stałego poziomu dc, który jest widoczny na przebiegach sygnału wynika on z właściwości wtórnika źródłowego, który jest na wyjściu i zapewnia odpowiednią impedancję wyjściową. Jest to systematyczny efekt po wszystkich kanałach co jest widoczne na poniższym wykresie.

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.

W tym miejscu chciałbym podkreślić, że współczynnik THD na poziomie 1% to nie jest bardzo niską wartością. W pracy nie optymalizowano tego parametru do poziomu bardzo niskiego, co faktycznie wymagałoby uzasadnienia biologicznego. THD jest miarą liniowości rejestrowanego sygnału powszechnie używaną w literaturze, jednak dla tego typu systemów podawany jest dla jednej wartości daleko od zakresu, w którym jest narażony na bardzo dużą nieliniowość. W pracy i na prezentacji przedstawiono że w niektórych systemach THD może być nawet o jeden rząd wielkości większe niż proponowany wymóg projektowy 1% dlatego podnoszono znaczenie tego parametru.

[...] 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.



dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] Język rozprawy jest bardzo dobry, odnotowano jedynie nieliczne przypadki łączenia imiesłowa przysłówkowego ze stroną bierną.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] Nie jest zachowany klasyczny układ publikacji naukowej, natomiast zaproponowany układ jest logiczny i przejrzysty.

Dziękuję za uwagi dotyczące układu pracy. Cieszę się, że zaproponowany układ został uznany za logiczny i przejrzysty.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] Użycie bibliografii jest nieco utrudnione przez brak sortowania alfabetycznego.

Dziękuję za uwagę dotyczącą sortowania bibliografii w pracy. Sortowanie numeryczne pozwoliło mi uporządkować cytowane prace w sposób, który lepiej oddawał hierarchię źródeł. Rozumiem, że różni czytelnicy preferują różne metody sortowania, ale w tym przypadku uznałam, że sortowanie numeryczne za bardziej odpowiednie szczególnie, że w wersji elektronicznej dzięki linkom między numerem, a pozycją można łatwo odszukać interesującą pozycję w bibliografii.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] Cytowanie na ogół jest poprawne, jedynie cztery źródła to źródła internetowe, dla których jedynym adresem publikacyjnym jest strona www. Podane są one [...] bez daty dostępu, co jest błędem, jednak ich charakter nie wskazuje na ulotność ponieważ są to w większości strony firmowe, zawierające charakterystyki produktów.

Faktycznie doszło do pominięcia tych informacji i nie wyświetlenia ich przy konkretnych pozycjach w bibliografii.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] natomiast rysunki stanowiące autocytaty z prac, których współautorką jest Autorką nie są oznaczone jako takie.

Chciałabym wyjaśnić, że te rysunki stanowią autocytaty z wcześniejszych prac, w których byłam współautorem oraz autorem głównym wszystkich grafik. Rysunki zostały dostosowane i poprawione zgodnie z potrzebami i kontekstem bieżącej pracy. W związku z tym, uznałam, że nie było konieczności oznaczania ich jako autocytaty, ponieważ zostały one zmodyfikowane w celu dostosowania do przedstawianej pracy. Rozumiem jednak, że ta kwestia może wydawać się niejasna.

[...] W tekście cytowanych jest kilka rodzin modeli symulacyjnych tranzystora MOS, należy się domyślać, że w dalszym ciągu użyty został model EKV.

[...] Należy przypomnieć, że tworząc symulacje dostosowane do submikronowych procesów technologicznych CMOS nadal opiera się na niedoskonałych modelach BSIM w wersji 4.3.0. Model EKV nie jest zaimplementowany w środowisku CADENCE, czyli narzędziach które służą przeprowadzaniu symulacji submikronowych procesów technologicznych CMOS ale jest pozyteczny w kontekście zrozumienia zjawisk fizycznych w tranzystorach MOS.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] Protokół badania nie jest dokładnie opisany, ale zakłada badanie odpowiedzi wywołanej na mechaniczne drażnienie wibrys u szczura, z jednoczesną rejestracją aktywności LFP w obszarze od kory mózgowej (Cx) do wnętrza mózgu (Th).

Eksperyment biologiczny, który jest opisany w pracy opiera się na standardowej procedurze badania odpowiedzi neuronalnej w korze mózgowej na mechaniczne drażnienie wibrys u szczura oraz aktywności spontanicznej w wzgórzu. Protokół badania opisany jest w formie minimalistycznej koniecznej do zrozumienia otrzymanych odpowiedzi. Chciałam podkreślić, że aspekt biologiczny, w tym przygotowanie zwierzęcia stał po stronie osoby wykonującej tego typu eksperymentu i mającej doświadczenie w tej kwestii.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] Kod źródłowy skryptów wypracowanych w ramach pracy nie jest częścią rozprawy ani nie jest dostępny w publicznym repozytorium, choć publikacja kodu pomogłaby w ocenie kompetencji Autorki.

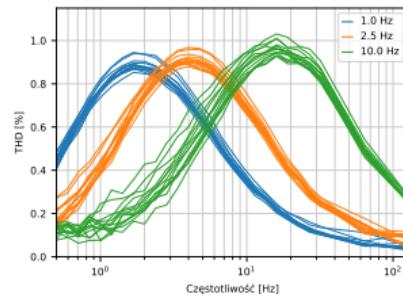
W pierwszym kroku chciałabym zapytać o jaki kod źródłowy chodzi ponieważ w pracy stworzono różne narzędzia prowadzące do otrzymania zweryfikowanego układu scalonego. Kody źródłowe projektu układu scalonego oraz obwodu drukowanego są niemożliwe do odczytania poza środowiskiem w którym były realizowane. Na potrzeby pracy były one archiwizowane w repozytorium o prywatnym dostępie co jest typowe dla tego typu prac. W przypadku skryptów mających na celu analizę otrzymanych wyników symulacyjnych i pomiarowych również nie zostały upublicznione, ale nie one były główną kwintesencją projektu. Kod źródłowy systemu akwizycji danych oparty o LabView oraz Python również nie jest dostępny w publicznym repozytorium ponieważ konsekwentnie nie upubliczniłam w otwartych repozytoriach stworzonego systemu.

[...] w analizie stanu sztuki Autorka pomija dorobek jej macierzystego zespołu, chociaż go cytuję [...]. W związku z tym recenzent skazany jest na domysły. Należy przyjąć, że istotną nowością omawianej pracy jest użycie pseudorezistorów, ponieważ ta technika nie pojawia się w tytułach wymienionych [...] powyżej pozycji dorobku.

Jest to kompletnie nowy projekt, i nie ma bezpośredniego odniesienia do poprzednich prac zespołu dlatego nie były one szczegółowo omówione. W poprzednich pracach zespołu zagadnienie pseudo-rezistorów nie było adresowane w żaden sposób. Dodatkowo opracowany wzmacniacz wykonany jest w innej technologii niż dotychczasowe projekty. Został od początku do końca opracowany i zoptymalizowany w ramach przedstawianej pracy. Wymagało to oczywiście stworzenia indywidualnych narzędzi symulacyjnych, projektowych oraz weryfikacyjnych.

[...] Metodykę procesu badawczego należy podzielić na dwa etapy [...]. Pierwszy z tych etapów nie budzi zasadniczych wątpliwości. Jedyny zidentyfikowany brak dotyczy wspomnianych na str. 68 wolnozmiennych oscylacji, które nie zostały uwzględnione w scenariuszach testowych, a jak wspomniano wcześniej w tekście, mają istotne znaczenie dla działalności wzmacniacza.

Ze względu na złożoność czasową procedury pomiarowej (kilkaset okresów dla danej częstotliwości sygnału wejściowego) nie było możliwe przeprowadzenie dogłębnej analizy wolnozmiennych sygnałów przy ustawieniu bardzo niskiej częstotliwości granicznej dlatego oparto się w rozważaniach na pomiarach THD w funkcji częstotliwości sygnału wejściowego z ustawieniami częstotliwość granicznej powyżej 1 Hz.

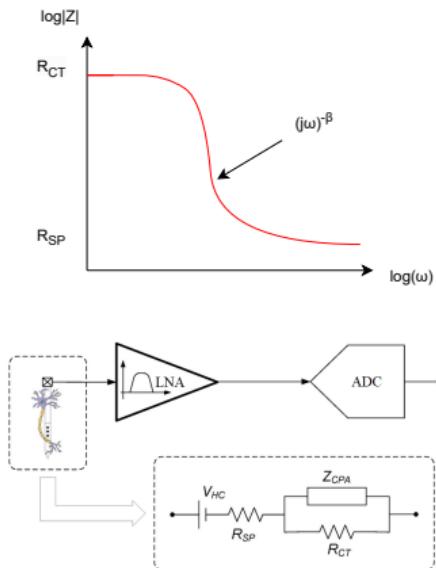


[...] Pewne wątpliwości budzi natomiast metodyka procesu weryfikacji w eksperymencie neurofizjologicznym. W przypadku pomiarów o charakterze unikatowym nie ma możliwości porównania wyniku z urządzeniami referencyjnymi. Wydaje się jednak, że ten przypadek tu nie zachodzi. Bardziej właściwe wydaje się porównanie omawianego urządzenia pomiarowego z urządzeniem referencyjnym w sposób, który wykaże prawidłowość realizowanych za jego pomocą pomiarów. Istnieją również wspierające ten proces metody statystyczne, takie jak metoda Blanda-Altmana.

[...] W przypadku niniejszej pracy zastosowano jakościową metodę weryfikacji, którą jest zgodność otrzymanych z użyciem urządzenia wyników z oczekiwaniami eksperymentatora. Oczekiwania te zbudowane są na podstawie dostępnej wiedzy, a ta zawiera oczywiście wyniki pomiarów, które można uznać za referencyjne. Jednak nie ulega wątpliwości, że tego typu analiza jest dużo słabsza z perspektywy matematycznej niż analiza porównawcza dwóch urządzeń korzystających z tego samego źródła sygnału.

Eksperiment przeprowadzony w IBD był standardową procedurą opartą na doświadczeniu osoby go wykonującej, wykorzystującej różne systemy pomiarowe dlatego w momencie opisu pracy uznano za wystarczające tego typu porównanie. Dziękuję jednak za podanie propozycji w jaki sposób można byłoby udoskonalić ten aspekt co może się przydać podczas potencjalnej publikacji wyników układu scalonego.

[...] wykres przedstawiony na rys. 2.4 przedstawia filtr górnoprzepustowy a nie dolnoprzepustowy (wysoka impedancja występuje w paśmie niskich częstotliwości, a impedancja w paśmie wysokich częstotliwości jest niska).



Wykres przedstawia charakter impedancji w zależności od częstotliwości a nie filtr. [...] Zależność impedancji elektrody  $Z$  od częstotliwości sygnału. Przy niskich częstotliwościach element pojemnościowy  $Z_{CPA}(j\omega)$  zachowuje się jak przerwa w obwodzie. Natomiast dla wysokich częstotliwości, element ten stanowi zwarcie w obwodzie i impedancja elektrody zmierza do  $R_{SP}$ . Dla częstotliwości pośrednich obserwuje się nachylenie charakterystyki zależne od parametru  $\beta$ .

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] Warto również odnotować niekonsekwentny charakter opisu procesów fizykochemicznych zachodzących po stronie tkanki, które czasem opisywane są jako procesy jonowe, czasem jako procesy elektrochemiczne, a czasem odnoszone są do pojęcia warstwy podwójnej i efektów pojemnościowych. Co do zasady użyte modele matematyczne nie budzą wątpliwości, choć model matematyczny tkanki jest zdawkowy [...]

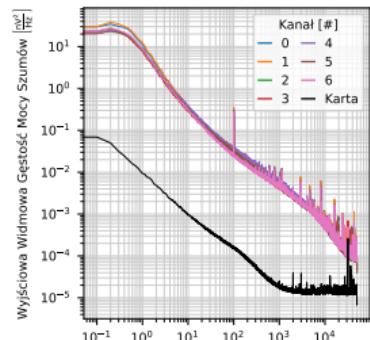
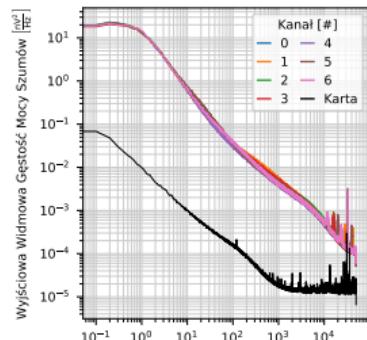
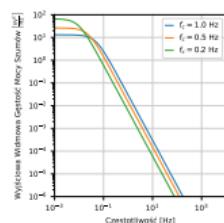
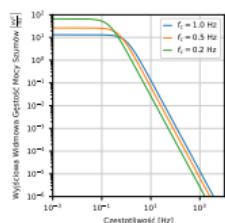
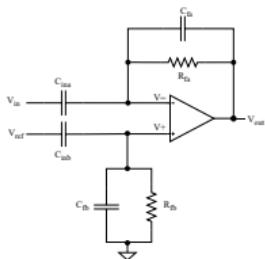
W pracy opierano się na powszechnie używanym prostym modelu tkanka elektroda. Uznano, że na potrzeby pracy takie podejście za wystarczające.

[...] Autorka opisuje proces inżynierski z perspektywy *ex post*. W związku z tym zdarza się, że relacjonując wykonane badanie czy analizę nie umieszcza na końcu rozdziału wniosków z tego badania. Pojawiają się one niejako mimo chodem jako uzasadnienie decyzji projektowej, której podjęcie jest ralaconowane w rozdziale następnym. Taka sytuacja występuje na granicy rozdziałów 3.2.1 i 3.2.2, kiedy zostaje w zasadzie podjęta decyzja o eliminacji z dalszych rozważań konfiguracji variable- $V_{gs}$ , do czego przesłanki dostarcza rozdział 3.2.1. Co do rozdziału 3.2.1 to skądinąd nie jest od początku jasne w jakim celu są prowadzone opisywane w nim rozważania. Staje się to jasne w rozdziale 3.2.2, kiedy okazuje się, że celem tego rozdziału było rozważenie przesłanek za wyborem jednej z dwóch konfiguracji.

[...] Zdarza się również, że Autorka uznała, że wniosek w sposób oczywisty wynika z przedstawionych wykresów, co nie jest oczywiste w interdyscyplinarnym środowisku odbiorców. Taka sytuacja występuje na granicy rozdziałów 3.3 oraz 3.4. Wniosek z rysunku 3.12, który kończy analizę z rozdziału 3.3 jest podsumowany w pierwszym akapicie rozdziału 3.4. Takich sytuacji jest więcej, ale nie spotkałem się z oczywistą luką i brakiem informacji, a co najwyżej z jej nieodpowiednią lokalizacją.

W tym momencie nie jestem już w stanie niestety poprawić tekstu, ale rozumiem uwagi, że całość mogła przysporzyć trudność podczas czytania. W pracy opisywane są wyniki, które doprowadziły do uzyskania zamierzonego celu chociaż po drodze były różne koncepcje na temat tego jak rozwiązać problem. Zapewne to mogło również wpływać na to, że opisując w ten sposób proces niektóre fragmenty są mniej zrozumiałe i lokalizacja wytłumaczenia może budzić pewne wątpliwości.

[...] Kilkukrotnie Autorka traktuje uzyskane wyniki jako oczywiste i nie tłumaczy która z cech wykresu dowodzi wyciąganego wniosku. W kilku przypadkach cechą tą jest różnica nachyleń między dwoma połówkami wykresy – sytuacja ta dotyczy rys 3.11 oraz 5.18.



[...] Z całkowitych drobiazgów należy zwrócić uwagę na tabelę 3.1, w której zmieniona  $R_f$  powinna stanowić kolejną kolumnę tabeli.

Parametry charakterystyczne	Pojemności sprzężenia AC [F]	Wzmocnienie [V/V]	Częstotliwość graniczna obwodu AC [Hz]	Rezystancja $R_f$ [ $\text{T}\Omega$ ]	Ekwivalentne szumy wejściowe [ $\mu\text{V}_{\text{rms}}$ ]
Zmienna częstotliwość graniczna (zmiana – $R_f$ )	4 p, 200 f	20	1,0	0.79	7,2
	4 p, 200 f	20	0,5	1.59	5,5
	4 p, 200 f	20	0,2	3.98	3,6
Zmienne wzmocnienie (zmiana – $C_f$ )	4 p, 200 f	20	1,0	0.79	7,2
	4 p, 80 f	50	1,0	1.98	4,6
	4 p, 40 f	100	1,0	3.98	3,2
Zmienna powierzchni obwodu (zmiana – $C_{in}$ , $C_f$ )	4 p, 200 f	20	1,0	0.79	7,2
	8 p, 400 f	20	1,0	0.39	5,1
	12 p, 600 f	20	1,0	0.26	4,2

[...] Co do mankamentów merytorycznych, występujących w dysertacji, jest ich kilka. Pierwszy z nich [...] dotyczy faktu, że model źródła, tkanki i sprzężenia jest niejednoznaczny i nie do końca odpowiada rzeczywistości pomiarowej. Niezależnie od widma samego źródła, skumulowane efekty pojemności i lokalnego przewodzenia w tkance, nakładają na źródł swoją charakterystykę, która faworyzuje niskie częstotliwości [8]. Efekty jonowe są składową tego zjawiska [9] ale nie mają dominującego charakteru [10].

[...] Potencjał stały jest przede wszystki efektem brzegowym, związanym z tworzeniem warstwy podwójnej, które z kolei wynika z różnicy potencjałów chemicznych między kontaktującymi się fazami [10]. Oczywiście rozdzielenie ładunku objętościowego również zachodzi [9], ale jest to efekt fizyczny a nie fizykochemiczny. Przemiany elektrochemiczne mogą zachodzić dopiero gdy przekroczena jest określona energia aktywacji [10]. W odniesieniu do elektrod stymulujących piszą o tym Merrill i wsp. – pozycja [113] literatury – te rozważania można rozszerzyć na elektrody pomiarowe [8-10].

[...] Fluktuacje termincze dotyczą nie tylko rezystancji ale również pojemności – taki proces jak tworzenie warstwy podwójnej również jest poddany fluktuacjom. W związku z tym nie ma potrzeby odwoływanie się do rezystancyjnej natury tkanki, po to, żeby uzasadnić użycie twierdzenia Nyquista. Należy to raczej uznać za brak modelu. Również rezystywny charakter tkanki nerwowej można poddać w wątpliwość – cytowany przez Autorkę Destexhe ma w swoim dorobku pracę [7] poświęconą temu zagadnieniu.



[...] Czynnikiem, który w sposób zasadniczy wpływa na model błędu i model sprzężenia tkanki z elektrodą jest lokalizacja elektrody referencyjnej. Nie ulega wątpliwości, że sonda MEA jest czymś zupełnie innym niż elektroda referencyjna, więc pomiar jest asymetryczny. Nie zmienia to jednak faktu, że nadal jest to pomiar bipolarny. Niektóre konstrukcje, takie jak opisywany przez Autorkę Neuropixel, są bipolarne i symetryczne (por rys. 2.8, także rys. 2.13) inne nie są (rys. 2.12, 3.7!). Zdecydowanie brakuje odniesienia do tej fundamentalnej różnicy. Im dalej umieszczona jest elektroda referencyjna tym większy wpływ na sygnał ma interferencja 50 Hz, oraz wszystkie źródła endogenne, w szczególności silny sygnał kardiogenny. Przy odległej lokalizacji elektrody odniesienia trudno jest interpretować otrzymane przebiegi jako neurogenne.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] Odwrócenie amplitudy obserwowane na elektrodzie 0 wygląda w pierwszym przybliżeniu na wynik zmiany fazy wynikający ze sprzężenia pojemnościowego – trudno byłoby zinterpretować odwrócenie amplitudy wprost jako odwrócenie kierunku prądu – jest to jeden z najciekawszych wyników dotyczących samych narzędzi, sugerujący konieczność dalszego rozwoju techniki modelowania.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] Odnośnie podnoszonego przez Autorkę faktu zniknięcia podwójnego maksimum widma THD, warto zauważyć, że rozwiązywanie takie występowało już jako jeden z wariantów widma w analizie Monte-Carlo (rys 4.9) oraz wykazywało silną zależność od pojemności  $C_{gb}$  (rys 3.10), co mogło być przyczyną obserwowanych różnic między widmem zmierzonym a wynikami symulacji.

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

mgr inż. Beata TRZPIL-JURGIELEWICZ

promotorzy:

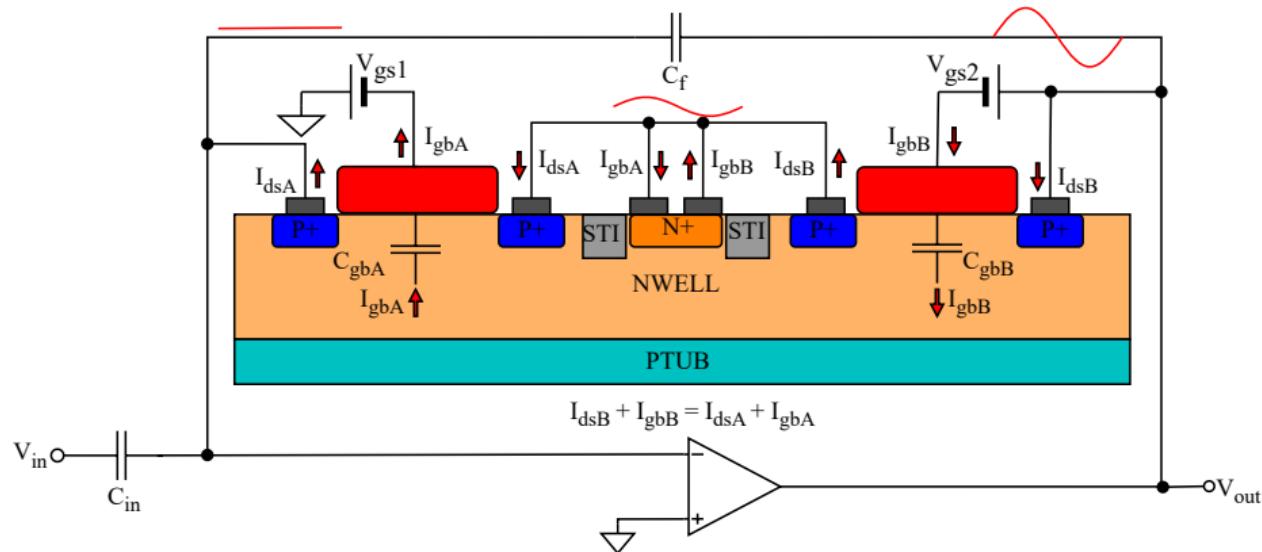
prof. dr hab. inż. Władysław DĄBROWSKI

dr inż. Paweł HOTTOWY

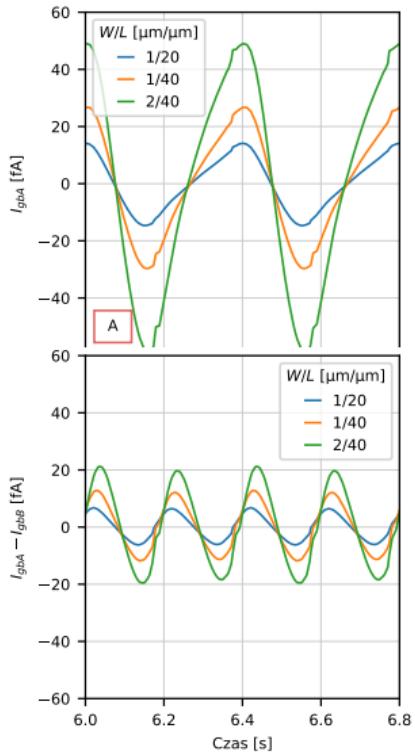
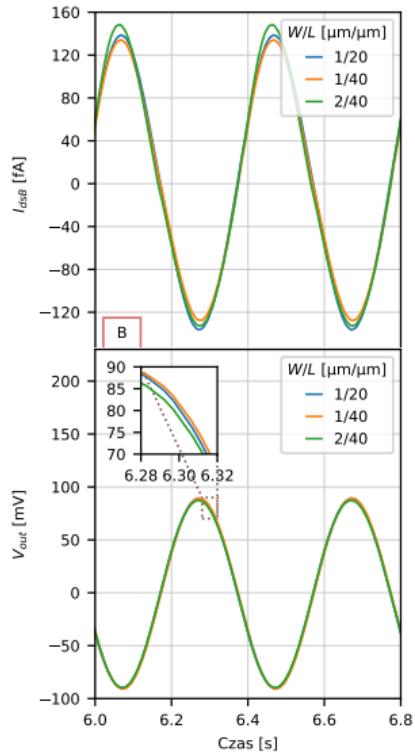
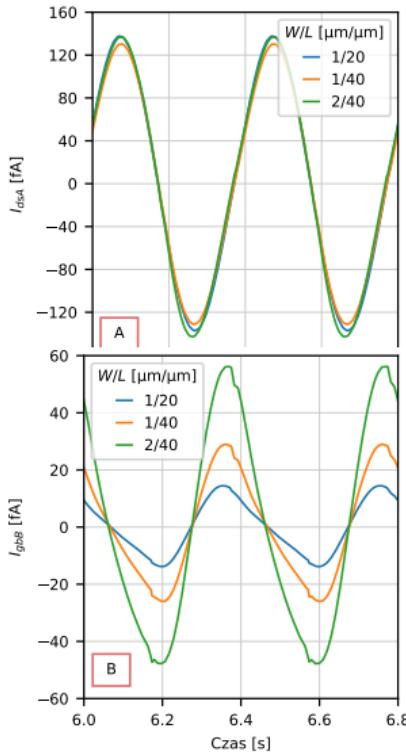
# Część VI

## Dodatki

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

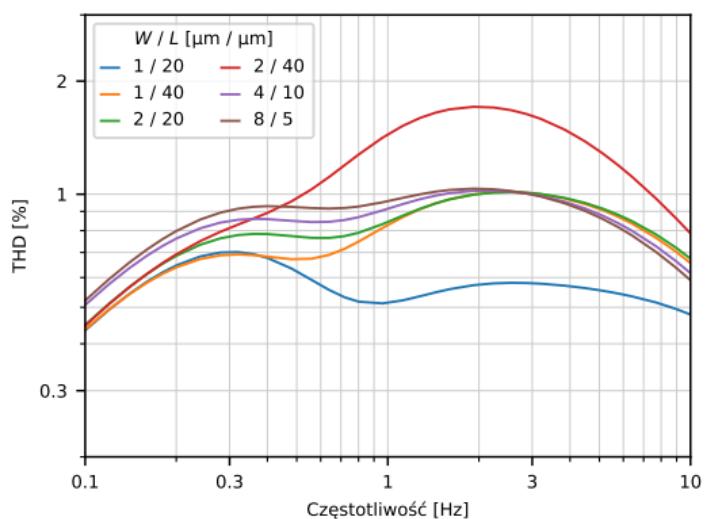


# Wpływ pojemnościowych prądów bramki pseudo-rezystorów na zniekształcenia w technologii 180 nm

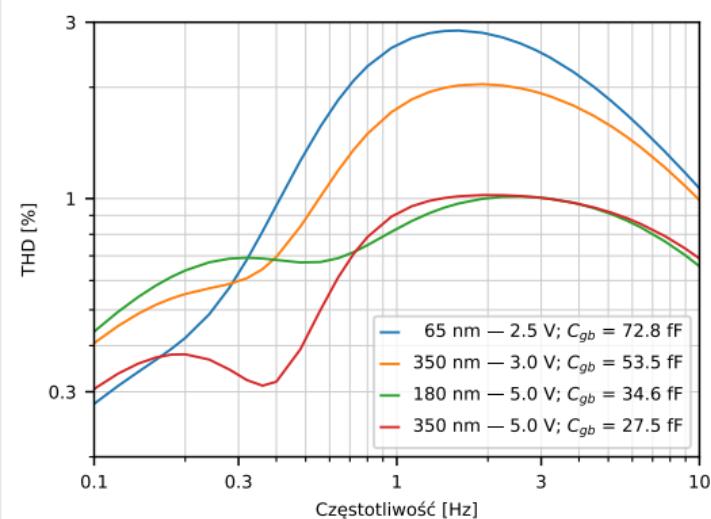


# Skalowanie zniekształceń z powierzchnią bramki i grubością tlenku tranzystorów tworzących pseudo-rezistory

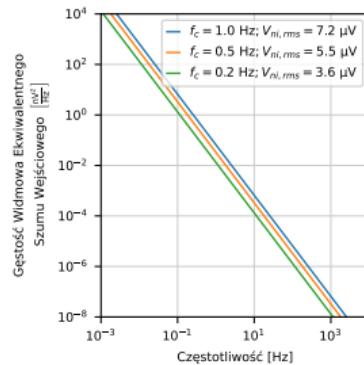
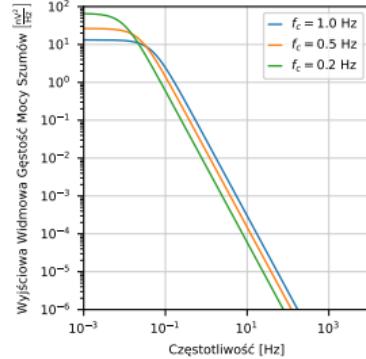
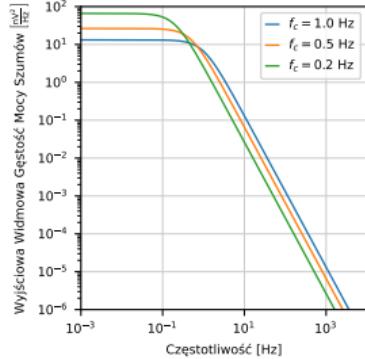
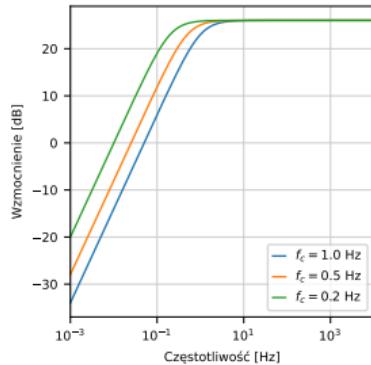
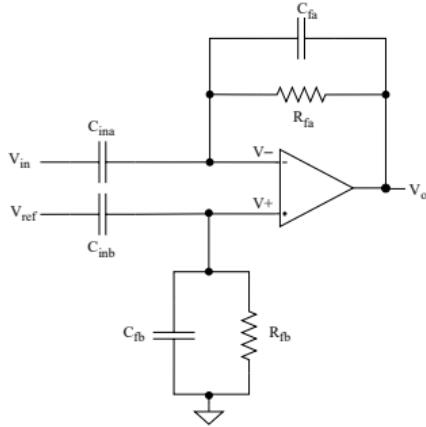
Powierzchnia bramki – technologia 180 nm



Zależność od technologii

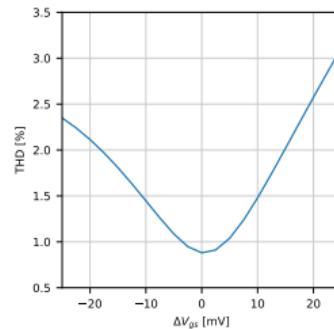
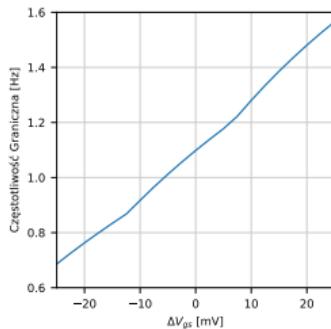
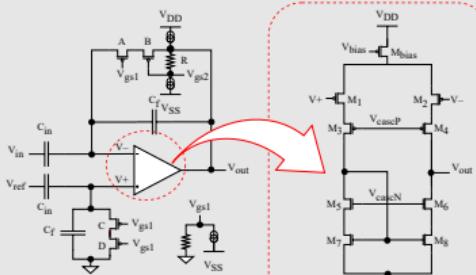


# Szumy

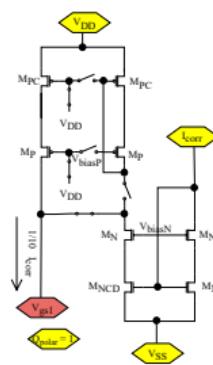
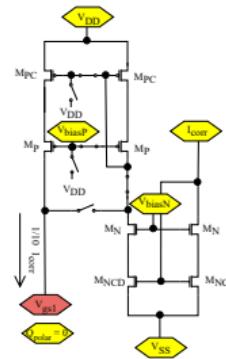
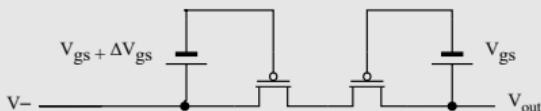


# Blok korekcji

## Projekt kanału

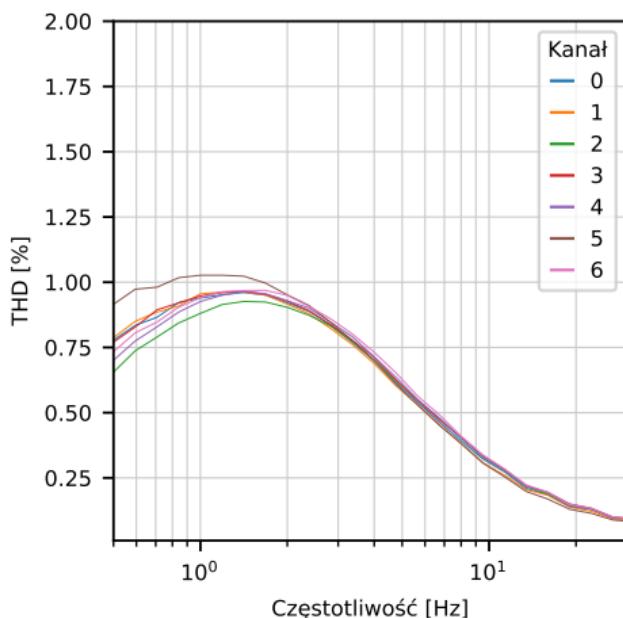


## Wyzwania do rozwiązania

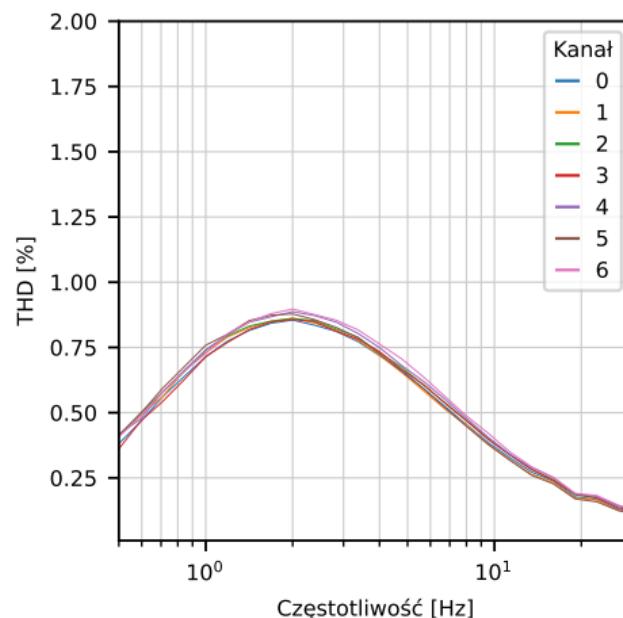


# Pomiary zniekształceń harmonicznych – wpływ korekty

Brak globalnej korekty



Korekta globalna



# Jednorodność kanałów

