



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

promotor:

prof. dr hab. inż. Władysław DĄBROWSKI

promotor pomocniczy:

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
- 6 Podsumowanie

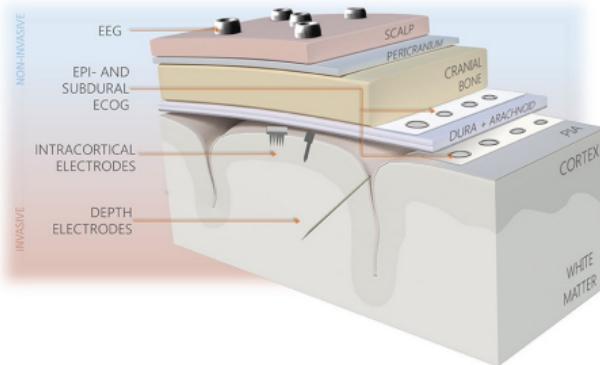
# Cele pracy

Celem projektu przedstawionego w niniejszej pracy było opracowanie i weryfikacja koncepcji przedwzmacniacza dedykowanego do wielokanałowej sondy neuronalnej umożliwiającej rejestrację aktywności neuronalnej mózgu.

## Główne zadania

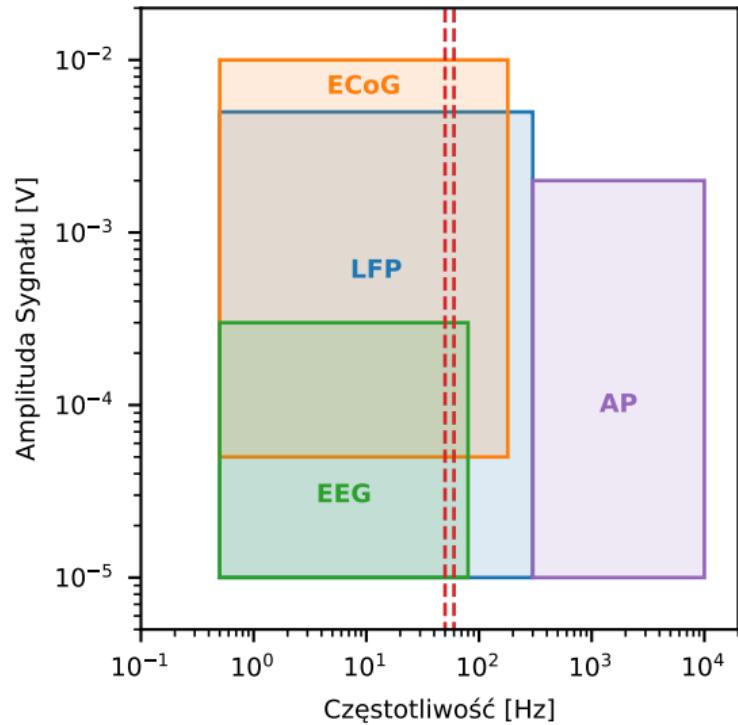
- Kompleksowa analiza zniekształceń nieliniowych we wzmacniaczach neuronalnych
- Optymalizacja kluczowych parametrów przedwzmacniaczy neuronalnych
- Projekt układu scalonego, obwodu drukowanego oraz systemu akwizycji danych
- Wykonanie testów elektronicznych oraz analiza parametrów i charakterystyk opracowanego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

# Zakresy amplitud i częstotliwości sygnałów neuronowych w różnych technikach rejestracji



## Metody rejestracji

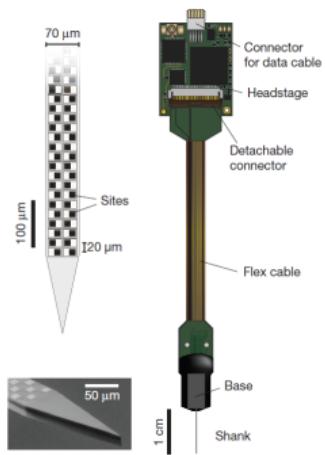
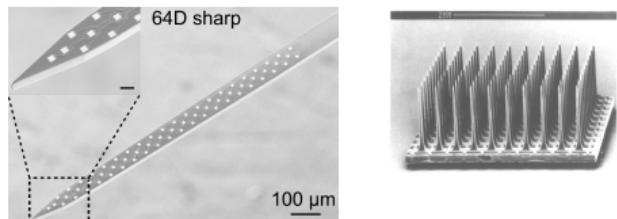
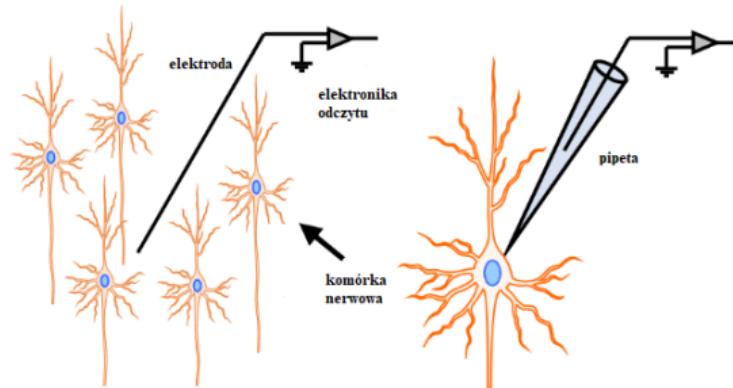
- LFP – Local Field Potential
- AP – Action Potential
- ECoG – Electrocorticography
- EEG – Electroencephalography



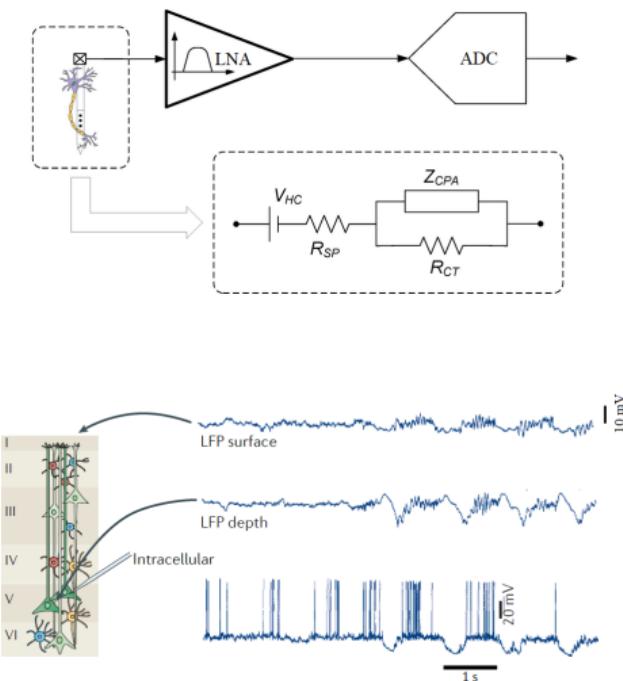
# Kierunki rozwoju współczesnych systemów pomiarowych i matryc mikroelektrodowych

## Techniki pomiarowe wewnętrz i zewnątrzkomórkowe w neurobiologii

- różne amplitudy sygnałów
- inwazyjność badań
- obszar badań



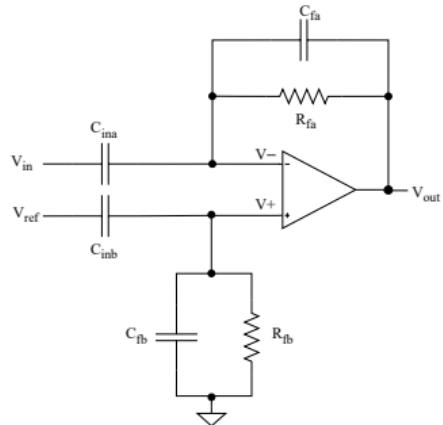
# Kanał rejestracji neuronowej z wykorzystaniem mikroelektrod zewnętrzkomórkowych



Wymagania stawiane interfejsom neuroelektronicznym umożliwiającym rejestrację sygnałów LFP i AP

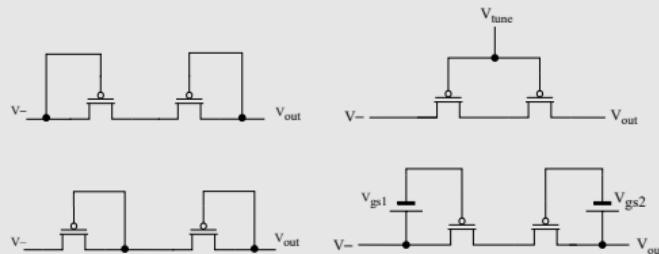
- Stałe napięcie na elektrodzie – do 1 V
- Szумy  $< 10 \mu\text{V}$  dla pasma LFP i AP
- Liniowość rejestrowanego sygnału
- Pobór mocy – limit ogrzewania tkanki mózgowej – mniej niż  $1^\circ\text{C}$
- Zróżnicowane sygnały: amplituda do  $10 \text{ mV}_{\text{pp}}$  dla LFP i od  $50 \mu\text{V}$  dla AP
- Skalowalność – tysiące kanałów dla przyszłych systemów

# Sprzężenie zmiennoprądowe



- Odcięcie napięcia stałego na elektrodzie
- Konieczność implementacji filtru górnoprzepustowego z dolną częstotliwością graniczną rzędu  $\sim 1 \text{ Hz}$
- Ograniczenia na pojemności kondensatorów w technologii CMOS  $\sim \text{pF}$
- Wymagane rezystancje  $\sim T\Omega$

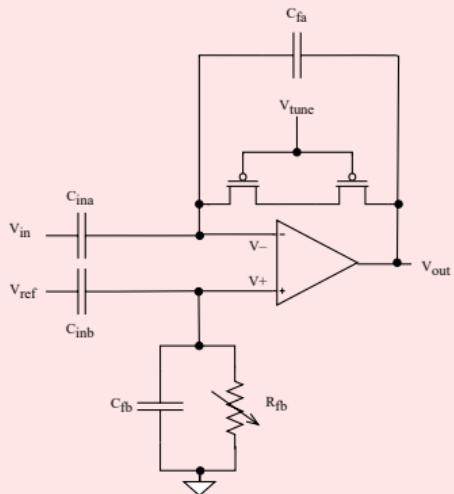
## Pseudo-rezystory – podstawowe rozwiązania



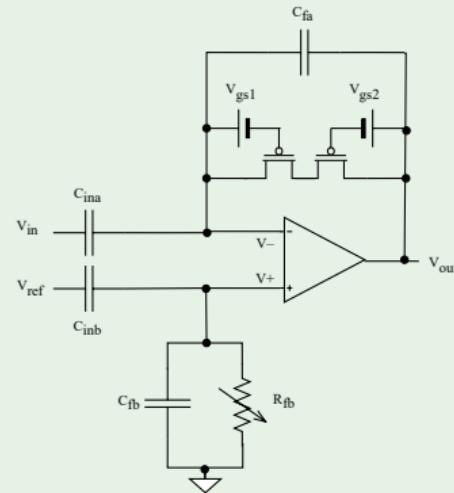
Zastosowanie tranzystorów jako elementów rezystancji, zwanych pseudo-rezystorami, jest powszechną praktyką w projektowaniu obwodów analogowych dla przypadków, w których bierne rezistory nie są odpowiednie ze względu na wartości wymaganych rezystancji lub powierzchnie takich elementów.

# Architektura wzmacniacza neuronowego wykorzystującego sprzętowanie zmiennoprądowe z różnymi implementacjami pseudo-rezystorów

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



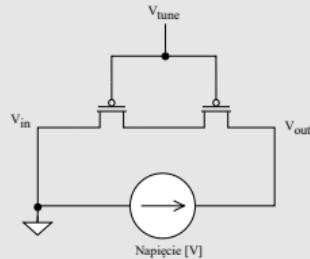
Stałe napięcie pomiędzy bramką, a źródłem niezależnie od sygnału wejściowego: *fixed* –  $V_{gs}$



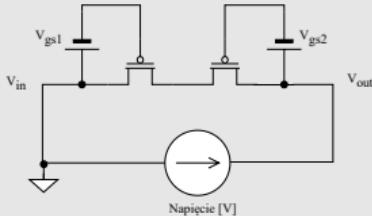
# Analiza liniowości pseudo-rezystorów

## Modele symulacyjne

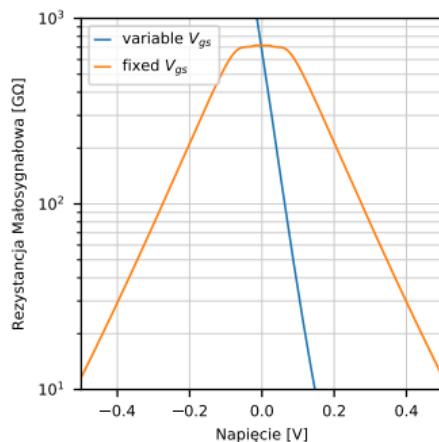
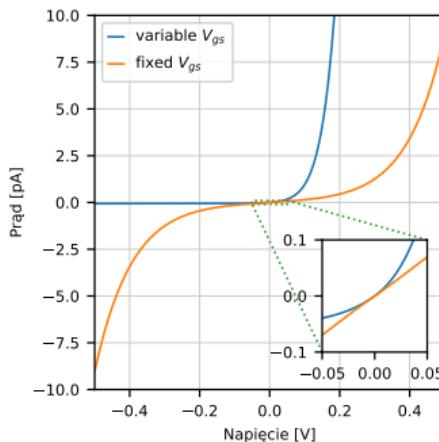
- variable –  $V_{gs}$



- fixed –  $V_{gs}$



- Badanie odpowiedzi stałoprądowej
- Napięcia polaryzujące bramki tranzystorów dostosowane do ustaleń częstotliwości granicznej dla układów ze sprzężeniem AC  $\sim 1$  Hz



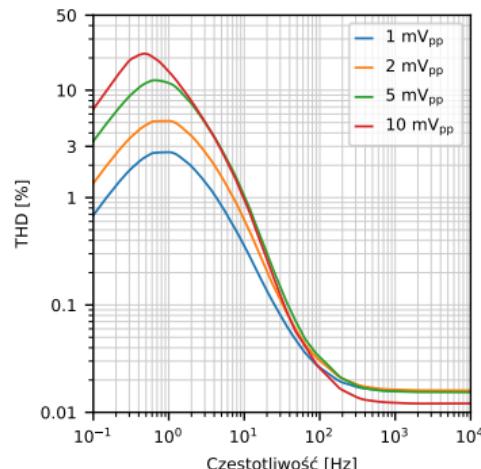
# Analiza zniekształceń pseudo-rezystorów

## Ustawienia symulacji

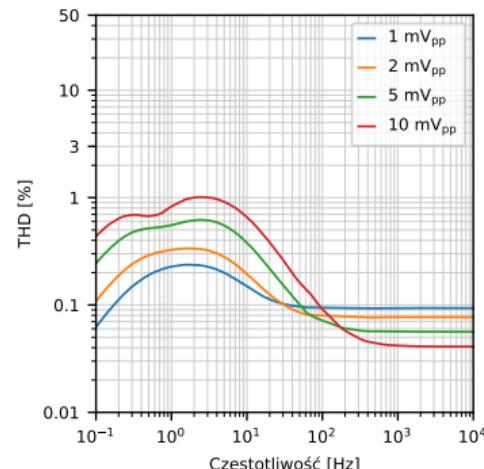
- Badanie odpowiedzi układu w dziedzinie czasu na wymuszenia sinusoidalne
- Częstotliwość graniczna dla układów ze sprzężeniem AC  $\sim 1$  Hz
- Analiza: Transformata Fouriera – wyznaczenie współczynnika THD – miara liniowości rejestrowanego sygnału

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

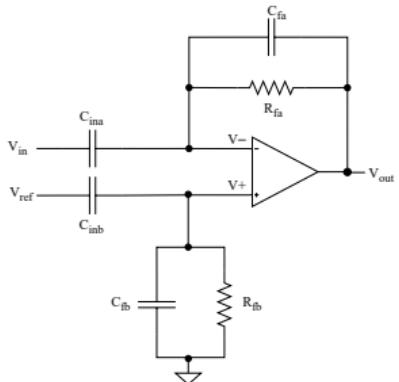
variable –  $V_{gs}$



fixed –  $V_{gs}$

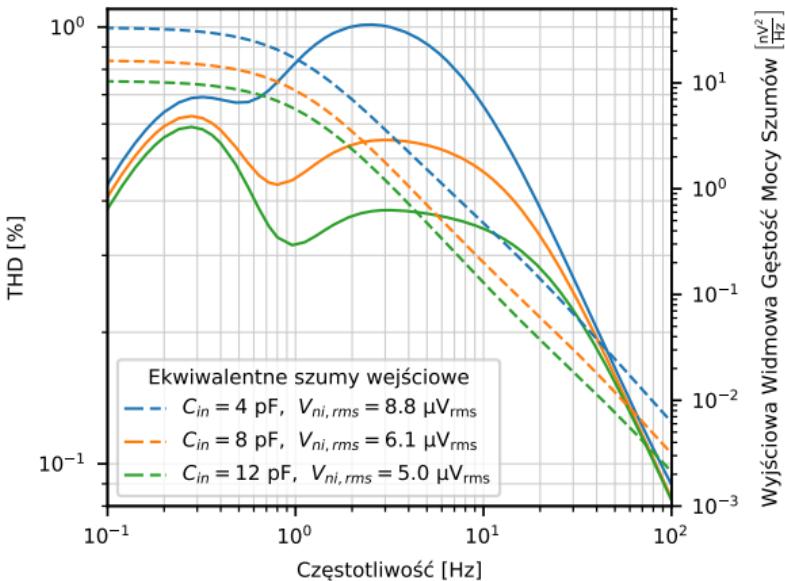


# Wpływ pojemności wejściowych na szумy i zniekształcenia



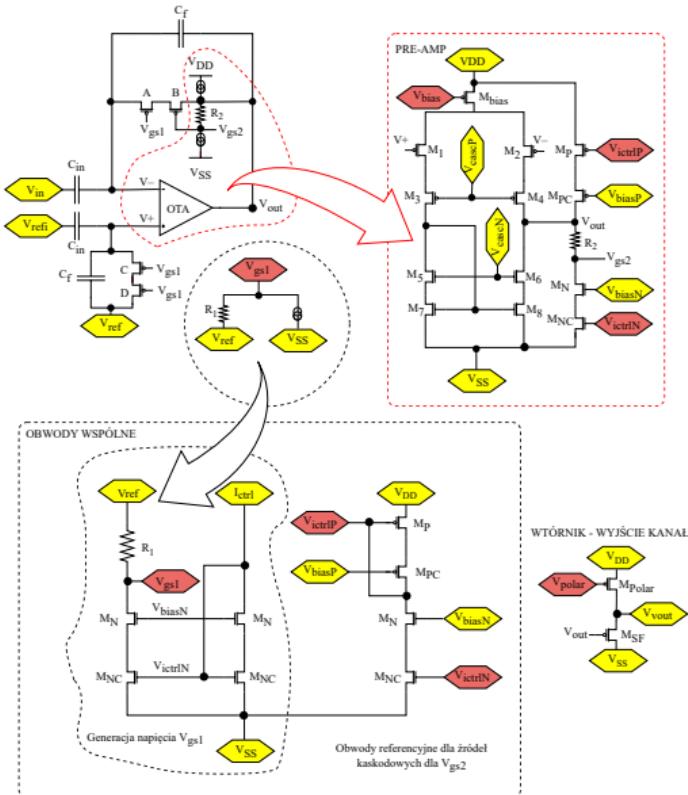
## Parametry

- 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
- Ekwivalentne szumy wejściowe mierzone w paśmie 1 Hz – 10 kHz



Powierzchnia pojemności  $4 \text{ pF} \approx 2000 \mu\text{m}^2$   
Powierzchnia pojedynczego przedwzmacniacza (szacunek)  $\approx 7000 \mu\text{m}^2$

# Przedwzmacniacz z wejściowym obwodem sprzęgającym AC

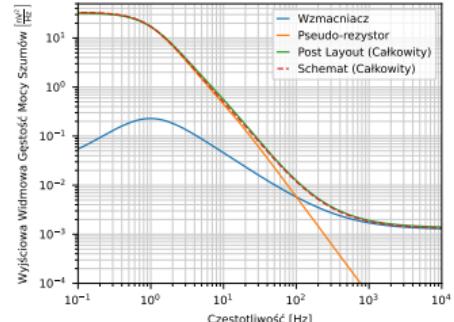
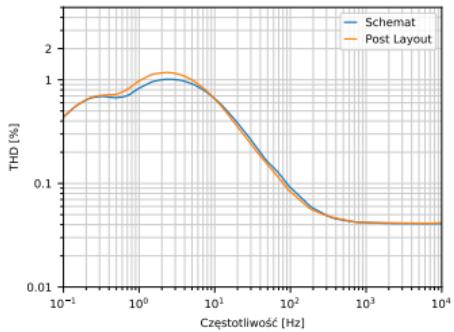
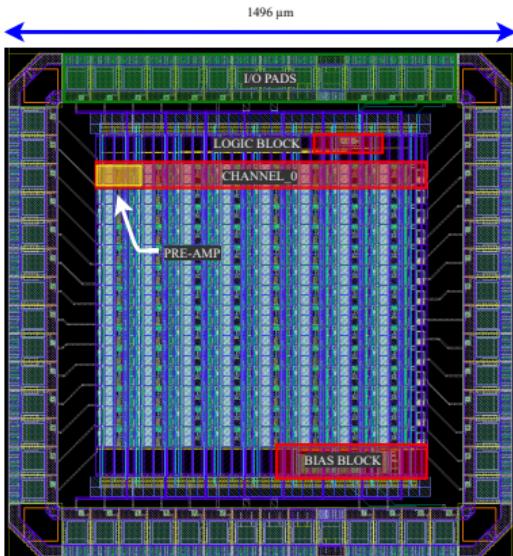


- Konfiguracja teleskopowej kaskody
- Polaryzacja pary różnicowej w obszarze podprogowym pracy tranzystora
- Skalowanie wymiarów tranzystorów z uwzględnieniem optymalizacji szumów (szumów  $1/f$ ) oraz wejściowych napięć niezrównoważenia wzmacniacza
- Napięcie zasilania  $\pm 1,8 \text{ V}$

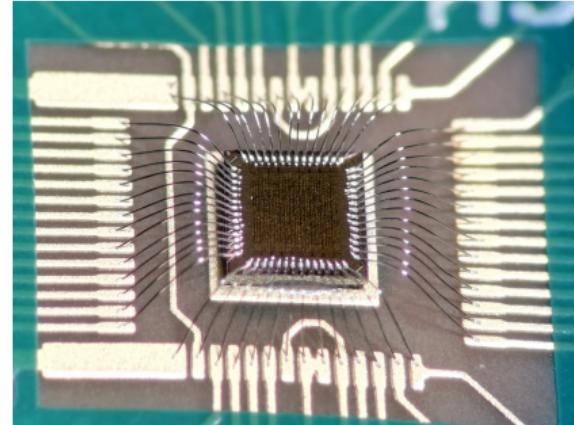
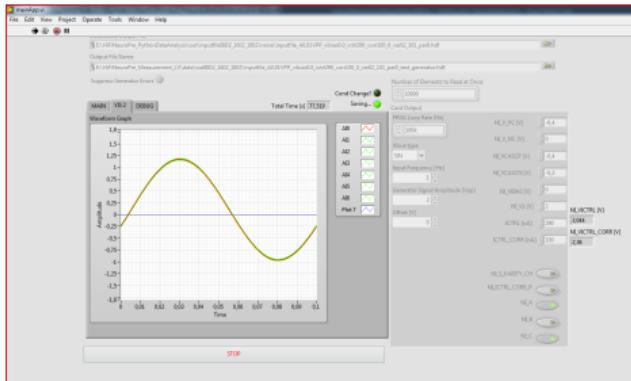
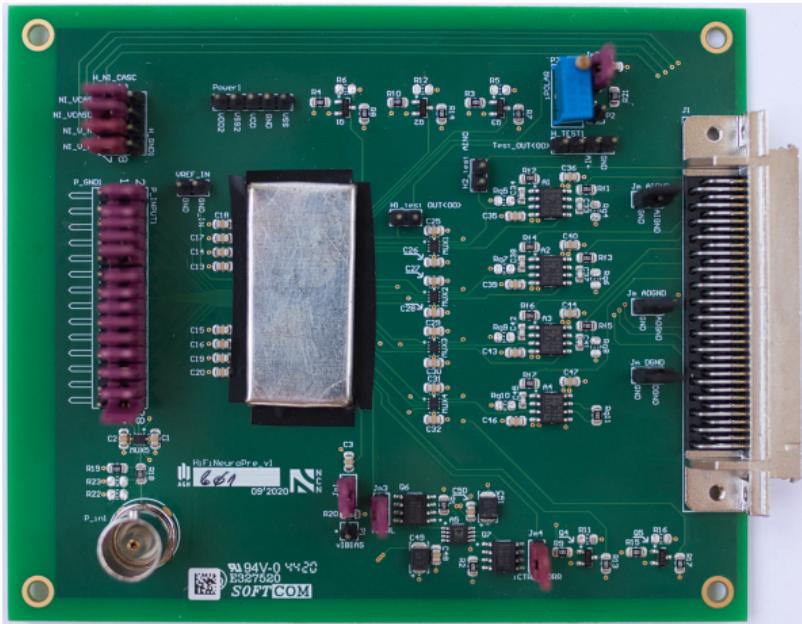
Kluczowe tranzystory	$W [\mu\text{m}]$	$L [\mu\text{m}]$
$M_{bias}$	10	10
$M_1, M_2$	300	1
$M_3, M_4$	20	2
$M_5, M_6$	5	5
$M_7, M_8$	4	48

# Kompozycja układu testowego

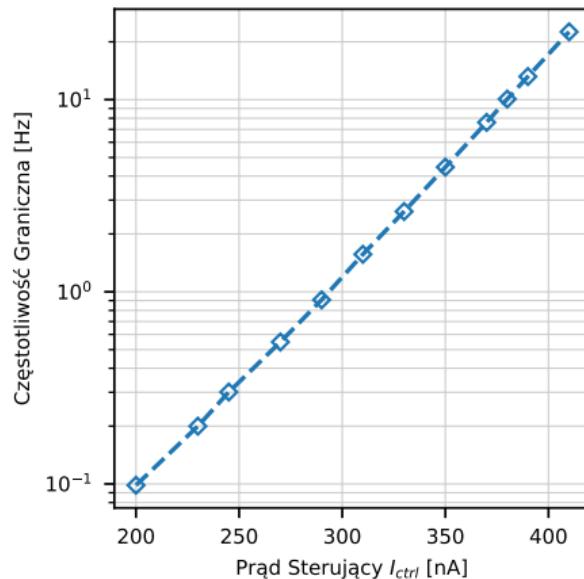
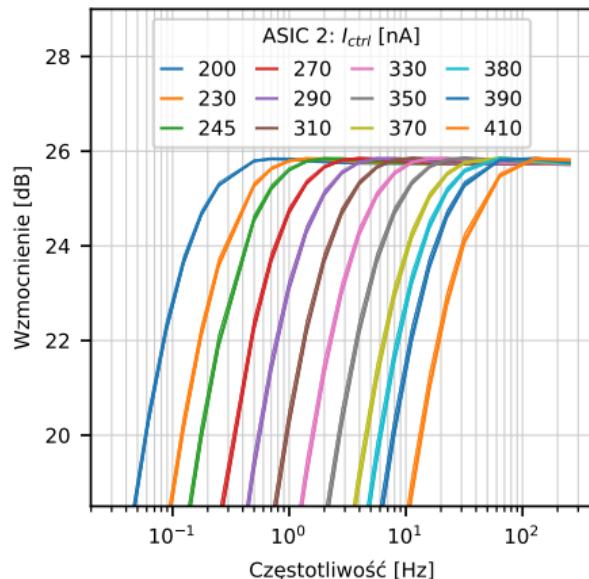
- 8 wersji przedwzmacniacza i 14 kanałów
- 4 wersje tranzystorów tworzących pseudo-rezystory –  $W/L$ :  
 $2/40, 1/40, 2/20, 1/20 \mu\text{m}/\mu\text{m}$
- 2 konfiguracje pojemności –  $C_{in}/C_f = 4/200, 8/400 \text{ pF/fF}$



## Zaprojektowane komponenty systemu testowego



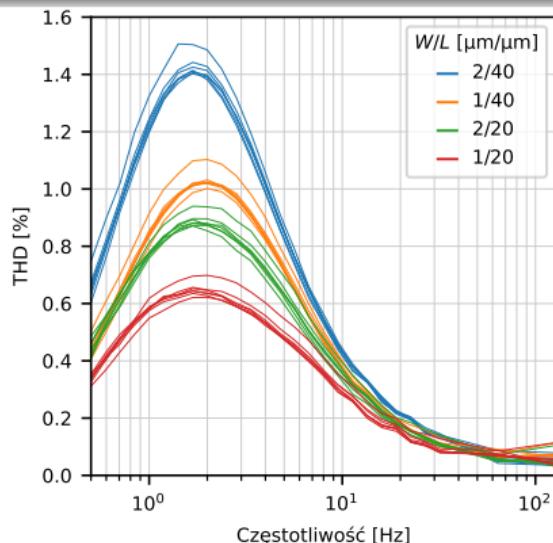
## Przykładowe wyniki – regulacja częstotliwości granicznej



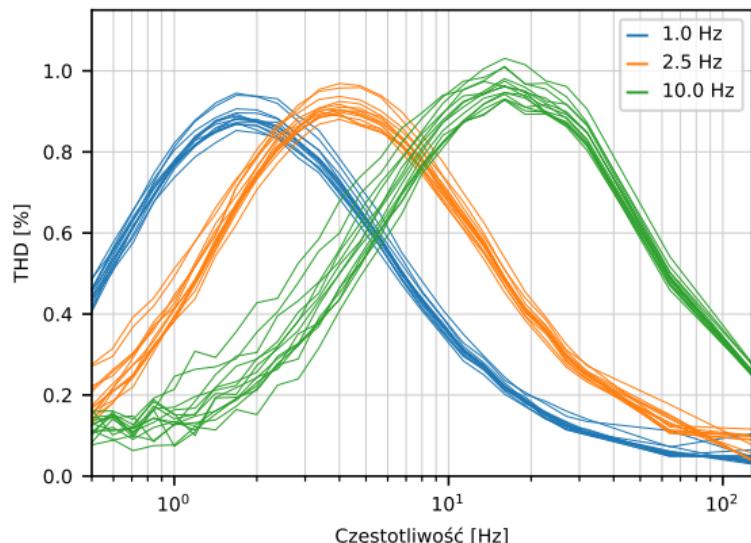
- Częstotliwość graniczna regułowana w zakresie od 0,1 Hz do 20 Hz
- Jednorodność kanałów

## Przykładowe wyniki – pomiary zniekształceń

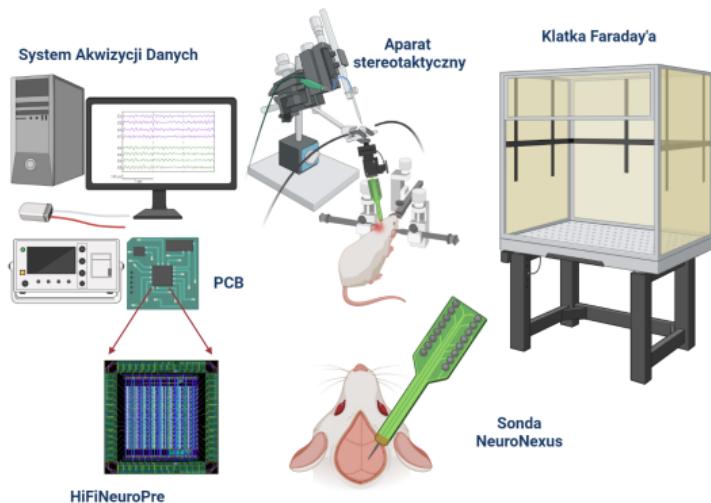
- Podobny protokół pomiarowy do symulacji – amplituda sygnału sinusoidalnego:  $10 \text{ mV}_{\text{pp}}$
- Zmierzony poziom zniekształceń niższy niż w symulacjach



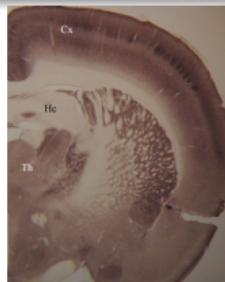
Różne częstotliwości granicznej dla wybranej konfiguracji przedwzmacniacza



# Eksperyment neurobiologiczny z wykorzystaniem systemu pomiarowego



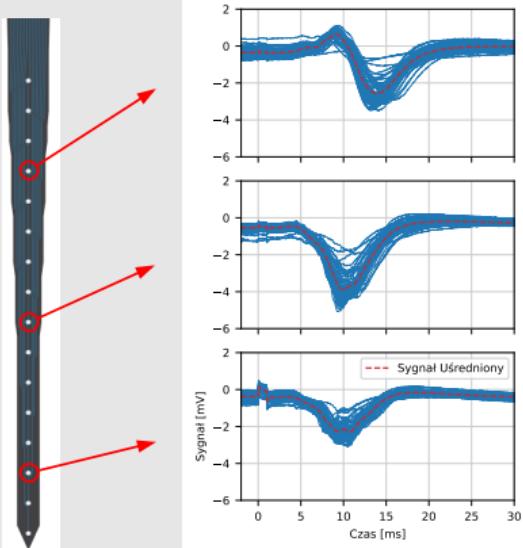
- Sonda komercyjna firmy Neuronexus – 16 elektrod na trzepieniu sondy
- Wymuszona aktywność: Sonda w obszarze kory mózgowej na głębokości 1,4 mm pod powierzchnią mózgu
- Spontaniczna aktywność: Sonda w obszarze wzgórza a głębokości 6 mm pod powierzchnią mózgu



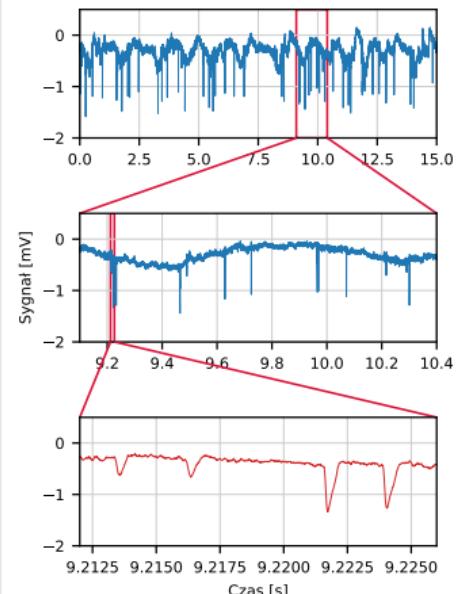
**Rysunek:** Schemat stanowiska pomiarowego do celów eksperymentu neurobiologicznego w Instytucie Biologii Doświadczalnej PAN

# 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



# Podsumowanie testów elektronicznych

Tabela 1: Parametry przedwzmacniacza na podstawie pomiarów weryfikacyjnych

Parametr	Wartość
Technologia	180 nm
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 harmoniczne THD – 10 mV <sub>pp</sub> 1,68 Hz	0,94 %
Powierzchnia pojedynczego przedwzmacniacza	$60 \mu\text{m} \times 118 \mu\text{m} = 7080 \mu\text{m}^2$

# Podsumowanie

- Przeprowadzono analizę nieliniowości wejściowego obwodu sprzęgającego, który jest odpowiedzialny za ustalenie dolnej częstotliwości granicznej;
- Wykazano, że 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;
- Testy elektroniczne pokazały, że możliwe jest uzyskanie zadowalających wszystkich parametrów wzmacniacza przy polu powierzchni ograniczonym do  $0,0071 \text{ mm}^2$ ;
- Przeprowadzone eksperymenty neurobiologiczne potwierdziły, że przy pomocy tego układu możemy prowadzić efektywną rejestrację zarówno sygnałów polowych, jak również potencjałów czynnościowych.

# Podziękowania

- prof. dr hab. inż. Władysław Dąbrowski
  - dr inż. Paweł Hottowy
  - dr hab. Ewa Kublik (IBD)
  - dr inż. Piotr Wiącek
  - dr inż. Tomasz Fiutowski
  - dr inż. Paweł Jurgielewicz
  - ...
- Interdyscyplinarne Środowiskowe Studia Doktoranckie Fizyczne, Chemiczne i Biofizyczne Podstawy Nowoczesnych Technologii i Inżynierii Materiałowej (FCB)
  - NCN SYMFONIA  
1:2013/08/W/NZ4/00691

# Część I

## 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.

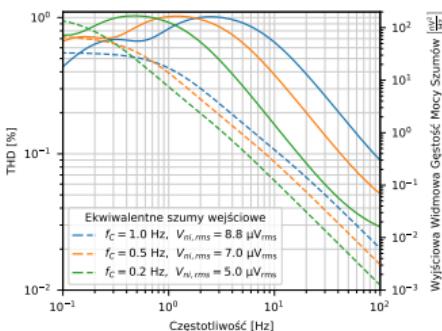
dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] 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. Rozumiem, że byłoby to przydatne podczas czytania.

[...] 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 rozkłady PSD na wyjściu dla różnych ustawień częstotliwości 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 szumy wejściowe w paśmie  $1 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz}$  dla poszczególnych rozwiązań.

Ekwiwalentne szumy wejściowe dla różnych parametrów przedwzmacniacza [ $\mu V_{rms}$ ]. Dla każdego prądu polaryzującego 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

[...] 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 w wybranej technologii. Nie celowano w konkretny zestaw parametrów, ponieważ powierzchnia, moc i szумy są parametrami, które się wymieniają i optymalizacja jednego parametru pogarsza pozostałe parametry. W trakcie opracowywania układu pamiętano jaki zakres parametrów jest wymagany, by nadawał się do rejestracji. Zbudowano kilka struktur testowych umożliwiających eksplorowanie ograniczeń technologicznych pod kątem budowy odczytu dla wielokanałowej sondy.

[...] 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.

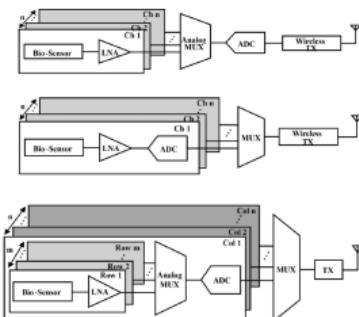
Rozumiem, że w kontekście rosnącej popularności rozwiązań opartych o wzmacniacz o małym lub jednostkowym wzmacnieniu i przetwornik analogowo-cyfrowy ubogi fragment w rozdziale dotyczącym obecnego stanu wiedzy budzi niedosyt. Rozwiązania te jednak tyczą się głównie zastosowań związanych z rejestracją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

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.

Z jednej strony ten materiał mógłby być krótszy, ale z drugiej strony uwagi pana dr. hab. Buchnera sugerują, że powinien być bardziej rozbudowany.

[...] 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 stosować wyrażenie **offset napięcia wyjściowego**.



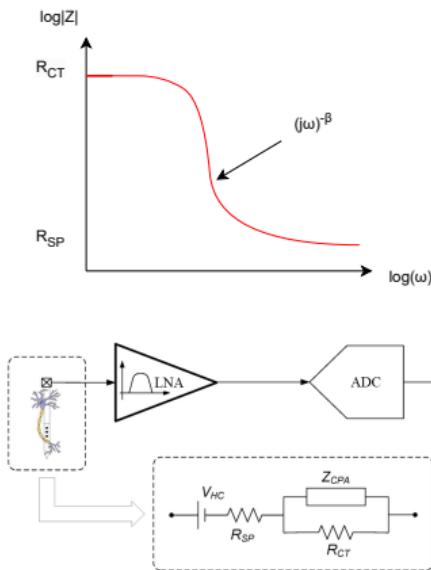
Układ odczytu jest pojęciem szerszym aniżeli wzmacniacz, który jest częścią układu odczytowego. Pojęcie może być niewłaściwe i lepsze byłoby określenie **tor odczytu** opisując drogę sygnału. Dodatkowo pojęcie *Front End* jest powszechnie używane w kontekście struktur scalonych, opisując fragment toru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

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

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

Oczywiście częstotliwość próbkowania jest zdeterminowana charakterystyką sygnału zgodnie z twierdzeniem Nyquista. W powyższym stwierdzeniu nieumiejętnie próbowało przekazać, że częstotliwość 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 próbkowanego sygnału, ale w przypadku multipleksowania wielu kanałów do jednego ADC jego częstotliwość systemu musi być odpowiednio większa. W efekcie doszło do słabego wytłumaczenia zagadnienia.

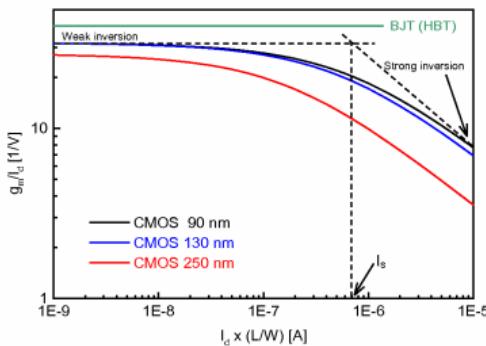
[...] **Impedancja mikroelektrody jest ważnym parametrem dla rejestracji zewnętrzkomórkowej, ponieważ określa szумy elektrody oraz tłumienie sygnału.** – w jaki sposób impedancja określa te parametry?



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 od rozmiaru elektrody. W przypadku niskich częstotliwości, jeżeli impedancja jest duża w stosunku do impedancji wejściowej 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 związana z wartością prądu polaryzacji tranzystora – w obszarze podprogowym zależność jest  $g_m \sim I_d$ , zaś w silnej inwersji  $g_m \sim \sqrt{I_d}$ . Wartość prądu przekłada się na pobór mocy, dlatego ważne jest uzyskanie danej transkonduktancji 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.

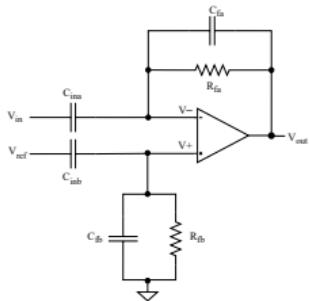


dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

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

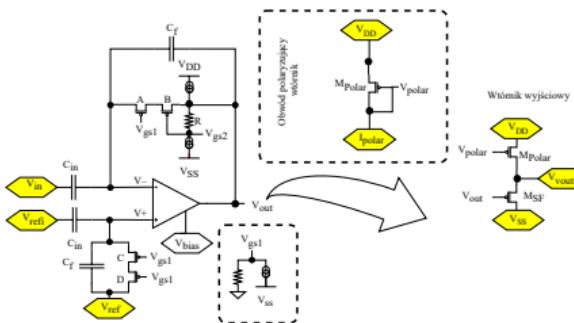
dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] W pracy przyjęto wzmacnienie dla pierwszego stopnia projektowanego wzmacniacza na poziomie  $K = 20V/V$ . Czy w kontekście możliwości pojawiienia 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 niefortunną 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.

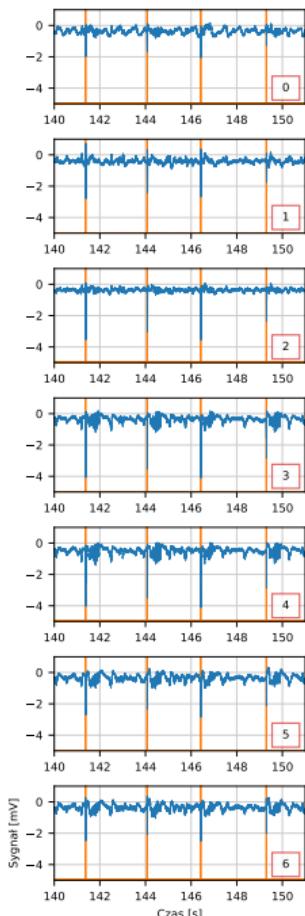
$$NEF = v_{ni,rms} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot I_{tot}}{V_t \cdot 4k \cdot T \cdot \Delta f \cdot \pi}}, \quad (1)$$

gdzie:

- $v_{ni,rms}$  – ekwiwalentne szумy wejściowe (IRN),
- $I_{tot}$  – prąd całkowity płynący przez obwód wzmacniacza,
- $\Delta f$  – efektywna szerokość pasma szumowego wzmacniacza (reprezentuje zakres częstotliwości, w którym rozważa się szum wzmacniacza),
- $V_t$  – napięcie termiczne, zazwyczaj wyrażane jako  $kT/q$ , gdzie:  $k$  – stała Boltzmanna,  $T$  – temperatura w kelwinach, a  $q$  – 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 poświęcono 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).

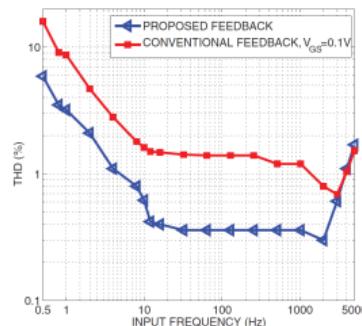
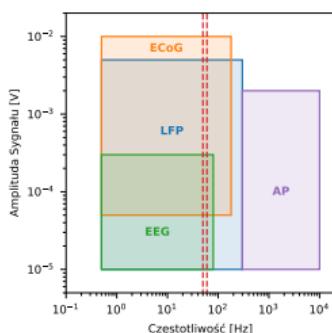
Celem w tej pracy była głównie analiza nieliniowości pseudo-rezystora, dlatego skupiono się na opisie tej struktury i jej własności. Przy projektowaniu wzmacniacza powyższe parametry były brane pod uwagę, razem z innymi parametrami jak szумy czy wejściowe napięcie niezrównoważenia co uznano za standardową 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 we wszystkich kanałach, co jest widoczne na wykresie.

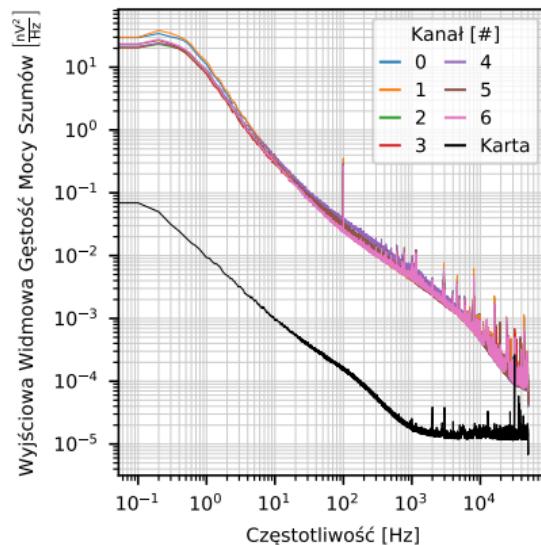
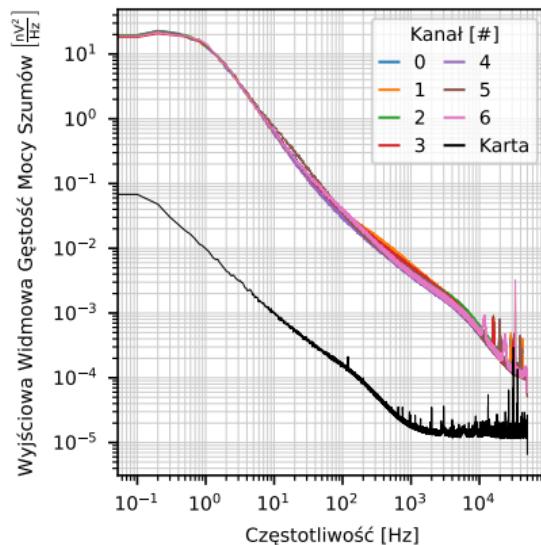
[...] Teza o dużym znaczeniu współczynnika THD dla niskoczęstotliwościowych składowych sygnałów nie jest poparta odpowiednimi przykładami uzasadniającymi to znaczenie. Jednak wymagałoby to dokładniejszej analizy własności rejestrowanych sygnałów neuronalnych, co jednak wykracza poza zakres pracy.

W tym miejscu chciałbym podkreślić, że współczynnik THD na poziomie 1% 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 podczas prezentacji przedstawiono, że w niektórych systemach THD może być nawet o jeden rząd wielkości większy niż proponowany wymóg projektowy (1%), dlatego podnoszono znaczenie tego parametru.



Jedyna praca, jaką udało mi się znaleźć wskazująca na problem nieliniowości w zakresie niskich częstotliwości, które są podstawową częścią rejestrowanych sygnałów. Symulacje THD dla sygnału sinusoidalnego o amplitudzie: 1,4 mV<sub>pp</sub> – K. Abdelhalim and R. Genov, doi: 10.1109/ISCAS.2012.6271415

[...] 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 niewielkie 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 kolejność występowania źródeł. Rozumiem, że różni czytelnicy preferują różne metody sortowania, ale w tym przypadku uznałem, 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 niewyświetlenia 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, których jestem współautorem oraz autorem głównym wszystkich grafik. Rysunki zostały dostosowane i poprawione zgodnie z potrzebami i kontekstem bieżącej pracy. W związku z tym uznałem, 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.

[...] 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 we wzgórzu. Protokół badania opisany jest w formie wystarczającej do zrozumienia otrzymanych odpowiedzi. Procedura biologiczna została zaproponowana przez panią dr hab. Ewę Kublik wykonującej tego typu eksperymenty i mającej ogromne doświadczenie. Zaprezentowane wyniki pomiarowe w tej sekcji miały służyć zademonstrowaniu możliwości układu w kontekście efektywnej rejestracji sygnałów LFP i potencjałów czynnościowych.

[...] 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.

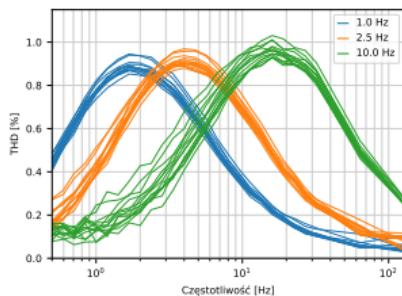
W pierwszym kroku chciałabym zapytać, o jaki kod źródłowy chodzi, ponieważ w pracy stworzono różne narzędzia prowadzące do otrzymania zweryfikowanego układu scalonego. Kody źródłowe projektu układu scalonego oraz obwodu drukowanego są niemożliwe do odczytania poza środowiskiem, w którym były projektowane. 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 upubliczniione, ale nie one były kwintesencją projektu. Podobnie kod źródłowy systemu akwizycji danych oparty o LabView oraz Python również nie jest dostępny publicznie.

[...] 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 całkowicie 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 częstotliwości granicznej powyżej 1 Hz.



Wykonanie pomiarów przedstawionych na wykresie zajmowało około tygodnia. Pomiar w niższym zakresie wymagałby wielokrotnie więcej czasu.

dr hab. inż. Teodor Buchner

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

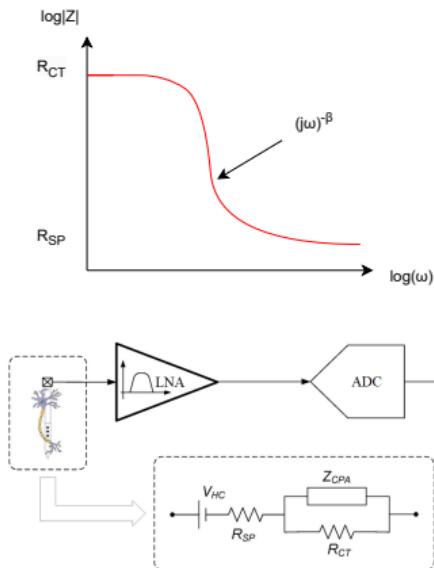
[...] Należy przypomnieć, że tworząc symulacje dostosowane do submikronowych procesów technologicznych CMOS nadal opiera się na niedoskonałych modelach BSIM w wersji 4.3.0. Model EKV nie jest zaimplementowany dla modeli tranzystorów w środowisku CADENCE, czyli narzędziach, które służą przeprowadzaniu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

[...] 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  $\beta$ .

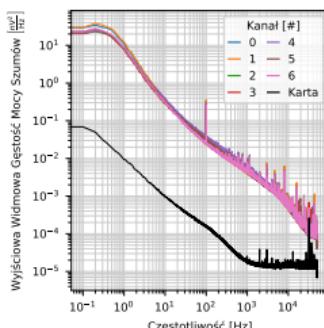
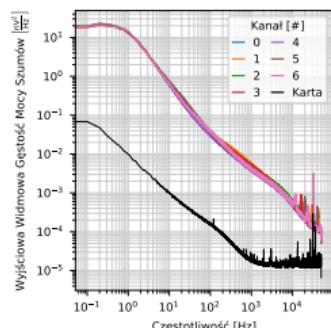
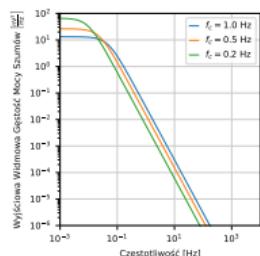
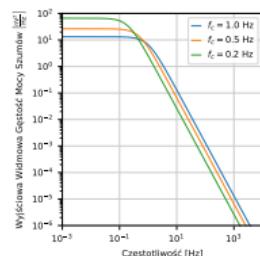
[...] Autorka opisuje proces inżynierski z perspektywy *ex post*. W związku z tym zdarza się, że relacjonując wykonane badanie, czy analizę nie umieszcza na końcu rozdziału wniosków z tego badania. Pojawiają się one niejako mimo chodem jako uzasadnienie decyzji projektowej, której podjęcie jest relacjonowane 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 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.

Na wykresach nie ma widocznych znaczących różnic w nachyleniu wykresów. Różnice wynikają z przesunięcia częstotliwości granicznych, co zostało omówione w pracy wraz z powodem, dla którego dane zjawisko występuje.



[...] 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 powierzchnia 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

[...] 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 wyznaczenia celów pracy takie podejście będzie wystarczające. Praca skupiała się na aspekcie 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. W trakcie pisania pracy uznałem, że warto wprowadzić czytelnika w tematykę procesów zachodzących na styku elektrody i tkanki na podstawowym poziomie.

[...] 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 źródła swoją charakterystykę, która faworyzuje niskie częstotliwości [8]. Efekty jonowe są składową tego zjawiska [9] ale nie mają dominującego charakteru [10].

[...] Potencjał stały jest przede wszystkim 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 przekroczona 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].

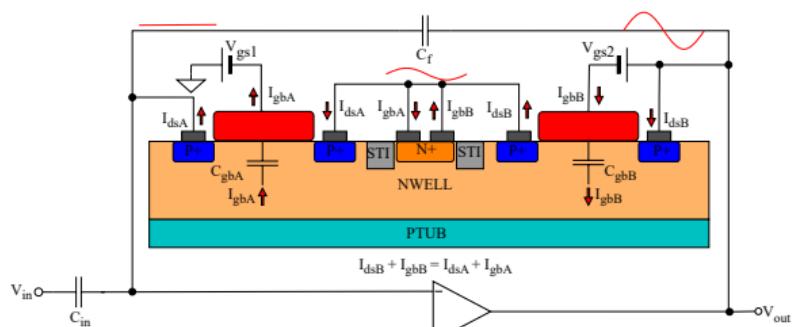
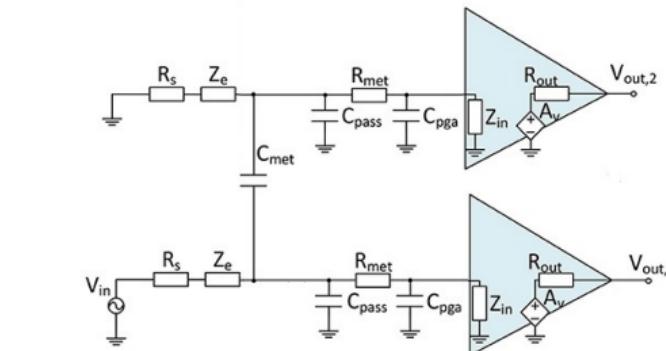
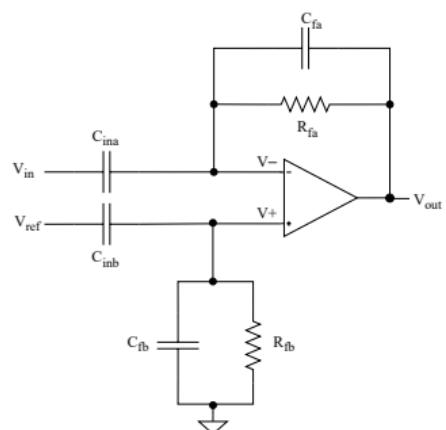
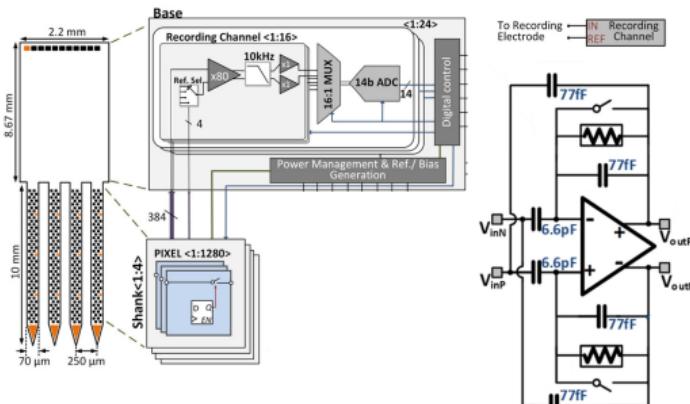
[...] Fluktuacje termiczne dotyczą nie tylko rezystancji, ale również pojemności – taki proces jak tworzenie warstwy podwójnej również jest poddany fluktuacjom. W związku z tym nie ma potrzeby odwoływanego się do rezystancyjnej natury tkanki, po to, żeby uzasadnić użycie twierdzenia Nyquista. Należy 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.

W pracy podczas wyznaczania wymagań dla systemu, ze względu na charakter sygnałów, opierano się na wiedzy literaturowej oraz doświadczeniu osób rejestrujących takie sygnały. Dodatkowo zakładano, że w przypadku mikroelektrod umiejscowionych w bezpośrednim sąsiedztwie komórki nerwowej główny dominujący wpływ ma rezystywny charakter medium. Rejestracja w takich systemach odbywa się na bardzo krótkich dystansach. W pomiarach EEG i ECoG sygnał transmitowany jest przez różne tkanki i zagadnienie modelowania tych sygnałów nie jest trywialne i istotne w kontekście stworzenia wiernych systemów rejestrujących. Chciałabym podkreślić, że mimo takiego uproszczonego podejścia możliwe było wyznaczenie wymagań projektowych w kontekście szumów, zakresu amplitudy i częstotliwości rejestrowanego sygnału.

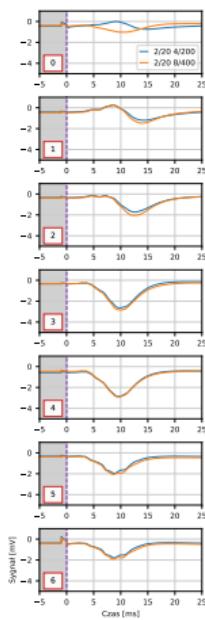
Dodatkowo głównym aspektem poruszonym w pracy była eksploracja ograniczeń technologii w kontekście stworzenia przyszłego systemu tysiące kanałów odczytowych.

[...] 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.

W praktyce trudno jest zapewnić idealnie symetryczny pomiar, ponieważ impedancja elektrody referencyjnej jest zawsze inna niż elektrody pomiarowej, nawet w przypadku sondy Neuropixel. Możliwym rozwiązaniem, stosowanym zresztą powszechnie, jest wykonanie elektrody referencyjnej o możliwie małej impedancji. Oczywiście nie zapewnia to tłumienia sygnałów współbieżących generowanych w badanej tkance, ale pomaga w tłumieniu sygnałów współbieżących pochodzących z zakłóceń elektromagnetycznych.



[...] 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.



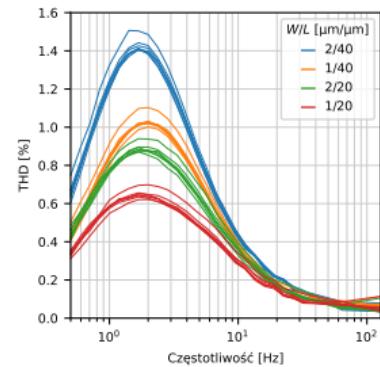
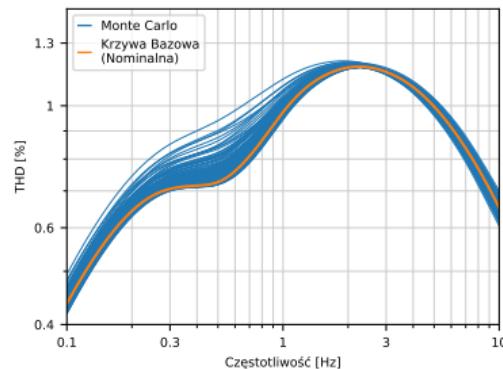
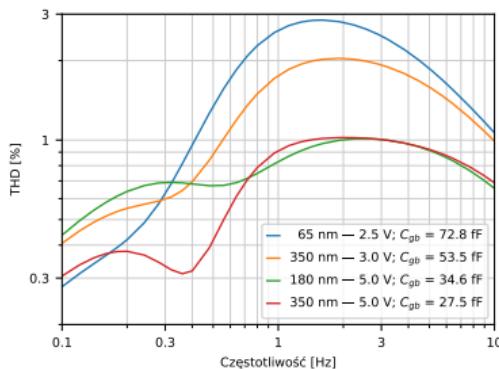
[...] Polarność sygnału wskazuje na kierunek przepływu jonów, do elektrody lub od elektrody. - ten fragment tyczy się wytłumaczenia, dlaczego poszczególne panele się różnią, nie odnoszą się do tego, co się stało na elektrodzie zero.

Zgodnie z wiedzą ekspercką osoby wykonującej pomiar i jej doświadczeniem w poprzednich eksperymentach efekt na elektrodzie zerowej został wytłumaczony jak efekt relaksacji mechanicznej tkanki. W pracy przedstawiono to wytłumaczenie jednak niestety w niezbyt klarowny sposób.

[...] Jeżeli uwzględnimy fakt, że pokazane dwie serie rejestracji zostały wykonane w znacznym odstępie czasowym ok. 100 minut, obserwację zmiany kształtu sygnału z bipolarnego na unipolarny należy interpretować jako zmianę w strukturze tkanki w pobliżu danej elektrody. Warstwa powierzchniowa tkanki jest bardziej narażana na wpływ czynników zewnętrznych, natomiast głębsze warstwy kory baryłkowej pozostają bardziej stabilne w czasie, co potwierdzają zarejestrowane sygnały.

[...] Odnośnie podnoszonego przez Autorkę faktu zniknięcia podwójnego maksimum widma THD, warto zauważać, że rozwiązanie 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.

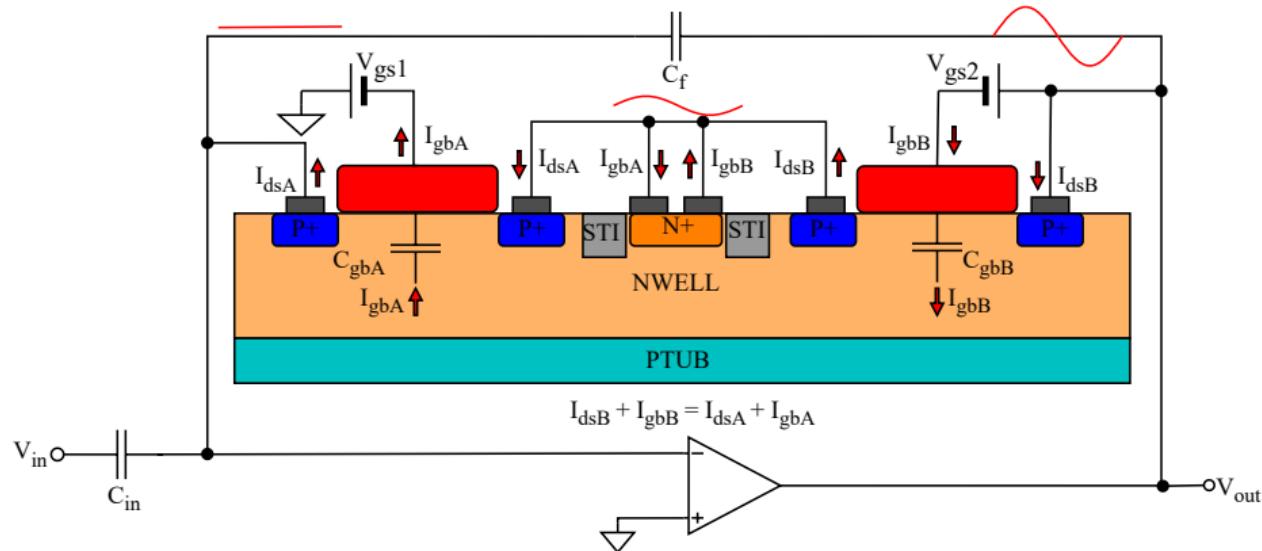
W pracy nie podano analitycznego wytłumaczenia charakteru zmian kształtu krzywej THD. Należy przyjąć, że bardziej wiarygodny jest wynik otrzymany w pomiarach, ponieważ środowisko symulacyjne może nie uwzględniać wszystkich efektów technologii, jeżeli stosuje się ją w dosyć nietypowych wariantach (brzegowych parametrach).



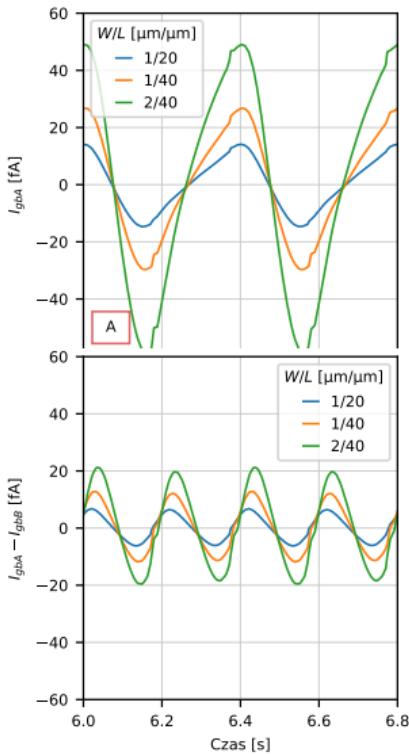
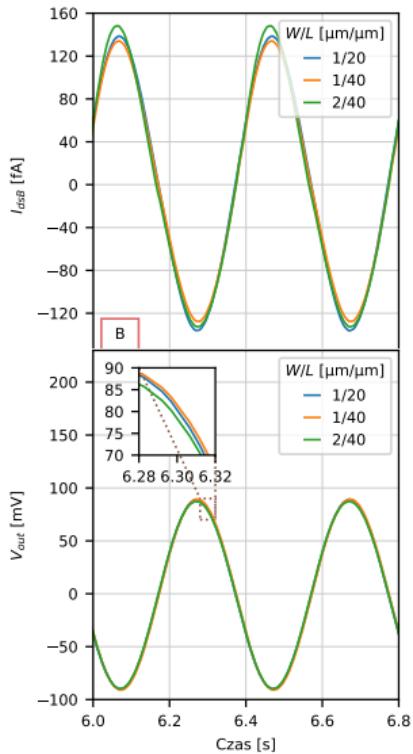
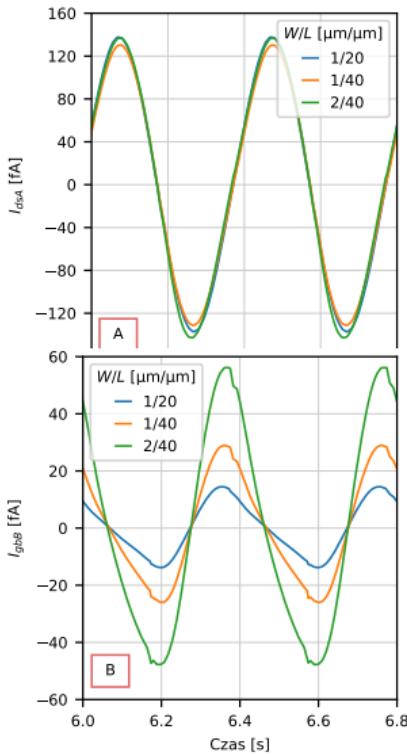
## Część II

### Dodatki

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

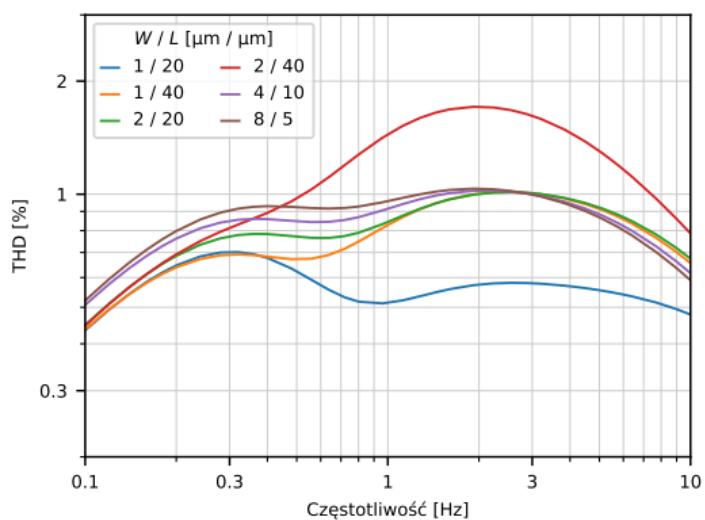


# Wpływ pojemnościowych prądów bramki pseudo-rezystorów na zniekształcenia w technologii 180 nm

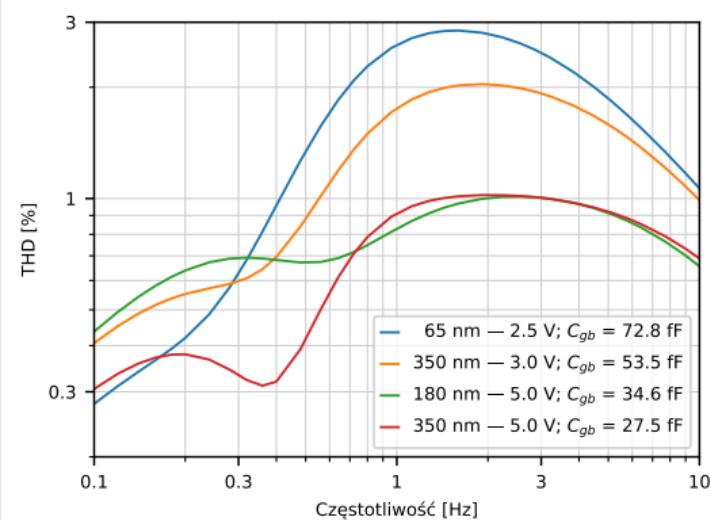


# Skalowanie zniekształceń z powierzchnią bramki i grubością tlenku tranzystorów tworzących pseudo-rezistory

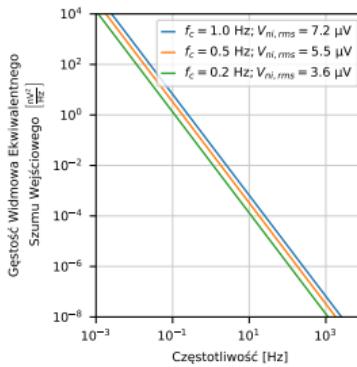
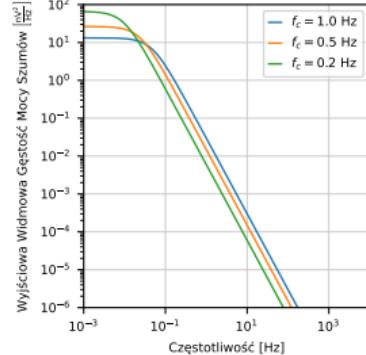
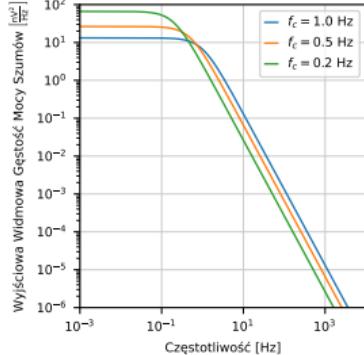
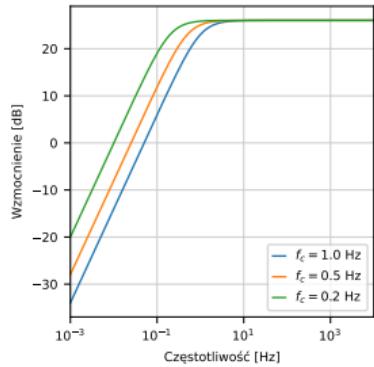
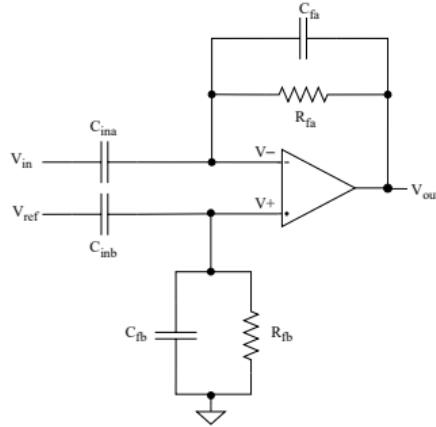
Powierzchnia bramki – technologia 180 nm



Zależność od technologii

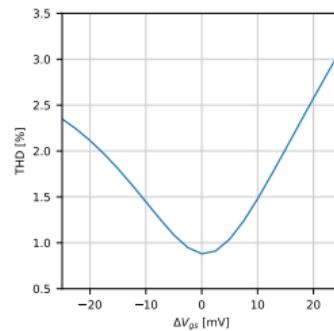
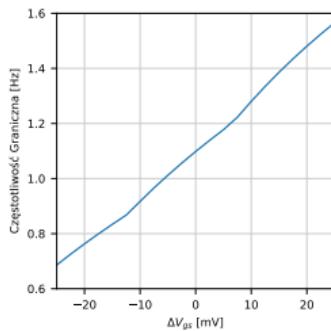
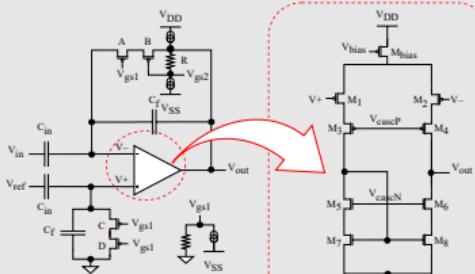


# Szumy

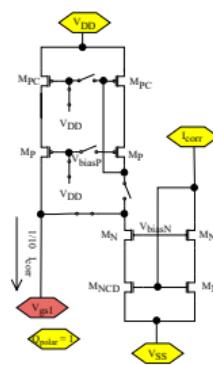
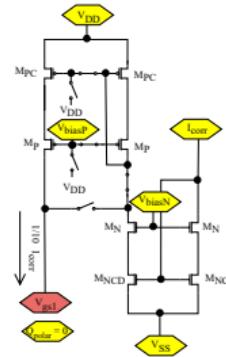
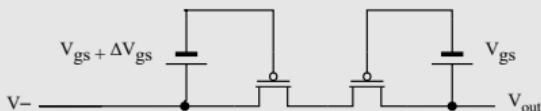


# Blok korekcji

## Projekt kanału

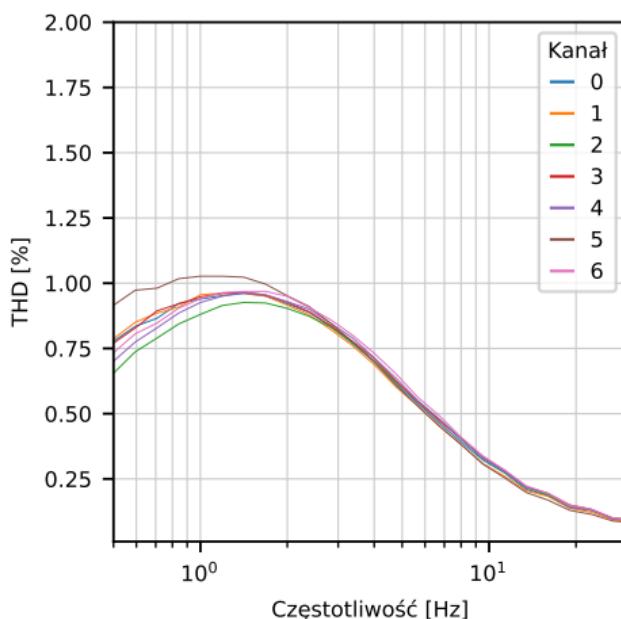


## Wyzwania do rozwiązania

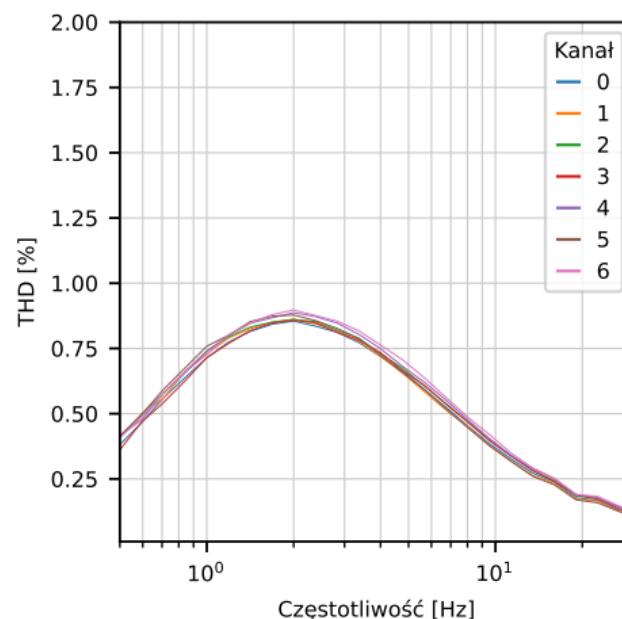


# Pomiary zniekształceń harmonicznych – wpływ korekty

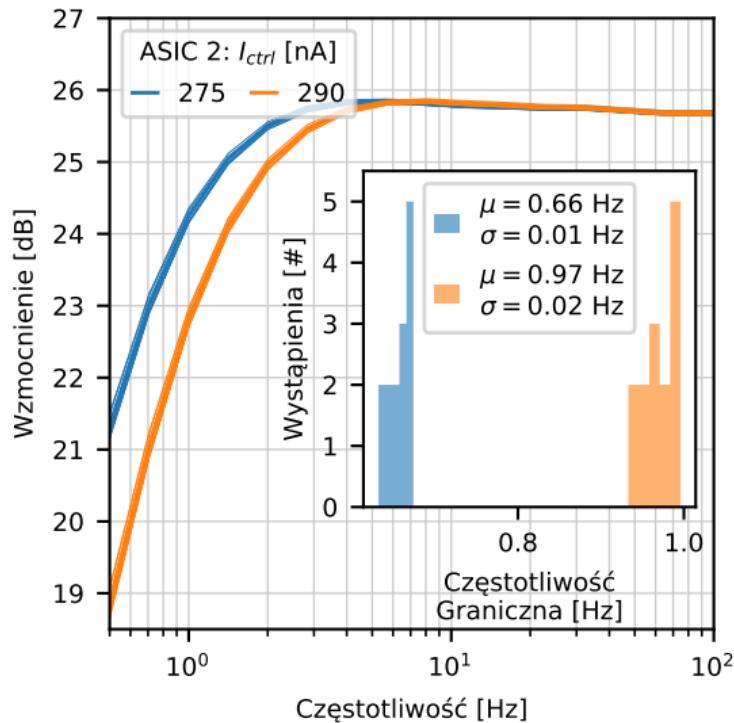
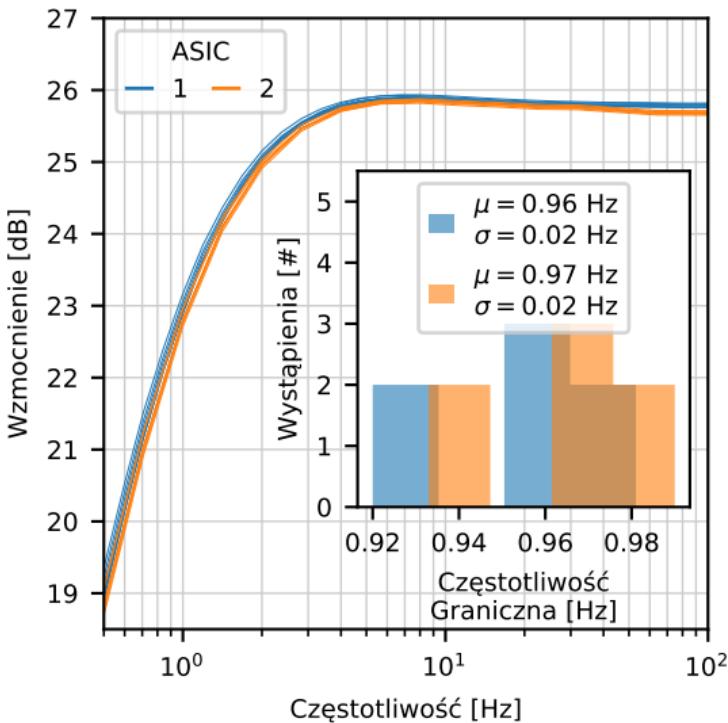
Brak globalnej korekty



Korekta globalna



# Jednorodność kanałów



# Profil lokalnego potencjału pola wywołanego (LFP) i rozkład źródeł prądu (CSD)

