

# Badanie własności gąbek na styku elektroda-skóra w EEG

Ada Kochlewska, Cezary Paziewski, Martyna Poziomska  
Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Wrzesień 2021

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Streszczenie</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Cel projektu</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Wstęp</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Przygotowanie</b>	<b>4</b>
4.1	Płytki . . . . .	4
4.2	Elementy drukowane w 3D . . . . .	4
4.2.1	Tłok . . . . .	4
4.2.2	Nóżki i śrubki . . . . .	4
4.3	Elektrody . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Przebieg eksperymentu</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Metodologia</b>	<b>10</b>
6.1	Pomiar i metody analizy . . . . .	10
6.2	Estymacja parametrów . . . . .	12
6.2.1	Dopasowanie sinusa . . . . .	12
6.2.2	Sygnał analityczny . . . . .	12
6.2.3	Fourier . . . . .	13
6.2.4	Wyznaczanie niepewności metod . . . . .	13
<b>7</b>	<b>Wyniki</b>	<b>13</b>
7.1	Bootstrap . . . . .	14
7.2	Oporność . . . . .	14
7.3	Elektroda gąbkowa jako filtr . . . . .	16
<b>8</b>	<b>Wnioski</b>	<b>20</b>
8.1	Bootstrap . . . . .	20

8.2	Oporność . . . . .	20
8.3	Transmitancja . . . . .	20
<b>9</b>	<b>Podziękowania</b>	<b>21</b>
<b>10</b>	<b>Podział obowiązków</b>	<b>21</b>

## 1 Streszczenie

W eksperymencie zbadano oporności elektrod gąbkowych nasączonych roztworami wodnymi z solą o różnym składzie (sól fizjologiczna 0,9%, woda destylowana oraz woda z kranu o stężeniach 0,9% oraz 20%). W analizie wykorzystano trzy metody estymacji parametrów sygnałów sinusoidalnych przechodzących przez kolejne elementy układu. Są nimi: dopasowanie funkcji sinus do punktów pomiarowych, zastosowanie sygnału analitycznego oraz analiza za pomocą szeregu Fouriera. Po sprawdzeniu wszystkich trzech estymatorów metodą bootstrap stwierdzono, że najlepsze dopasowania daje analiza Fourierowska. Inne metody nie odbiegają od niej znacząco. Po analizie za pomocą obliczenia wartości oporności oraz transmitancji stwierdzono, że najmniejsze oporności uzyskuje się dla soli fizjologicznej, kiedy sygnał ma większą częstotliwość. Policzenie faz zmian potencjałów, pozwoliło na zauważenie, iż zwłaszcza dla niskich częstotliwości występuje przesunięcie fazowe, czyli elektroda gąbkowa wprowadza nieliniowość do układu.

## 2 Cel projektu

Celem projektu było stworzenie układu pomiarowego pozwalającego na badanie właściwości elektrod EEG. Układ pozwala na wyznaczenie między innymi oporu i oporności elektrody oraz przesunięcia fazowego. Badanie można przeprowadzać na elektrodach w różnych warunkach.

Korzystając z układu zbadano właściwości, w zależności od stężenia i rodzaju roztworu elektrod używanych w badaniach EEG z wykorzystaniem bezprzewodowego wzmacniacza.

## 3 Wstęp

Elektrody są niezbędnym elementem pomiarów EEG, gdyż to za ich pomocą sygnał bioelektryczny jest przekazywany do aparatury pozwalającej na rejestrację zmian potencjałów. Oznacza to, że ich zadaniem jest zamiana prądów jonowych na prąd elektronowy. Proces ten będzie udany jedynie pod warunkiem, że elektrody będą miały odpowiednie właściwości. Przyjmuje się, że opór układu elektroda-skóra nie powinien przekraczać  $5\text{ k}\Omega$ . Oporność elektrody powinna być jak najmniejsza, ponieważ bardzo duży opór ma sama skóra [1], [2].

Stworzenie dobrych elektrod nie jest proste, gdyż ich opór zależy od wielu czynników takich jak materiału z jakiego zostały wykonane, ich geometrii, zastosowanych elektrolitów na powierzchni elektrody (ich stężenia, temperatury, spoczynku lub ruchu pojawiającego się na skutek mieszania), a także częstotliwości sygnału oraz gęstości prądu na granicy elektroda-skóra [2].

Spośród wszystkich metali prawdopodobnie najczęściej na elektrodę wybierane jest srebro, które jest stosunkowo tanie oraz biokompatybilne. Z tego powodu w badaniach EEG powszechnie stosowanymi elektrodami są mokre elektrody Ag/AgCl [2]. Na takiej elektrodzie zachodzi reakcja: (1)



Dzięki zastosowaniu substancji pomocniczych (żel lub roztwór wodny soli) można zmniejszyć opór pomiędzy skórą głową a elektrodą. Niestety wraz z czasem żele wysychają, a woda wyparowuje, przez co wzrasta opór i pogarsza się sygnał [2].

Z racji tego, że potencjał elektryczny zbiera się na ostro zakończonych elementach, bardzo ważne jest zwracanie uwagi na kształt elektrod. W przypadku gromadzenia się ładunków mogą powstawać niejednorodne pola zakłócające odczyt prawdziwych sygnałów. Z tego powodu, zwłaszcza w przypadku elektrod metalicznych, zazwyczaj stosuje się elektrody okrągłe z zaokrąglonymi brzegami [2].

Coraz częściej zwraca się również uwagę, aby elektrody były miękkie i wytrzymałe, gdyż pozwala to na przeprowadzanie długich pomiarów bez odczuwania dyskomfortu przez osoby badane [2].

## 4 Przygotowanie

W celu wykonania pomiarów stworzono układ pomiarowy składający się z:

- płytki drukowanej pozwalającej na konfigurowanie układu,
- tłoka służącego do umieszczenia w nim badanej elektrody,
- imadła kontrolującego ściskanie elektrody gąbkowej
- 2 urządzeń TiePie Handyscope HS5 służących jako generator i oscyloskop

### 4.1 Płytki

Płytki składała się 3 złączy radiowych (2 na oporniki o znanej wartości oraz jedno służące do połączania elektrody) połączonych szeregowo, wejścia na sygnał z generatora oraz wyjście pozwalające mierzyć spadek napięcia względem masy. Projekt płytki przygotowano w programie KiCad [3]. Na Rysunku 1a pokazano schemat ideowy wykonanego układu. Na podstawie wymiarów złącza radiowego stworzono footprint (Rysunek 1d), który został dodany do schematu płytki. Na Rysunku 1b można zobaczyć płytę po uwzględnieniu fizycznych komponentów. Rysunek 1c pokazuje wytwarzoną maskę która użyta do naświetlenia płytki światłoczułej. Po naświetleniu płytka została poddana kąpieli w 5% roztworze sody kaustycznej aby rozpuścić nienaswietloną część płytki. Następnie trafiła ona do kąpieli w nadsiarczanie sodowym, aby usunąć miedź ze ścieżek. W płytce wywiercono otwory pod komponenty oraz nóżki znajdujące się w rogach płytki, które izolują układ od podłoża. Jest to ważne, ponieważ w trakcie eksperymentu z tłem trzymającym elektrodę wyciekał roztwór który mógł spowodować zwarcie. Do płytki przylutowano złącza radiowe pozwalające na montowanie oporników i elektrody. Następnie sprawdzono czy układ został poprawnie wykonany stosując oporniki o znanej oporności.

### 4.2 Elementy drukowane w 3D

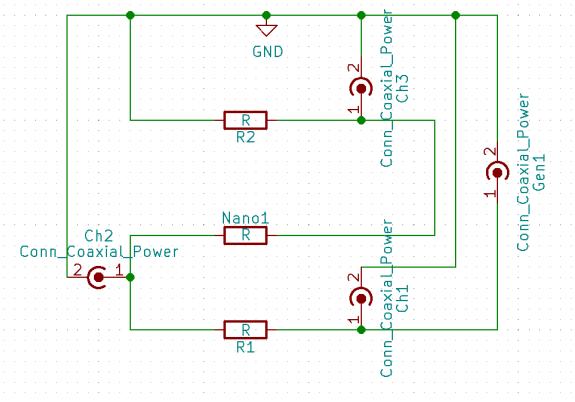
#### 4.2.1 Tłok

Do wykonywania pomiarów stworzono tło w kształcie prostopadłościanu. Został on wydrukowany na drukarce 3D z wykorzystaniem PLA, co pozwoliło na odizolowanie elektrod od elementów przewodzących. Schemat z wymiarami przedstawiono na Rysunku 2. W jednej ze ścianek tła wywiercono dziurki wspomagające odparowywanie wody (widoczne na Rysunku 2d). W dolnej części tła znajdują się otwory pozwalające na przełożenie kabla od elektrody znajdującej się na dnie (Rysunek 2a). Wzdłuż całej wysokości jednej ze ścian pozostawiono walcowatą przestrzeń o średnicy pozwalającej na umieszczenie w niej kabla od drugiej górnej elektrody (Rysunek 2b). Na elemencie wsuwającym do środka przyklejono linijkę ułatwiającą kontrolowanie poziomu ścisknięcia elektrody umieszczonej w środku (Rysunek 2d).

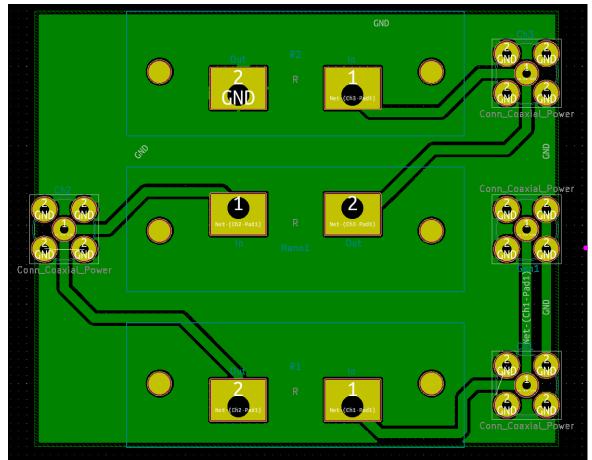
#### 4.2.2 Nóżki i śrubki

Płytkę odizolowano od podłoża za pomocą nóżek wydrukowanych na drukarce 3D. Model został wykonany w programie Tinkercad [4], a ich model przedstawiono na Rysunku 3. Nóżki zaprojektowano tak, aby jedna ich część stanowiła śrubkę a druga nakrętkę.

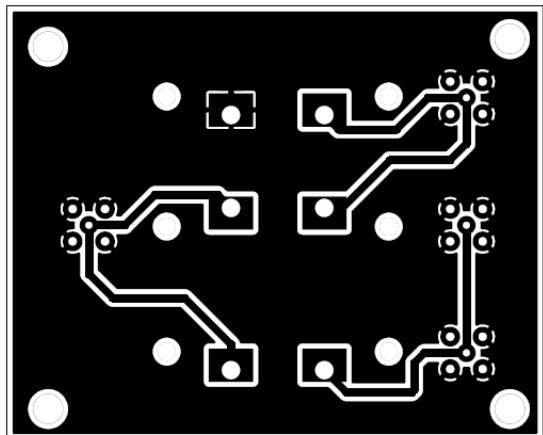
Złącza radiowe użyte w płytce przyjmocowano za pomocą metalowych śrubek. W celu zapobiegnięcia zwarcia układu z metalowymi elementami, wykonano nakrętki osłaniające końcówki śrubek. Model nakrętki przedstawiono na Rysunku 4.



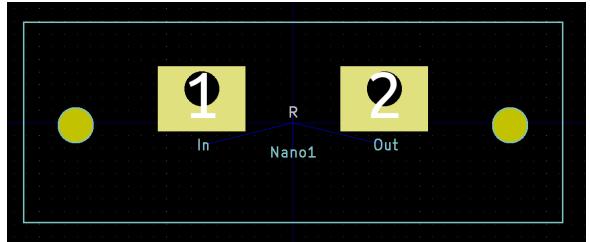
(a) Schemat układu drukowanego



(b) Wygląd płytki

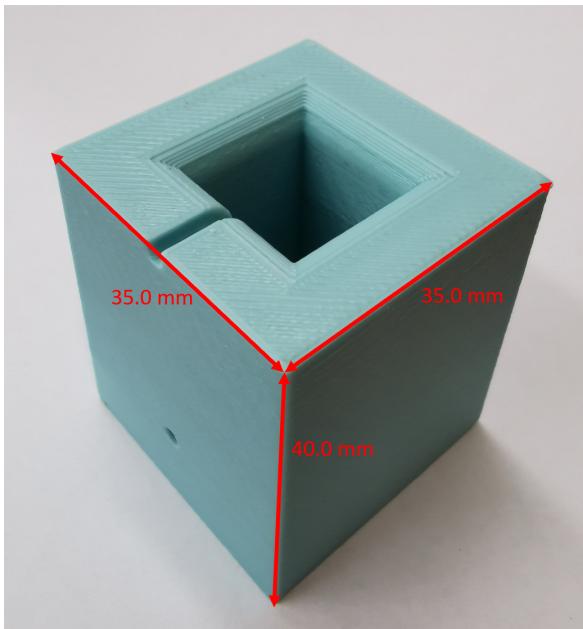


(c) Maska

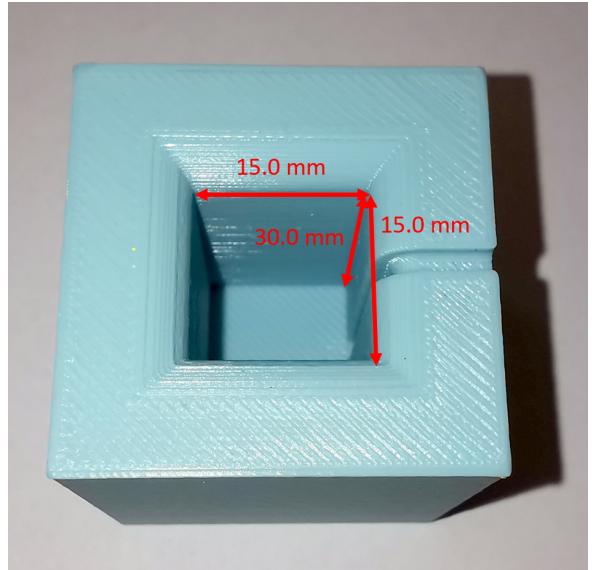


(d) Footprint złącza radiowego

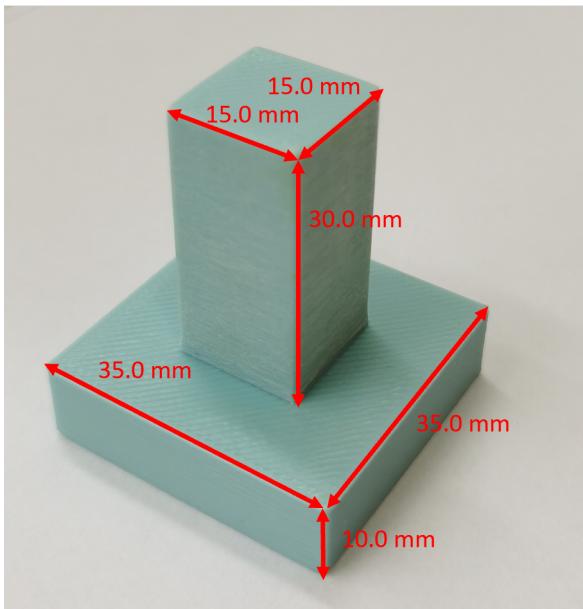
Rysunek 1: (a) Schemat ideowy płytki drukowanej, za pomocą którego wykonano pomiary. Układ składa się z 3 złącz radiowych oraz 4 gniazda BNC. (b) Wygląd płytki po uwzględnieniu fizycznych elementów. (c) Maska układu gotowa do przeniesienia na płytke. W rogach widoczne są otwory, w których zostaną umieszczone nóżki. (d) Footprint złącza radiowego, 1 i 2 oznaczono odpowiednio wejście i wyjście złącza, na żółto oznaczono miejsce otworów na śrubki mocujące.



(a) Wymiary zewnętrzne tłoka



(b) Wymiary wewnętrzne tłoka

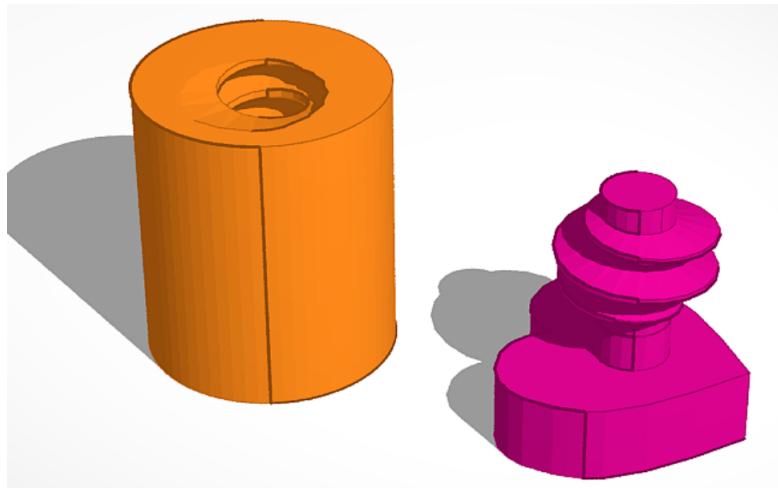


(c) Wymiary górnej części tłoka

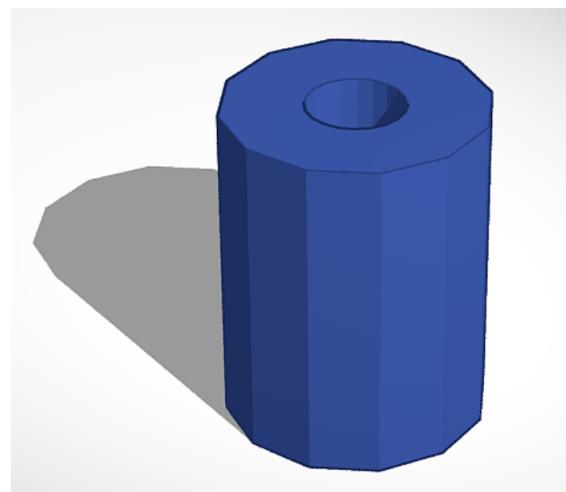


(d) Nieściśnięty tłok z gąbką w środku

Rysunek 2: Wymiary tłoka używanego do mierzenia elektrod gąbkowych. Jedna z elektrod pomiarowych jest wkładana na dno tłoka, a kabel od niej przechodzi przez otwór widoczny na Rysunku (a), następnie umieszcza się elektrodę gąbkową i drugą elektrodę pomiarową, której kabelek mieści się w rynnicy widocznej na Rysunku (a) oraz (b). Całość przyciskana jest przed górną częścią tłoka. Cały tłok z widocznymi dziurkami ułatwiającym parowanie wody oraz linijką naklejoną na górną część tłoka pozwalającą na kontrolowanie ścisnięcia gąbki widoczny jest na Rysunku (d).



Rysunek 3: Model nóżki użytej do odizolowania płytki od podłoża. Aby móc je przymocować stworzono je w formie śrubki z nakrętką.



Rysunek 4: Model nakrętki pozwalający na odizolowanie śrubek mocujących złącza radiowe.

### 4.3 Elektrody

Elektrody służące do przekazywania sygnału z badanej elektrody wykonano ze srebrnych zawieszek o próbie 925 (Rysunek 5) i średnicy 12 mm. Spłaszczenie ich za pomocą imadła pozwoliło na powstanie okrągłych elektrod o średnicy 14 mm. Do zawieszek przylutowano kable, miejscełączenia zostało zabezpieczone i odizolowane za pomocą kleju cyjanoakrylowego lub bezbarwnego lakieru do paznokci. Następnie całość umieszczono w roztworze podchlorynu sodu na przynajmniej 30 minut aby doszło do wytworzenia warstwy Ag/AgCl. Tak przygotowane elektrody zostały sprawdzone za pomocą elektrody referencyjnej, poprzez zanurzenie ich w roztworze soli fizjologicznej i mierzenie wytworzzonego napięcia. Jeśli napięcie między elektrodami było bliskie 0 mV (poniżej 30 mV) to uznawano elektrodę za dobrze przygotowaną. Elektrody używano maksymalnie przez 48 h, gdyż mniej więcej po tym czasie następowało ich zużycie. Zużyte elektrody odnawiano wkładając ponownie do roztworu podchlorynu.



Rysunek 5: Srebrna zawieszka użyta do wytworzenia elektrod.

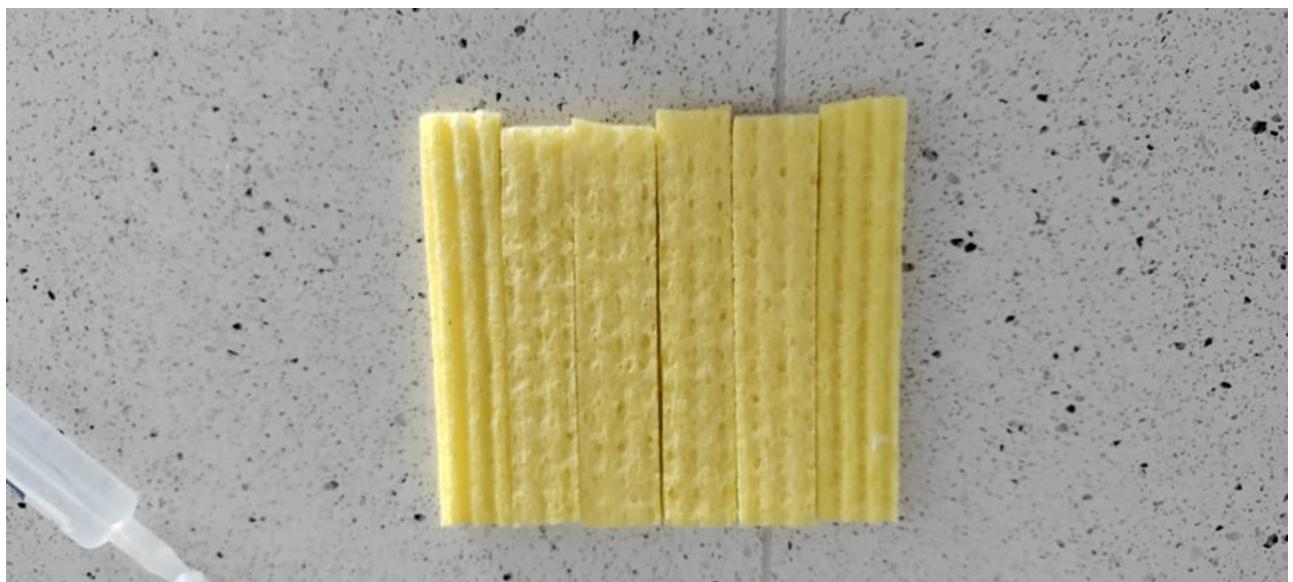
## 5 Przebieg eksperymentu

W ramach eksperymentu porównano oporności gąbek przy różnym stopniu zasolenia i ścisnięcia. Zdecydowano, że zostaną zmierzone następujące roztwory:

- sól fizjologiczna (0,9%)
- roztwór wody z kranu i soli o stężeniu 0,9%
- roztwór wody z kranu i soli o stężeniu 20%
- roztwór wody destylowanej i soli o stężeniu 0,9%
- roztwór wody destylowanej i soli o stężeniu 20%

Gąbki (niewyprane) na początku zostały pocięte w paski ok. 1.5 cm x 7.5 cm (Rysunek 6), przy czym zrobiono to przed zmoczeniem całego płyta gąbki Viledy, gdyż zauważono, że po wyschnięciu zmienia swój rozmiar. Sytuację te przedstawia Rysunek 7, gdzie widać gąbki w dwóch kolorach. Z różowej gąbki odcięto pasek z lewej strony, a następnie ją zmoczono i pozostawiono do wyschnięcia. Zielona gąbka jest standardowego rozmiaru przed jakąkolwiek obróbką. U dołu widać, że rozmiar gąbki różowej różni się znaczco od gąbki zielonej.

Tak przygotowane paski złożono w harmonijki o wysokości wynoszącej  $1.5 \pm 0.043$  cm (niepewność wynika z pomiarów wszystkich gąbek użytych w doświadczeniu oraz niepewności linijki, Wzór 7) oraz boku równym 1.5 cm. Takie złożenie pozwoliło na całkowite wypełnienie przestrzeni wewnętrznej tłoka, co umożliwiło przyjęcie braku błędu boku elektrody gąbkowej.



Rysunek 6: Paski na jakie pocięto gąbki Vileda w celu stworzenia elektrod gąbkowych.



Rysunek 7: Porównanie rozmiaru gąbek bez jakiekolwiek obróbki oraz pozostawionej do wyschnięcia po ówczesnym jej zmoczeniu.

Przy każdym ze stężeń wykonano pomiar przy braku ściśnięcia, ściśnięciu do 2/3 oraz 1/3 wysokości. Dodatkowo dla każdego stężenia i ściśnięcia robiono pomiary dla częstotliwości od 1 do 100 Hz (co 1 Hz).

Ściśnięcie gąbki kontrolowane było za pomocą tłoka z linijką oraz imadła. Roztwory przyrządzone korzystając z wagi o dokładności 0.01 g.

Za pomocą funkcji napisanych w języku Python sterowano generatorem oraz odczytywano i analizowano sygnały. Na wejściu na płytę puszczano sygnały sinusoidalne o amplitudzie 1.7 V i czasie trwania 5 s z wykorzystaniem odpowiednich parametrów (częstotliwość, ściśnięcie, rodzaj i stopień zasolenia). Częstotliwość próbkowania wynosiła 1000 Hz. Sygnały dla danego stężenia i ściśnięcia puszczano jeden za drugim przez 24 h przechodząc przez kolejne częstotliwości i następnie powtarzając zakres. Pilnowano jedynie, żeby zbieranie sygnału rozpoczynało się w miejscu, gdzie sinus przechodził przez początek układu współrzędnych (punkt (0,0)).

Wygląd całego układu po zmontowaniu przedstawiono na Rysunku 8.



Rysunek 8: Zdjęcie całego układu pomiarowego.

## 6 Metodologia

### 6.1 Pomiar i metody analizy

Przed przystąpieniem do rejestracji sygnałów sprawdzono wpływ zakłóceń wynikających z otoczenia na ich przebieg. W warunkach kontrolowanych nie zauważono znaczących odchyleń ani w sygnale wychodzący ani w sygnale rejestrowanym przez układ. Mimo to starano się poprzez analizę wyeliminować potencjalne zakłócenia.

Sygnały zbierano w trzech punktach:

- $U_1$  - po wejściu do układu

- $U_2$  - po przejściu przez pierwszy opornik  $R_1$
- $U_3$  - po przejściu przez gąbkę

Pozwoliło to na obliczenie spadków napięć na poszczególnych elementach obwodu:

- $V_{R_1} = U_2 - U_1$  - spadek napięcia na oporniku  $R_1$
- $V_{R_g} = U_3 - U_2$  - spadek napięcia na elektrodzie gąbkowej
- $V_{R_2} = U_3 - 0V = U_3$  - spadek napięcia na oporniku  $R_2$

Z II prawa Kirchhoffa wiadomo, że suma spadków napięć na opornikach jest równa sumie sił elektromotorycznych.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{gen} &= V_{R_1} + V_{R_g} + V_{R_2} \\ &= I(R_1 + R_g + R_2) \\ &= IR_1 + IR_g + IR_2\end{aligned}\tag{2}$$

Ponieważ jest znana wartość oporu  $R_1$  oraz spadek napięcia na tym oporniku, można wyznaczyć natężenie  $I$ .

$$I = \frac{V_{R_1}}{R_1}\tag{3}$$

Znając natężenie prądu płynącego w obwodzie można wyznaczyć opór gąbki  $R_g$ .

$$R_g = \frac{V_{R_g}}{I}\tag{4}$$

Ostatecznie otrzymano:

$$R_g = \frac{V_{R_g}}{V_{R_1}} R_1\tag{5}$$

Kluczową dla projektu wartością jest oporność, którą otrzymano ze Wzoru (6). We wzorze tym  $S$  jest polem powierzchni, a  $L$  wysokością. Jak wspomniano wyżej, gąbki ściskano tym samym zmniejszając ich wysokość. Dla każdego pomiaru zapisywano oryginalną wysokość gąbki  $h_o$  (1.5 cm) oraz wysokość ściśnięcia  $h_s$  (0 cm, 0.5 cm, 1 cm). Na podstawie tych dwóch wartości obliczano nową wysokość gąbki  $L = h_o - h_s$ .

$$\rho_g = \frac{R_g \cdot S}{L}\tag{6}$$

Przy obliczaniu błędów skorzystano z dwóch wzorów. Wzór (7) pokazuje sposób na obliczenie niepewności bezpośrednio zmierzonej wielkości  $u$ , gdzie  $\Delta$  jest niepewnością przyrządu pomiarowego a  $s$  odchyleniem standardowym wynikającym z wielokrotnych pomiarów tej samej wielkości. Natomiast niepewność  $u_f$  wielkości przedstawianej za pomocą funkcji  $f$  zależnej od  $N$  wartości  $x_i$  które mają niepewności  $u_{x_i}$  oblicza się za pomocą Wzoru (8). W tym przypadku ze Wzoru (7) skorzystano przy obliczeniu niepewności oryginalnej wysokości gąbki ( $h_o$ ), wysokości ściśnięcia ( $h_s$ ) oraz oporów  $R_1$  i  $R_2$ , a w pozostałych przypadkach został zastosowany Wzór (8).

$$u = \sqrt{\frac{\Delta^2}{3} + s^2}\tag{7}$$

$$u_f = \sqrt{\sum_{i=0}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u_{x_i} \right)^2} \quad (8)$$

Do estymacji parametrów zebranych sygnałów wykorzystano trzy różne metody:

- dopasowanie sinusa,
- sygnał analityczny,
- analizę Fouriera.

Metody te opisano poniżej.

## 6.2 Estymacja parametrów

Za pomocą generatora wysyłano sygnał w postaci sinusa, którego można opisać następującym wzorem:

$$f(t) = A \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \varphi) + c, \quad (9)$$

gdzie  $A$  to amplituda,  $f$  częstotliwość,  $t$  czas,  $\varphi$  to przesunięcie fazowe, a  $c$  to offset.

### 6.2.1 Dopasowanie sinusa

Do zebranych próbek dopasowano funkcję sinus, tak aby znaleźć taką wartość parametru  $\beta = (A, f, \varphi, c)$ , która minimalizowałaby funkcję  $\chi^2$ .

$$\chi^2 = \frac{1}{2} \sum_i (y_i - f(x_i, \beta))^2 \quad (10)$$

$$\arg \min_{\beta} \frac{1}{2} \sum_i (y_i - f(x_i, \beta))^2 \quad (11)$$

Założenie to zostanie spełnione, gdy  $\frac{\partial \chi^2}{\partial \beta} = 0$ . Kiedy minimalizacja nieliniowej funkcji przebiega przy pomocy najmniejszych kwadratów można skorzystać z algorytmu Levenberga-Marquardta[5]. Jest to metoda iteracyjna wykorzystująca metodę największego spadku, która przy niejednoznacznie zdefiniowanych sygnałach, może zbiegać do lokalnego minimum zamiast do minimum globalnego. Drugą wadą tej metody jest czas potrzebny na obliczenia. Metoda ta jest 4-8 razy wolniejsza niż pozostałe. Jej zaletami są jawnie zdefiniowane niepewności dopasowania oraz to, że nie potrzebuje informacji dla jakiej częstotliwości dopasowuje parametry.

### 6.2.2 Sygnał analityczny

W celu przygotowania sygnału do analizy policzono jego średnią i uznano ją za offset funkcji. Następnie odjęto ją od sygnału i za pomocą wbudowanej funkcji bazującej na transformacie Hilberta (Wzór 13) obliczono sygnał analityczny przedstawiany za pomocą wzoru: [6]

$$z(t) = x(t) + ix_H(t), \quad (12)$$

gdzie  $x(t)$  jest sygnałem a  $x_H(t)$  jego transformatą Hilberta.

$$x_H(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (13)$$

Korzystając z własności funkcji zespolonej oraz że sygnał analityczny można zapisać również w postaci

$$z(t) = |z(t)|e^{i\phi(t)}, \quad (14)$$

obliczono amplitudę chwilową sygnału jako wartość bezwzględną z sygnału analitycznego. W celu eliminacji potencjalnych zakłóceń postanowiono policzyć średnią ( $m$ ) oraz odchylnie standardowe ( $\sigma$ ) z otrzymanych wyników i wyeliminować wszystkie wartości nie mieszczące się w zakresie  $m \pm \sigma$ . Na koniec z otrzymanej listy wyników wyciągnięto medianę. Posługując się ponownie zależnością wyrażoną za pomocą Wzoru (14) znaleziono fazę szukanego sygnału. Wartości w każdej chwili czasowej zostały obliczone za pomocą wbudowanych funkcji, a dalsza analiza posłużyła się analogiczną statystyką jak przy liczeniu amplitudy [7].

Ponieważ ta metoda nie ma niepewności podanej w jawnym sposób wyznaczone je za pomocą metody bootstrap (sekcja 6.2.4), a uzyskane wartości można zobaczyć w Tabeli 1.

### 6.2.3 Fourier

Surowy sygnał poddano Dyskretnej Transformacie Fouriera przy pomocy algorytmu FFT (fast Fourier transform), zgodnie ze wzorem:

$$s[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s[n] e^{2i\pi \frac{kn}{N}}. \quad (15)$$

Gdzie  $N$  - liczba próbek w czasie,  $k$  - częstotliwość.

Offset sygnału to wartość bezwzględna  $s[k = 0]$ . Dla szukanej częstotliwości  $f$  znajdujemy wartość  $s[k = f]$ , która jest liczbą zespoloną. Wartość bezwzględna i faza tej liczby to kolejno amplituda i faza sygnału dla danej częstotliwości.

Niepewności estymowanych parametrów zostały przyjęte jako niepewności wyznaczone w sekcji 6.2.4 podane w Tabeli 1.

### 6.2.4 Wyznaczanie niepewności metod

Aby sprawdzić skuteczność wyżej wymienionych metod, skorzystano z metody bootstrapu.

W tym celu stworzono symulowane sygnały z następującymi parametrami (dla każdej częstotliwości z zakresu 1-100 Hz):

1. Amplituda od 0.1 do 4 V
2. Faza od 0 do  $2\pi$
3. Offset od -1 do 1 V
4. Szum od 0 do 5% wartości amplitudy

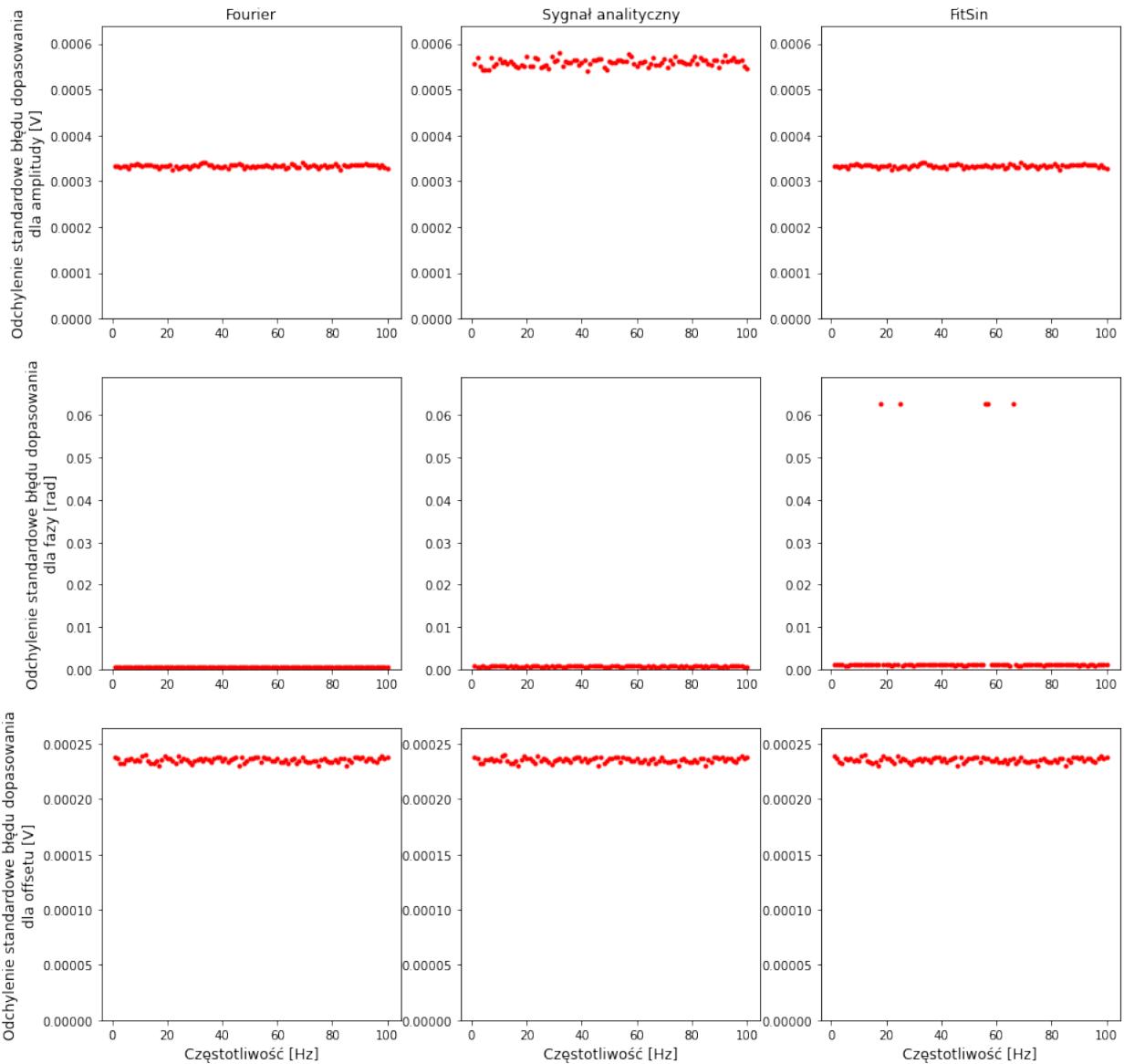
Dla każdej częstotliwości wykonano 10000 losowań tych sygnałów i podjęto próbę wyznaczenia offsetu, amplitudy i fazy, przy znanej częstotliwości. Dla każdego dopasowania obliczono błąd jako różnicę między poprawną wartością a estymowaną.

## 7 Wyniki

Przy wszystkich pomiarach skorzystano z tych samych oporników  $R_1 = (392.000 \pm 9.136) \Omega$ ,  $R_2 = (385 \pm 9.080) \Omega$ .

## 7.1 Bootstrap

Na Rysunku 9 przedstawiono odchylenia standardowe błędów dopasowań amplitudy, fazy oraz offsetu dla każdej z metod estymacji. Wynika z niego, że częstotliwość nie ma wpływu na dokładność dopasowania. Można więc przyjąć, że błąd dopasowania dla danej metody i dla danego parametru to średnia z odchyleń standardowych po wszystkich częstotliwościach. Ostateczne niepewności dopasowania przedstawiono w Tabeli 1.



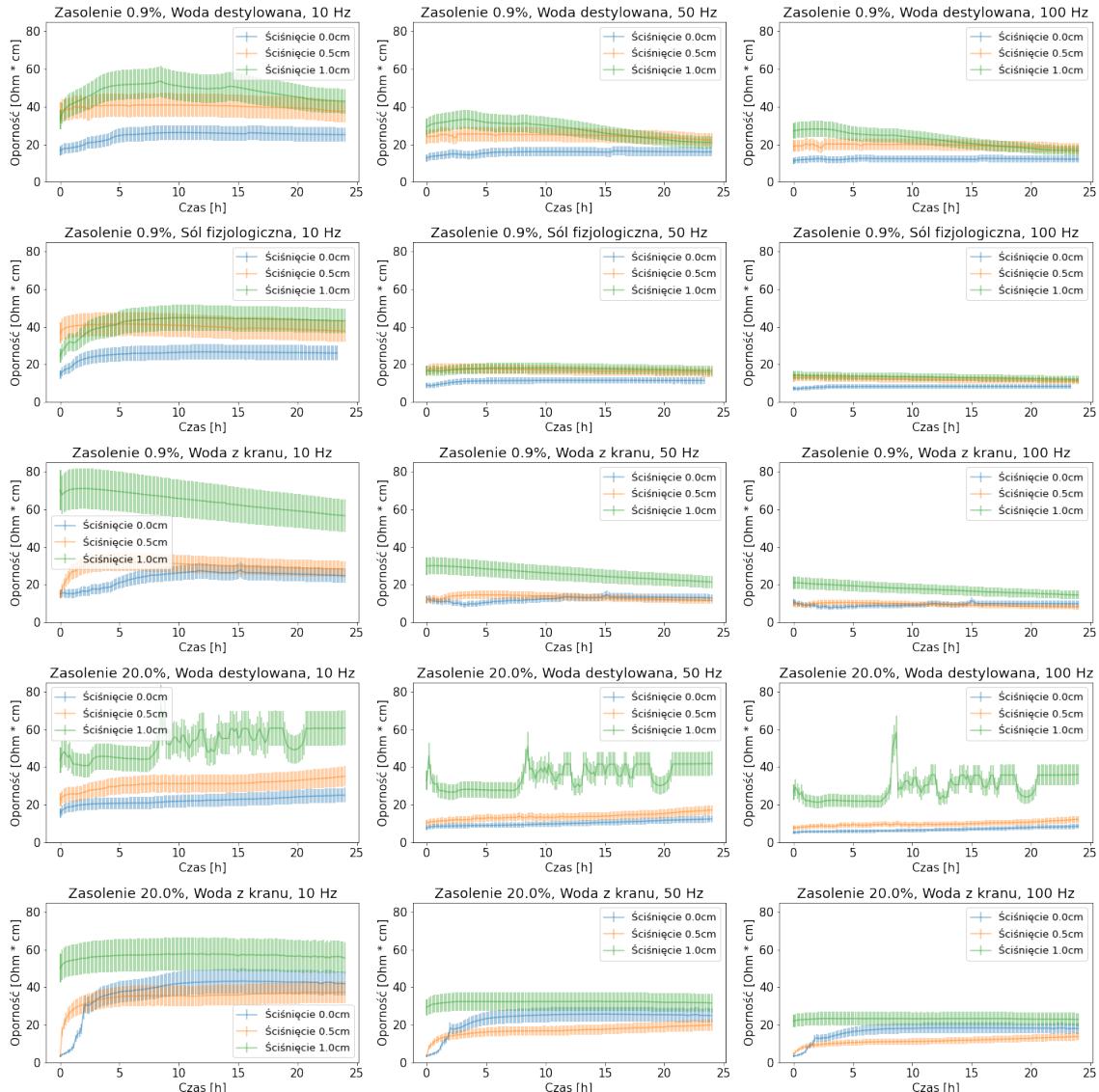
Rysunek 9: Odchylenia standardowe błędów dopasowań estymatorów wykonane za pomocą metody bootstrap.

## 7.2 Oporność

Korzystając z Wzoru 6 znaleziono wartości oporności w każdej chwili czasowej z 24 godzinnego pomiaru dla sygnałów o częstotliwościach 10 Hz, 50 Hz oraz 100 Hz przy każdym z poziomów stężeń zasolenia oraz rodzaju rozpuszczalnika. Wyniki wraz z niepewnościami (Wzór 8) przedstawiono na Rysunku 10. Zielonym kolorem zaznaczono wyniki dla ściśnięcia o 1 cm, pomarańczowym ściśnięcie o 0,5 cm, a niebieskim brak ściśnięcia (oznaczane jako 0 cm). Podpisy poszczególnych wykresów wskazują na rodzaj roztworu oraz częstotliwość sygnału.

	<b>Fourier</b>	<b>Sygnal analityczny</b>	<b>Dopasowanie sinusa</b>
<b>Amplituda [V]</b>	0.00033	0.00056	0.00033
<b>Faza [rad]</b>	0.00053	0.00073	0.0041
<b>Offset [V]</b>	0.00024	0.00024	0.00024

Tabela 1: Niepewności dopasowań otrzymane z metody bootstrap.

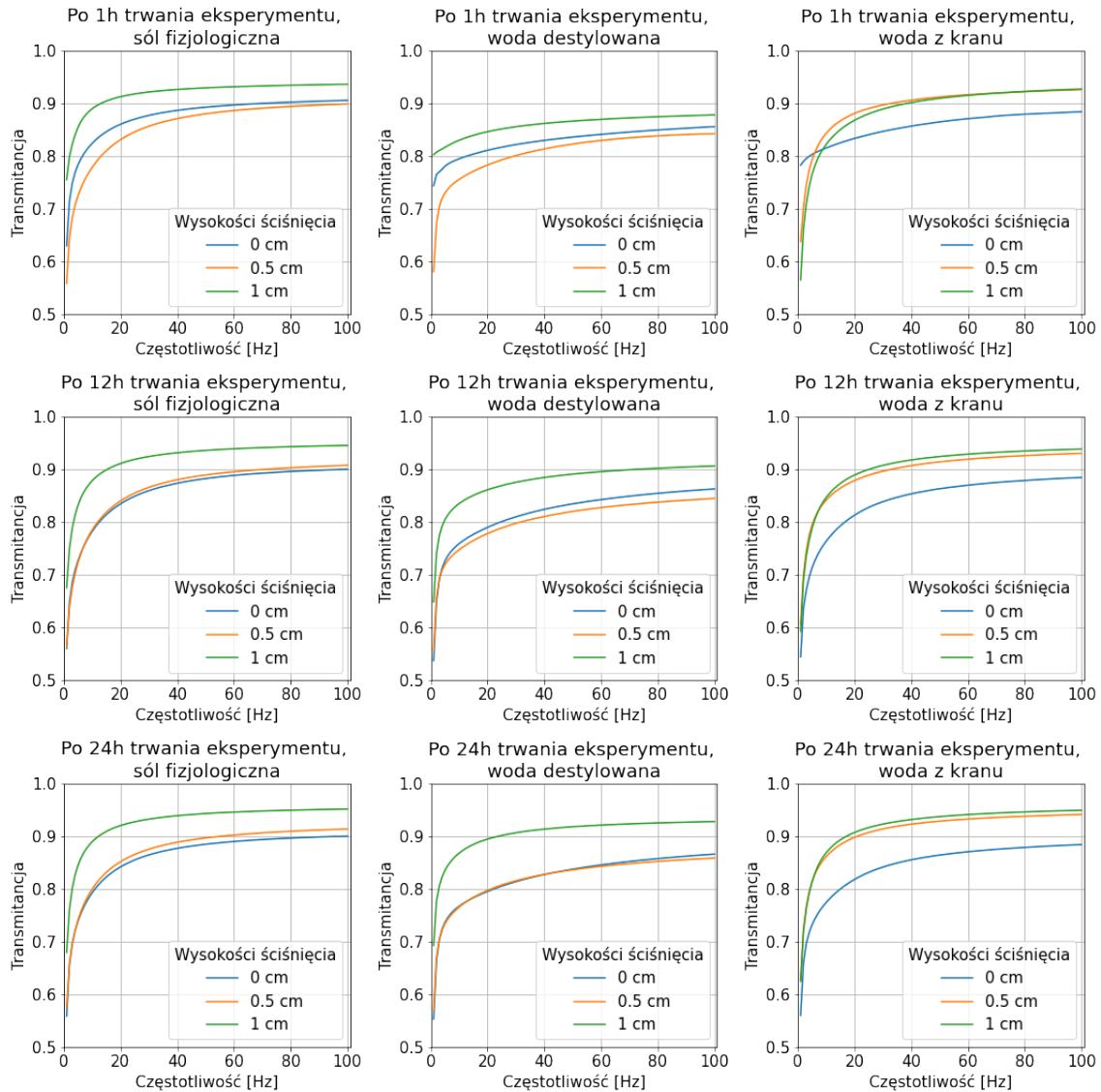


Rysunek 10: Oporność w zależności od czasu wraz z niepewnościami wyznaczona przy pomocy estymatora fourierowskiego dla sygnałów o częstotliwościach 10, 50 oraz 100 Hz. Zielonym kolorem zaznaczono wyniki dla ściśnięcia o 1 cm, pomarańczowym ściśnięcie o 0,5 cm, a niebieskim brak ściśnięcia.

### 7.3 Elektroda gąbkowa jako filtr

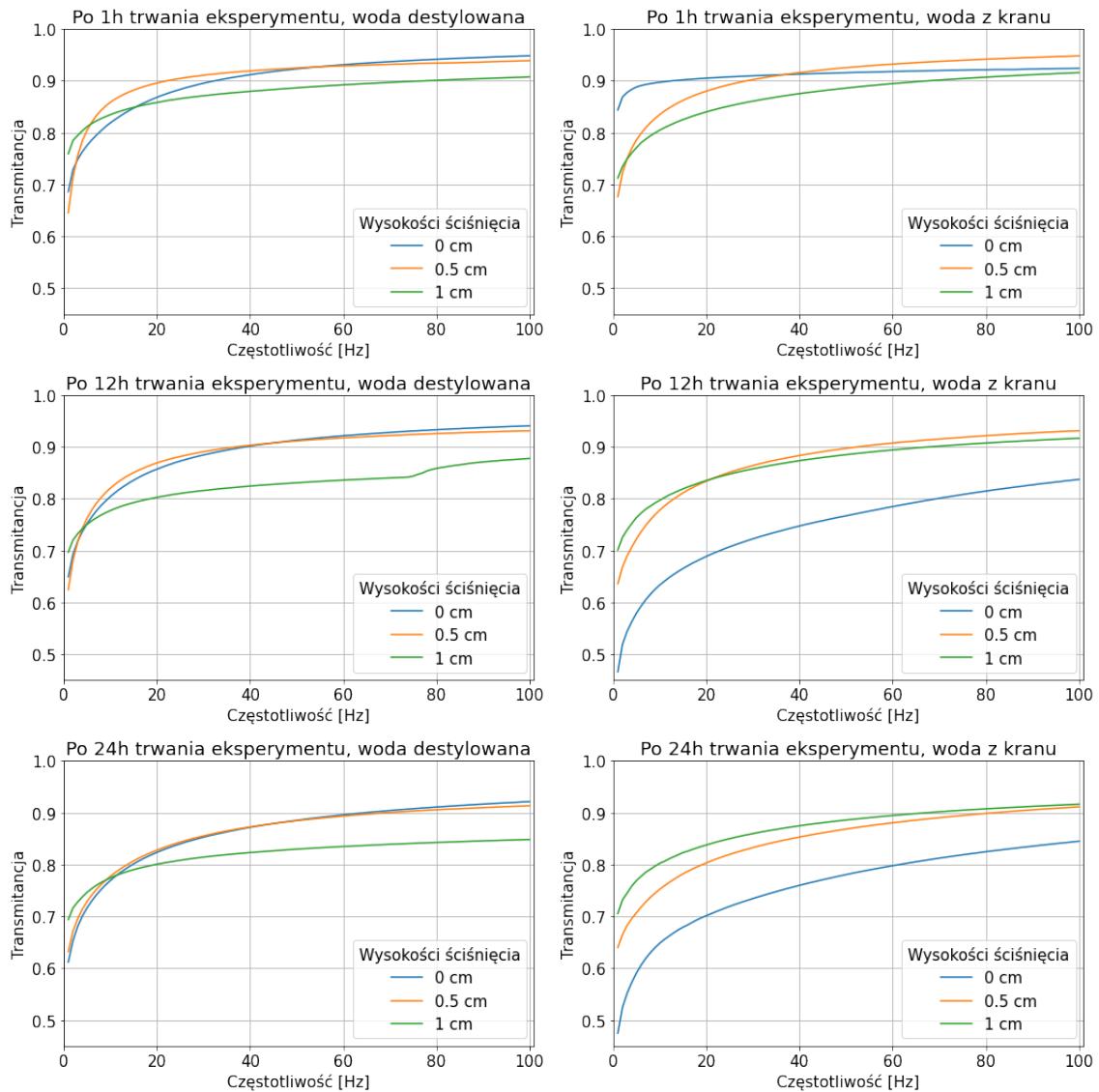
Kolejnym ważnym aspektem analizy jest zbadanie właściwości elektrody gąbkowej jako filtra. W tym przypadku postanowiono wyznaczyć transmitancję sygnału ( $U_3/U_2$ ) oraz przesunięcie fazowe ( $faza(U_3) - faza(U_2)$ ), porównując sygnał przed wejściem do elektrody gąbkowej ( $U_2$ ) i po wyjściu z niej ( $U_3$ ). Trzeba jednak pamiętać, iż metoda transmitancji sygnału zakłada liniowość badanego układu.

Transmitancję widmową sygnału przedstawiono na Rysunkach 11 oraz 12 odpowiednio dla zasolenia 0.9% oraz 20%.

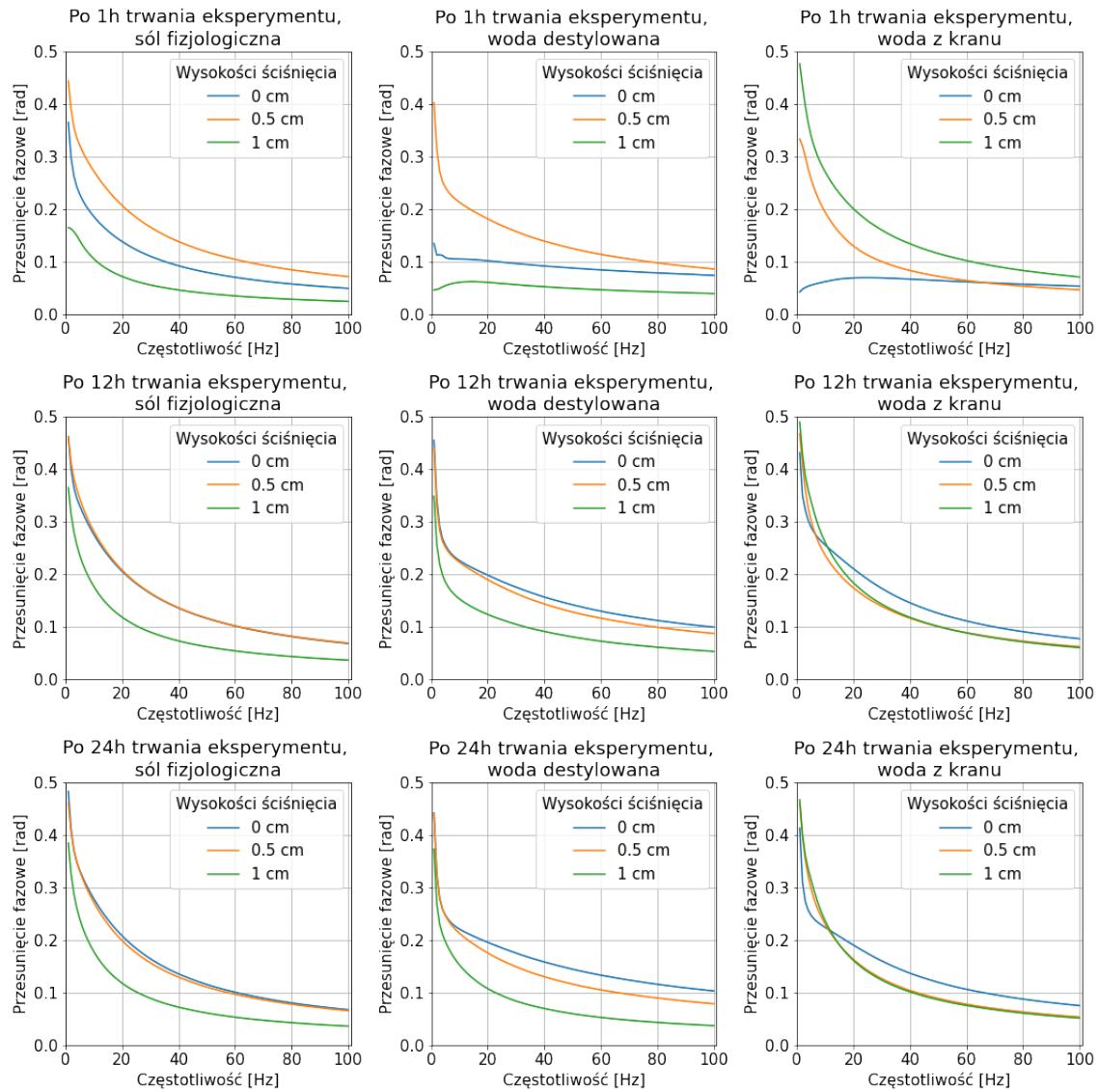


Rysunek 11: Porównanie transmitancji sygnału przechodzącego przez elektrodę gąbkową w zależności od częstotliwości dla różnych rodzajów płynów przy zasoleniu 0.9%. Zależności wyznaczono przy pomocy estymatora fourierowskiego.

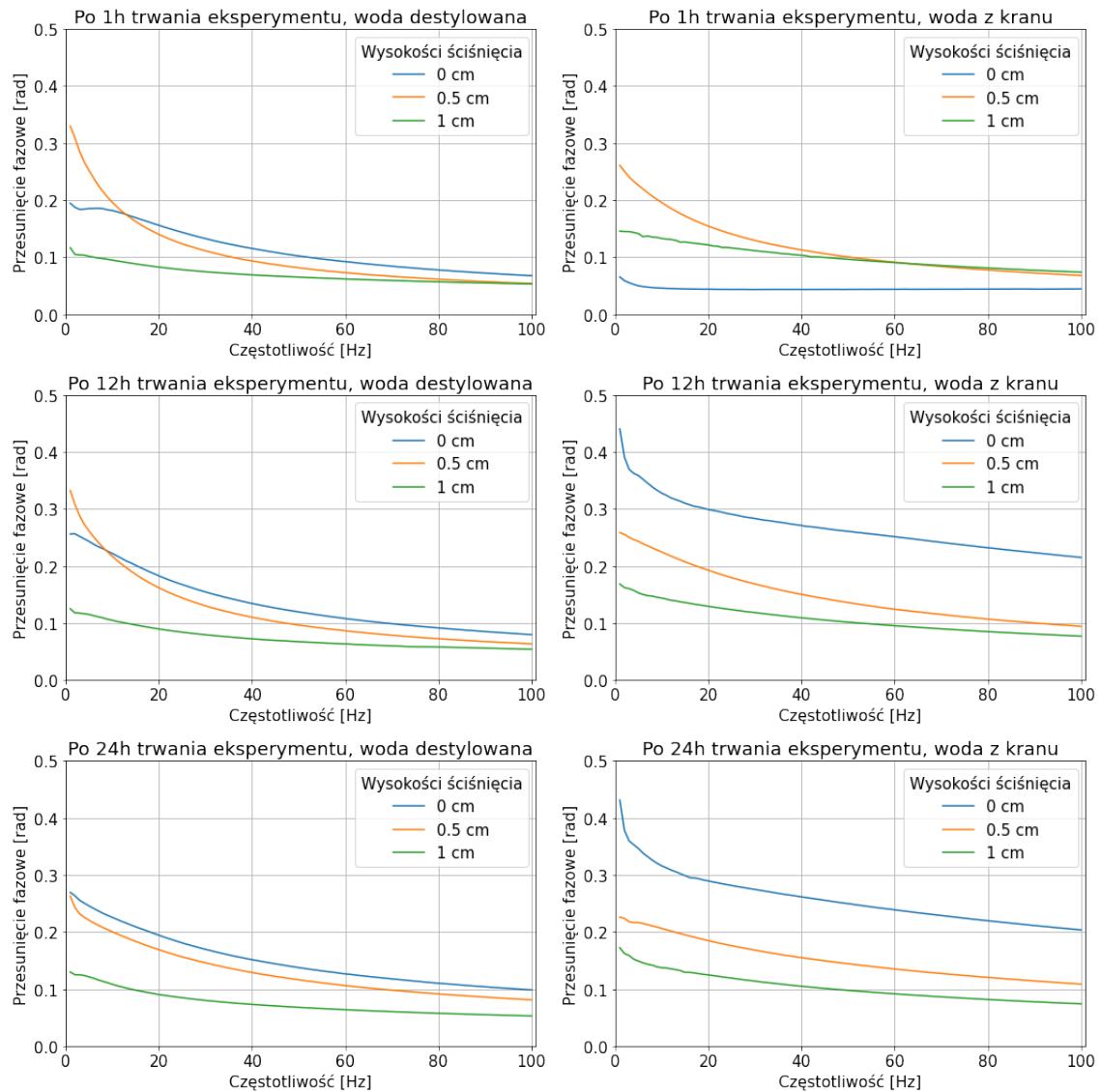
Przesunięcia fazowe w zależności do częstotliwości przedstawiono na Rysunkach 13 oraz 14 dla zasolenia kolejno 0.9% oraz 20%.



Rysunek 12: Porównanie transmitancji sygnału przechodzącego przez elektrodę gąbkową w zależności od częstotliwości dla różnych rodzajów płynów przy zasoleniu 20%. Zależności wyznaczono przy pomocy estymatora fourierowskiego.



Rysunek 13: Porównanie przesunięcia fazowego sygnału przez elektrodę gąbkową dla roztworów przygotowanych z różnych rozpuszczalników, zasolenie 0.9%, wyznaczone przy pomocy estymatora fourierowskiego.



Rysunek 14: Porównanie przesunięcia fazowego sygnału przez elektrodę gąbkową dla roztworów przygotowanych z różnych rozpuszczalników, zasolenie 20%, wyznaczone przy pomocy estymatora fourierowskiego.

## 8 Wnioski

### 8.1 Bootstrap

Analizując informacje zawarte w Tabeli 1 widać, że najmniejsze błędy dopasowania dała metoda korzystająca z analizy fourierowskiej. Mimo że nie zauważono istotnych różnic w wynikach estymatorów dla rzeczywistych danych, w dalszych wynikach przedstawiono jedynie wyniki bazujące na tej właśnie metodzie.

### 8.2 Oporność

Pierwszą właściwością jaką można zauważyć na Rysunku 10 jest to, że oporność maleje wraz ze wzrostem częstotliwości. Drugą dobrze widoczną właściwością jest wartość oporności dla ścisnięcia elektrody gąbkowej o 1 cm, która zawsze jest największa. Może to być wynik szybszej utraty roztworu soli spowodowanej mocnym zgnieceniem gąbki. Nie można łatwo ustalić, czy czas badania sygnału sinusoidalnego wpływa na wartość oporności, gdyż wśród przedstawionych wykresów widać każdą z zależności. Na przykład dla roztworu wody destylowanej o stężeniu 0.9% przy częstotliwości 10 Hz oporność z początku rośnie, aby następnie zmaleć; w przypadku soli fizjologicznej zarówno dla 50 jak i 100 Hz wartość ta pozostaje stała w czasie, a przy niektórych wartościach ścisnięcia maleje (głównie w przypadku skurczenia elektrody gąbkowej o 1 cm). Warto zwrócić uwagę również na wykresy wody destylowanej o stężeniu 20%, gdzie dla wszystkich ścisnięć oporność rośnie w czasie a dla ścisnięcia o 1 cm przy każdej z częstotliwości pojawiły się zakłócenia. Mogą one być zarówno wynikiem zmian temperatury, czy wilgotności pomieszczenia jak i trącenia urządzenia pomiarowego lub niedokładnego podłączenia elementów.

Zdecydowanie największą oporność ma woda z kranu dla zasolenia 0.9%, ścisiku 1 cm oraz częstotliwości 10 Hz. Najmniejsze zaś wartości można zaobserwować dla soli fizjologicznej dla wyższych częstotliwości. W tym przypadku nawet ścisnięcie nie ma dużego znaczenia.

### 8.3 Transmitancja

Rysunek 11 oraz Rysunek 12 pokazują stosunki prądów wypływających z elektrody gąbkowej do prądów wpływających do niej w zależności od częstotliwości.

Łatwo zauważyć, że stosunek ten zwiększa się wraz ze wzrostem częstotliwości niezależnie od innych parametrów elektrody. Oznacza to, że im wyższa jest częstotliwość sygnału tym mniejszą oporność ma elektroda gąbkowa.

Tylko dla wody destylowanej widać wzrost stosunku przepływów dla ścisnięcia o 1 cm wraz z upływanym czasem, co sugerowałoby spadek oporności w czasie.

Dla stężenia 0.9% nie widać znaczących zmian w czasie dla soli fizjologicznej, co jest również wyraźnie widoczne w przypadku oporności.

W obu przypadkach najlepiej wypadła sól fizjologiczna dla wyższych częstotliwości. Najbardziej widoczną z nich jest spadek oporności dla największych ścisnięć w przypadku analizy transmitancji i jej wzrost przy porównywaniu samych wartości oporności.

Dotychczasowe wnioski zgadzają się z wnioskami wyciągniętymi z sekcji 8.2. Jednak jest niestety dużo właściwości, które się nie pokrywają.

Najgorszą transmitancję ma woda destylowana dla 20% stężenia i ścisnięcia 1 cm, gdy przy opornościach najgorzej wypadła woda z kranu dla stężenia 0.9% i 10 Hz.

Również inaczej sytuacja wygląda na Rysunku 12, czyli dla stężenia 20%. Dla wody z kranu zależność czasową widać tylko dla braku ścisnięcia, gdy dla wody destylowanej jest to widoczne tylko dla ścisnięcia 1 cm. W obu przypadkach pozostałe dwa ścisnięcia są do siebie podobne i utrzymują się na

stałym poziomie.

Różnice mogą wynikać z tego, że badany układ ma w sobie trochę nieliniowości. Do sprawdzenia tego najlepszą metodą jest analiza przesunięć fazowych.

Zwiększenie częstotliwości, co pokazuje Rysunek 13 oraz Rysunek 14 wpływa na zmniejszenie przesunięcia fazowego zbieranych sygnałów. Jedynie w dwóch przypadkach skurczenie gąbki o 1 cm nie daje najmniejszych różnic. Dzieje się tak zarówno dla roztworu 0,9% jak i roztworu 20% wody z kranu po pierwszej godzinie od uruchomienia eksperymentu. Z wyjątkiem roztworu 0,9% z wodą destylowaną, gdzie z początku zarówno dla skurczenia elektrody gąbkowej o 0,5 cm jak i o 1 cm przesunięcia fazy były na stałym poziomie, by następnie przybliżyć się kształtem do tego oznaczającego brak ściśnięcia, wartości różnic dla największego ze ściśnięć nie zmieniają się w czasie.

Przesunięcia fazowe w większości przypadków są na tyle istotne, że nie można założyć iż układ jest liniowy. Mamy więc do czynienia dodatkowo z reaktancją, której nie jesteśmy w stanie zbadać.

## 9 Podziękowania

Serdeczne podziękowania dla Pawła Prokopczyka za pomoc w wykonaniu modelu tłoka oraz wydrukowanie go na drukarce 3D.

Gorące podziękowania dla Inkubatora Uniwersytetu Warszawskiego za pomoc w renowacji imadła, wytrawieniu i przygotowaniu płytki, udostępnienie materiałów oraz sal i wsparcie udzielone podczas wykonywania projektu mimo okresu pandemicznego.

Podziękowania dla pracowni wstępnej za udostępnienie wagi.

## 10 Podział obowiązków

Niniejszy projekt został zrealizowany w ramach Zespołowych Projektów Studenckich i został sfinansowany z mini grantów ZPS. Autorzy projektu i raportu potwierdzają równy udział wszystkich członków i członkiń zespołu (~33% każdy/-a) w pracach projektowych, programistycznych i sprawozdawczych.

## Literatura

- [1] [https://brain.fuw.edu.pl/edu/index.php/Pracownia\\_Sygna%C5%82%C3%B3w\\_Biologicznych/Zajecia\\_9](https://brain.fuw.edu.pl/edu/index.php/Pracownia_Sygna%C5%82%C3%B3w_Biologicznych/Zajecia_9). Dostęp: 24-09-2021.
- [2] Eugenijus Kaniusas. *Biomedical Signals and Sensors III*. Springer International Publishing, 1st, edition, 2019.
- [3] <https://www.kicad.org/>. Dostęp: 11-04-2021.
- [4] <https://www.tinkercad.com/>. Dostęp: 10-06-2021.
- [5] Jorge J. Moré. The levenberg-marquardt algorithm: Implementation and theory. In *Lecture Notes in Mathematics*, pages 105–116. Springer Berlin Heidelberg, 1978.
- [6] <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.hilbert.html>. Dostęp: 21-05-2021.
- [7] [https://brain.fuw.edu.pl/edu/index.php/Pracownia\\_EEG/SSVEP\\_1](https://brain.fuw.edu.pl/edu/index.php/Pracownia_EEG/SSVEP_1). Dostęp: 02-09-2021.