



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

**AGH**

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

mgr inż. Beata TRZPIL-JURGIELEWICZ

promotorzy:

prof. dr hab. inż. Władysław DĄBROWSKI

dr inż. Paweł HOTTOWY

# Plan prezentacji

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

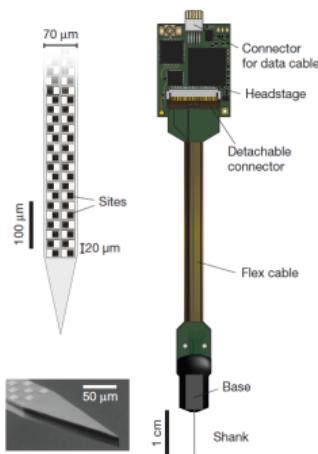
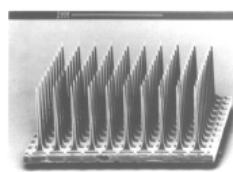
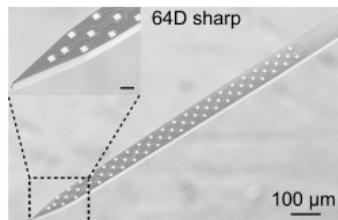
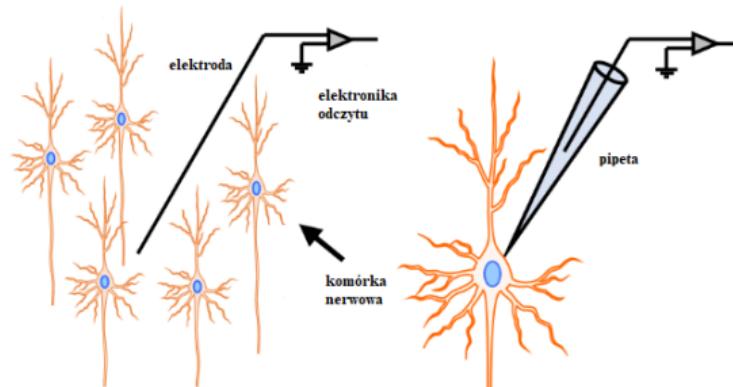
# Część I

## Tematyka pracy

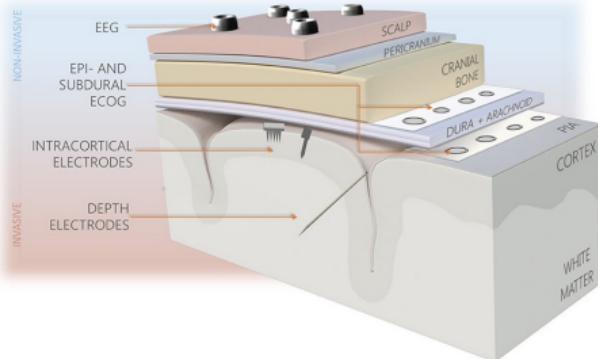
# Kierunki rozwoju współczesnych systemów pomiarowych i matryc mikroelektrodowych

## Techniki pomiarowe wewnętrz i zewnątrzkomórkowe w neurobiologii

- różne amplitudy sygnałów
- inwazyjność badań
- obszar badań

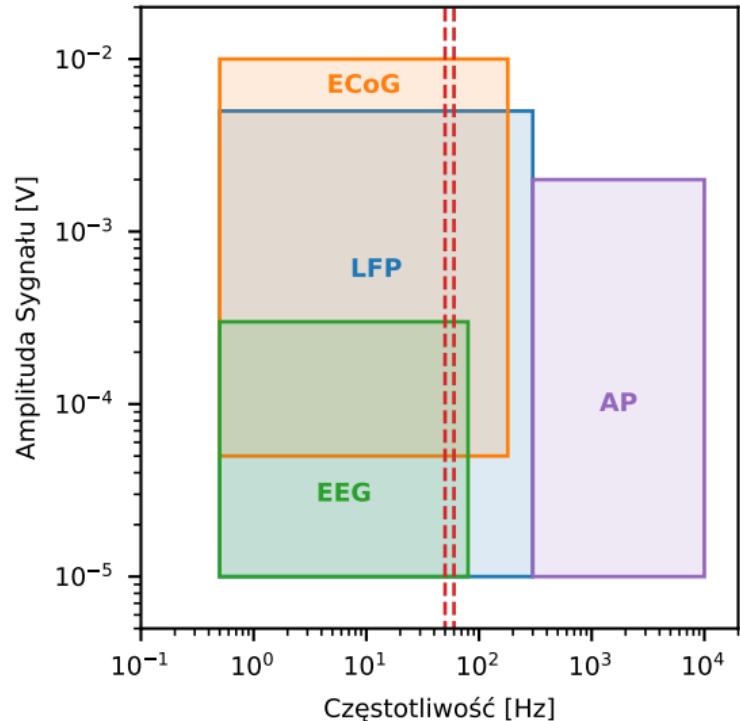


# Zakresy amplitud i częstotliwości sygnałów neuronowych

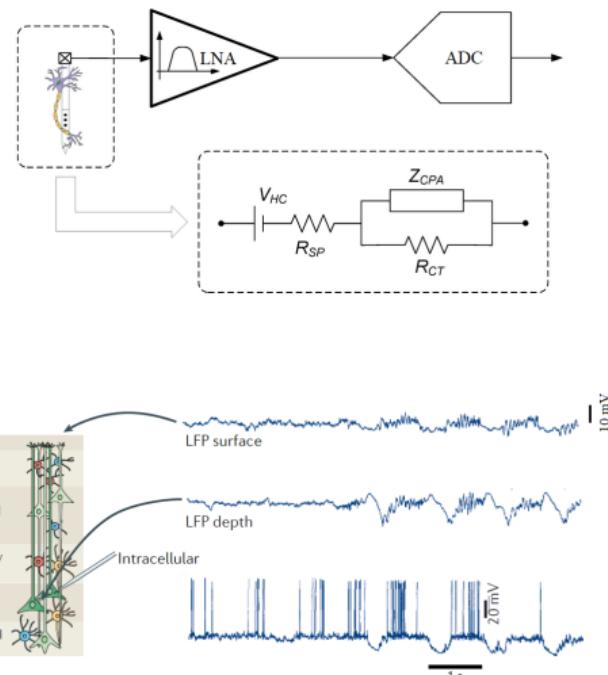


## Metody rejestracji

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



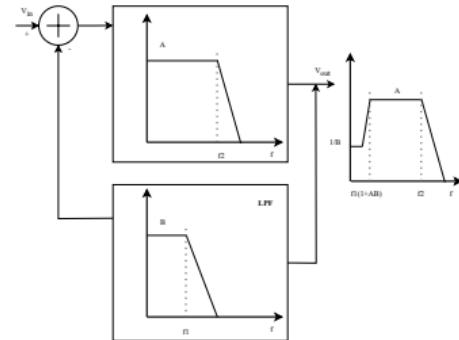
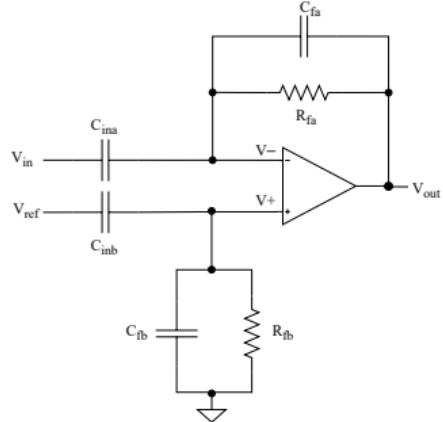
# Kanał rejestracji neuronowej z wykorzystaniem elektrod zewnętrzkomórkowych



Wymagania stawiane interfejsom neuroelektronicznym umożliwiającym rejestrację sygnałów LFP i AP

- Offset stały na styku elektrody – do 1 V do 2 V
- Szумy  $< 5 \mu\text{V}$  dla pasma LFP i AP
- Liniowość rejestrowanego sygnału
- Pobór mocy – limit ogrzewania tkanki mózgowej – mniej niż  $1^\circ\text{C}$
- 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 stałoprądowe i zmiennoprądowe



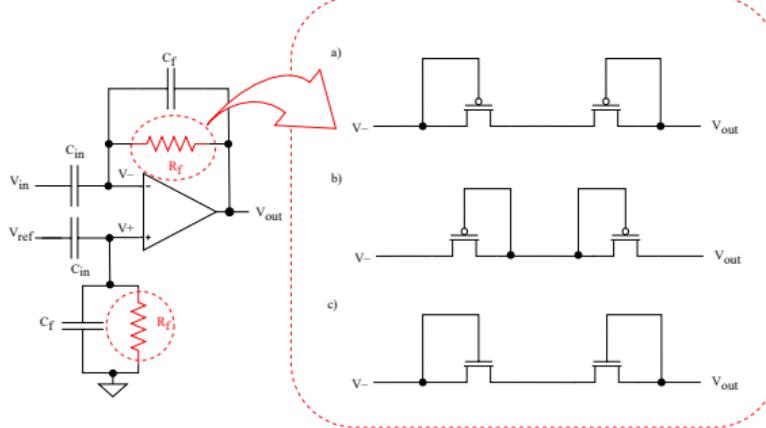
- Dolna częstotliwość graniczna rzędu  $\sim 1 \text{ Hz}$
- Pojemności w CMOS  $\sim \text{fF} \cdot \mu\text{m}^{-2}$
- Rezystancja sprzężenia zwrotnego  $\sim \text{T}\Omega$
- Brak składowej stałej od elektrody
- Wydajność szumowa

- Duża wrażliwość na offset
- Pobór mocy
- Brak dużych rezystancji w pętli sprzężenia zwrotnego

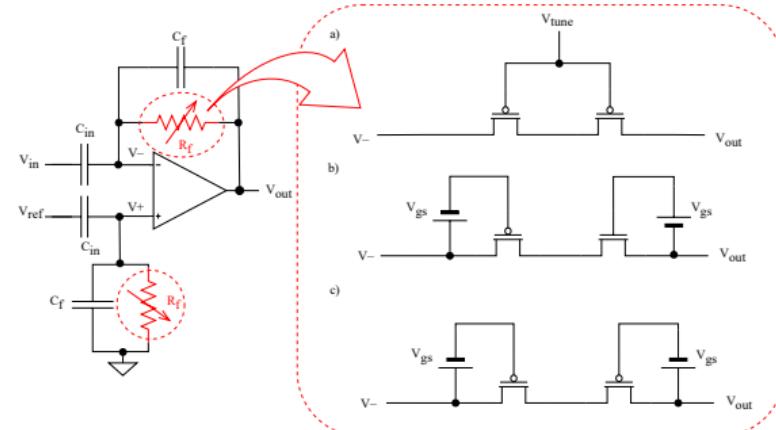
## Część II

### Liniowy pseudo-rezystor

# Podstawowe rozwiązania pseudo-rezystorów



brak możliwości regulacji wartości rezystancji

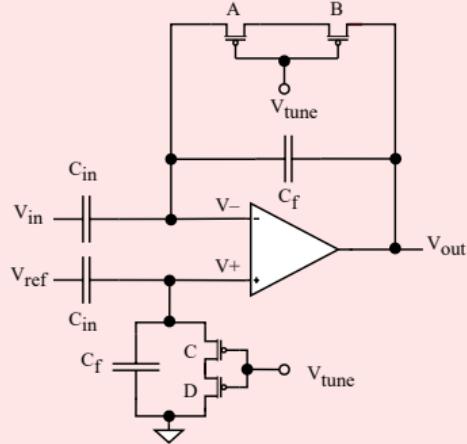


możliwość sterowania częstotliwością graniczną

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

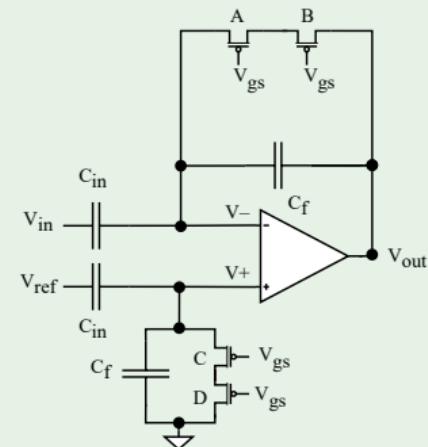
Zmienne napięcia na bramce –  
*variable* –  $V_{gs}$

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



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

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

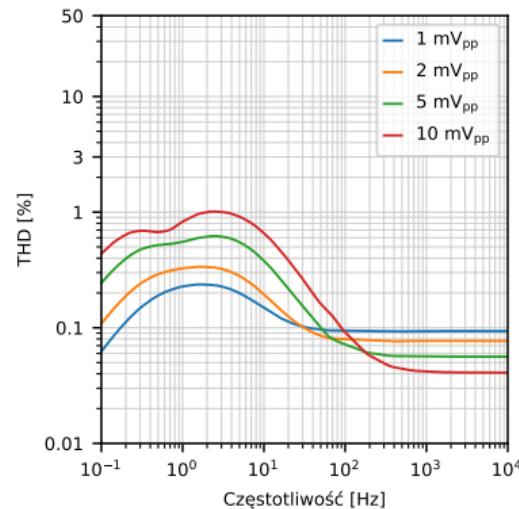
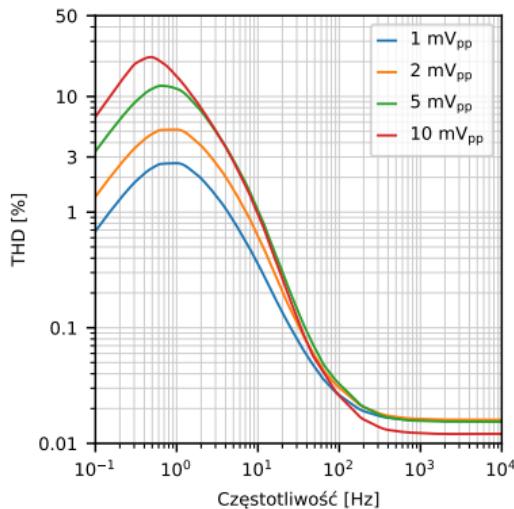


# Analiza Transient sprzężenia AC

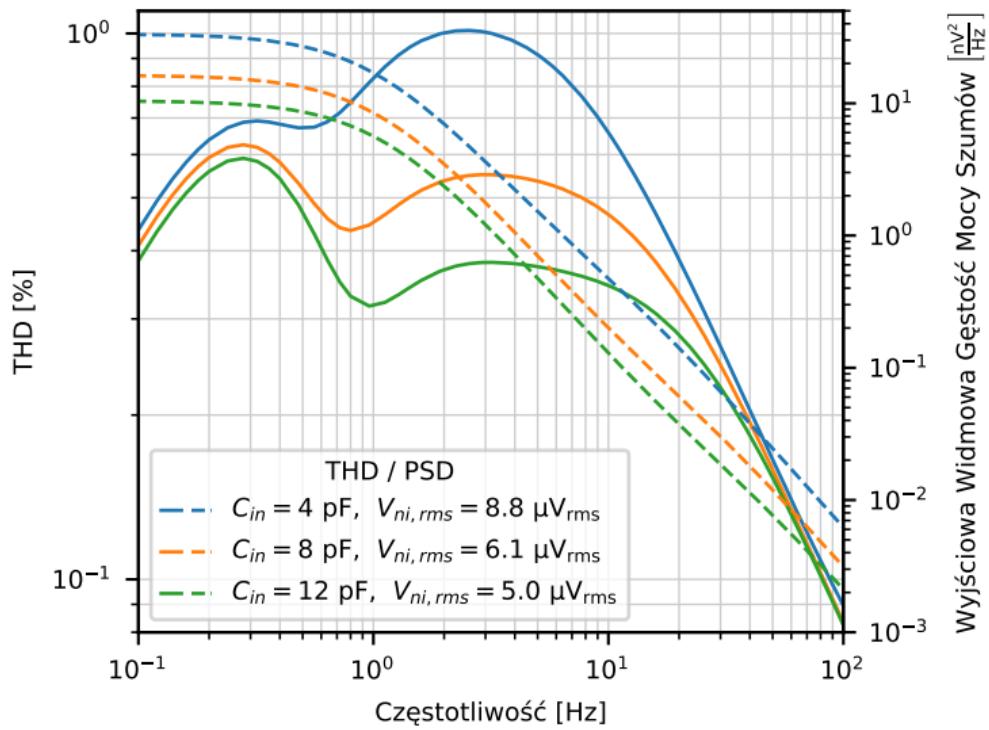
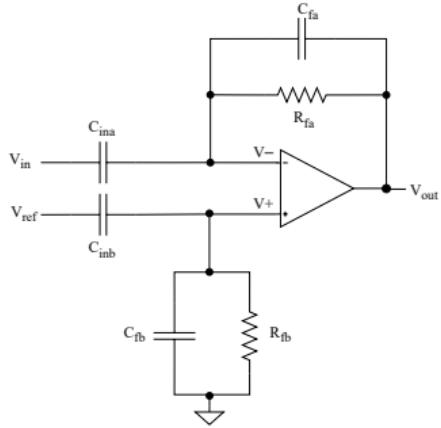
## Ustawienia symulacji

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

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



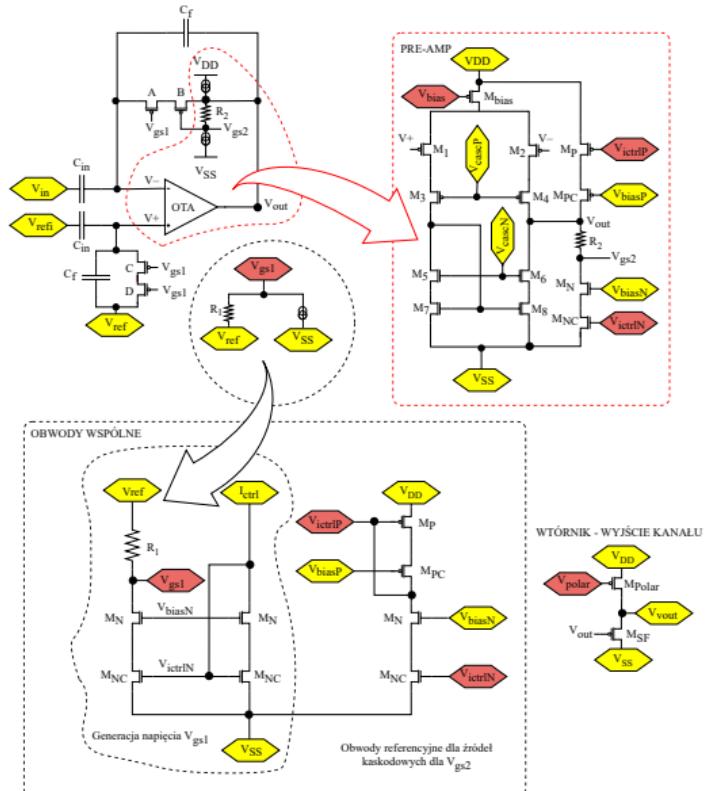
# Wpływ pojemności wejściowych na szумy i zniekształcenia



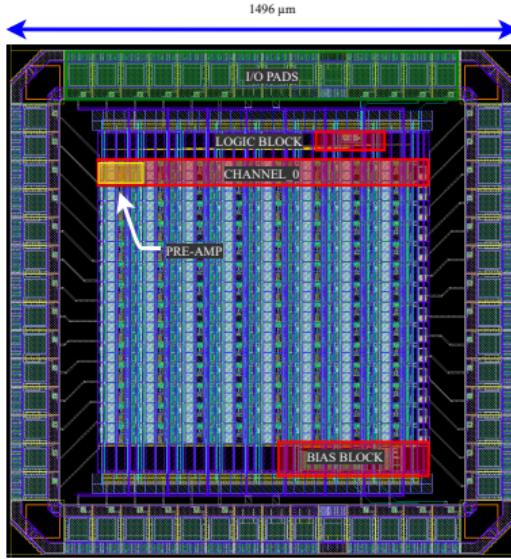
## Część III

Operacyjny wzmacniacz transkonduktancyjny

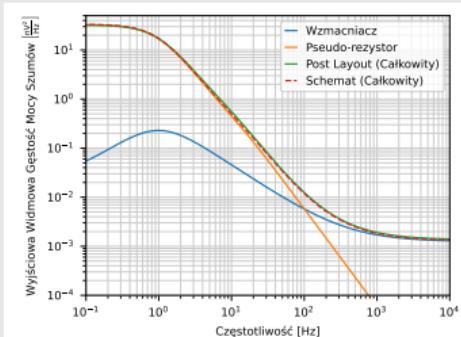
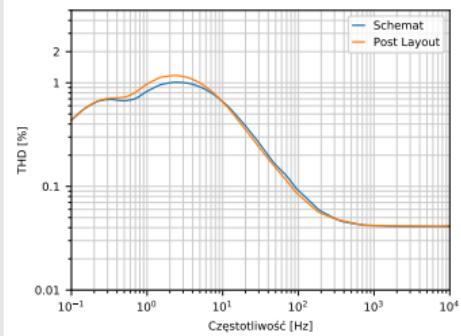
# Przedwzmacniacz z wejściowym obwodem sprzęgającym AC



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



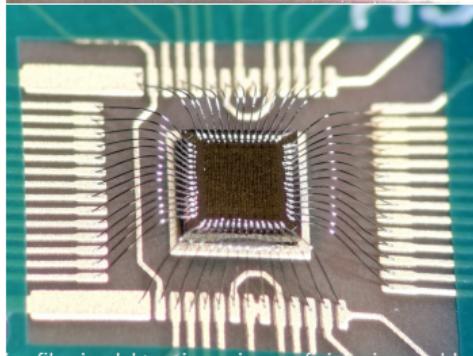
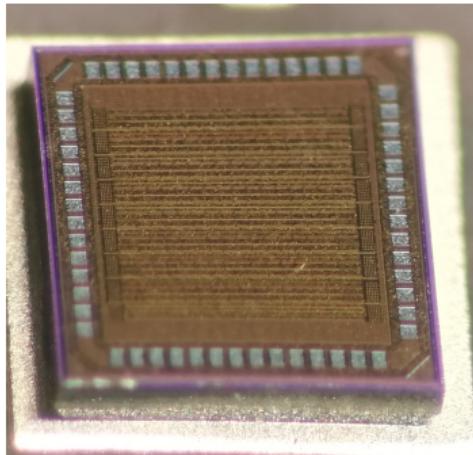
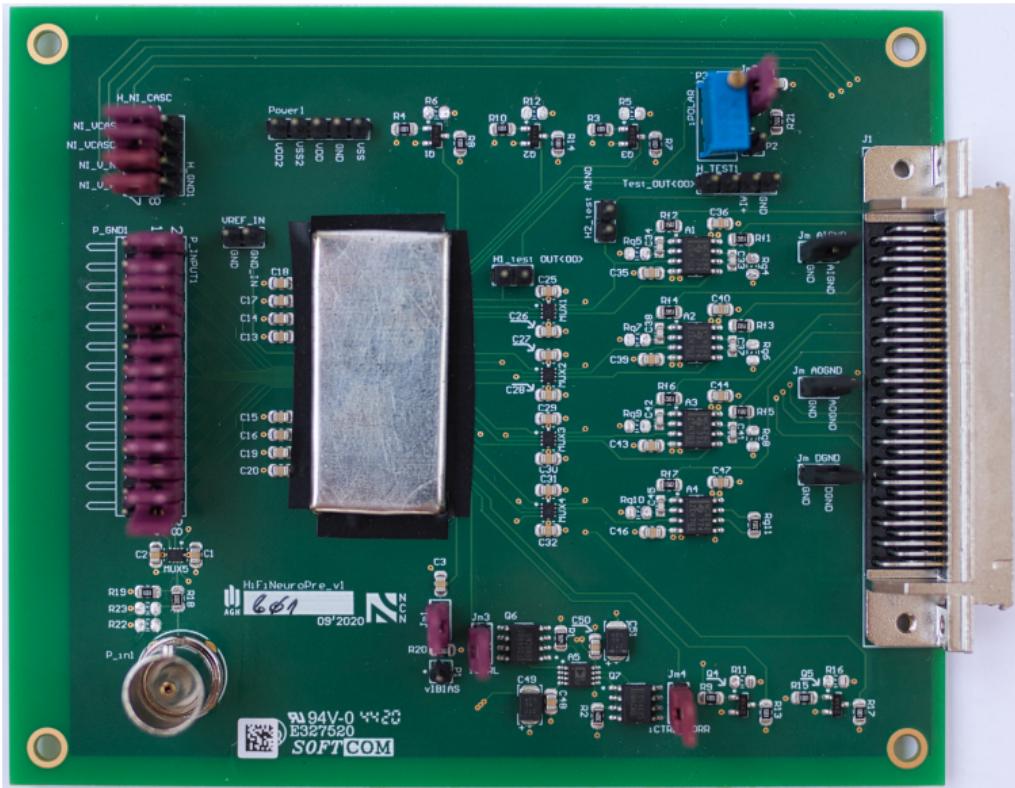
## Symulacje Post-Layout



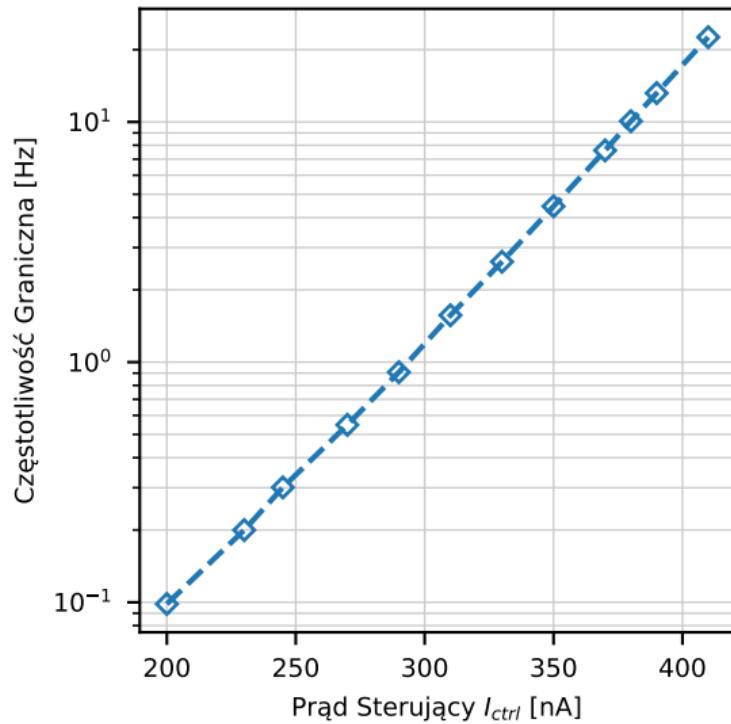
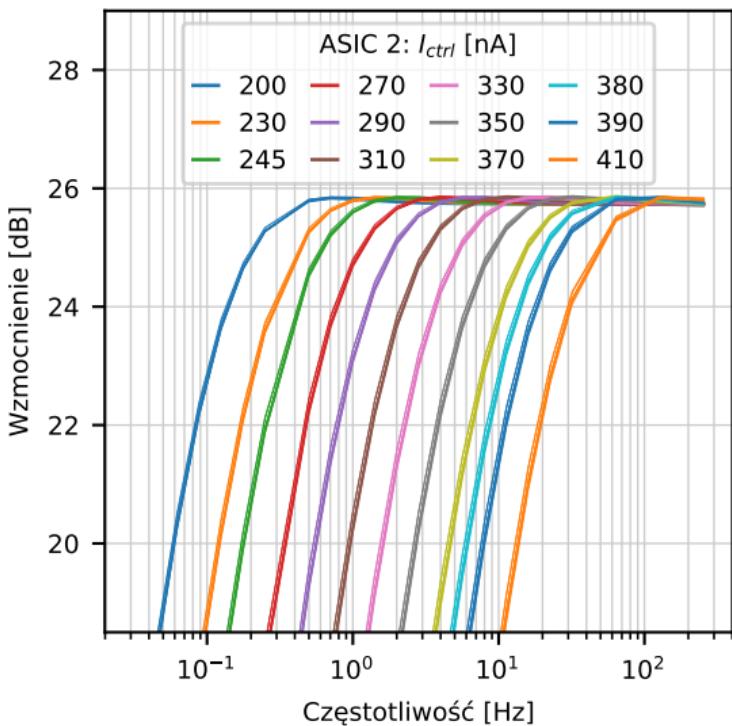
## Część IV

Weryfikacja elektroniczna i neurofizjologiczna układu scalonego HiFiNeuroPre

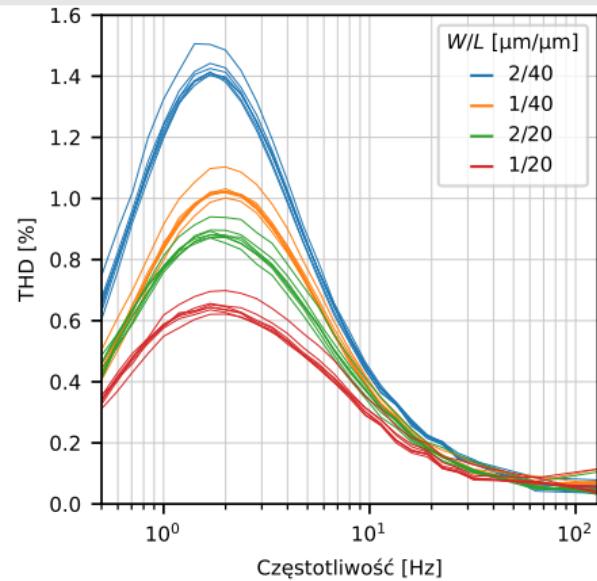
# System testowy



# Wzmocnienie, częstotliwość graniczna

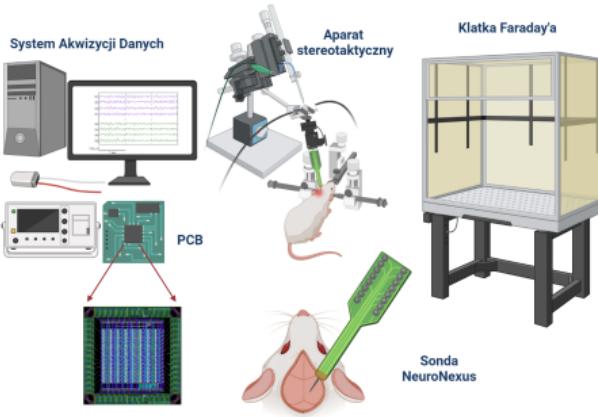


# Konfiguracje przedwzmacniacza

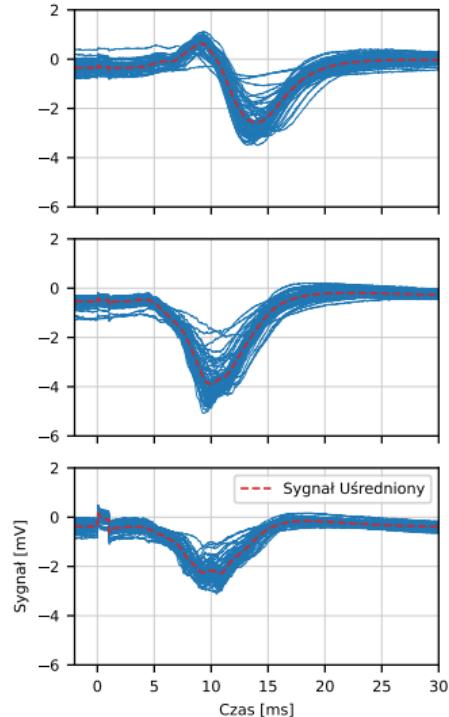


todo

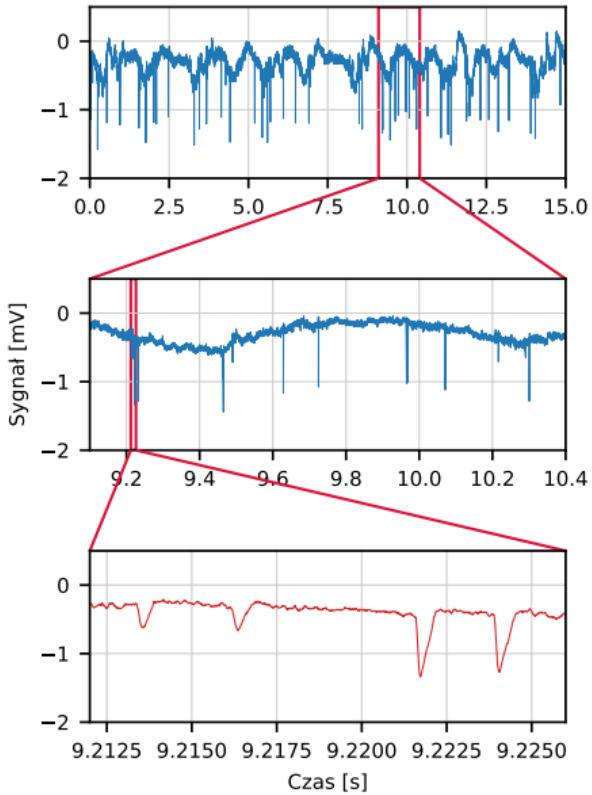
# System pomiarowy do akwizycji sygnałów neurobiologicznych



todo



todo



# Część V

## Podsumowanie

# Podsumowanie testów elektronicznych

Tabela 1: Parametry przedwzmacniacza na podstawie pomiarów weryfikacyjnych

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

# Podsumowanie

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

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

mgr inż. Beata TRZPIL-JURGIELEWICZ

promotorzy:

prof. dr hab. inż. Władysław DĄBROWSKI

dr inż. Paweł HOTTOWY

# Część VI

## Odpowiedzi

dr hab. Andrzej Pfitzner, prof. PW

[...] Autorka nie sformułowała tezy rozprawy, co wynika ze specyfiki pracy, natomiast celem praktycznym było opracowanie takiego rozwiązania konstrukcyjnego przedwzmacniacza, aby umożliwić skutecną realizację zintegrowanego narzędzia do badań mózgu przez zespół Katedry Oddziaływań i Detekcji Cząstek AGH.

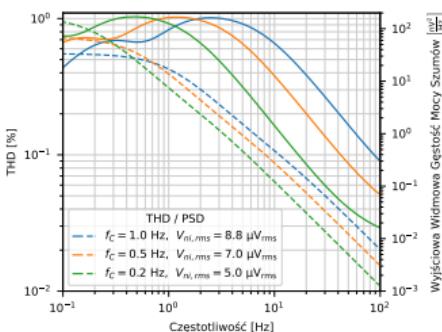
dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] 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 wzmocniacz [ $\mu A$ ]	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 eksplorowanie zakresu parametrów, nie zaś osiąganie konkretnych wartości. W zależności od użytych elektrod podczas eksperimentu jak również celu samego eksperimentu wymagania dotyczące toru odczytowego mogą być różne. Dzięki temu podejściu możliwe było poznanie ograniczeń technologii, architektury. Rozumiem, że brak zbiorczej tabeli porównującej budzi niedosyt ale jak przedstawiono na samym początku prezentacji porównywanie wartości THD mijałoby się z celem ponieważ w literaturze brak danych, które byłyby porównywalne. Jedyna praca, którą udało mi się znaleźć wzmiankę na ten temat, o której wspominałam w pracy pochodzi z grupy profesora Genova z Toronto.

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

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

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 wymagania dotyczące projektu były inne.

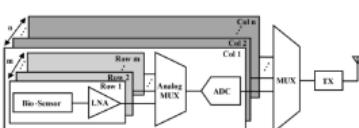
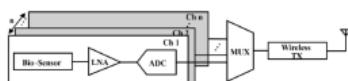
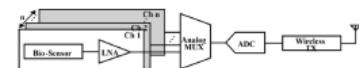
dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] 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.

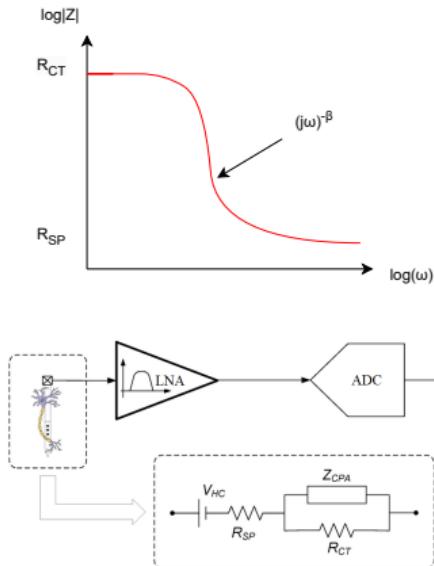


dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] 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.

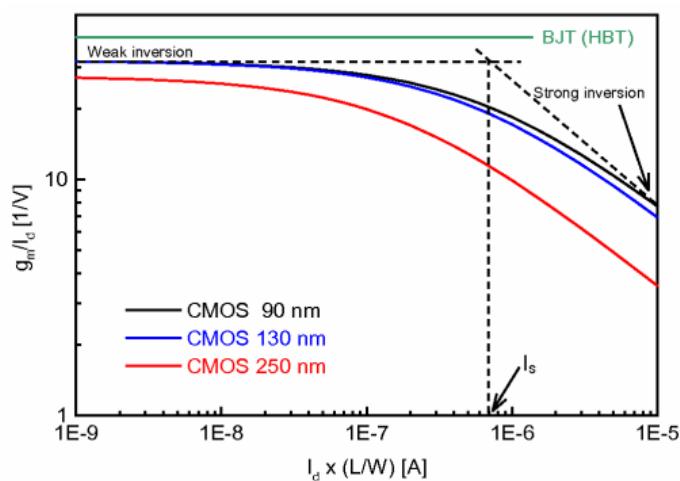
Oczywiście częstotliwość próbkowania jest zdeterminowana charakterystyką sygnału zgodnie z twierdzeniem Nyquista. W powyższym stwierdzeniu nieumiejętnie próbowało przekazać, że częstotliwość wielokanałowego ADC zależy od architektury, a konkretnie od ilości obsługiwanych kanałów w przetworniku. Jeżeli 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?



Impedancia przy niskich częstotliwościach ma charakter rezystancyjny, gdzie główny wpływ ma rezystancja  $R_{sp}$ , która wprowadza szum termiczny. Podobnie w przypadku niskich częstotliwości jeżeli impedancia jest duża w stosunku do impedancji wejściowej pierwszego elementu toru odczytowego czyli w tym przypadku wzmacniacza otrzymujemy dzielik 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].



TODO

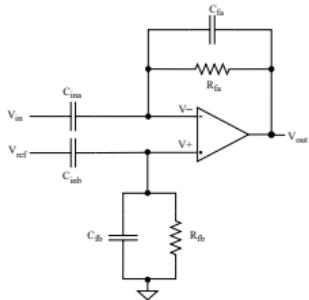
Stosunek transkonduktancji do prądu drenu w funkcji znormalizowanego prąd drenu dla trzech technologii

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

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

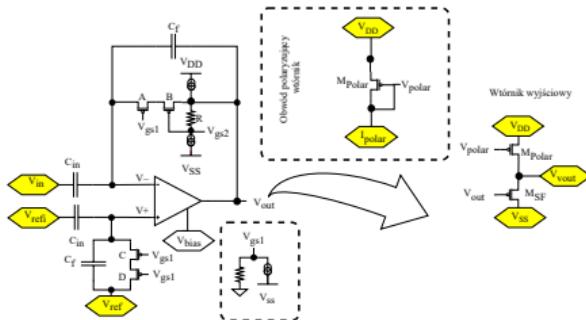
dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] 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 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.



TODO By móc utrzymać wysokie wzmacnianie różnicowe prądu stałego oferowane przez przedwzmacniacz niezależnie od dalszych elementów toru odczytowego powinien on zapewniać niską rezystancję wyjściową ze względu na możliwość obciążenia parametrów przedwzmacniacza. Aby układ przedwzmacniacza miał niską rezystancję wyjściową należało dodać stopień buforujący do wyjścia OTA.

[...] 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,

$\Delta f$  To jest 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.

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

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

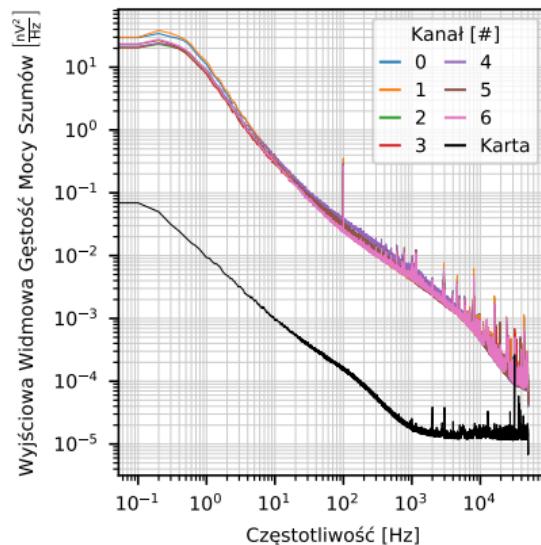
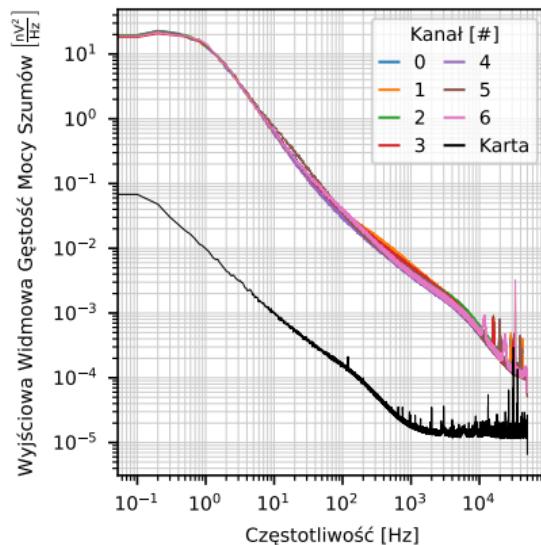
dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

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

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

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

[...] 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.

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 w środowisku CADENCE, czyli narzędziach które służą przeprowadzaniu symulacji submikronowych procesów technologicznych CMOS ale jest pożyteczny 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

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.

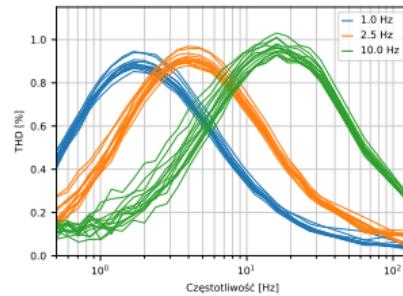
W pierwszym kroku chciałabym zapytać o jaki kod źródłowy chodzi ponieważ w pracy stworzono różne narzędzia prowadzące do otrzymania zweryfikowanego układu scalonego. Kody źródłowe projektu układu scalonego oraz obwodu drukowanego są niemożliwe do odczytania poza środowiskiem w którym były realizowane. 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.

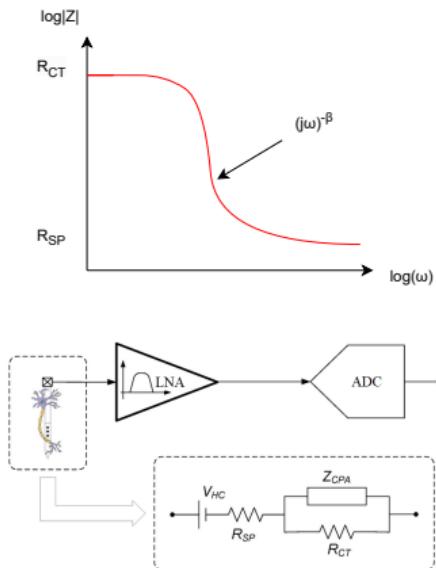


[...] Pewne wątpliwości budzi natomiast metodyka procesu weryfikacji w eksperymencie neurofizjologicznym. W przypadku pomiarów o charakterze unikatowym nie ma możliwości porównania wyniku z urządzeniami referencyjnymi. Wydaje się jednak, że ten przypadek tu nie zachodzi. Bardziej właściwe wydaje się 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 Odpowiedzi

[...] 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 [...]

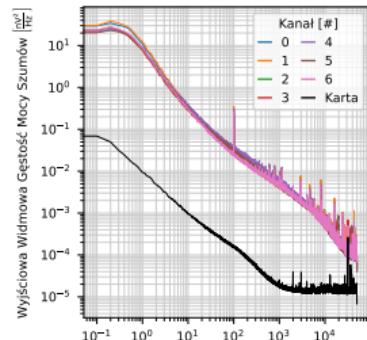
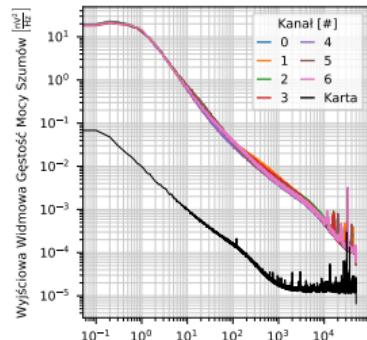
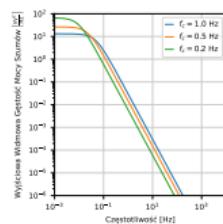
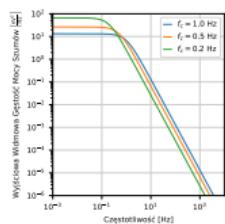
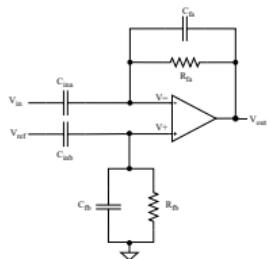
W pracy opierano się na powszechnie używanym prostym modelu tkanka elektroda. Uznano, że na potrzeby pracy takie podejście za wystarczające.

[...] 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 rałaconowane 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<sub>gs</sub>*, 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 uznaje, 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 konieczności na Odpowiedzi

[...] 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:

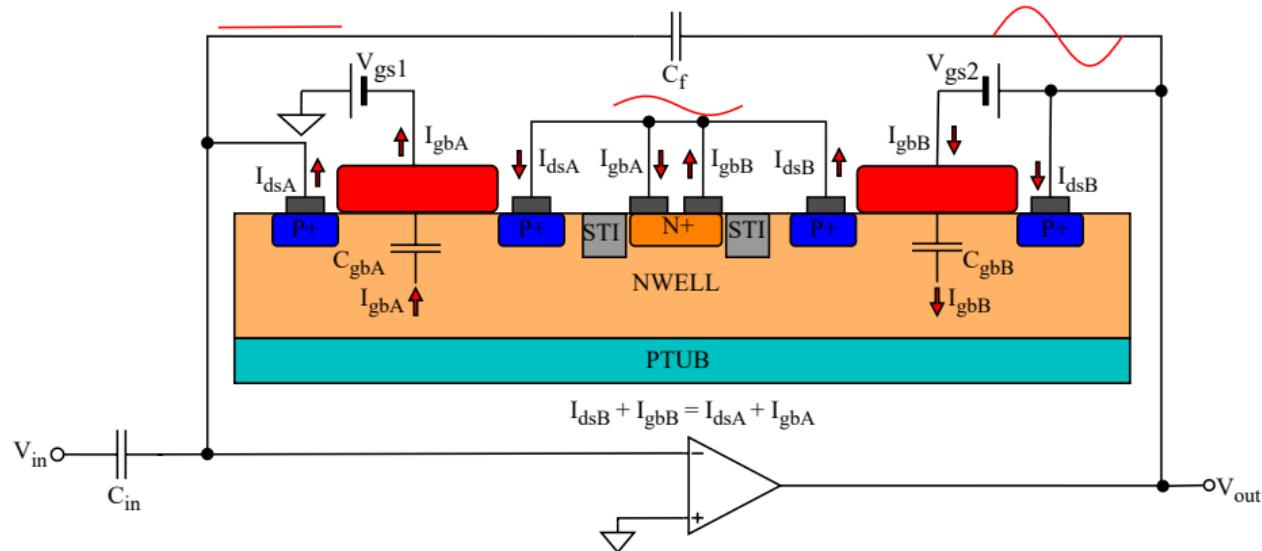
prof. dr hab. inż. Władysław DĄBROWSKI

dr inż. Paweł HOTTOWY

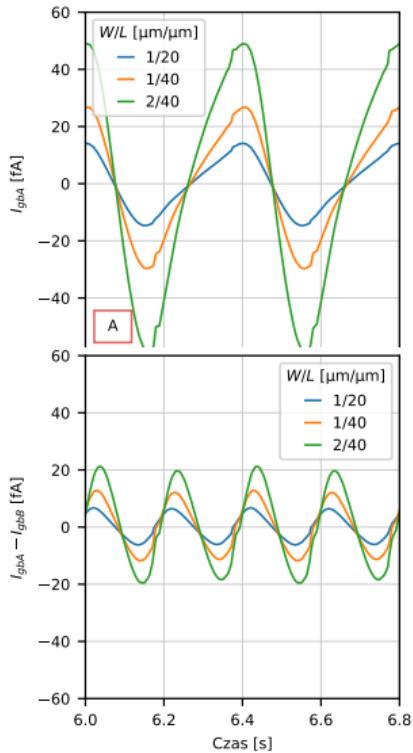
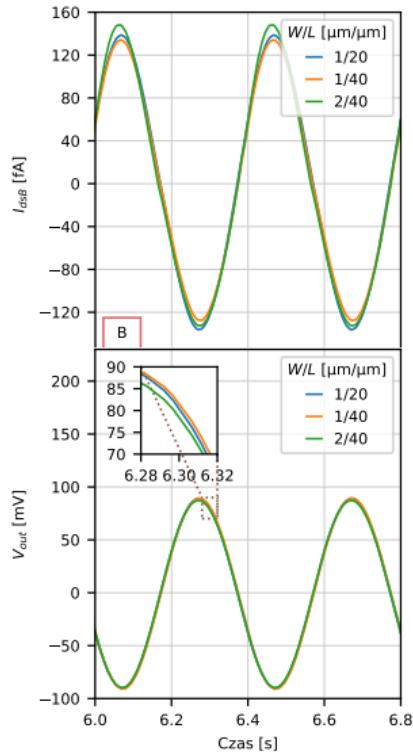
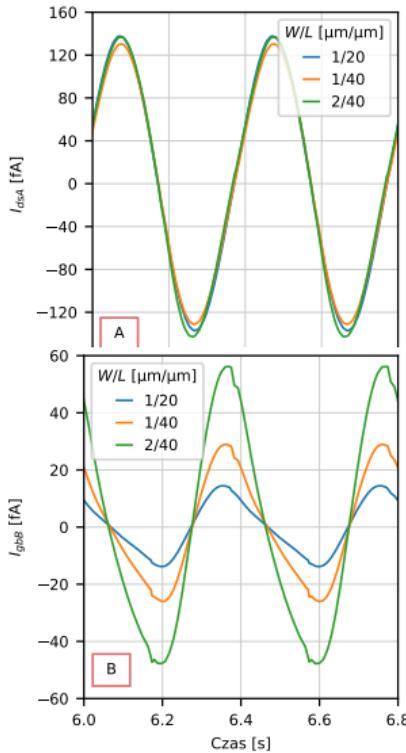
# Część VII

## Dodatki

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

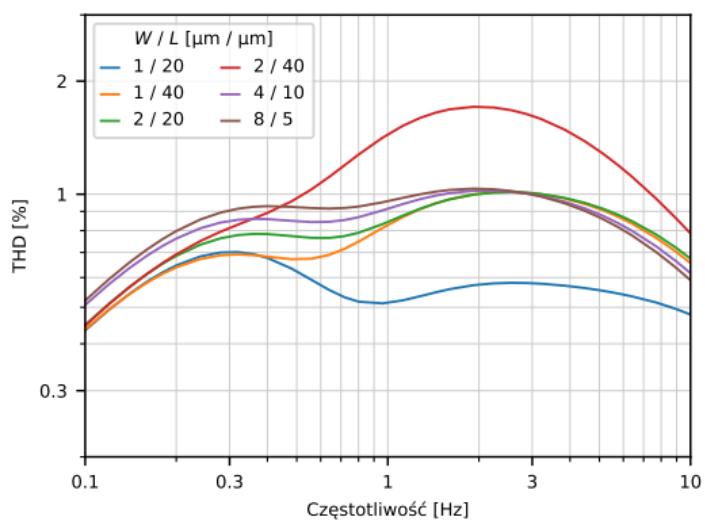


# Wpływ pojemnościowych prądów bramki pseudo-rezystorów na zniekształcenia w technologii 180 nm

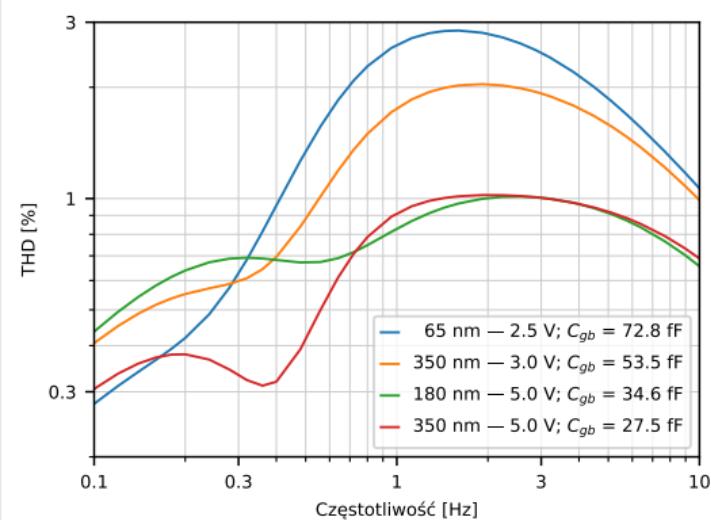


# Skalowanie zniekształceń z powierzchnią bramki i grubością tlenku tranzystorów tworzących pseudo-rezistory

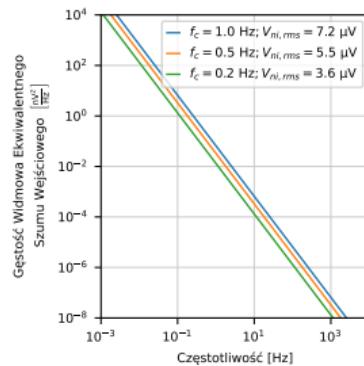
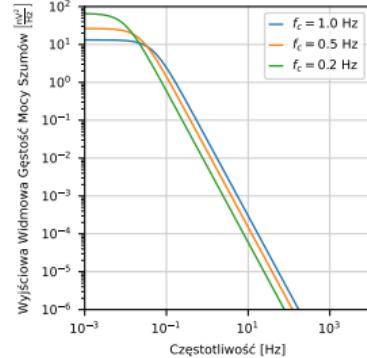
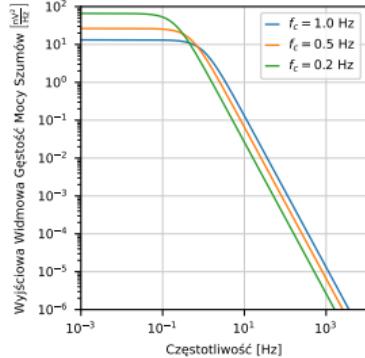
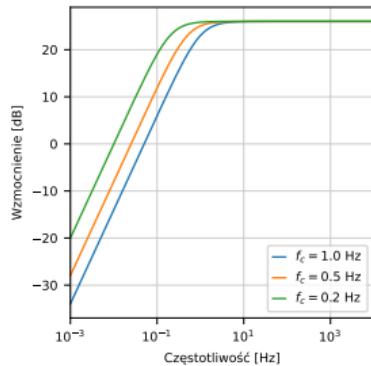
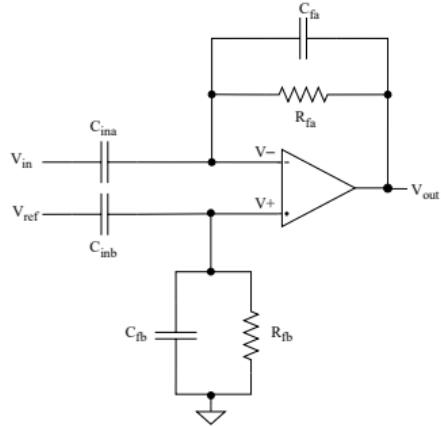
Powierzchnia bramki – technologia 180 nm



Zależność od technologii

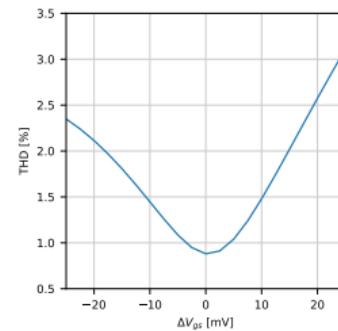
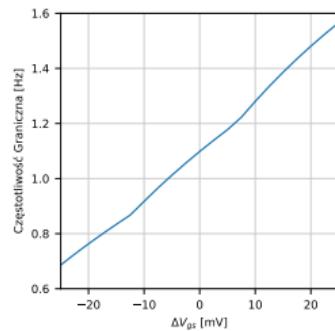
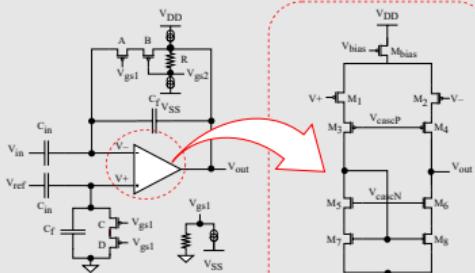


# Szumy

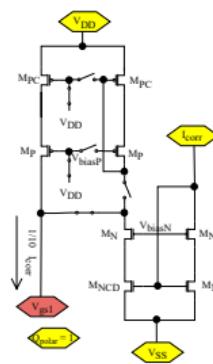
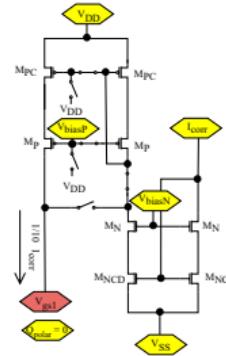
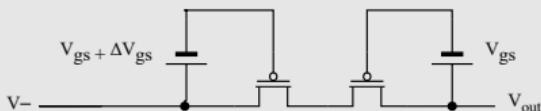


# Blok korekcji

## Projekt kanału

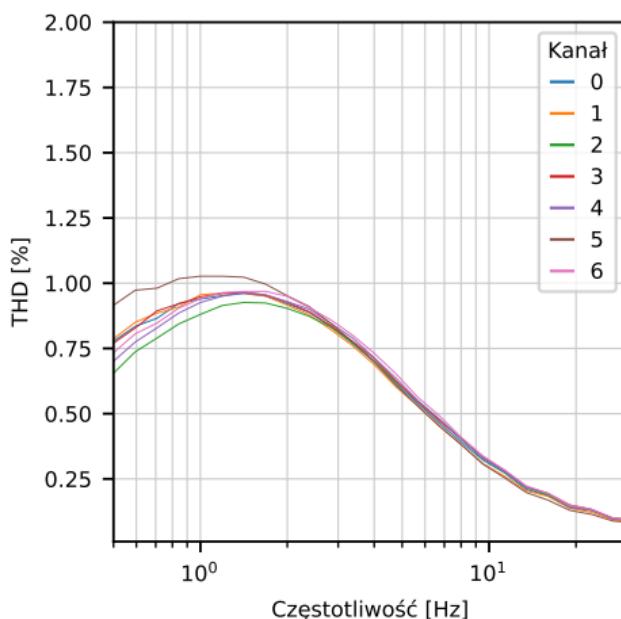


## Wyzwania do rozwiązania

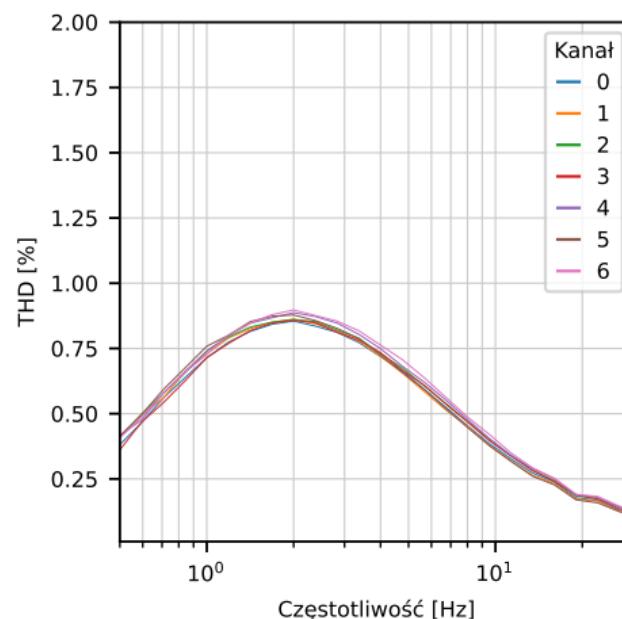


# Pomiary zniekształceń harmonicznych – wpływ korekty

Brak globalnej korekty



Korekta globalna



# Jednorodność kanałów

