

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

Agnieszka Porowska

Nr albumu: 323371

**Analiza zmian w sygnale LFP
związanych z treningiem
wzrokowym i stymulacją
elektryczną w strukturach układu
wzrokowego szczura.**

**Praca magisterska
na kierunku ZASTOSOWANIA FIZYKI W BIOLOGII I MEDYCYNIE
specjalność Neuroinformatyka**

Praca wykonana pod kierunkiem
dra hab. Jarosława Żygierewicza

Zakład Fizyki

Instytut Fizyki Doświadczalnej

Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

oraz

prof. dr hab. Wioletty Waleszczyk

Pracownia Neurobiologii Widzenia

Instytut Biologii Doświadczalnej im. M. Nenckiego PAN

Czerwiec 2015

Oświadczenie kierującego pracą

Potwierdzam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i kwalifikuje się do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie tytułu zawodowego.

Data

Podpis kierującego pracą

Oświadczenie autora (autorów) pracy

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w wyższej uczelni.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja pracy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Data

Podpis autora (autorów) pracy

Streszczenie

W pracy wykorzystano dane pochodzące z eksperymentów na szczurach w dwóch paradygmatach. Dla obu warunków doświadczalnych zarejestrowano sygnał kontrolny, czyli odpowiedź układu wzrokowego na bodziec świetlny. Następnie jedną grupę szczurów od razu poddano treningowi wzrokowemu, i zbierano sygnał po jednej, dwóch i trzech godzinach od początku treningu. W drugiej grupie również rejestrowano efekt treningu wzrokowego w tych samych odstępach czasowych, jednak zanim przystąpiono do treningu, przez 1 min stymulowano oko sygnałem elektrycznym prostokątnym o częstotliwości 20 Hz i amplitudzie (peak-to-peak) $200\text{ }\mu\text{A}$. Elektrody zostały umieszczone bezpośrednio w mózgu szczura w strukturach układu wzrokowego. W pracy wykorzystano po 13 elektrod w obydwu eksperymentach wybranych na podstawie kształtu odpowiedzi na bodziec. Sygnały filtrowano filtrem Butterwortha oraz filtrem notch (pasmowozaporowym). Do analizy wykorzystano nieznormalizowaną kierunkową funkcję przejścia (nDTF). Istotność statystyczną na poziomie 95 procent sprawdzono za pomocą bootstrapu.

Słowa kluczowe

analiza sygnałów, potencjał wywołany, kora wzrokowa, układ wzrokowy, Direct Transfer Function, nDTF

Dziedzina pracy (kody wg programu Socrates-Erasmus)

13.2 Fizyka

Tytuł pracy w języku angielskim

Analysis of changes in LFP signal related to visual training and electric stimulation in rat visual system structures.

Spis treści

| | |
|--|----|
| Cel pracy | 5 |
| 1. Wprowadzenie | 7 |
| 1.1. Wstęp | 7 |
| 1.2. Budowa układu wzrokowego | 8 |
| 1.3. Lokalne potencjały polowe | 9 |
| 1.4. Połączenia między warstwami | 10 |
| 1.4.1. Kora wzrokowa | 10 |
| 2. Pochodzenie danych doświadczalnych | 11 |
| 2.1. Dane doświadczalne | 11 |
| 2.2. Procedury eksperymentów | 11 |
| 2.2.1. Eksperyment A | 11 |
| 2.2.2. Eksperyment B | 12 |
| 2.3. Przygotowanie danych do analizy | 12 |
| 3. Metodologia | 15 |
| 3.1. Uśrednianie potencjałów wywołanych | 15 |
| 3.1.1. Opis metody | 15 |
| 3.1.2. Statystyka | 16 |
| 3.2. Wielokanałowy model autoregresyjny | 16 |
| 3.3. Połączenia funkcjonalne | 17 |
| 3.3.1. Przyczynowość w sensie Grangera | 17 |
| 3.3.2. Kierunkowa funkcja przejścia | 17 |
| 3.3.3. Opis metody | 18 |
| 3.3.4. Statystyka | 18 |
| 4. Wyniki | 19 |
| 4.1. Uśrednianie EP | 19 |
| 4.1.1. Analiza uśrednionych potencjałów w czasie | 20 |
| 4.1.2. Statystyka | 22 |
| 4.2. Połączenia funkcjonalne | 24 |
| 4.2.1. CxC do LGN | 24 |
| 4.2.2. CxC do SC | 25 |
| 4.2.3. SC do CxC | 27 |
| 5. Dyskusja | 29 |

Cel pracy

Celem pracy było porównanie odpowiedzi na bodziec wzrokowy poprzedzony treningiem wzrokowym i stymulacją elektryczną.

Rozdział 1

Wprowadzenie

1.1. Wstęp

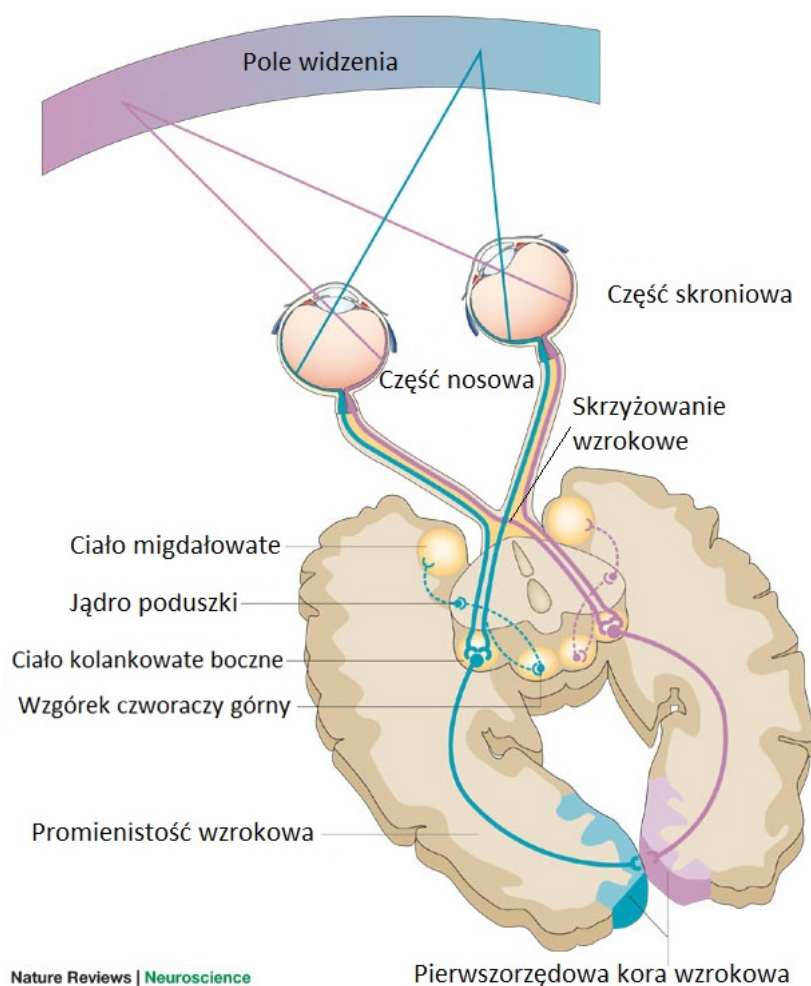
Odkrycie aktywności elektrycznej w mózgu przypisuje się Richardowi Catonowi i Adolfovi Beckowi, którzy niezależnie rejestrowali zmiany potencjału elektrycznego bezpośrednio z mózgu zwierząt. Skutkiem tych doświadczeń było odkrycie najpierw elektokortykogramu (ECoG) a następnie elektroencefalogramu (EEG). Za twórcę nieinwazyjnej metody rejestrowania sygnału z powierzchni skóry uznaje się Hansa Bergera (Coenen and Zayachkivska, 2013). Dalsze doświadczenia pozwoliły na sformułowanie wniosku, iż w spontanicznej aktywności mózgu można wyróżnić pasma o określonej częstotliwości i amplitudzie, które mają różne właściwości. Do najważniejszych zaliczają się:

- pasmo delta: 0 - 4 Hz
- pasmo theta: 4 - 7 Hz
- pasmo alfa: 8 - 13 Hz
- pasmo beta: 15 - 30 Hz
- pasmo gamma >30 Hz. (Schomer and Lopes da Silva, 2010)

Już pod koniec lat 40 ubiegłego wieku zauważono, że w wyniku prezentacji bodźca w zapisie EEG pojawia się słabo widoczna odpowiedź na ten bodziec. Pionierem badań w tym zakresie był G.D. Dawson który zarejestrował odpowiedzi na bodziec na kilku kliszach fotograficznych i po nałożeniu ich na siebie dostrzegł wzmocnienie odpowiedzi. Uśredniony sygnał z kilku realizacji zsynchronizowanych względem bodźca nazywa się potencjałem wywołanym EP (z *ang. evoked potentials*) (Schomer and Lopes da Silva, 2010). Amplituda potencjału jest różna dla każdego organizmu a także badanej struktury. Jednakże wielokrotne powtarzanie serii jednakowych bodźców, zwane po prostu treningiem wzrokowym, powoduje jej wzmocnienie (Hager and Dringenberg, 2010). To wzmocnienie jest zauważalne jako zwiększenie amplitudy odpowiedzi na bodziec. Jednocześnie obserwuje się polepszenie funkcji wzrokowych za pomocą nieinwazyjnego stymulowania mózgu prądem o niskiej amplitudzie (Schulz et al., 2013). W mojej pracy sprawdzę, czy dodatkowa stymulacja prądem przed treningiem wzrokowym wpłynie na zwiększenie odpowiedzi na bodziec.

1.2. Budowa układu wzrokowego

Na Rysunku 1.1 przedstawiono schemat organizacji układu wzrokowego. Informacja wzrokowa z siatkówki dociera do kory wzrokowej dwiema równoległymi drogami. Obie zaczynają się na siatkówce, gdzie bodźce świetlne odbierane przez fotoreceptory, są przetwarzane przez szereg komórek nerwowych i w postaci zmian potencjału są przekazywane do nerwu wzrokowego. Tu drogi się rozdzielają. Pierwsza z nich, zwana kolankowatą drogą wzrokową, prowadzi przez część grzbietową jądra kolankowatego bocznego (*ang. dorsal lateral geniculate nucleus, dLGN*) do pierwszorzędowej kory wzrokowej (V1), a stamtąd do pól korowych wyższych rzędów. Druga droga, zwana pozakolankowatą drogą wzrokową, wiedzie przez wzgórek czworaczy górny przez kompleks jądra tylnobocznego poduszki i dociera, do pierwszorzędowej kory wzrokowej i dalej do pól korowych wyższych rzędów. (Waleszczyk et al., 2004).



Rysunek 1.1: Schemat układu wzrokowego (Hannula et al., 2005).

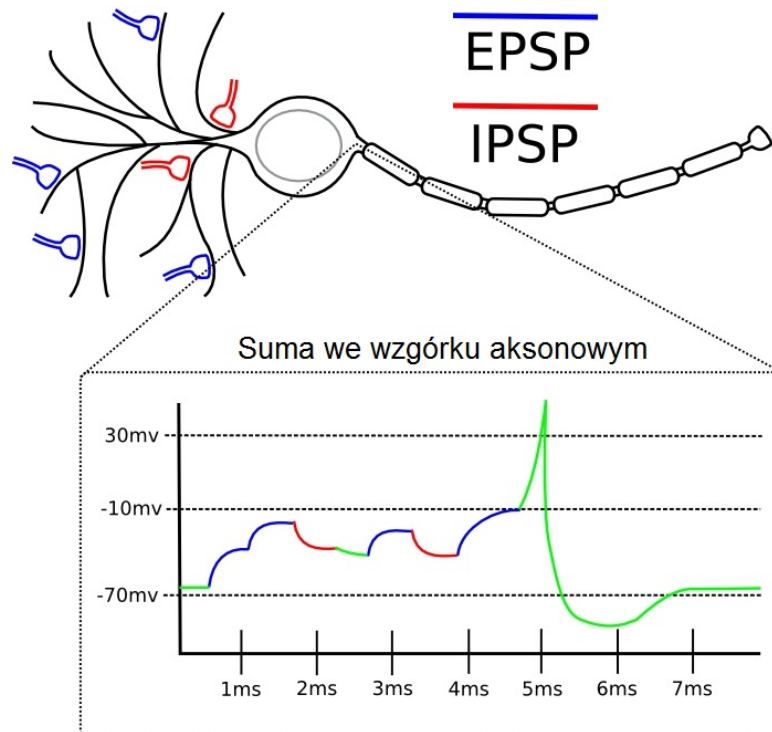
1.3. Lokalne potencjały polowe

Sygnal rejestrowany bezpośrednio z kory i warstw podkorowych nazywany jest elektrokorykogramem. Jest to metoda inwazyjna i tylko w wyjątkowych okolicznościach przeprowadza się ją na ludziach. Jest znacznie dokładniejsza od EEG dzięki temu, że elektrody umieszczone są tuż obok neuronów – zbiera się w ten sposób zapis aktywności mózgu z niewielkiego obszaru. Zapis ten zwany jest lokalnymi potencjałami polowymi (ang. *Local Field Potentials*). W odróżnieniu od sygnału z powierzchni głowy, w LFP rejestruje się nie tylko potencjał postsynaptyczny (Rysunek 1.2), ale także czynnościowy (Rysunek 1.3).

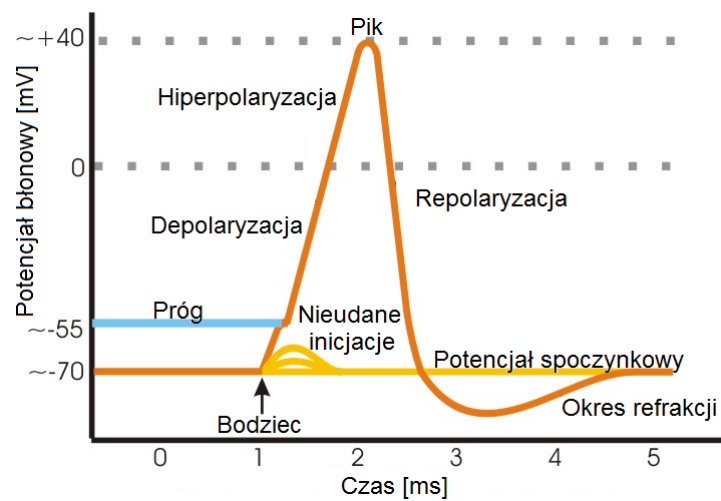
Potencjały postsynaptyczne są to potencjały docierające do dendrytu komórki nerwowej. Występują dwa rodzaje:

- potencjały pobudzające EPSP (z ang. *Excitatory Post-Synaptic Potentials*)
- potencjały hamujące IPSP (z ang. *Inhibitory Post-Synaptic Potentials*)

Pierwsze z nich zwiększają szansę na wywołanie potencjału czynnościowego, a drugie tę szansę zmniejszają. Do neuronu dociera równocześnie wiele potencjałów. W chwili, gdy ich suma przekroczy pewną wartość graniczną, neuron zostaje pobudzony. Generuje potencjał czynnościowy, który propaguje się wzdłuż aksonu.



Rysunek 1.2: Schemat potencjałów postsynaptycznych.



Rysunek 1.3: Schemat potencjału czynnościowego.

1.4. Połączenia między warstwami

U wszystkich badanych struktur można wyróżnić, które mają nieco odmienną budowę lub pełnią różną funkcję.

1.4.1. Kora wzrokowa

W pierwszorzędowej korze wzrokowej (V1) można wyróżnić 6 warstw:

- 3 warstwy nadziarniste
- 1 warstwę ziarnistą
- 2 warstwy podziarniste

Rozdział 2

Pochodzenie danych doświadczalnych

2.1. Dane doświadczalne

Dane wykorzystane w niniejszej pracy pochodzą z eksperymentów przeprowadzonych w Pracowni Neurobiologii Widzenia Instytutu Biologii Doświadczalnej PAN im. Marcelego Nenckiego w Warszawie. Zostały zebrane przez zespół doświadczalny składający się z dra Andrzeja Foika i mgr inż. Katarzyny Żeber w okresie od września do grudnia 2014 r.

W każdym doświadczeniu wykorzystano 20 szczurów z gatunku Wistar, z których do analizy wybrano po 2 (łącznie 4). Szczury zostały znieczulone dootrzewnowym zastrzykiem z uretanu (2 ml/kg). W mózgu każdego ze zwierząt umieszczono 4 elektrody:

- 1 po stronie ipsilateralnej względem bodźca – w korze wzrokowej (CxI)
- 3 po stronie konralateralnej względem bodźca:
 - w korze wzrokowej (CxC)
 - we wzgórku czworaczym górnym (SC)
 - w jądrze kolankowatym bocznym (LGN)

Na każdej elektrodzie znajdowało się od 7 do 16 kontaktów.

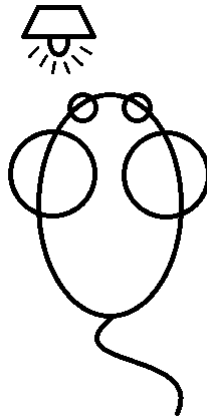
2.2. Procedury eksperymentów

Zastosowano dwie różne procedury eksperymentalne opisane poniżej.

2.2.1. Eksperyment A

Co 15 minut prezentowano serię bodźców w postaci błyskającego światła, którego źródło umieszczono blisko jednego oka (Rysunek 2.1). Jako próbę kontrolną przyjęto pierwszą rejestrację, zakładając, że jest to odpowiedź w stanie nieprzyzwyczajonym do stymulacji. Błyski

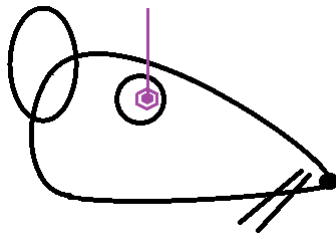
trwały 2 ms i pojawiały się z różną częstotliwością (przerwy wynosiły od 2 do 2,13 s) 300 razy. Sygnał zbierano co godzinę.



Rysunek 2.1: Schemat eksperymentu A.

2.2.2. Eksperyment B

Czterokrotnie przez pół sekundy stymulowano lewe oko prądem elektrycznym za pomocą niewielkiej elektrody umieszczonej na gałce ocznej (Rysunek 2.2). Amplituda prądu wynosiła 2 mA, a częstotliwość 100 Hz. Następnie stymulowano to samo oko bodźcem świetlnym w seriach po 200 błysków (takich jak w eksperymencie A) i co godzinę rejestrowano odpowiedź.



Rysunek 2.2: Schemat stymulacji elektrycznej przeprowadzanej podczas eksperymentu B.

2.3. Przygotowanie danych do analizy

Sygnał został zarejestrowany z częstotliwością 20 kHz, odfiltrowany pasmowo-przepustowo w przedziale 0,3 - 10 kHz oraz wzmacniony 500-krotnie przy użyciu wzmacniacza różnicowego prądu zmiennego firmy A-M SystemsTM (<https://www.a-msystems.com/>).

Uznano, że tak wysoka częstość próbkowania nie jest potrzebna do dalszej analizy, dlatego zdecydowano się zredukować ją do częstości 250 Hz. W tym celu trzykrotnie na przemian filtrowano sygnał dolnoprzepustowym filtrem Butterwortha (częstości odcięcia: 2,5 kHz, 500 Hz

i 100 Hz) i decymowano (ang. *downsampling*). Kolejnym krokiem było odfiltrowanie artefaktów pochodzących od napięcia sieciowego (pasmowo-zaporowy filtr Butterwortha w przedziale 49,5-50,5 Hz) i usunięcie niskich częstotliwości (górnoprzepustowy filtr Butterwortha 1 Hz).

Filtry Butterwortha zostały wybrane ze względu na to, że tylko w niewielkim stopniu przekształcają sygnał. Odbywa się to jednak kosztem niższej skuteczności filtracji. Filtrowano metodą *filtfilt*, ponieważ nie zmienia fazy sygnału wejściowego.

Tak przygotowanie dane pocięto na odcinki od -0,2 s do 1 s (gdzie 0 było momentem wystąpienia bodźca) i uśredniono po realizacjach.

Do dalszej analizy wybrano po 4 kanały z kory wzrokowej (zarówno kontra- i ipsilateralnej względem bodźca) i wzgórką czworaczą oraz jeden kanał z ciała kolankowatego bocznego. Zmniejszenie liczby kanałów było niezbędne z dwóch powodów:

- część kontaktów na elektrodach nie działała poprawnie – rejestrował się szum, a nie właściwy sygnał
- kanały warstw leżących jedna nad drugą były bardzo podobne

Rozdział 3

Metodologia

3.1. Uśrednianie potencjałów wywołanych

3.1.1. Opis metody

VEP (z ang. *Visual Evoked Potential*) jest szczególnym przypadkiem potencjałów wywołanych stanu ustalonego, gdzie stymulacja odbywa się za pomocą fali świetlnej. Stymulacją jest seria krótkotrwałych błysków światła powtarzających się w sposób ściśle periodyczny. W założeniu spontaniczna aktywność ECoG jest procesem stochastycznym (niezależnym, stacjonarnym szumem o średniej zero), a odpowiedź mózgu na każdy z kolejnych bodźców jest niezmienna. Wtedy sygnał mierzony w i -tej realizacji możemy wyrazić jako:

$$x_i(t) = s(t) + n_i(t), \quad (3.1)$$

gdzie $s(t)$ jest rzeczywistym sygnałem, a $n_i(t)$ – składową szumu. Po uśrednieniu N realizacji otrzymuje się:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t) = s(t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i(t). \quad (3.2)$$

Dla szumu o średniej zero, wartość oczekiwana wynosi:

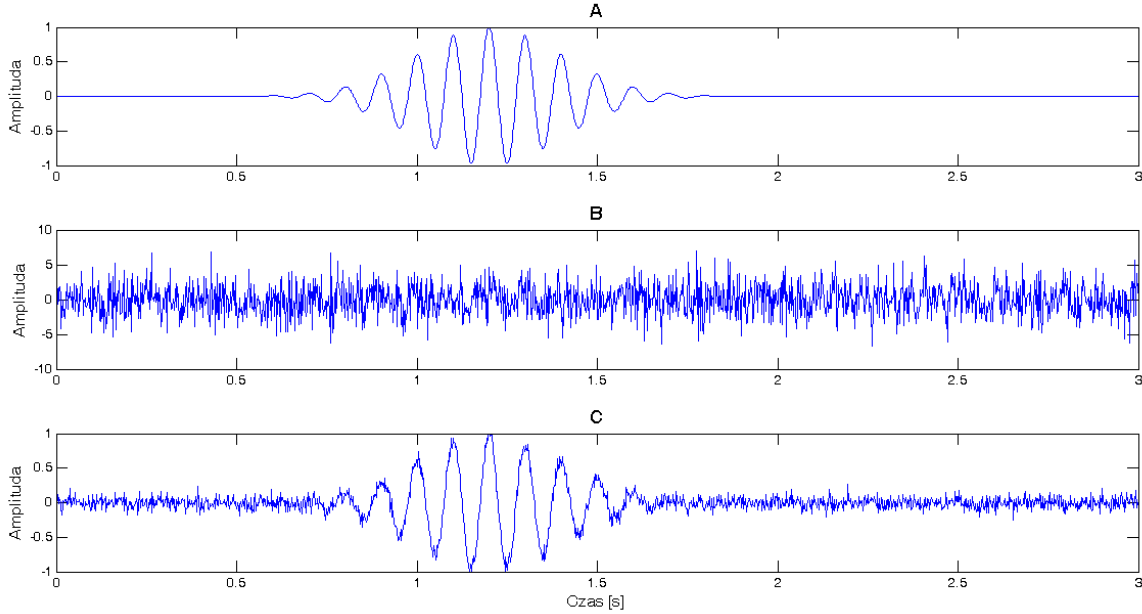
$$E \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i(t) \right] = 0, \quad (3.3)$$

z czego wynika, że dla uśrednionego sygnału $E[\bar{x}(t)] = s(t)$.

Na Rysunku 3.1 przedstawiono kolejno:

- funkcję Gabora przed dodaniem szumu
- funkcję Gabora z nałożonym szumem
- sygnał uśredniony.

Widać, że na ostatnim wykresie udało się odzyskać pierwotny kształt.



Rysunek 3.1: Na wykresie A narysowano funkcję Gabora o częstotliwości 10 Hz, odchyleniu standardowym $\sigma_g = 0.2$ i amplitudzie $A = 1$. Wykres B przedstawia tę samą funkcję co wykres A po dodaniu 30 składowych szumowych z rozkładu normalnego o średniej $m_{sz} = 0$ i odchyleniu standardowym $\sigma_{sz} = 0.4$. Wykres C to 1000 uśrednionych sygnałów z wykresu B.

3.1.2. Statystyka

Spośród wszystkich realizacji 6 razy losowano bez powtórzeń 50 realizacji i uśredniano. Następnie liczone maksymalną różnicę między najwyższym i najniższym punktem na przedziale 0 – 0,1 s. Po sprawdzeniu testem Shapiro-Wilka, że tak policzone średnie amplitudy należą do rozkładu normalnego, przeprowadzano test T studenta, by się przekonać, czy wzrost amplitudy pomiędzy kontrolą a każdą kolejną godziną rejestracji jest istotny statystycznie.

3.2. Wielokanałowy model autoregresyjny

Sygnały pochodzące z rejestracji aktywności mózgu mogą być opisywane przez model AR (ang. *autoregressive model*). Założeniem tego modelu jest to, że na podstawie p pierwszych próbek można przewidzieć wartość $p + 1$ próbki:

$$x(t) = \sum_{i=1}^p a_i x(t-i) + e(t), \quad (3.4)$$

gdzie a_i jest i -tym współczynnikiem, a $e(t)$ – składową szumową.

Jeśli podczas eksperymentu rejestruje się dane równocześnie z kilku źródeł, można przypuszczać, że są ze sobą związane. Wtedy sygnał z każdego źródła w i -tej chwili czasu traktuje się jak złożenie liniowe p poprzednich próbek wszystkich źródeł:

$$\sum_{i=1}^p A(t)X(t-i) = E(t). \quad (3.5)$$

Po przetransformowaniu powyższego równania do dziedzinę częstości za pomocą transformacji Z , otrzymuje się:

$$A(z)X(z) = E(z), \quad (3.6)$$

gdzie $z = e^{2\pi f \Delta t}$.

3.3. Połączenia funkcjonalne

Zależności między dostępnymi kanałami (dane z kilku źródeł zbierane równocześnie) można badać na wiele sposobów. Jedną z podstawowych miar podobieństwa między kanałami jest koherencja. Wadą tej funkcji jest to, że nie pozwala stwierdzić kierunku oddziaływania między danymi źródłowymi. Żeby móc odpowiedzieć na pytanie, który kanał generuje informację, a który ją tylko odbiera, skorzystano z kierunkowej funkcji przejścia, bazującej na przyczynowości w sensie Grangera.

3.3.1. Przyczynowość w sensie Grangera

Definicja przyczynowości bazuje na przewidywalności szeregów czasowych. Przy założeniu, że wartość sygnału x da się przewidzieć na podstawie p poprzednich wartości otrzymuje się:

$$x(t) = \sum_{i=1}^p A_1(i)x(t-i) + E_1(t), \quad (3.7)$$

gdzie A jest macierzą współczynników, a E_1 – macierzą wartości szumowych.

Przy takim zapisie dąży się do tego, by wartości współczynników były jak największe. Tym samym możemy traktować macierz wartości szumowych jako miarę dopasowania – im czynnik szumowy jest mniejszy, tym dane są lepiej opisywane przez model.

Przy założeniu, że na wartość sygnału x ma również wpływ sygnał y , można zapisać:

$$x(t) = \sum_{i=1}^p A_1(i)x(t-i) + \sum_{i=1}^p A_2(i)y(t-i) + E_2(t), \quad (3.8)$$

Jeśli $\text{var}(E_1) > \text{var}(E_2)$, to można powiedzieć, że w sensie Grangera sygnał x jest zależny od sygnału y . W przypadku gdy obie wartości są porównywalne to znaczy, że dodatkowa informacja o wartościach sygnału y nie wniosła nic do opisu wartości sygnału x , a więc sygnał x jest niezależny od sygnału y .

3.3.2. Kierunkowa funkcja przejścia

Kierunkowa funkcja przejścia (z ang. *Direct Transfer Function*) opiera się o założenie, że dane są dobrze opisywane przez wielokanałowy model autoregresyjny (MVAR). Definiuje się ją przez macierz przejścia modelu H daną wzorem: $H = A^{-1}$.

Kierunkowa funkcja przejścia w wersji nieznormalizowanej:

$$NDTF_{i \rightarrow j}^2(f) = |H_{ij}(f)|^2 \quad (3.9)$$

Znormalizowana kierunkowa funkcja przejścia:

$$DTF_{i \rightarrow j}^2(f) = \frac{|H_{ij}(f)|^2}{\sum_{m=1}^k |H_{im}(f)|^2} \quad (3.10)$$

3.3.3. Opis metody

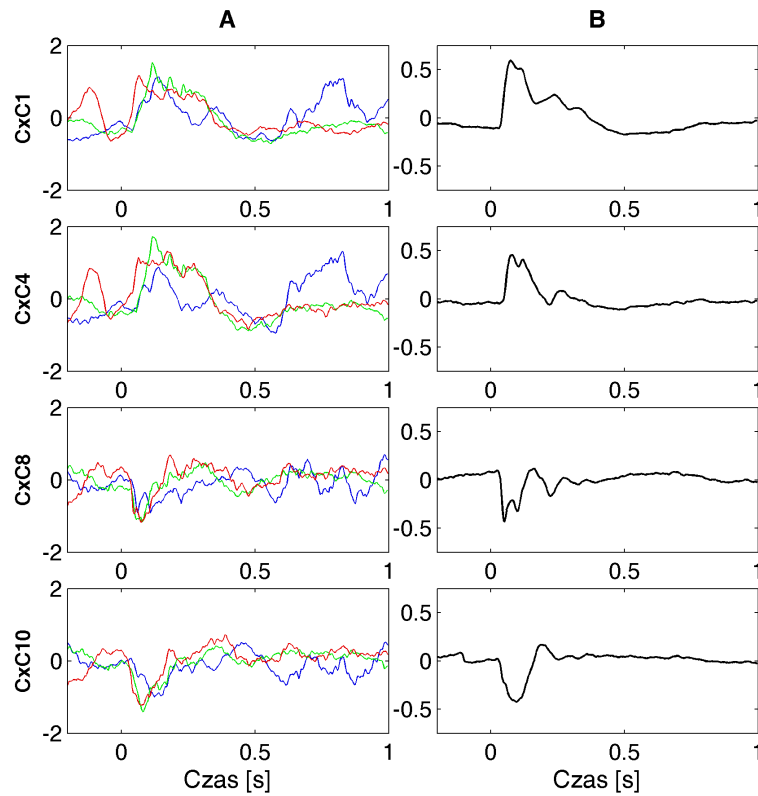
3.3.4. Statystyka

Rozdział 4

Wyniki

4.1. Uśrednianie EP

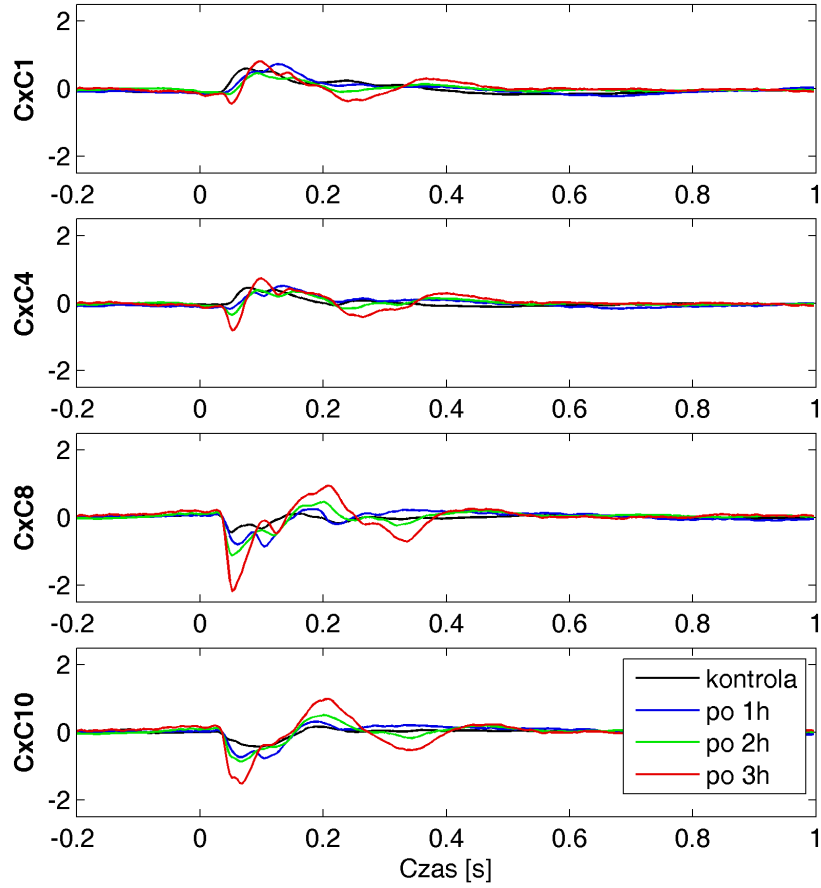
Na Rysunku 4.1 przedstawiono uśrednianie potencjałów. Przed uśrednieniem dane są chaotyczne, dopiero po uśrednieniu uwidacznia się kształt odpowiedzi na bodziec.



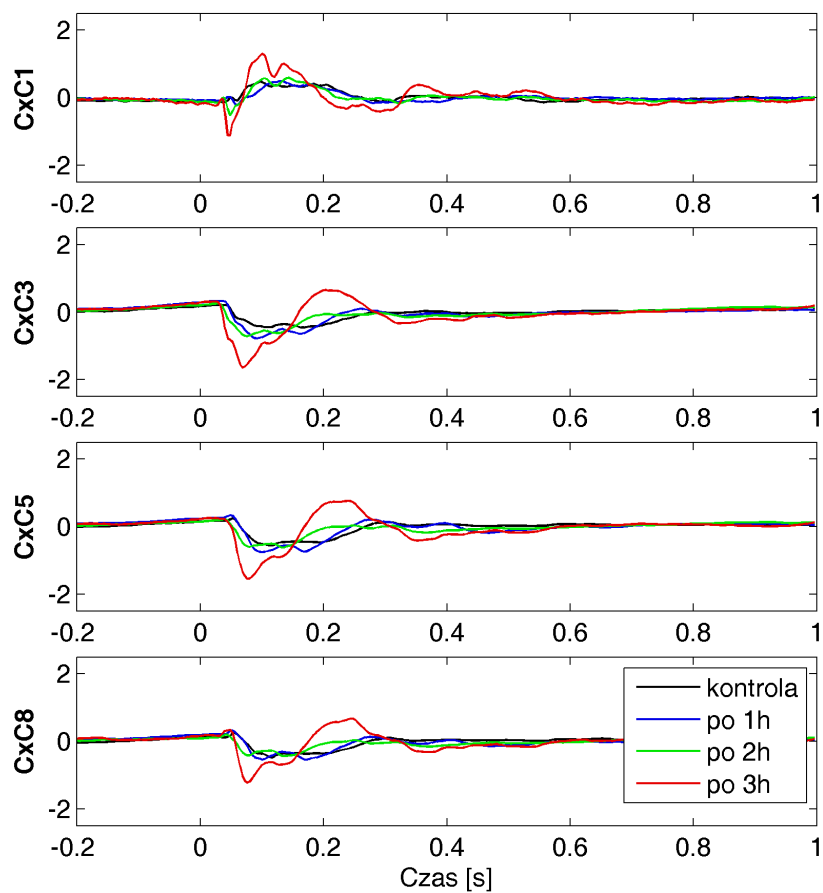
Rysunek 4.1: Dane pochodzą z eksperymentu A przed treningiem wzrokowym (kontrola) – 4 wybrane kanały kontralateralnej kory wzrokowej (CxC). W kolumnie A przedstawiono 3 pojedyncze realizacje, a w kolumnie B – uśrednione potencjały wywołane po wszystkich realizacjach.

4.1.1. Analiza uśrednionych potencjałów w czasie

Na Rysunku 4.2 przedstawiono uśrednione potencjały w czasie.



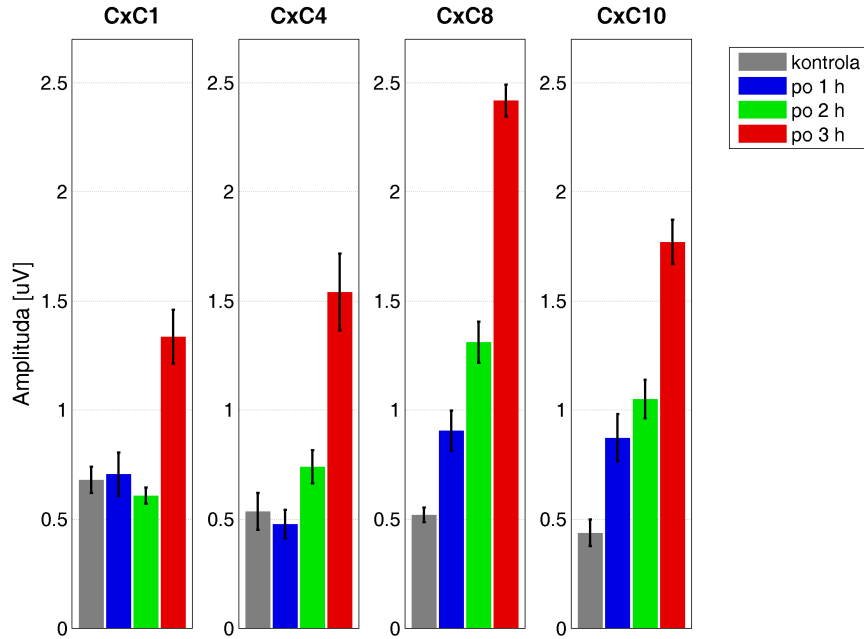
Rysunek 4.2: Dane pochodzą z eksperymentu A – 4 wybrane kanały kontralateralnej kory wzrokowej (CxC). Kolorami zaznaczono uśrednione po realizacjach potencjały wywołane przed treningiem wzrokowy, po 1, 2 i 3 godzinach.



Rysunek 4.3: Dane pochodzą z eksperymentu B – 4 wybrane kanały kontralateralnej kory wzrokowej (Cx C). Kolorami zaznaczono uśrednione po realizacjach potencjały wywołane przed treningiem wzrokowy, po 1, 2 i 3 godzinach.

4.1.2. Statystyka

Test Shapiro-Wilka wykazał, że dane pochodzą z rozkładu normalnego. Na Rysunku 4.4 przedstawiono średnie z wylosowanych amplitud z uśrednionych potencjałów dla kilku wybranych kanałów. W Tabeli 4.1 zamieszczono wartości liczbowe z Rysunku 4.4.

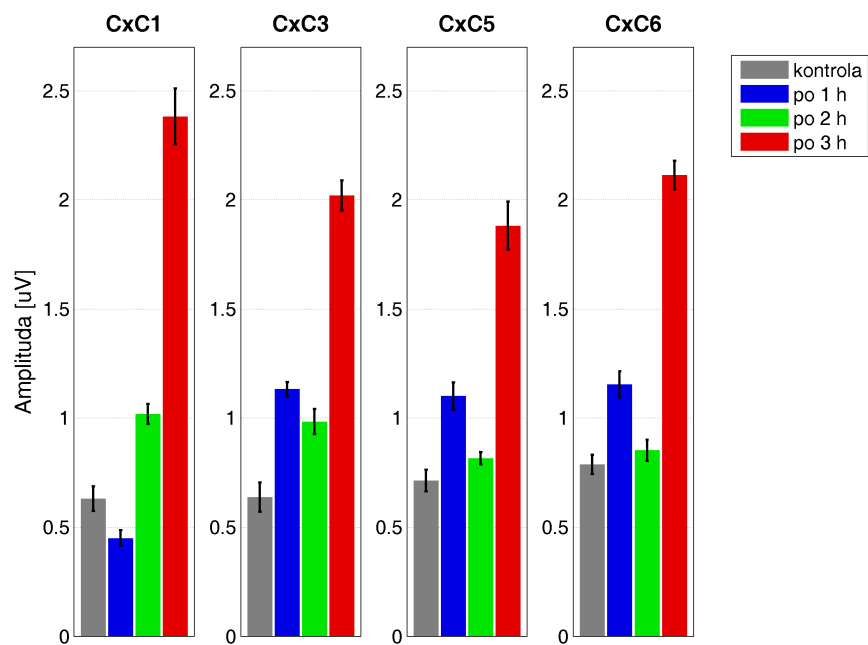


Rysunek 4.4: Dane pochodzą z eksperymentu A przed treningiem wzrokowym (kontrola) – 4 wybrane kanały kontralateralnej kory wzrokowej (CxC). Średnia amplituda i odchylenie standardowe dla kolejnych czasów.

Tabela 4.1: Średnia amplituda i odchylenie standardowe.

| czas | CxC1 | CxC4 | CxC8 | CxC10 |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| kontrola | 0,68 ± 0,02 | 0,54 ± 0,04 | 0,52 ± 0,01 | 0,44 ± 0,02 |
| po 1 h | 0,71 ± 0,05 | 0,48 ± 0,02 | 0,91 ± 0,04 | 0,87 ± 0,06 |
| po 2 h | 0,61 ± 0,01 | 0,74 ± 0,03 | 1,31 ± 0,04 | 1,05 ± 0,04 |
| po 3 h | 1,34 ± 0,08 | 1,54 ± 0,16 | 2,42 ± 0,03 | 1,77 ± 0,05 |

W Tabeli 4.2 zamieszczono wartości liczbowe z Rysunku 4.5.



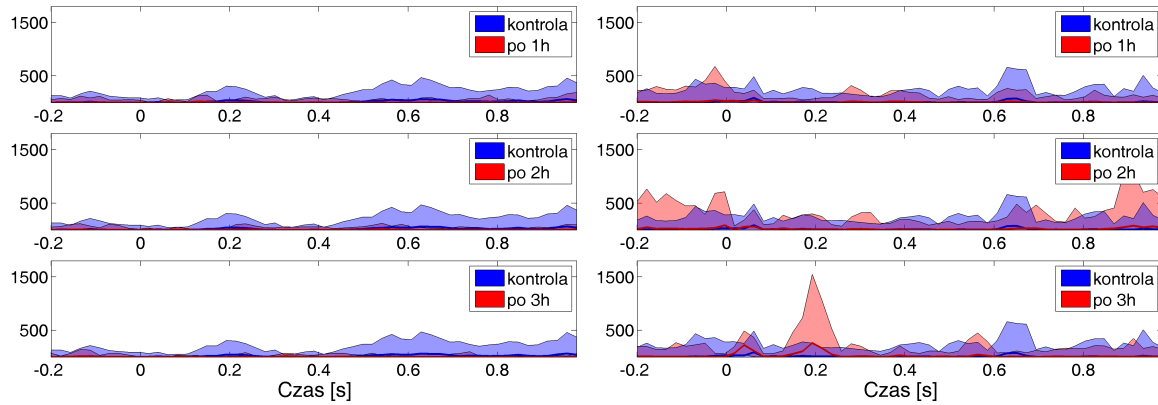
Rysunek 4.5: Dane pochodzą z eksperymentu A przed treningiem wzrokowym (kontrola) – 4 wybrane kanały kontralateralnej kory wzrokowej (CxC). Średnia amplituda i odchylenie standardowe dla kolejnych czasów.

Tabela 4.2: Średnia amplituda i odchylenie standardowe.

| czas | CxC1 | CxC3 | CxC5 | CxC6 |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| kontrola | 0,63 ± 0,02 | 0,64 ± 0,02 | 0,71 ± 0,01 | 0,79 ± 0,01 |
| po 1 h | 0,45 ± 0,01 | 1,13 ± 0,01 | 1,10 ± 0,02 | 1,15 ± 0,02 |
| po 2 h | 1,02 ± 0,01 | 0,98 ± 0,02 | 0,82 ± 0,01 | 0,85 ± 0,01 |
| po 3 h | 2,38 ± 0,08 | 2,02 ± 0,02 | 1,88 ± 0,06 | 2,11 ± 0,02 |

4.2. Połączenia funkcjonalne

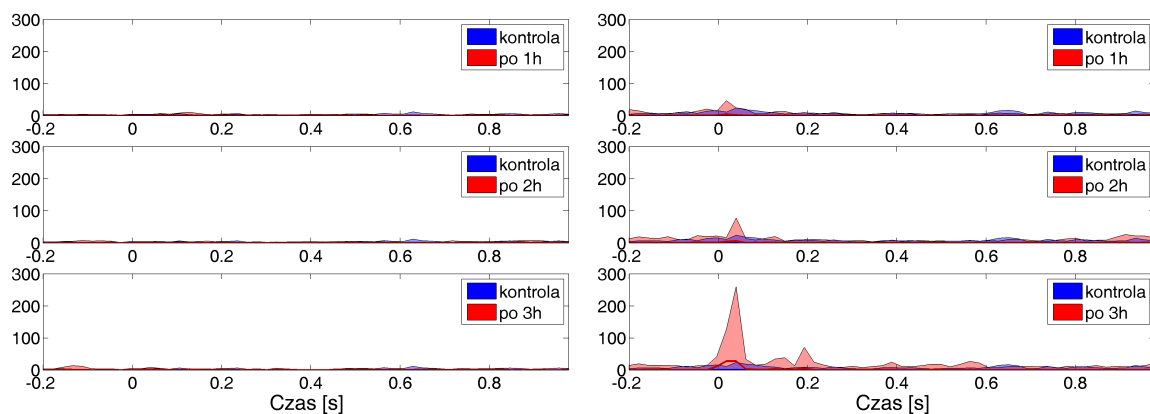
4.2.1. CxC do LGN



(a) Bez stymulacji elektrycznej

(b) Po stymulacji elektrycznej

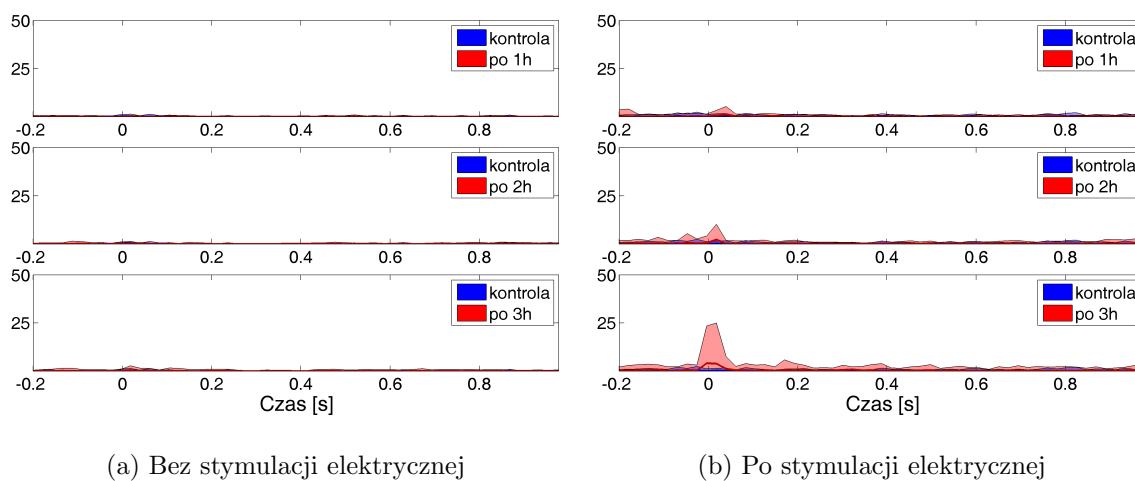
Rysunek 4.6: Porównanie danych z różnych eksperymentów w paśmie 1-10 Hz.



(a) Bez stymulacji elektrycznej

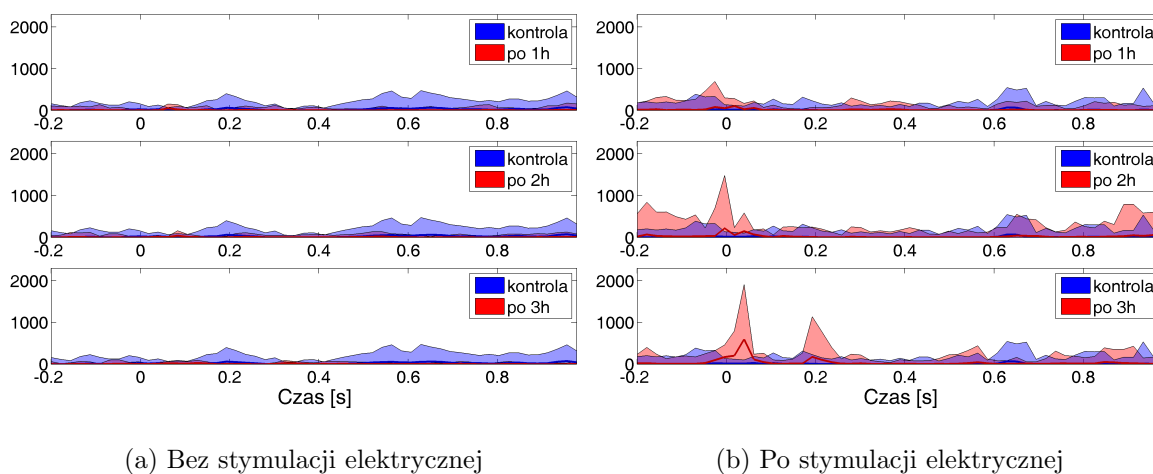
(b) Po stymulacji elektrycznej

Rysunek 4.7: Porównanie danych z różnych eksperymentów w paśmie 10-30 Hz.

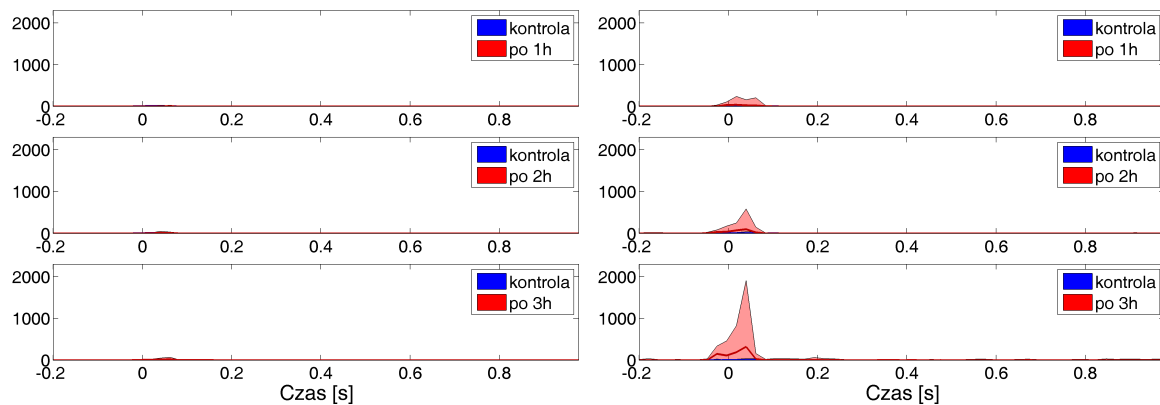


Rysunek 4.8: Porównanie danych z różnych eksperymentów w paśmie 20-40 Hz.

4.2.2. CxC do SC



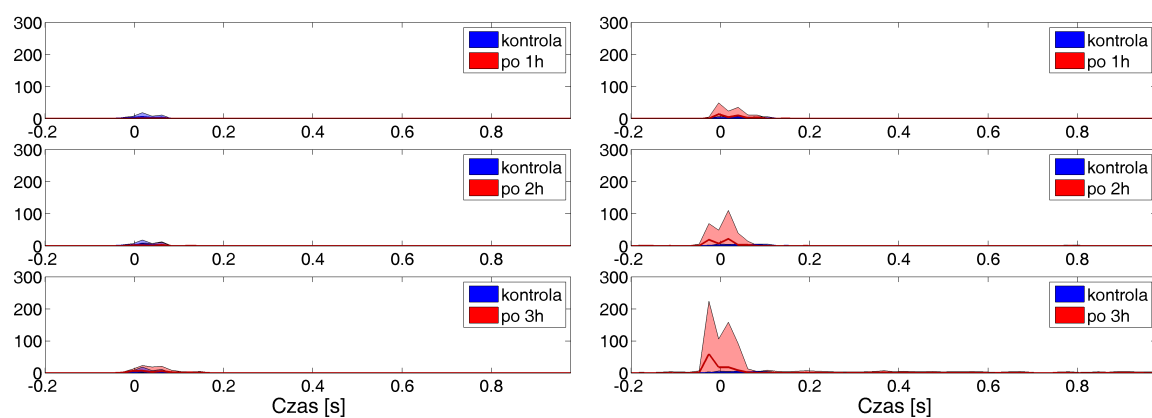
Rysunek 4.9: Porównanie danych z różnych eksperymentów w paśmie 1-10 Hz.



(a) Bez stymulacji elektrycznej

(b) Po stymulacji elektrycznej

Rysunek 4.10: Porównanie danych z różnych eksperymentów w paśmie 10-30 Hz.

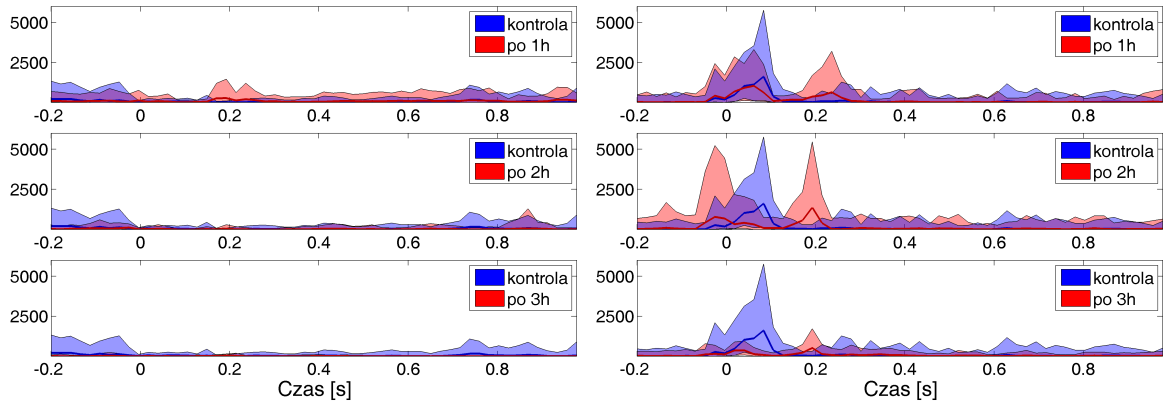


(a) Bez stymulacji elektrycznej

(b) Po stymulacji elektrycznej

Rysunek 4.11: Porównanie danych z różnych eksperymentów w paśmie 20-40 Hz.

4.2.3. SC do CxC



(a) Bez stymulacji elektrycznej

(b) Po stymulacji elektrycznej

Rysunek 4.12: Porównanie danych z różnych eksperymentów w paśmie 1-10 Hz.

Rozdział 5

Dyskusja

Odniesienie do biologii połączeń. Ewentualne błędy i sugestie co można poprawić. Kandel
Kandel (2013)

Bibliografia

- Coenen, A., Zayachkivska, O., 2013. Adolf Beck: A pioneer in electroencephalography in between Richard Caton and Hans Berger. *Adv Cogn Psychol* 9 (4), 216–221.
- Hager, A. M., Dringenberg, H. C., Aug 2010. Training-induced plasticity in the visual cortex of adult rats following visual discrimination learning. *Learn. Mem.* 17 (8), 394–401.
- Hannula, D. E., Simons, D. J., Cohen, N. J., Mar 2005. Imaging implicit perception: promise and pitfalls. *Nat. Rev. Neurosci.* 6 (3), 247–255.
- Kandel, E., 2013. *Principles of Neural Science*, 5th Edition. McGraw Hill Professional.
- Schomer, D. L., Lopes da Silva, F., 2010. *Niedermeyer’s Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*, 6th Edition. Lippincott Williams & Wilkins.
- Schulz, R., Gerloff, C., Hummel, F. C., Jan 2013. Non-invasive brain stimulation in neurological diseases. *Neuropharmacology* 64, 579–587.
- Waleszczyk, W. J., Wang, C., Benedek, G., Burke, W., Dreher, B., 2004. Motion sensitivity in cat’s superior colliculus: contribution of different visual processing channels to response properties of collicular neurons. *Acta Neurobiol Exp (Wars)* 64 (2), 209–228.