



Elektroencefalografia

Pomiar aktywności elektrycznej mózgu

1

Elektroencefalografia



Technika rejestracji i interpretacji bioelektrycznej aktywności mózgu z wykorzystaniem elektrod umieszczonych na powierzchni głowy

2

Sygnał elektroencefalograficzny (EEG)

- Amplituda $<100 \mu V$,
- Częstotliwość 0,1-70 (100) Hz,
- Charakter stochastyczny,
- Aktywność spontaniczna i wymuszona (potencjały wymuszone),
- 5 rytmów.

3

Rytmy EEG

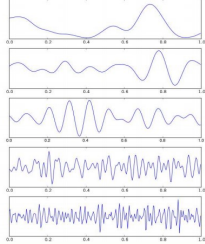
Delta, 0,5 – 4 Hz, Poniżej $100 \mu V$

Teta, 4 – 8 Hz, Poniżej $100 \mu V$

Alfa, 8 – 13 Hz, Poniżej $10 \mu V$

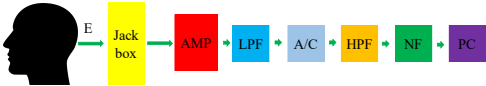
Beta, 13 – 22 Hz, Poniżej $20 \mu V$

Gamma, 22 – 30 Hz, Poniżej $2 \mu V$



4

Schemat blokowy elektroencefalografu



E elektrody pomiarowe
 Jackbox zespół przełączający
 AMP wzmacniacz
 LPF filtr dolnoprzepustowy
 A/C przetwornik analogowo-cyfrowy
 HPF filtr górnoprzepustowy
 NF filtr pasmowo-zaporowy (sieciowy)

5

Źródło sygnału EEG

Neurofizjologiczne podstawy EEG

W jaki sposób sygnał EEG z mózgu „przenoszony jest” do urządzenia rejestrującego? (wewnątrz mózgu, z mózgu do elektrody)

Zagadnienia pomiarowe:

- sumowanie i rozmywanie sygnału,
- czy elektroencefalograf może wykryć dipole elektryczne powstające gdziekolwiek w korze mózgowej?
- które źródła elektryczne w mózgu można zmierzyć na powierzchni czaszki?
- czy żel elektrodowy jest konieczny?
- czy jeżeli pomiar czystego sygnału EEG jest tak trudny że wymaga specjalnego żelu, dlaczego mimo wszystko szum tak łatwo „zanieczyszcza” sygnał? (co to sygnał, co to szum (zewnętrzny, wewnętrzny))

6

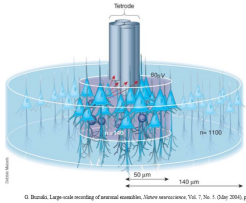
Zagadnienia pomiarowe (cd)

- dlaczego elektroencefalograf potrzebuje wzmacniacza? Co robi wzmacniacz?
- dlaczego impedancja wejściowa wzmacniacza jest ważna?
- szum elektryczny i znaczenie wysokiej impedancji wejściowej wzmacniacza
- połączenie elektryczne między elektrodą a czaszką,
- dlaczego ważna jest minimalizacja rezystancji między elektrodą a czaszką?
- w jaki sposób impedancja wejściowa wzmacniacza pozwala na tolerancję „słabszego” połączenia między elektrodą a czaszką?

Ogólne konkluzje ad pomiaru EEG

Fizyka pomiaru EEG (Wzory Maxwella)

7

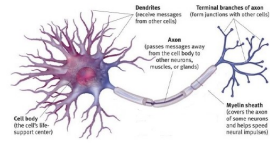


1 mm² tkanki korowej to:
 $\sim 10^5$ neuronów
 $\sim 10^6$ synaps

Aktywność elektryczna mózgu **nie może** być zrozumiana badając pojedynczą jednostkę nerwową.

8

Dwa typy elektrycznej aktywności neuronu



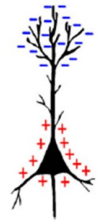
Potencjał czynnościowy

Podprogowy potencjał błonowy

- Pobudzeniowy potencjał postsynaptyczny (EPSP)
- Hamulcowy potencjał postsynaptyczny (IPSP)

9

Dipol prądowy



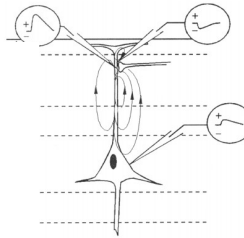
Akcja synaptyczna tworzy dipol prądowy.

Dipol prądowy definiowany jest jako region ładunku dodatniego oddzielony o pewną odległość od regionu ładunku ujemnego

Źródło – region ładunku dodatniego

Zlew – region ładunku ujemnego

Polaryzacja potencjału dla pojedynczego neuronu

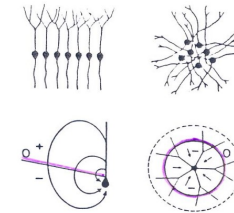


Potencjał odbierany przez mikroelektrodę umieszczoną w środowisku zewnętrznym zależy od tego, czy znajduje się ona w pobliżu prądu wypływającego (źródła) czy wpływającego (zlewu).

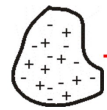
Pola indukowane przez populację neuronów

OPEN FIELD

CLOSED FIELD



Model dipola dla populacji komórek

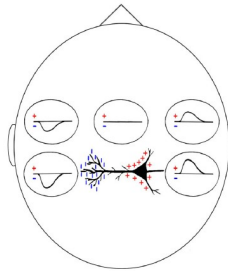


Randomly distributed dipoles in a neuron population

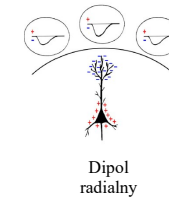


Equivalent dipole of the population

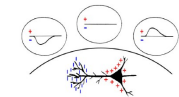
Detekcja potencjałów przez czaszkę



Dipole mierzone w EEG

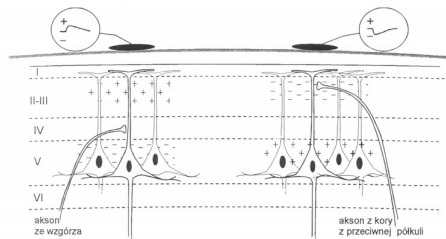


Dipol radialny



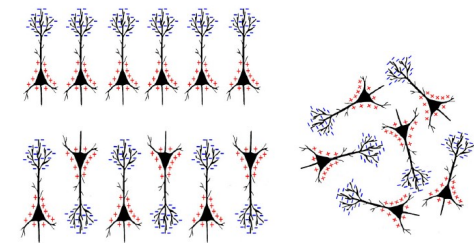
Dipol styczny

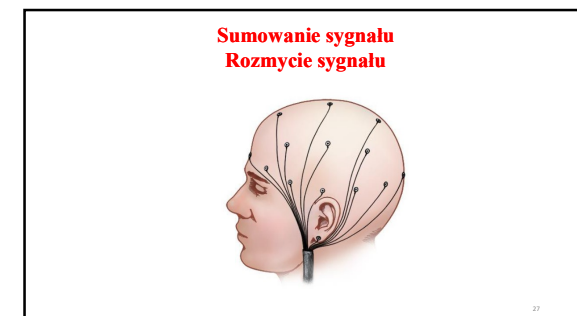
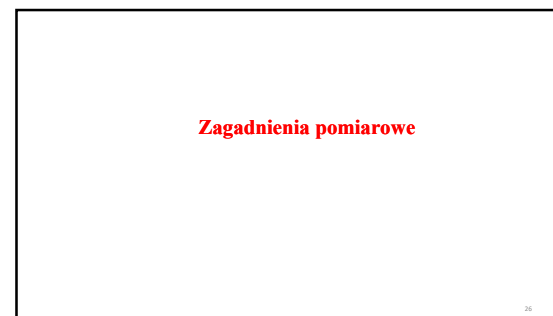
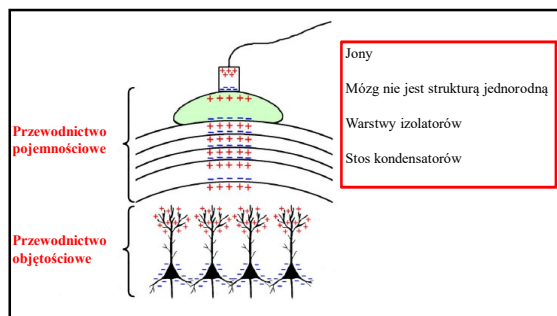
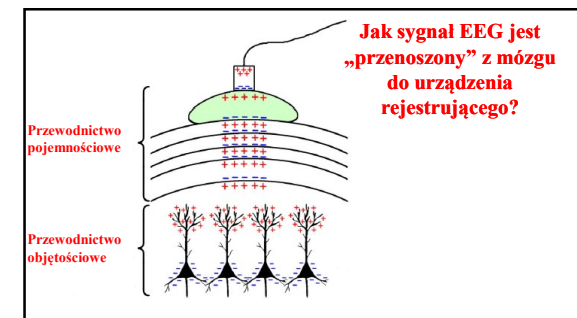
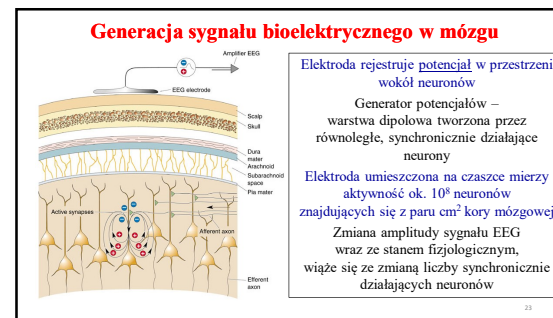
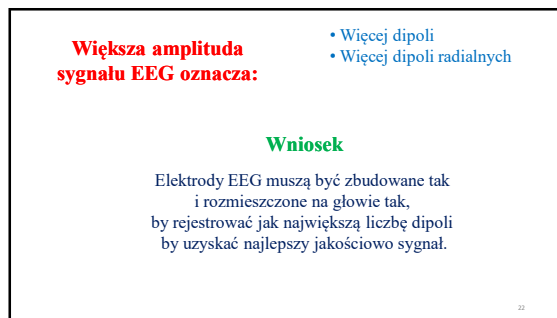
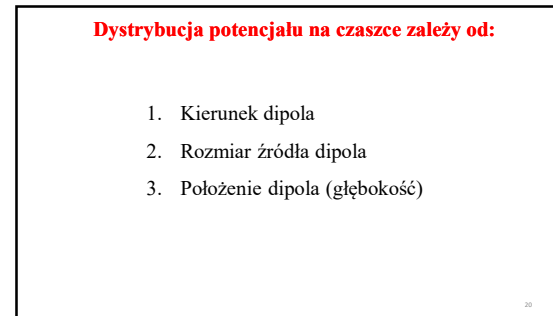
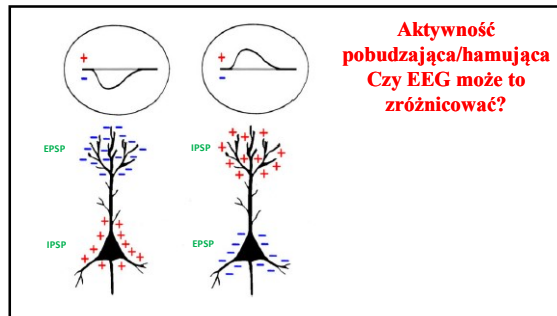
Polaryzacja sygnału dla populacji komórek



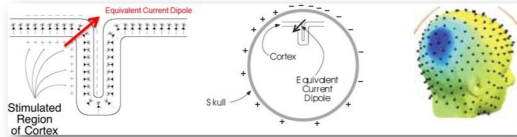
Warunki powstania mierzanego sygnału EEG

- Neurony muszą być ułożone równolegle względem siebie
- Neurony muszą być synchronicznie aktywne





Czy EEG może wykryć dipole generowane gdziekolwiek w korze?



Szумы w EEG

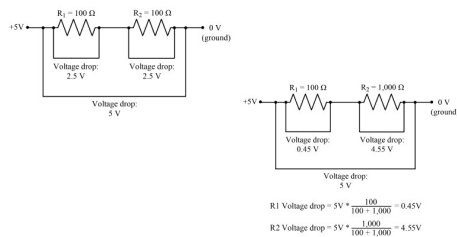
- Szумы zewnętrzne (pasywne ekranowanie, aktywne elektrody)
- Szумы wewnętrzne (kontrola czynników środowiskowych)

Wzmacniacz w EEG

- Maksymalizacja SNR
- Zwiększenie amplitudy sygnału EEG



Trochę przypomnienia

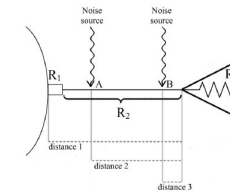


Wzmacniacz EEG

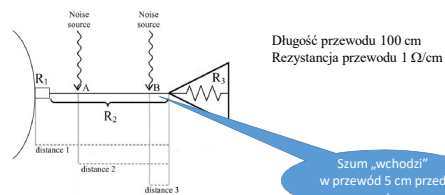


1. Amplituda EEG jest bardzo mała, zatem ważny jest pomiar jak największej ilości sygnału
2. Minimalizacja wpływu zakłóceń elektrycznych

Szum elektryczny a duża impedancja wejściowa wzmacniacza EEG



Eksperyment teoretyczny



$A = \text{Rezystancja wejściowa wzmacniacza} / \text{Rezystancja całkowita}$

Impedancja wejściowa wzmacniacza 100 Ω	Impedancja wejściowa wzmacniacza 1 M Ω
Sygnał	Sygnał
$A = 100 / (100 + 100) = 0.5$	$A = 1000000 / (1000000 + 100) = 0.9999$
Szum	Szum
$A = 100 / (100 + 5) = 0.9524$	$A = 1000000 / (1000000 + 5) = 0.9995$

Dlaczego wysoka impedancja wejściowa wzmacniacza pozwala na tolerancję słabszego połączenia interfejs skóra/elektroda ?

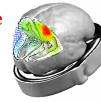
Niska	Impedancja połączenia elektroda/skóra będzie stanowił większą część całkowitej impedancji i spadek napięcia na interfejsie skóra/elektroda będzie większy Sygnał będzie zdominowany przez szum
Wysoka	Większa impedancja interfejsu skóra/elektroda może być tolerowana bez utraty jakości sygnału

Fizyka EEG

Rozpatrzmy głowę jako przewodnik pojemnościowy

37

Prądy w tkance nerwowej



Rozkład gęstości prądu w mózgu oszacowany za pomocą rozwiązania problemu odwrotnego zainstalowanego do 256-kanalowego zapisu EEG. Przestrzeń rozwiązań jest ograniczona do materii szarej na podstawie obrazowania MRI.

- W tkance mózgowej płyną prądy jonowe (jony dodatnie i jony ujemne),
- W tkance mózgowej przepływ prądu jest niejednorodny,
- Gęstość prądu, najczęściej nie jest stała dla r na żadnym przekroju poprzecznym,
- Opór właściwy może zależeć od położenia (ośrodek niejednorodny) oraz od kierunku (ośrodek anizotropowy)

Równania Maxwella

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon \cdot \epsilon_0}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times B = \mu_0 \left(j + \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot \partial E}{\partial t} \right)$$

Zasada zachowania ładunku

$$\nabla \cdot j + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

Równania Maxwella dla liniowej neurofizjologii

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon \cdot \epsilon_0}$$

$$\nabla \times E = 0$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times B = \mu_0 j$$

$$\nabla \cdot j = 0$$

W ośrodku przewodzącym spełnione jest prawo Ohma:

$$\vec{J} = \vec{J}_i + \sigma \vec{E}$$

gdzie J_i jest gęstością prądu wstrzykiwanego (injected) w pewien obszar przestrzeni (np. prąd dokomórkowy w wyniku pobudzenia synaptycznego), σE – prąd objętościowy w przestrzeni. E – pole elektryczne w ośrodku przewodzącym, σ – przewodnictwo.

Pole elektryczne E jest związane z potencjałem elektrycznym V przez zależność:

$$\vec{E} = -\text{grad}V$$

gdzie:

$$\text{grad}V = \left(\frac{\partial V}{\partial x}, \frac{\partial V}{\partial y}, \frac{\partial V}{\partial z} \right)$$

Korzystając ze stacjonarności prądów:

$$\text{div} \vec{E} = -\frac{\text{div} \vec{J}_i}{\sigma}$$

Gęstość prądu

$$\vec{J} = \sum \rho_i \vec{v}_i$$

Równanie ciągłości:

$$\text{div} \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

gdzie ρ – gęstość ładunku

Dla $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

dostajemy:

$$\text{div} \vec{J} = 0$$

Pole elektryczne E jest związane z potencjałem elektrycznym V przez zależność:

$$\vec{E} = -\text{grad}V$$

W ośrodku przewodzącym spełnione jest prawo Ohma:

$$\vec{J} = \vec{J}_i + \sigma \vec{E}$$

Korzystając z gradientu potencjału V , dostajemy równanie Poissona:

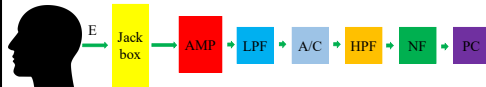
$$\text{divgrad}V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\text{div} \vec{J}_i}{\sigma}$$

3.

Budowa elektroencefalografu

42

Schemat blokowy elektroencefalografu



E – elektrody pomiarowe
 Jackbox – zespół przełączający
 AMP – wzmacniacz
 LPF – filtr dolnoprzepustowy
 A/C – przetwornik analogowo-cyfrowy
 HPF – filtr górnoprzepustowy
 NF – filtr pasmowo-zaporowy (sieciowy)

Elektrody pomiarowe

Cel:

1. Przeniesienie potencjału, który istnieje na powierzchni głowy, do wejścia elektroencefalografu.
2. Budowa i skład chemiczny elektrod wynika ze zjawisk fizycznych chemicznych zachodzących pod wpływem aktywności elektrycznej mózgu.
3. Głównym zadaniem elektrody jest przetworzenie prądu jonowego na prądy elektronowe (które mogą być przenoszone i przetwarzane przez urządzenie elektryczne).

44

Elektrody pomiarowe

Elektrody stykowe



Misczkowe



Grzybkowe



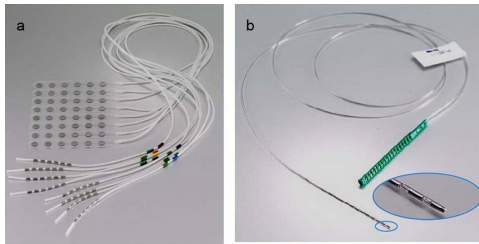
Klipsowe

Elektrody naklejane

Elektrody igłowe

45

Elektrody pomiarowe



Elektrokortykografia

Stereoelektroencefalografia

Parametry charakteryzujące dobre połączenie między aparatem EEG a skórą głowy pacjenta

- mała rezystancja,
- mała pojemność elektryczna,
- niewielki potencjał statyczny,
- stabilność czasowa ww. parametrów,
- mała wrażliwość na zmiany temperatury i czynniki zewnętrzne zwłaszcza mechaniczne.

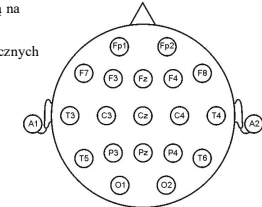
Rozmieszczenie elektrod System 10-20 (1958 r)

(The International Federation of Clinical Neurophysiology)

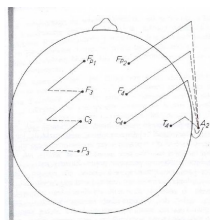
Elektrody o numerach nieparzystych leżą na lewej półkuli głowy, parzyste po prawej,

Litery opisują elektrody według anatomicznych obszarów czaszki:

Fp - przedczołowe,
F - czołowe,
C - centralne,
T - skroniowe,
P - ciemieniowe,
O - potyliczne,
A – uszne.



Typy odprowadzeń



Jednobiegunowe (Monopolarne)

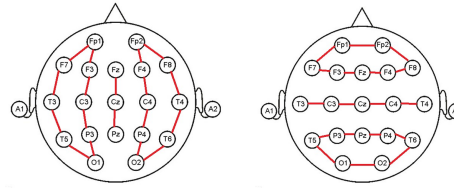
Sygnał jest różnicą potencjałów między elektrodami, a jednym wspólnym potencjałem odniesienia.

Dwubiegunowe (Bipolarne)

Sygnał jest różnicą potencjałów między danymi dwiema elektrodami.

Montaż EEG

Montaż – wzorzec określonego układu połączeń elektrod pomiarowych

Montaż wzdluzny
(tzw. „podwojny banan”)

Montaż poprzeczny

Zespół przełączający (Jacbox) elektroencefalografu

Cel:

1. Podłączenie każdej elektrody do każdego wejścia wzmacniacza.
2. Podłączenie wszystkich kanałów do napięć kalibrujących.
3. Ochrona wejść wzmacniaczy przed zakłóceniami zewnętrznymi przy braku podłączenia jakiegokolwiek sygnału.

Układ do pomiaru impedancji elektrod

Cel:

1. Kontrola wartości impedancji styku elektroda-głowa. ($<5k\Omega$)
2. Kontrola symetrii impedancji wszystkich odprowadzeń.

Blok wzmacniaczy elektroencefalografu

Cel:

Wzmocnienie rejestrowanego sygnału EEG, przed jego dalszym przetworzeniem.

Wymagania:

- Wzmacniacz różnicowy.
- Wysoka impedancja wejściowa $Z_{we} > 10 \text{ Mohm}$.
- Poziom szumów własnych poniżej $1\mu\text{V}$ (przy zwartym wejściu).
- Pasmo przenoszenia od ułamka Hz do kilkuset Hz.
- Czulość od $0,5 \mu\text{V/mm}$ do $200 \mu\text{V/mm}$.
- Wysoki CMR (współczynnik tłumienia sygnału sumacyjnego) $>140 \text{ dB}$.

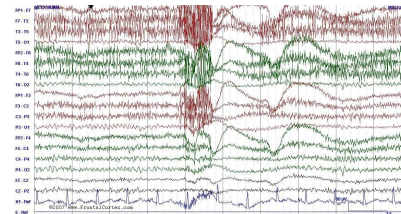
Artefakty

Zakłócenia, czyli wszystkie anomalie w zapisie EEG w odniesieniu do rzeczywistego przebiegu fal mózgowych.

Źródła zakłóceń rejestracji sygnału EEG

- Generatory czynności elektrycznej znajdujące się w ciele człowieka. (artefakty fizjologiczne)
- Zjawiska fizyczne i chemiczne zachodzące pomiędzy skórą a elektrodą. (artefakty techniczne)
- Pola elektryczne wytworzone przez znajdujące się w pobliżu urządzenia elektryczne oraz sieć zasilającą. (artefakty techniczne)

55



Sygnał EEG z artefaktami mięśniowymi i ocznymi

56

Eliminacja artefaktów

Obiektywna ocena wpływu każdego źródła zakłóceń na zapis EEG

Likwidacja źródła zakłócenia

Likwidacja medium, którym zakłócenia się przedostają

Obróbka zarejestrowanego przebiegu celem odzyskania czystego zapisu EEG

Filtry elektroencefalografu

Cel:

Redukcja (usunięcie) sygnałów o zdefiniowanej częstotliwości (artefakty).
Niestety, filtry mogą modyfikować kształt EEG „ukrywając” informacje ważne diagnostycznie.

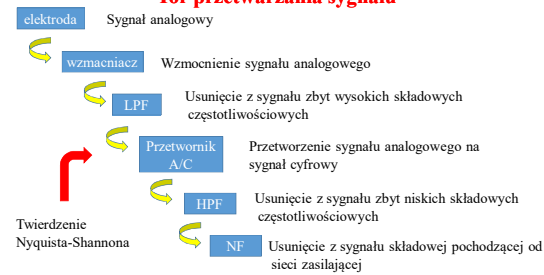
LPF: 70, 30, 15 Hz

HPF: 0.1, 0.3, 1.5 Hz

NF: 50 (60) Hz

58

Tor przetwarzania sygnału



59

Przetwornik A/C elektroencefalografu

Cel:

Konwersja sygnału analogowego na sygnał cyfrowy.

Wymagania:

- Przetwornik 16-24 bitowy,
- Częstotliwość próbkowania 1000 próbek/s (max 20 k próbek/s),
- 6-10 oversampling (precyzyjne ustawienie parametrów filtrów aby uniknąć efektu aliasingu).

60

Praktyczne uwagi dotyczące przeprowadzania rejestracji sygnału EEG

Osoba przeprowadzająca badanie EEG ma olbrzymi wpływ na jakość uzyskanego sygnału.

- Identyfikacja elektrod,
- Nie używać zużytych elektrod,
- Brak kontaktu badanego z el. uziemionymi,
- Brak kontaktu badanego z el. metalowymi,
- Komfort badanego,
- Brak ruchów badanego,
- Kontrola oporu elektroda-skóra ($<5k\Omega$, wartości zbliżone na każdej elektrodzie),
- Kolejność umieszczania elektrod,
- Zmniejszenie wielkości pasożytniczych kabli elektroda-wzmacniacz.

61

Dziękuję za uwagę

62