

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

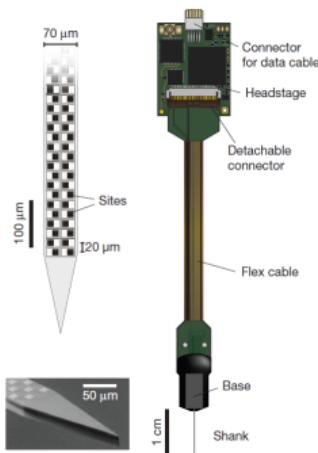
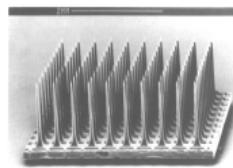
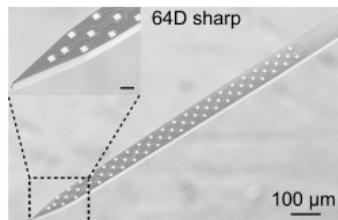
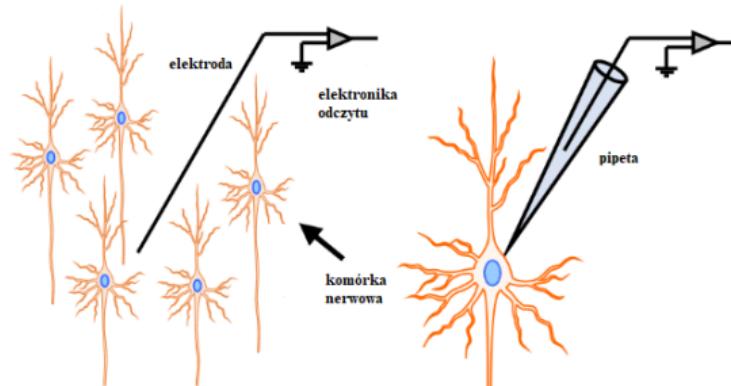
Część I

Tematyka pracy

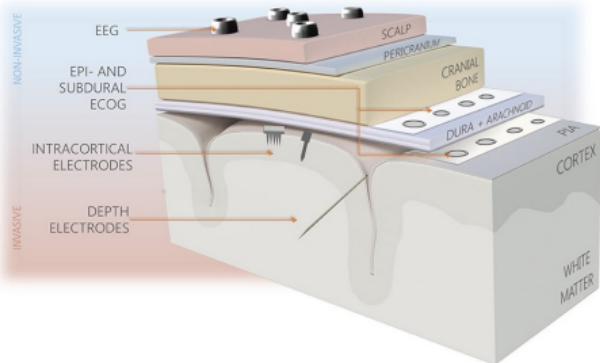
Kierunki rozwoju współczesnych systemów pomiarowych i matryc mikroelektrodowych

Techniki pomiarowe wewnętrz i zewnątrzkomórkowe w neurobiologii

- różne amplitudy sygnałów
- inwazyjność badań
- obszar badań

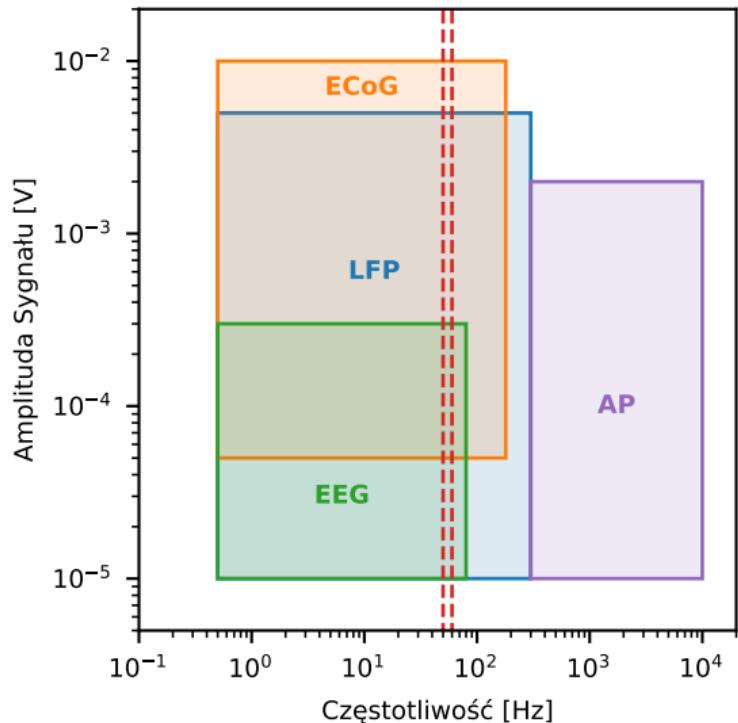


Zakresy amplitud i częstotliwości sygnałów neuronowych

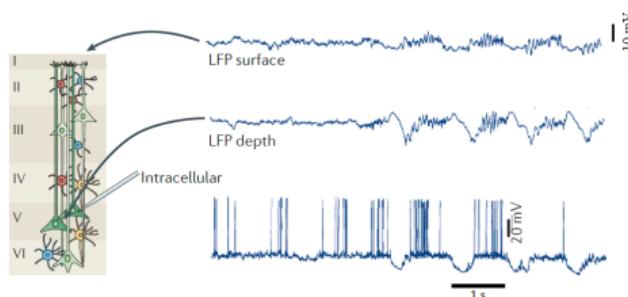
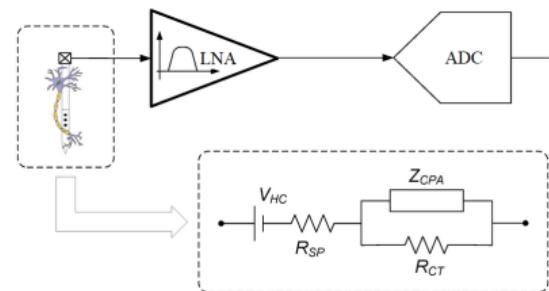


Metody rejestracji

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



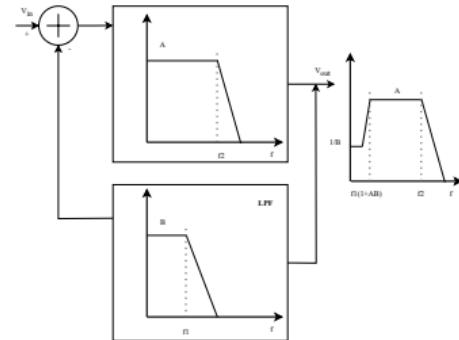
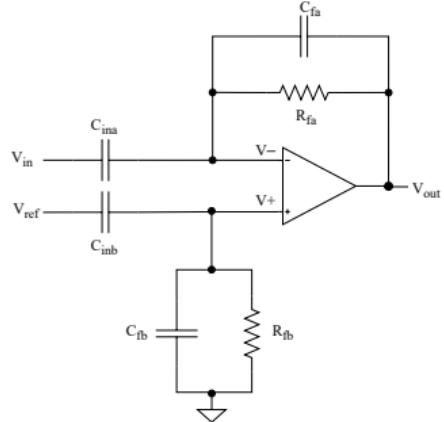
Kanał rejestracji neuronowej z wykorzystaniem elektrod zewnętrzkomórkowych



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°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



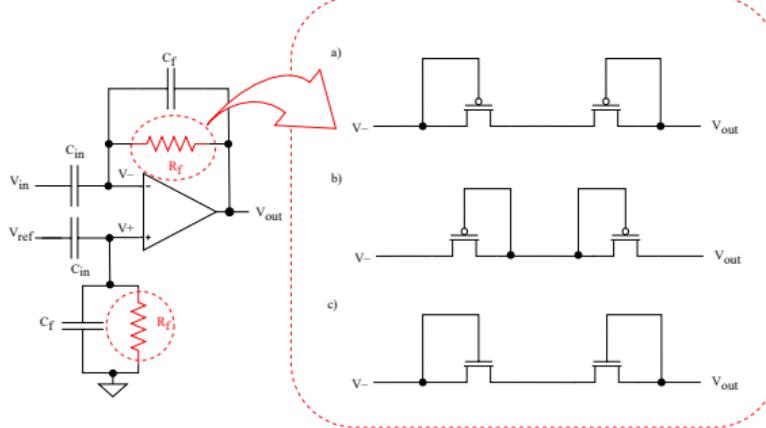
- Dolna częstotliwość graniczna rzędu $\sim 1 \text{ Hz}$
- Pojemności w CMOS $\sim \text{fF} \cdot \mu\text{m}^{-2}$
- Rezystancja sprzężenia zwrotnego $\sim \text{T}\Omega$
- Brak składowej stałej od elektrody
- Wydajność szumowa

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

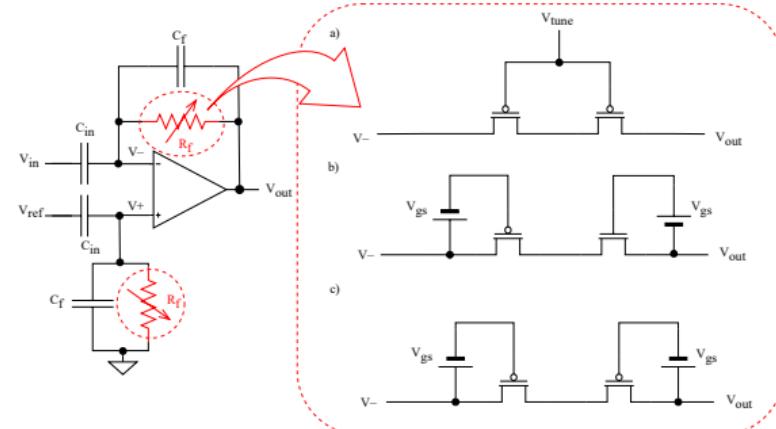
Część II

Liniowy pseudo-rezystor

Podstawowe rozwiązania pseudo-rezystorów



brak możliwości regulacji wartości rezystancji

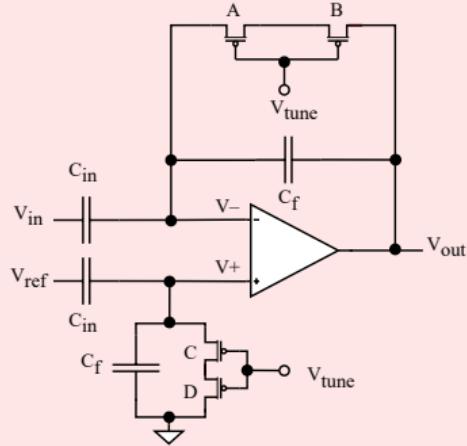


możliwość sterowania częstotliwością graniczną

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

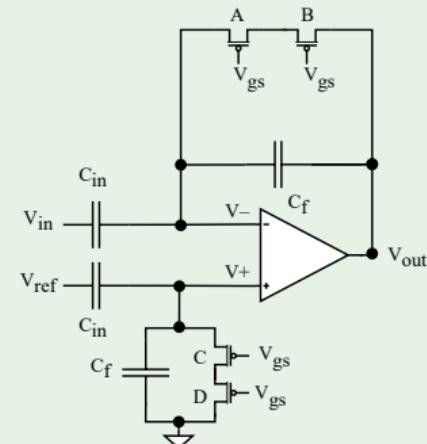
Zmienne napięcia na bramce –
variable – V_{gs}

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

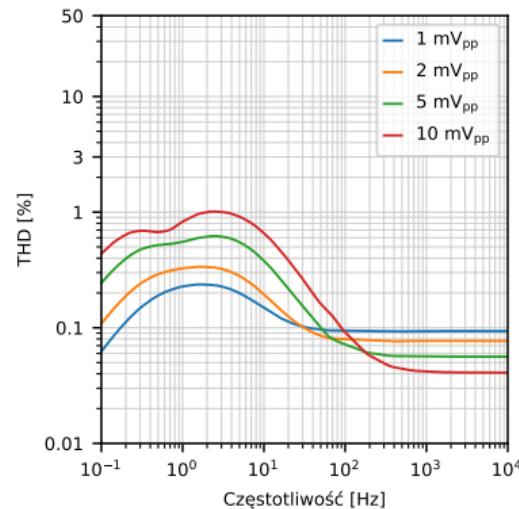
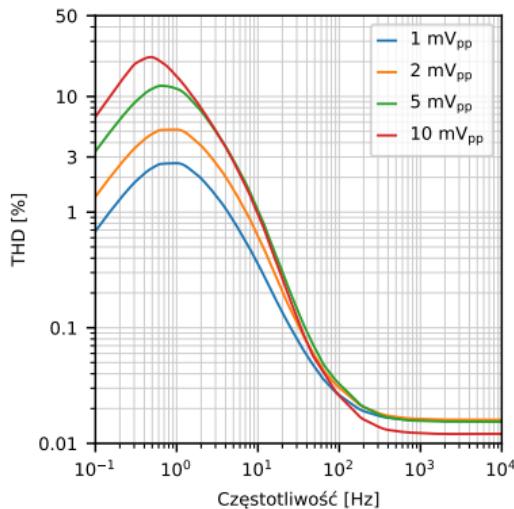


Analiza Transient sprzężenia AC

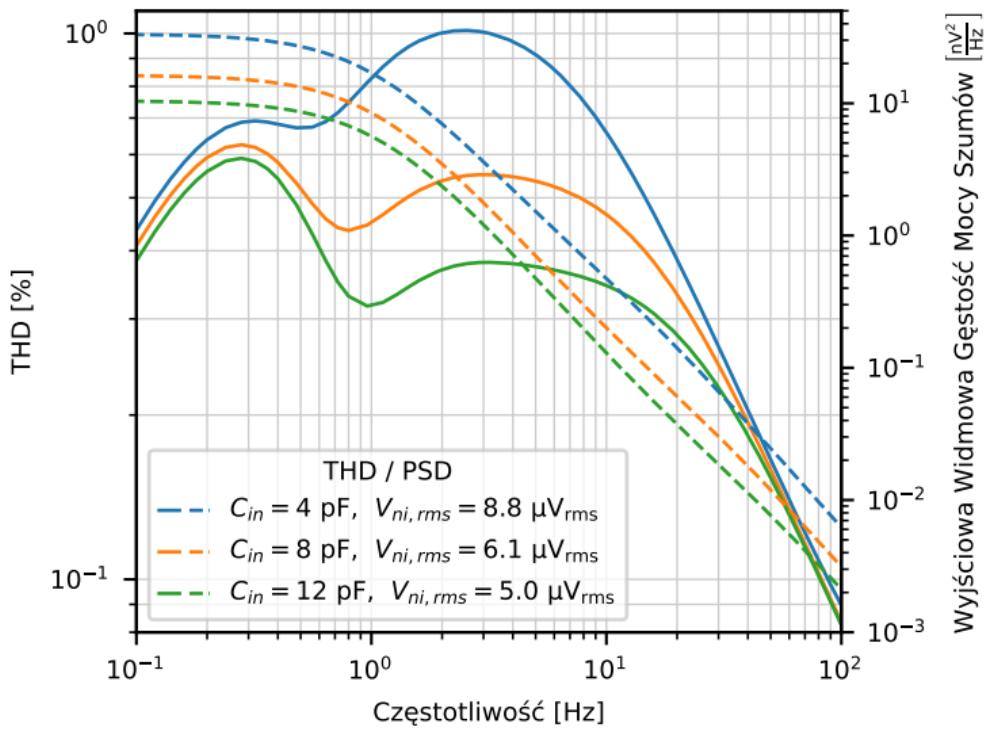
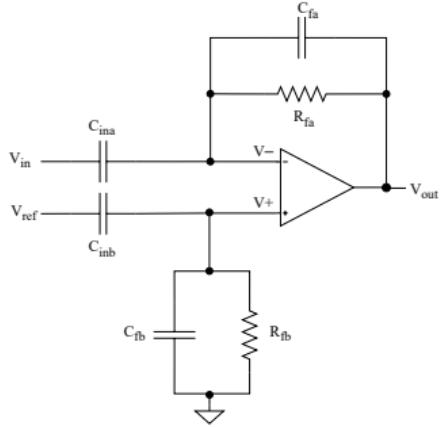
Ustawienia symulacji

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

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



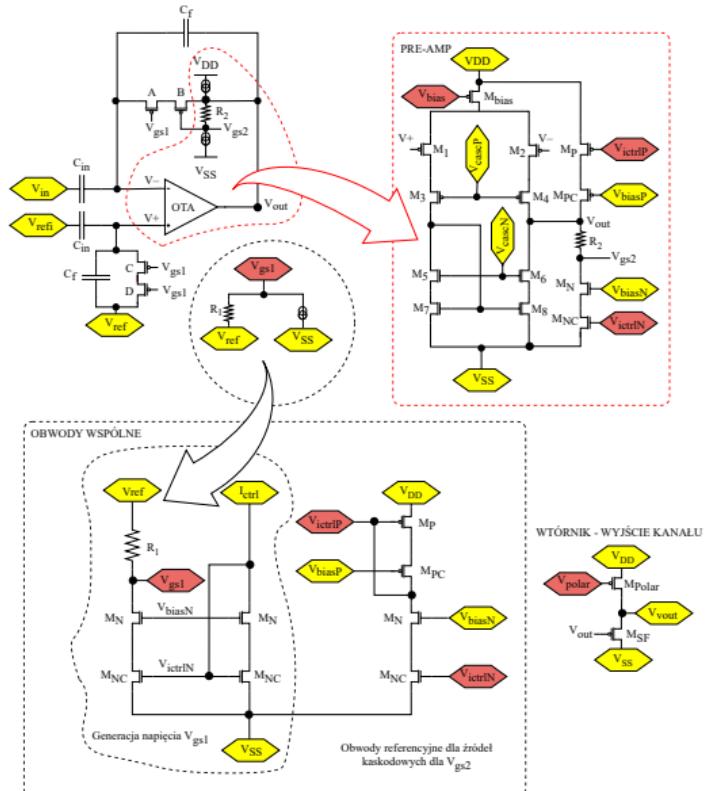
Wpływ pojemności wejściowych na szумy i zniekształcenia



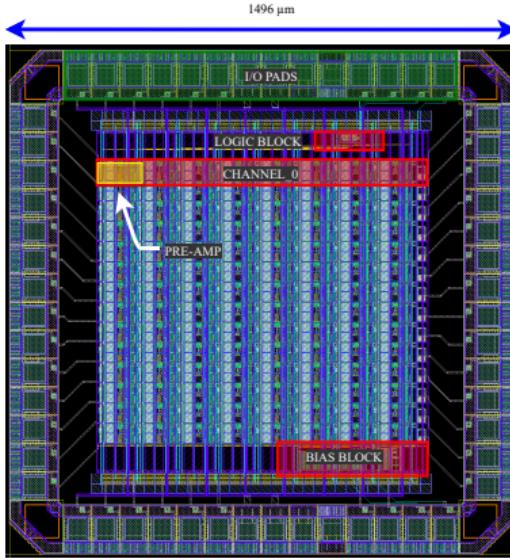
Część III

Operacyjny wzmacniacz transkonduktancyjny

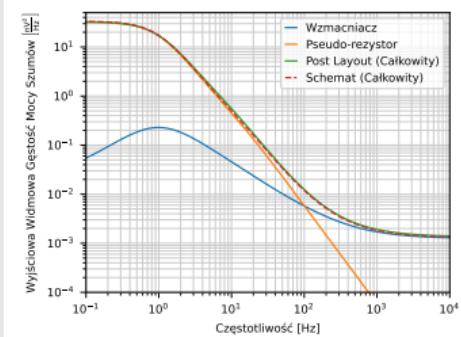
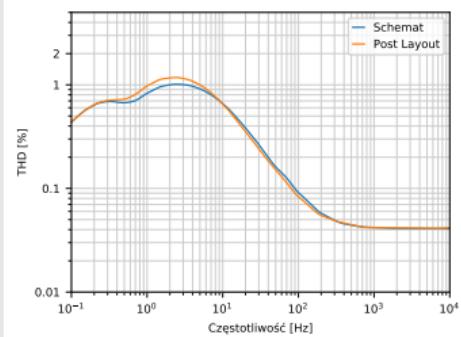
Przedwzmacniacz z wejściowym obwodem sprzęgającym AC



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



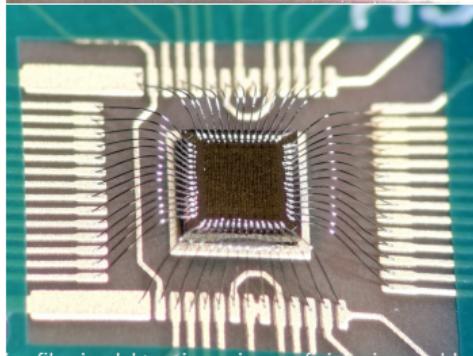
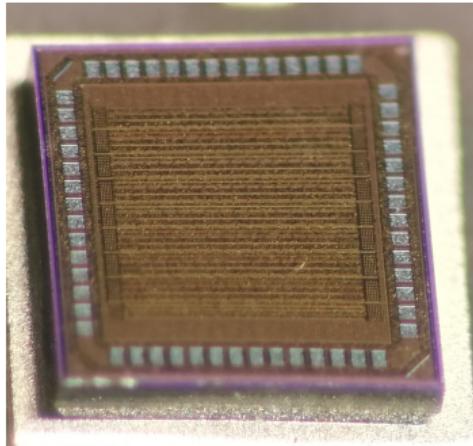
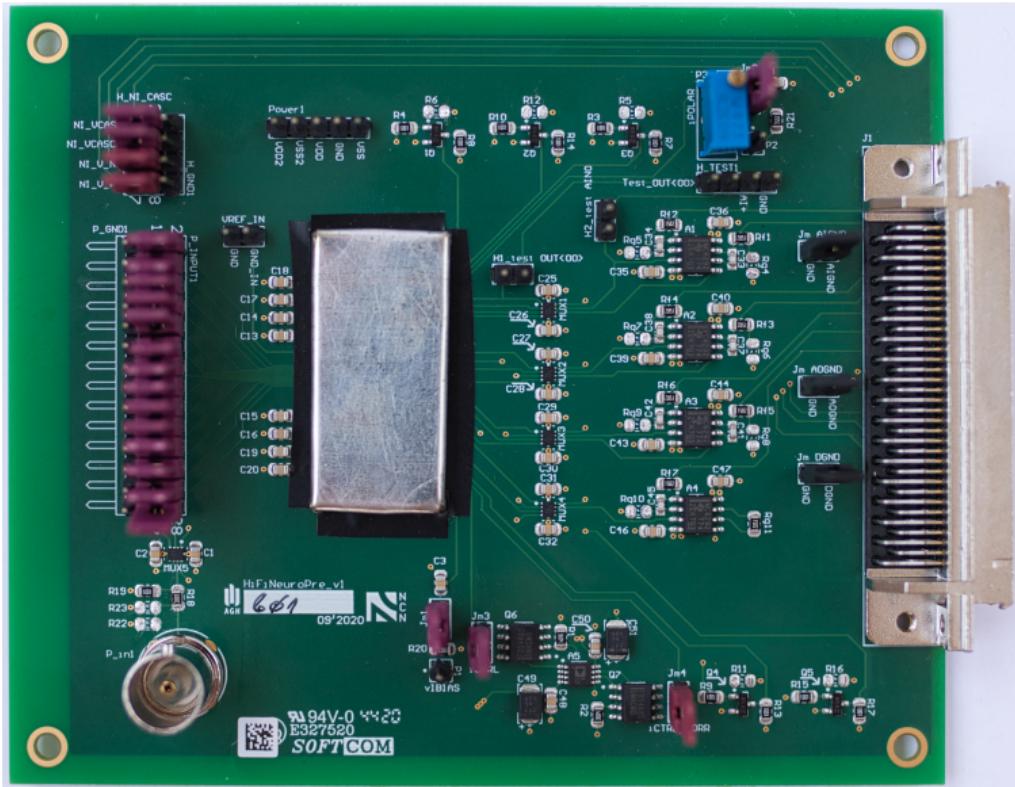
Symulacje Post-Layout



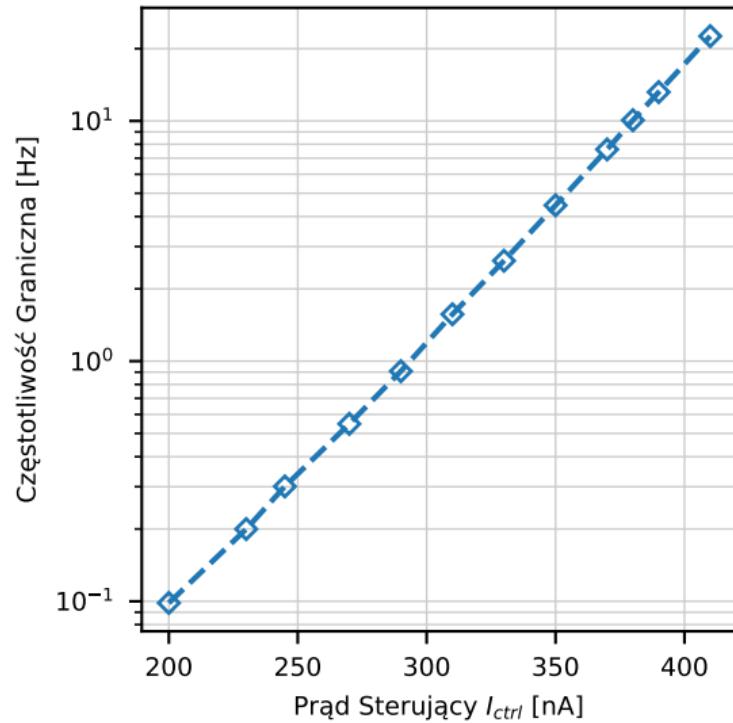
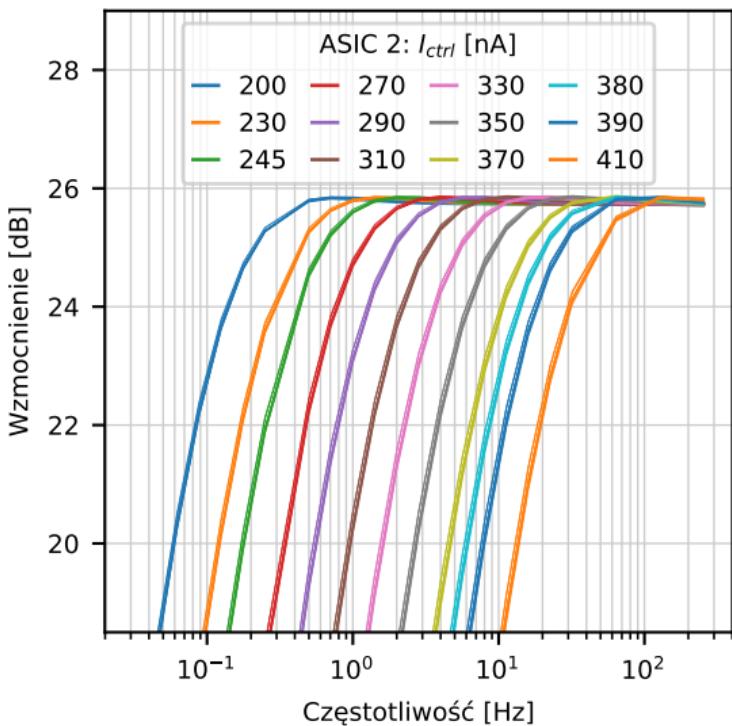
Część IV

Weryfikacja elektroniczna i neurofizjologiczna układu scalonego HiFiNeuroPre

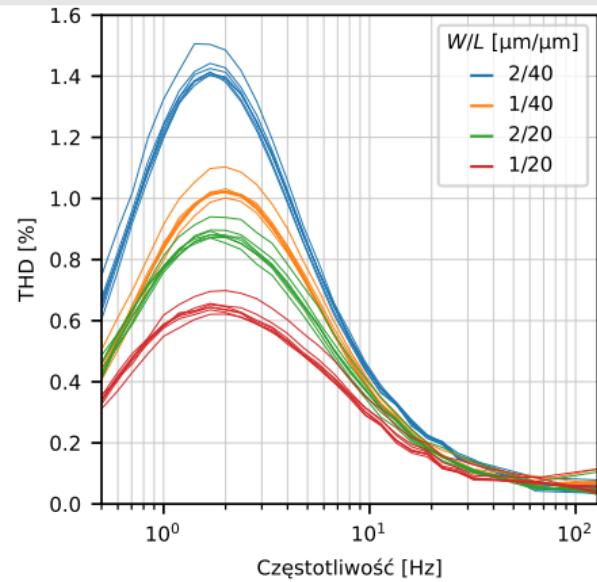
System testowy



Wzmocnienie, częstotliwość graniczna

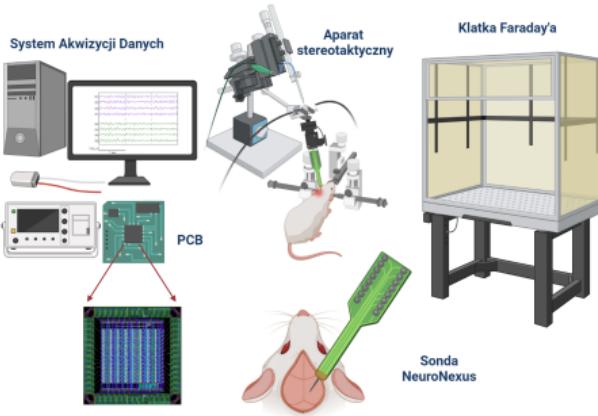


Konfiguracje przedwzmacniacza

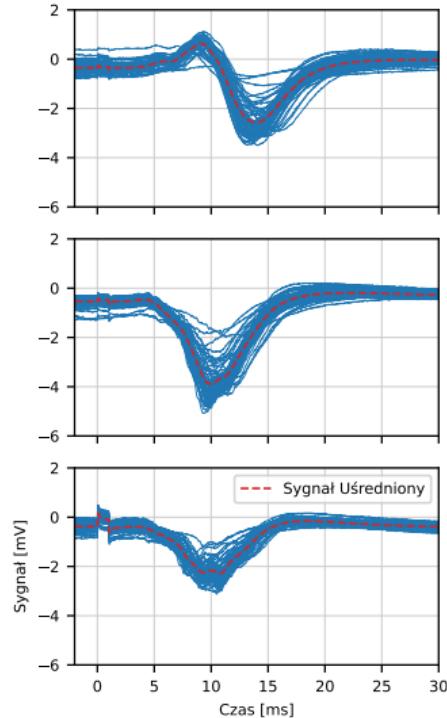


todo

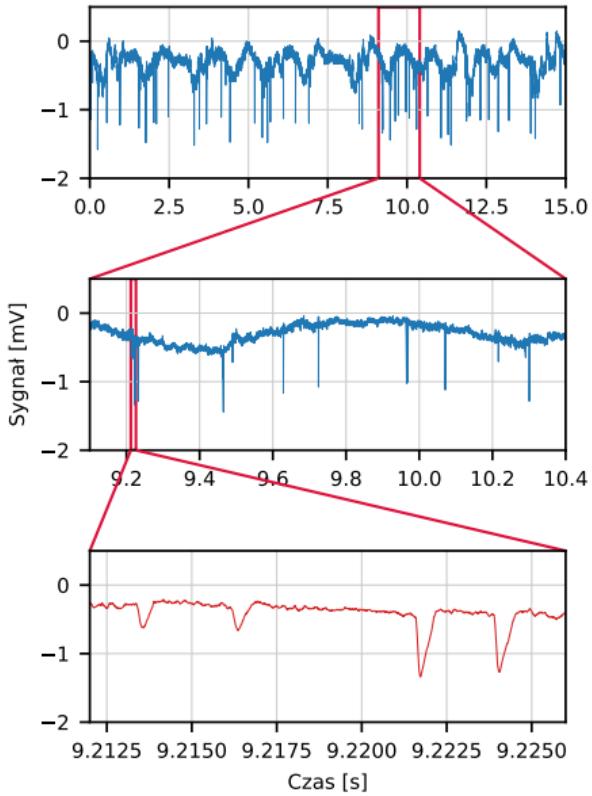
System pomiarowy do akwizycji sygnałów neurobiologicznych



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.

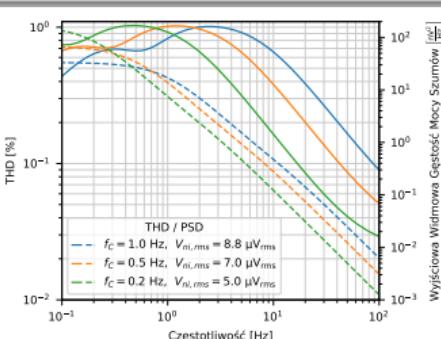
dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

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

Ze powodu specyfiki pracy tezy pracy tożsame są z celem pracy, czyli możliwością realizacji zintegrowanego układu scalonego w technologii CMOS o zadanych parametrach.

[...] 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: $10 \text{ mV}_{\text{pp}}$. 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 [μV_{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 [μA]	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.

Oczywiście możliwe jest podanie sztywnych wartości granicznych istotnych parametrów jednak na etapie pisania pracy uznano, że będzie to miało formę sztuczną ponieważ projekt zakładał eksplorowanie tychże parametrów. Dzięki tej formie miałam chęć przedstawienie, że optymalizacja dokonywana jest na etapie dostosowania do konkretne zastosowanie i jest zwykle wykonywana kosztem wyborów ponieważ często wymagania są przeciwnostawne w możliwości co do ich realizacji.

Jak już przedstawiano wcześniej porównanie wartości THD mijałoby się z celem ze względu na brak tego typu zestawień dla szerokiego spektrum, zaś w przypadku innych parametrów jak szумy, powierzchnia, pobór mocy jest wypadkową optymalizacji projektowej o której wspomniano powyżej.

[...] Omówiono również inne koncepcje eliminacji składowej stałej: technikę wzmacniającą 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.

Na etapie pisania pracy uznałem, że treść w rozdziale jest wystarczająca, aby zrozumieć koncepcje związane z eliminacją składowej stałej i powód dla którego zdecydowano się na konkretne rozwiązanie. Rosnąca popularność tego typu rozwiązań widać w systemach komercyjnych, które nie są możliwe do dostosowania do wielkoskalowych systemów aplikowanych w mózgu dla których projektowano rozwiązanie w pracy dlatego zdecydowano się nie rozszerzać o ten aspekt pracy.

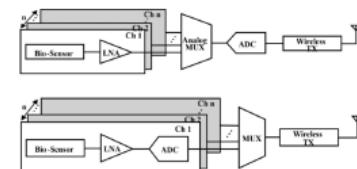
dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

[...] 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 wydawać się dłuża, warto podkreślić, że jej rozmiar jest wynikiem interdyscyplinarnego charakteru tego projektu. Moim celem było dostarczenie wszechstronnej wiedzy, aby sprostać potrzebom różnych grup odbiorców, w tym osób korzystających z wyników oraz profesjonalistów projektujących podobne systemy. Ta obszerność miała pozwolić na lepsze zrozumienie charakterystyk sygnałów LFP i AP oraz zwiększyć użyteczność przedstawionych badań do innych zastosowań poprzez sprowadzenie sygnałów do pojęć znanych grupie projektantów.

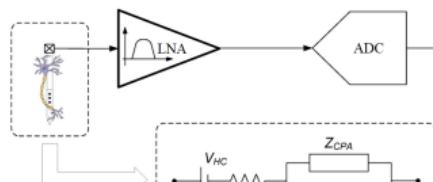
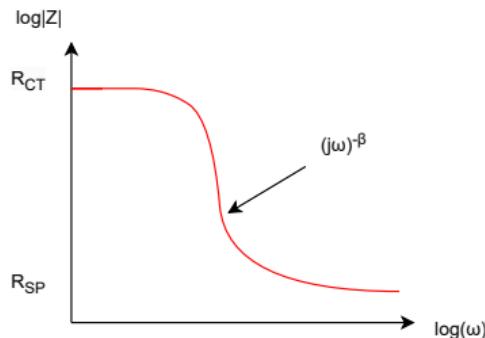
[...] Niektóre używane w pracy określenia moim zdaniem są nietypowe, głównie dotyczy to określenia "**układ odczytu**" zamiast wzmacniacz. [...] Podobnie użycie słowa "**zaadresowany**". Wyrażenie "**mniejsze multipleksery**" (str. 34) jest mało precyzyjne, a właściwie w użytym kontekście nieprawidłowe. 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**.

Schematy rodzajów
architektury systemów
wielokanałowych do rejestracji
biosygnałów elektrycznych.



Układ odczytu jest pojęciem szerszym aniżeli wzmacniacz, który jest częścią układu odczytowego. Pojęcie mniejsze multipleksery jest niefortunne - chodziło o multipleksery obejmujące mniej kanałów wejściowych.

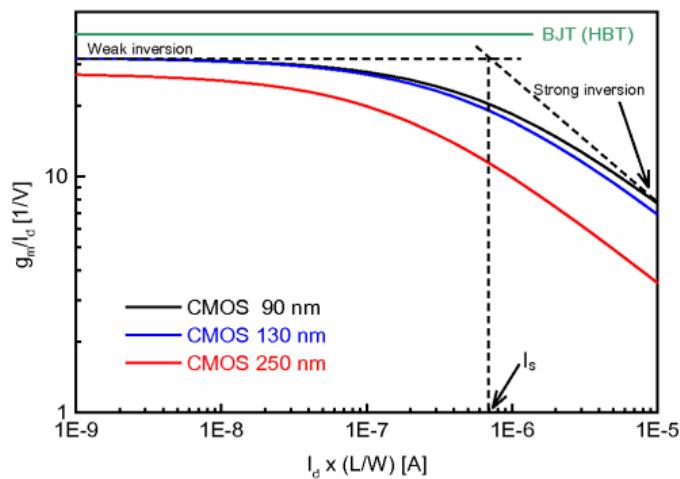
[...] **Impedancja mikroelektrody jest ważnym parametrem dla rejestracji zewnątrzkomórkowej, ponieważ określa szумy elektrody oraz tłumienie sygnału.** – w jaki sposób impedanca określa te parametry?



[...] 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 zależy od właściwości sygnału zgodnie z twierdzeniem Nyquista. W powyższym stwierdzeniu niefortunnie próbowało przekazać, że częstotliwość próbkowania wielkoanałowego ADC zależy od architektury i elosci kanałów obsługiwanych. Dlatego częstotliwość próbkowania w systemie TDM musi być wyższa, aby uwzględnić dodatkowe wymagania wynikające z próbkowania wielu kanałów w sekwencji.

[...] 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].



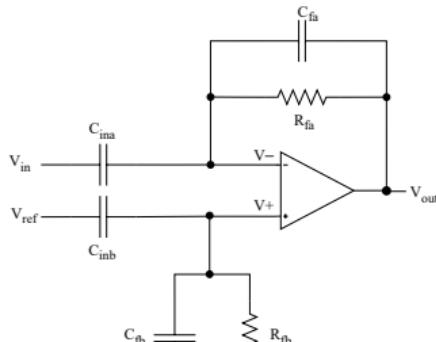
Stosunek transkonduktancji do prądu drenu w funkcji znormalizowanego prąd drenu dla trzech technologii

dr hab. inż. Dariusz Komorowski, prof. PŚ

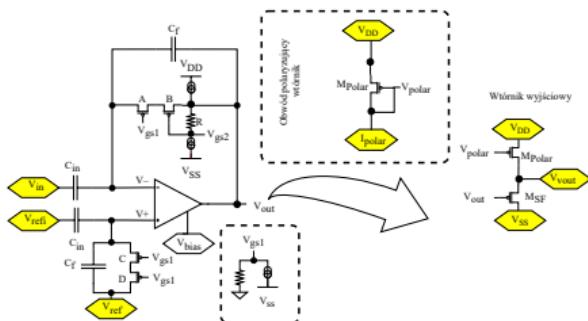
[...] Niektóre fragmenty tekstu są dla mnie niezrozumiałe lub budzą pewne wątpliwości [...] ale przy stałym stosunku $C_{in}/C_f = 20V/V$

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 pojawienia się składowej stałej napięcia na wejściu wzmacniacza spowodowanego zjawiskami zachodzącymi na styku tkanka-elektroda wartość ta nie jest zbyt duża i czy nie będzie powodowała nasycenia stopnia wejściowego wzmacniacza?



[...] 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.



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.

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

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

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.

Celem w tej pracy była głównie analiza nieliniowości pseudorezystora, dlatego skupiono się na opisie tej struktury i jej własności. Oczywiście na etapie projektu badano wpływ Niemniej jednak, rozumiem, że parametry wzmacniacza, takie jak CMRR i napięcie offsetu, są istotne w kontekście całej analizy. Chociaż nie były one głównym celem pracy, doceniamy sugestie dotyczące ich bardziej obszernej analizy. Moim celem było szczegółowe opisanie i analiza własnych, oryginalnych rozwiązań, które były głównym wkładem w dziedzinie. W efekcie, mniej miejsca poświęciłem opisowi struktury wzmacniacza.

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).

Chciałam podkreślić, że wybór był wynikiem identyfikacji problemu występującego w literaturze, gdzie współczynnik THD często podawany jest dla zakresu, w Oczywiście na etapie przygotowania projektu (podczas optymalizacji OTA skupiono się na na podstawowych parametrach) jednak ze względu na inny cel pracy nie przedstawiono tego etapu w sposób dokładny gdyż .

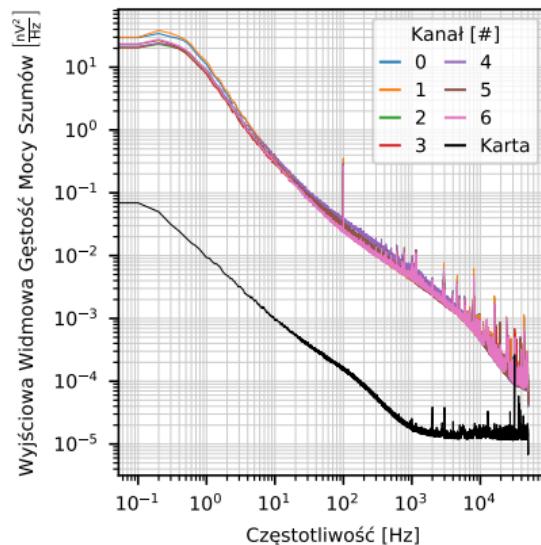
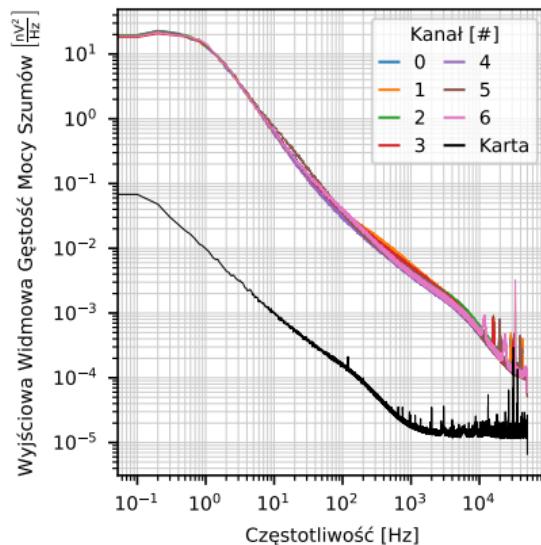
Niemôžliwe jest uwzględnienie wszystkich parametrów wzmacniacza w jednym projekcie badawczym, ale doceniamy sugestie dotyczące innych istotnych parametrów, takich jak liniowość fazy, odpowiedź na skok jednostkowy i szybkość narastania.

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.

Dziękuję za zwrócenie uwagi na brak odpowiednich przykładów uzasadniających znaczenie współczynnika THD dla niskoczęstotliwościowych składowych sygnałów w 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 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 hierarchię źródeł. Rozumiem, że różni czytelnicy preferują różne metody sortowania, ale w tym przypadku uznałem, że sortowanie numeryczne za bardziej odpowiednie.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] Cytowanie na ogólnie 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.

dr hab. inż. Teodor Buchner

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

Dziękuję za uwagę dotyczącą rysunków w pracy. Chciałabym wyjaśnić, że te rysunki stanowią autorytaty 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 autorytaty, 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.

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).

Zgadza się, że protokół badania nie został dokładnie opisany, ale chciałem podkreślić, że aspekt biologiczny, w tym przygotowanie zwierzęcia oraz samo badanie odpowiedzi wywołanej na mechaniczne drażnienie wibrysem, nie był w zakresie mojej odpowiedzialności.

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 pełni rozumiem, że publikacja kodu źródłowego może być ważna z punktu widzenia oceny kompetencji, ale w niektórych przypadkach, ze względu na specyfikę badań lub innych czynników, może to być trudne lub niemożliwe.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] *w analizie stanu sztuki Autorka pomija dorobek jej macierzystego zespołu, chociaż go cytuje [...]. 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.*

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] 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 znacznie dla działalności wzmacniacza.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] Uwaga co do modelowania, wynikająca z rozważań na str. 60 jest taka, że konsekwencją zależności C_{gb} od V_{gb} jest obecność wyrazu kwadratowego w zależności $I_{gb}(U_{gb})$ – warto rozważyć cząstkową publikację tego wyniku.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] 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.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] 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.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] 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).

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 [...]

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] 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_{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.

dr hab. inż. Teodor Buchner

[...] 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.

[...] 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 [μV_{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 swoą 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 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 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 odwoływania 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.

[...] 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:

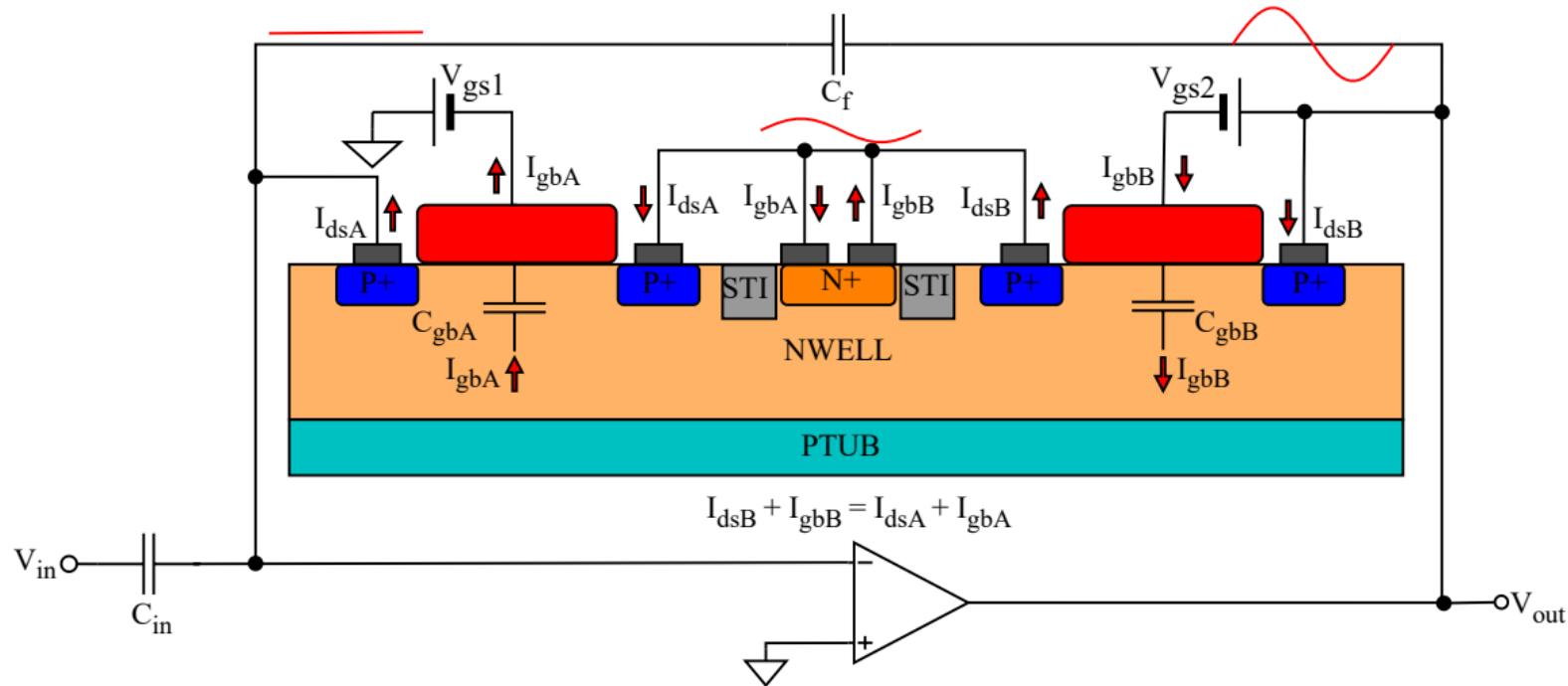
prof. dr hab. inż. Władysław DĄBROWSKI

dr inż. Paweł HOTTOWY

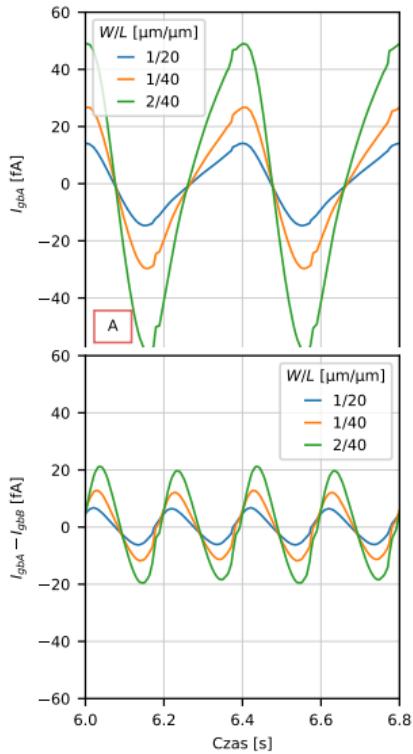
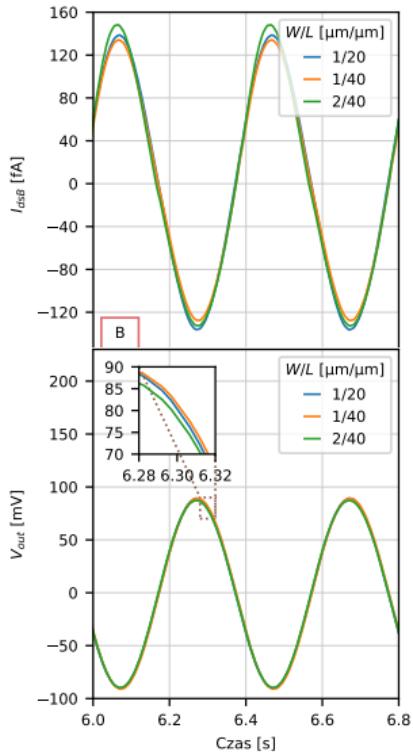
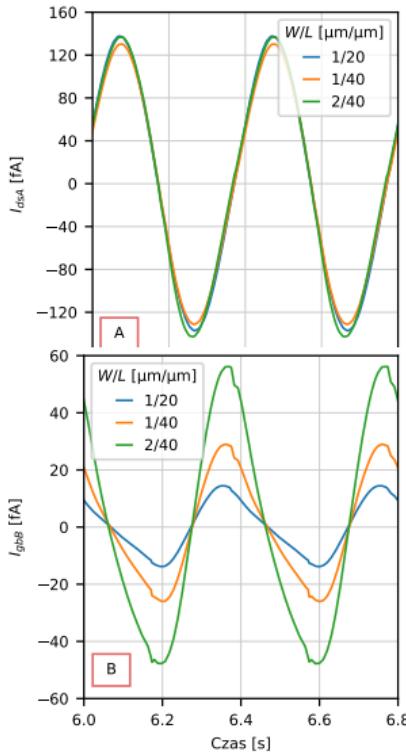
Część VII

Dodatki

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

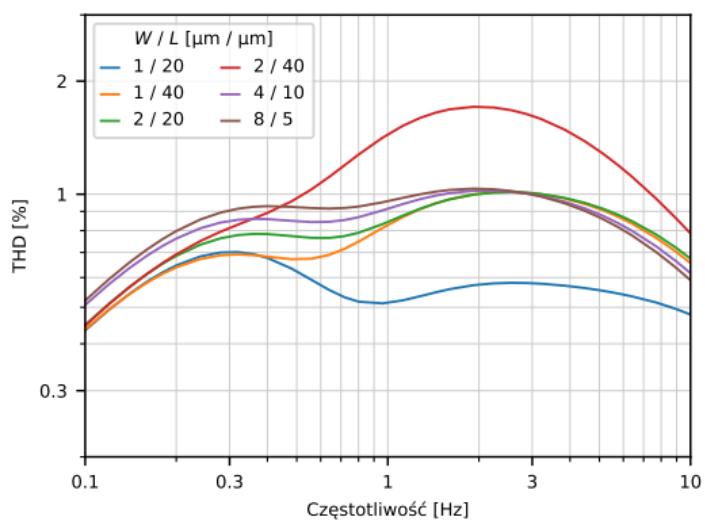


Wpływ pojemnościowych prądów bramki pseudo-rezystorów na zniekształcenia w technologii 180 nm

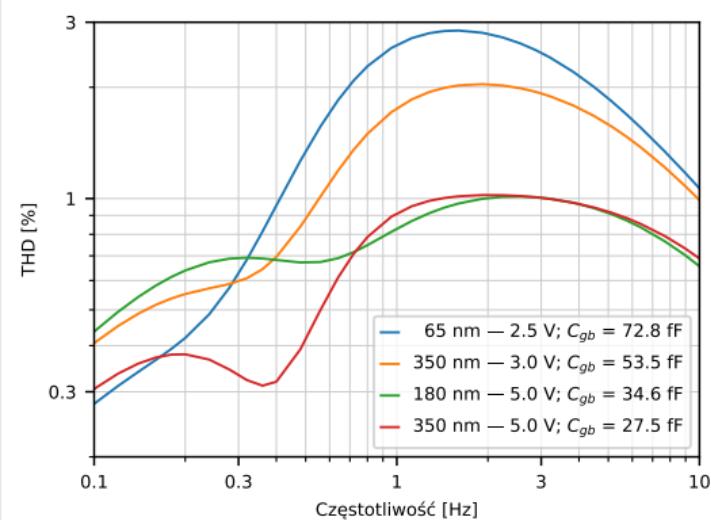


Skalowanie zniekształceń z powierzchnią bramki i grubością tlenku tranzystorów tworzących pseudo-rezistory

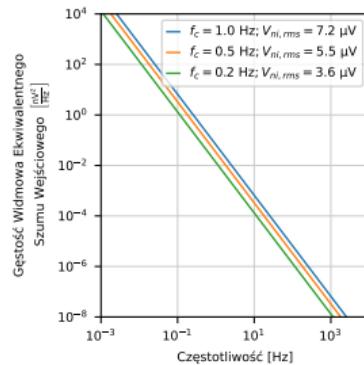
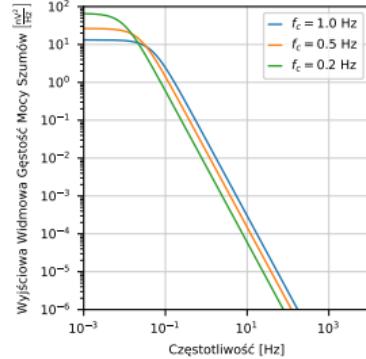
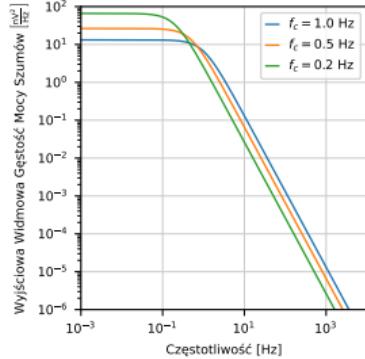
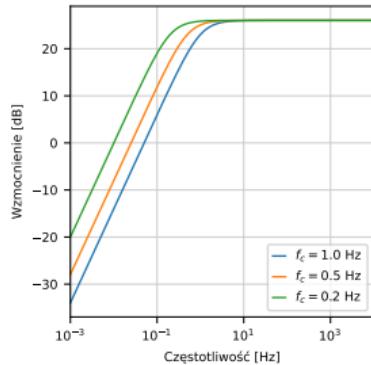
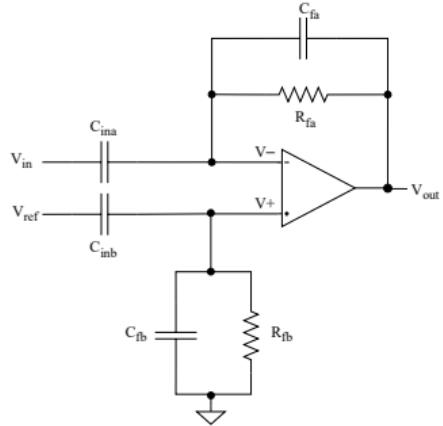
Powierzchnia bramki – technologia 180 nm



Zależność od technologii

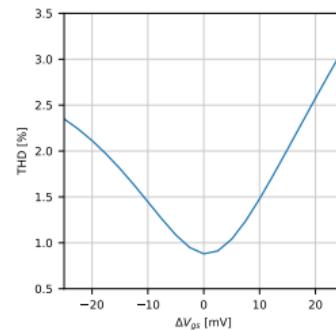
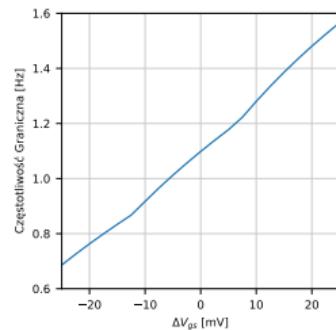
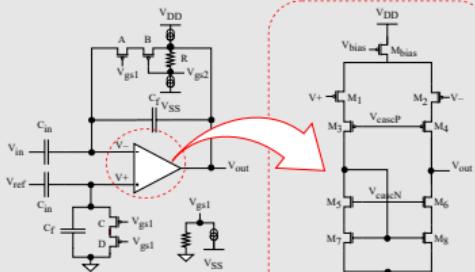


Szumy

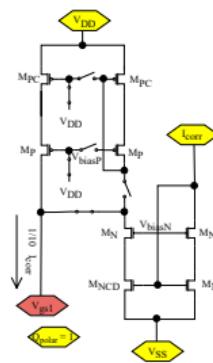
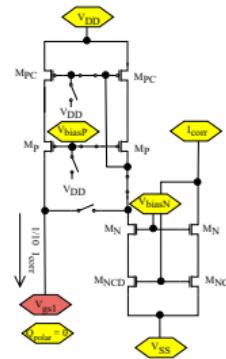
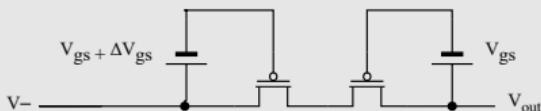


Blok korekcji

Projekt kanału

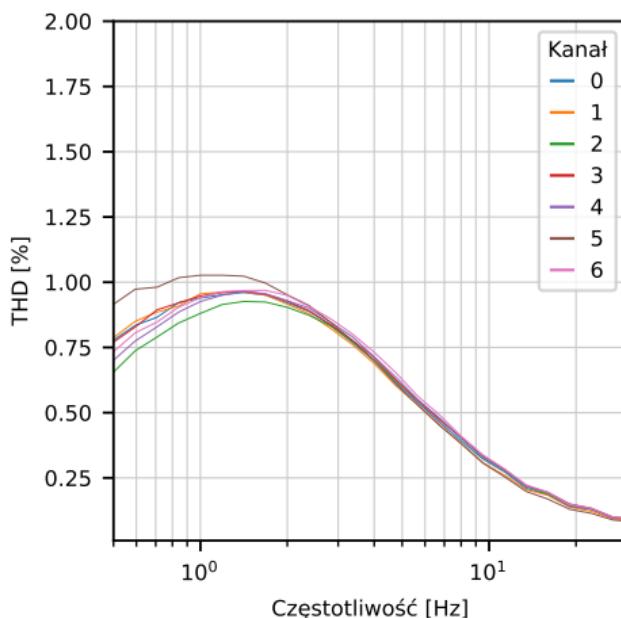


Wyzwania do rozwiązania

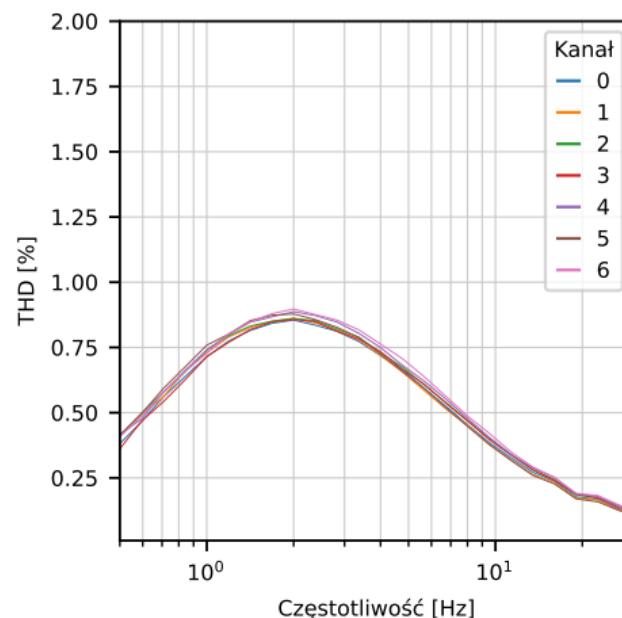


Pomiary zniekształceń harmonicznych – wpływ korekty

Brak globalnej korekty



Korekta globalna



Jednorodność kanałów

