



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I ROBOTYKI

KATEDRA MECHANIKI I WIBROAKUSTYKI

Praca dyplomowa

*Wpływ umiejscowienia mikrofonu względem przewodów na membranie
głośników gitarowych na rejestrowany sygnał.*

*Impact of microphone placement in relation to the guitar speakers'
signal wires on the recorded signal.*

Autor:	<i>Damian Hamowski</i>
Kierunek studiów:	<i>Inżynieria Akustyczna</i>
Opiekun pracy:	<i>dr hab. Marek Pluta</i>

Kraków, 2022

Spis treści

1. Wstęp	3
1.1. Wprowadzenie	3
1.2. Cel i zakres pracy	3
2. Przegląd aktualnego stanu wiedzy	5
3. Metodyka	6
3.1. Wstępne założenia	6
3.2. Tor pomiarowy	8
3.3. Analiza danych	10
3.3.1. Środek ciężkości widma	10
3.3.2. Kurtoza widmowa (spłaszczenie widma)	10
3.3.3. Porównanie widm w pasmach oktaowych	11
3.3.4. Porównanie dwóch punktów oraz półsfer	12
3.3.5. Test K-W	13
3.3.6. Usunięcie najbardziej odstającego pomiaru	13
3.4. Badane głośniki	14
4. Wyniki	15
4.1. Porównanie dwóch przeciwległych punktów	15
4.2. Porównanie dwóch półsfer	24
4.3. Porównanie środków ciężkości widma	26
4.4. Porównanie kurtozy widmowej (spłaszczenia widma)	29
4.5. Średnie wartości wraz z niepewnością rozszerzoną dla pasm oktaowych, w zależności od punktu pomiarowego	32
5. Omówienie wyników	41
5.1. Porównanie dwóch punktów	41
5.2. Porównanie dwóch półsfer	41
5.3. Porównanie środków ciężkości widma	42
5.4. Porównanie kurtozy widmowej (spłaszczenia widma)	42
5.5. Test K-W	43
6. Podsumowanie i wnioski	44
Literatura	46

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Wraz z rozwojem technologicznym w branży audio rośnie również zapotrzebowanie na nową wiedzę umożliwiającą bardziej świadome korzystanie z dostępnych na rynku urządzeń. Pożądaną cechą realizatora nagrań studyjnych, tudzież wydarzeń na żywo, jest umiejętność podejmowania szybkich i skutecznych decyzji podpartych wiedzą teoretyczną oraz doświadczeniem. Na przestrzeni lat zarówno praktycy jak i teoretycy tejże dyscypliny wypracowali różne standardy pracy ze sprzętem, których znajomość ma na celu usprawnienie pracy z dźwiękiem.

Niszą dziedziny audio, jaką traktuje ta praca inżynierska, jest sztuka mikrofonowania/nagłaśniania głośników gitarowych. Im dalej od źródła znajduje się mikrofon, tym mniejszy wpływ na zarejestrowany sygnał mają jego konkretne elementy. Analogicznie zmniejszając odległość, większe znaczenie zaczynają mieć pojedyncze cechy budowy źródła. Jedną z najbardziej popularnych metod rejestracji sygnału głośnikowej kolumny gitarowej jest ustawianie mikrofonu w polu bliskim, w niewielkiej odległości od membrany [11]. Oznacza to, że na percepcję rejestrowanego w ten sposób dźwięku mogą znacząco wpływać czynniki takie jak chociażby położenie mikrofonu, modalność drgającej powłoki, czy inne elementy budowy rozpatrywanego przetwornika elektroakustycznego, nie zapominając o obudowie w jakiej się on znajduje.

Każdy producent głośników gitarowych implementuje swoje własne rozwiązania mające na celu wyróżnienie jego produktu od pozostałych. Pomimo tego, zdecydowana większość zdaje się podążać za konkretnym typem budowy głośnika dynamicznego (magnetoelektrycznego), który został skonstruowany po raz pierwszy w 1924 r. przez C.W. Rice i E.W. Kellogg z firmy General Electric. Szczególną wspólną cechą badanych w tej pracy inżynierskiej głośników jest sposób mocowania przewodów. Przebijają one najbardziej delikatny element, czyli membranę, w celu doprowadzenia sygnału elektrycznego do cewki, pomijając zawieszenie amortyzujące. Dodatkowo zabezpieczane są one klejem naniesionym w omawianym miejscu na membranę. Taka ingerencja w naturalną modalność membrany może wpływać na sygnał rejestrowany w polu bliskim, powodując trudniejsze do przewidzenia, tudzież modelowania zachowania.

1.2. Cel i zakres pracy

Celem tej pracy inżynierskiej jest zaobserwowanie konkretnych, powtarzalnych zależności pomiędzy umiejscowieniem mikrofonu względem przewodów na membranie głośników gitarowych, a sygnałem rejestrowanym w polu bliskim. Zależności te docelowo mają umożliwić stworzenie listy wskazówek ułatwiających świadomą pracę z sygnałem kolumny gitarowej w studio nagraniowym, czy też przy koncertach na żywo. Przewody na głośnikach są łatwe do zlokalizowania, nawet jeśli samo ich mocowanie ukryte jest pod kopułką przeciwpylową.

Część pomiarowa polegała na pobraniu odpowiedzi impulsowych głośników gitarowych w wielu punktach w polu bliskim. Ponieważ kolejne pozycje mikrofonu ustawiane

były ręcznie, w celu zmniejszenia wpływu czynnika ludzkiego na wyniki, w każdym punkcie wykonano po kilka pomiarów.

Do celów porównawczych wykorzystano między innymi jednoliczbowe parametry opisujące widma sygnałów, takie jak środek ciężkości widma oraz kurtoza widmowa (inaczej spłaszczenie widma). Pozostałe analizy widm zarejestrowanych sygnałów wykonywane były po ich uprzednim podzieleniu na pasma oktauwowe. Do części obliczeniowej zaliczają się również testy statystyczne pozwalające ustalić normalność rozkładów danych, jak i równość ich średnich lub median.

2. Przegląd aktualnego stanu wiedzy

Temat wpływu mocowania przewodów na membranie głośników gitarowych na sygnał rejestrowany w polu bliskim jest poruszany przez inżyniera dźwięku i producenta Adama “Nolly” Getgood w krótkometrażowym filmie dokumentalnym “Guitar Tone Secrets: The Dark Side Of The Cone” [9]. Zwraca on uwagę na powtarzającą się w jego wieloletnich doświadczeniach zależność subiektywnego pojęcia barwy rejestrowanego sygnału od umiejscowienia mikrofonu (z naciskiem na obecność kleju zabezpieczającego przewody na membranie głośnika).

Dokument “Recording Electric Guitar - The Science and The Myth”, opublikowany pod nazwiskiem Alex Case w lutym 2010 roku dla Journal of the Audio Engineering Society [10] porusza zagadnienia podobne do omawianych w tej pracy inżynierskiej. Przedstawia wyniki badań wpływu trzech zmiennych parametrów na odpowiedź impulsową toru sygnałowego składającego się ze wzmacniacza gitarowego, głośnika w obudowie (combo gitarowe) i mikrofonu: odległość mikrofonu od środka membrany (promień), odległość mikrofonu od kolumny, oraz kąt ustawienia mikrofonu względem głośnika.

Na przestrzeni lat ustandaryzowane zostały również różne parametry głośników oraz sposób ich wyznaczania. Mają one pomóc w ocenie porównawczej przetworników różnych producentów, czy nawet kilku egzemplarzy tego samego modelu. Do literatury w tym zakresie można zaliczyć chociażby normę PN-EN 60268-5:2004 - “*Urządzenia systemów elektroakustycznych -- głośniki i zestawy głośnikowe*” [2].

W artykule dla miesięcznika Gitarre & Bass z sierpnia 2021 roku zatytułowanym “The Speakers for Electric Guitar” [11], jego autor Ignazio Vagnone nazywa głośnik gitarowy najbardziej kluczowym, a zarazem najmniej uhonorowanym elementem mającym wpływ na brzmienie gitary elektrycznej. Porusza wpływ poszczególnych elementów budowy przetworników elektroakustycznych na ich zachowanie, poczynając od membrany, przez kopułkę przeciwpylową, aż po sam magnes.

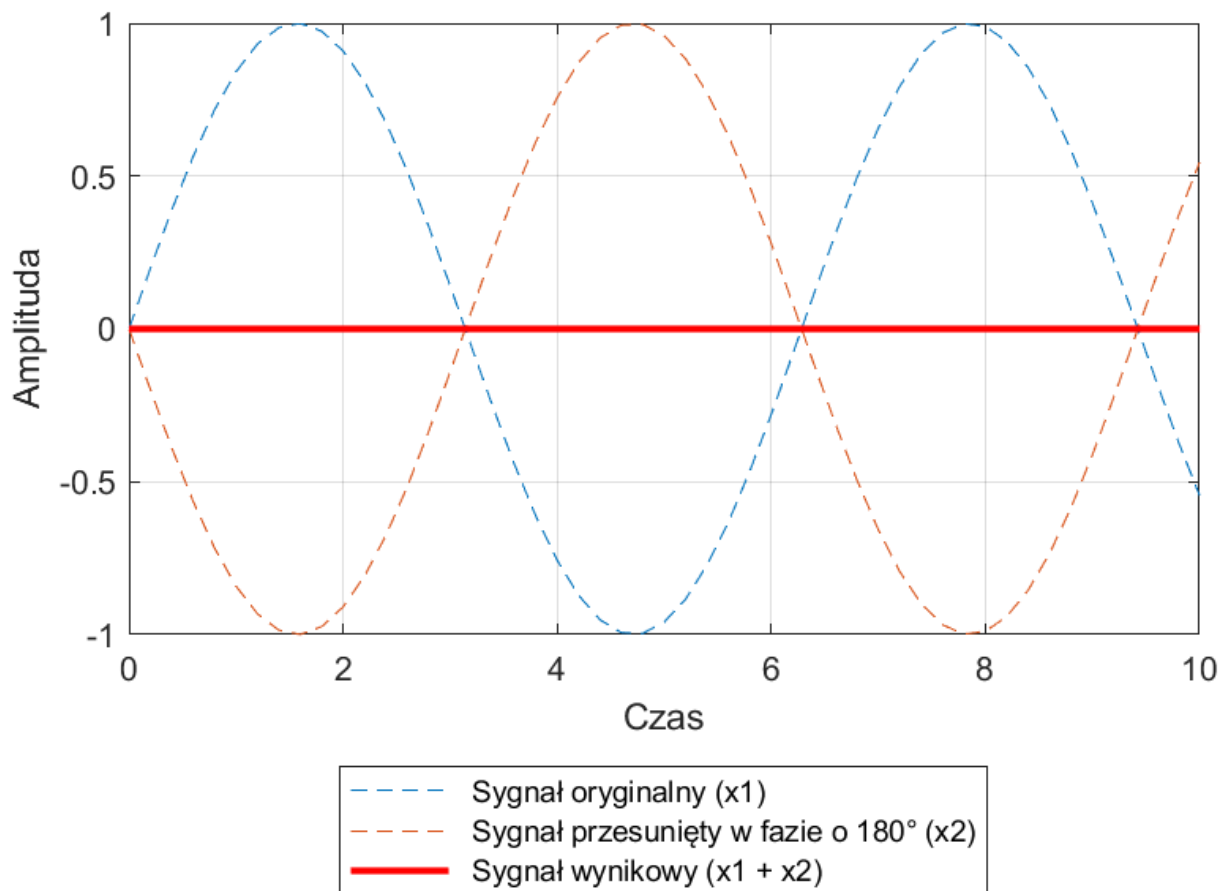
3. Metodyka

3.1. Wstępne założenia

W celu zbadania wpływu mocowania przewodów na membranie głośnika gitarowego konieczne było opracowanie wiarygodnej i powtarzalnej metody pomiarowej. Pierwszym krokiem było pozbycie się jak największej ilości czynników zewnętrznych mogących wpłynąć na wyniki. W tym celu podjęto następujące kroki:

- wyciągnięcie głośnika z obudowy (pozbycie się jej wpływu na rejestrowany sygnał),
- zamocowanie głośnika w odgradzie znormalizowanej (zminimalizowanie wpływu fal akustycznych generowanych przez tylną część membrany),
- wykonywanie pomiarów w komorze bezdechowej (pozbycie się wpływu pomieszczenia).

Fale akustyczne generowane przez tylną część membrany są przesunięte w fazie o 180 stopni względem fal generowanych przez jej przednią część. W wyniku ich interakcji, może pojawić się zjawisko interferencji destruktywnej, której skrajny przypadek został przedstawiony na Rys. 3.1.



Rys. 3.1. Skrajny przypadek interferencji destruktywnej.

Poruszane zjawisko ma największy wpływ na fale akustyczne o niższych częstotliwościach ze względu na ich długość. Wymiary odgrody są zatem narzucone przez falę o największej długości, dla jakiej chcemy zminimalizować zjawisko interferencji. Interesującą nas wartość można wyznaczyć z poniższego wzoru:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

gdzie:

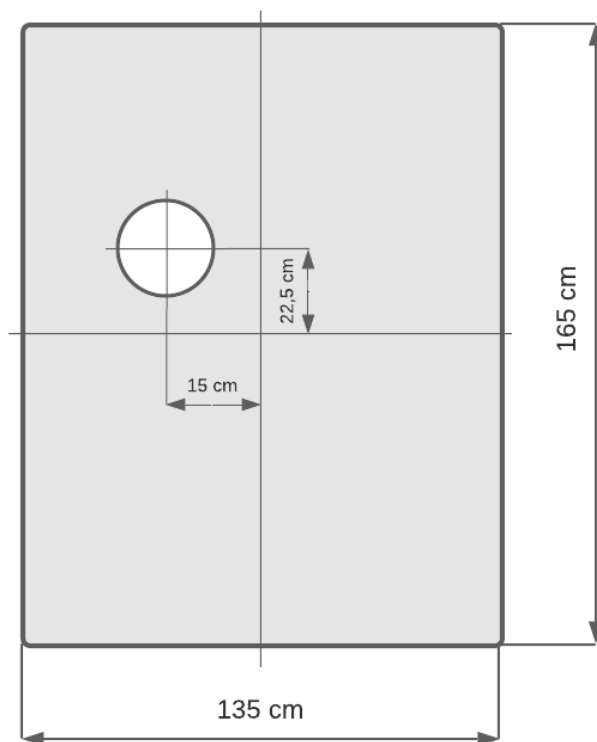
λ - długość fali akustycznej [m],

c - prędkość fali akustycznej w powietrzu [m/s],

f - częstotliwość [Hz].

Jako najniższą częstotliwość słyszalną przez człowieka powszechnie uznaje się 20 Hz [1]. Dla takiej wartości, przy przyjęciu prędkości propagacji fali akustycznej w powietrzu równej 340 m/s, odgroda musiałaby mieć w przybliżeniu wymiary 8,5 x 8,5 m. Są to wartości wysoce problematyczne w praktyce, dlatego przy wyznaczaniu wymiarów odgrody należy sugerować się częstotliwością rezonansową badanego głośnika, poniżej której jego charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa gwałtownie opada. Oprócz tego, zmian wynikających z obecności przewodów na membranie, spodziewano się w wyższych częstotliwościach. Odgroda znormalizowana, której użyto przy pomiarach, zgodnie z normą PN-EN 60268-5 [2], ma wymiary 1,65 x 1,35 m i została schematycznie przedstawiona na Rys. 3.2.

Dodatkowo warte uwagi jest niesymetryczne zamontowanie głośnika. Zabieg ten ma na celu zminimalizowanie niepożądanego interferencji fal akustycznych o długości dwukrotnie mniejszej od granicznej odgrody.

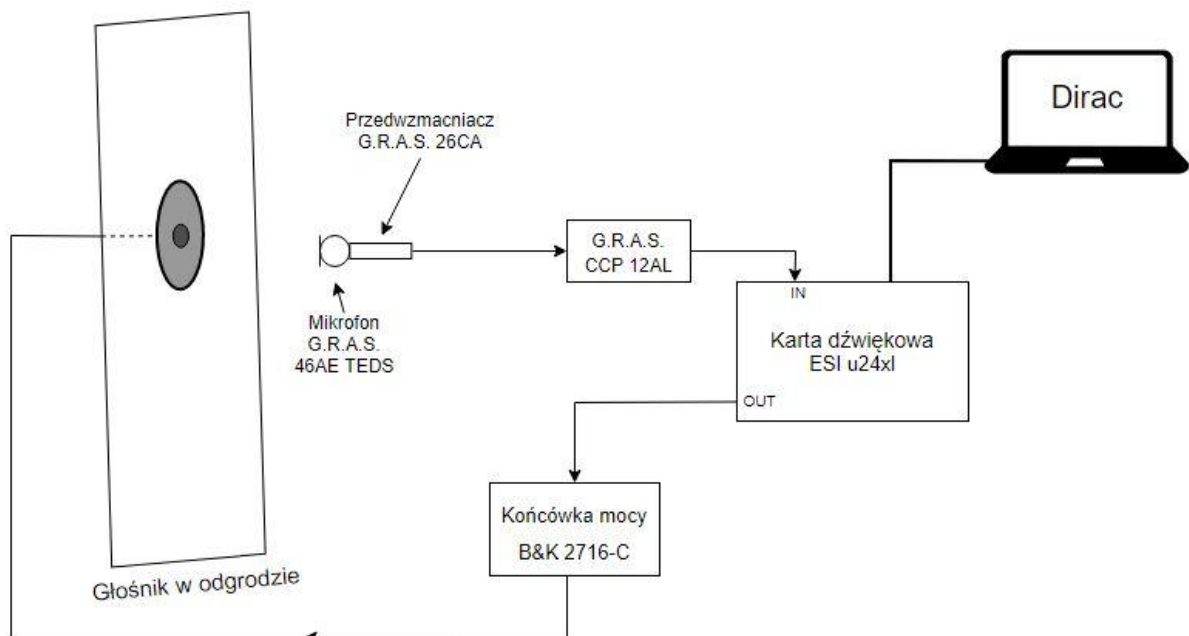


Rys. 3.2. Wymiary odgrody znormalizowanej.

3.2. Tor pomiarowy

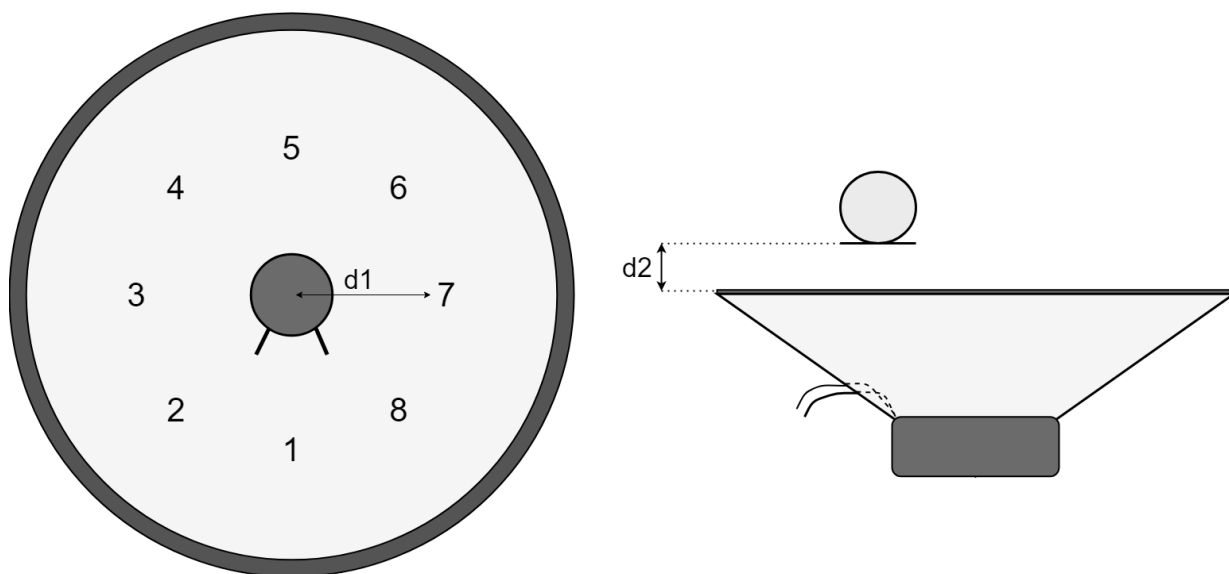
Metoda pomiarowa miała na celu uzyskanie odpowiedzi impulsowej głośnika w kilku zdefiniowanych wcześniej punktach. Rys. 3.3. jest wizualną reprezentacją wykorzystanego toru pomiarowego, a poniżej znajduje się spis wykorzystanego do tego celu sprzętu:

- mikrofon pomiarowy G.R.A.S. 46AE TEDS, nr seryjny: 152819,
- przedwzmacniacz mikrofonowy G.R.A.S. 26CA, nr seryjny: 127014,
- zasilanie do przedwzmacniacza G.R.A.S. CCP 12AL, nr seryjny: 332597,
- karta dźwiękowa ESI u24xl, nr seryjny: R16081506204,
- laptop z oprogramowaniem Dirac,
- końcówka mocy B&K 2716-C-001, nr seryjny: 2761590.



Rys. 3.3. Schemat toru pomiarowego.

Odpowiedź impulsową badanych przetworników elektroakustycznych uzyskano metodą SineSweep z uśrednianiem 3 przebiegów przestrajanego sinusa. Zgodnie z [3], metoda ta wyróżnia się największym odstępem sygnału od szumu (ang. *Signal to Noise Ratio*, SNR) oraz doskonale nadaje się do pomiarów w warunkach wolnych od hałasów zewnętrznych (komora bezechowa).



Rys. 3.4. Schematyczne przedstawienie punktów pomiarowych przed głośnikiem (ozn. 1-8).

Odległość $d2$ widoczna na Rys. 3.4. wynosiła 7 cm. Jest to odległość, na której byłoby możliwe ustawienie mikrofonu w przypadku większości kolumn (przed membraną znajduje się zazwyczaj siatka tudzież kratka chroniąca głośnik przed uszkodzeniem). Ponieważ podstawowym celem tej pracy inżynierskiej jest odkrycie pewnych zależności mogących potencjalnie ułatwić pracę inżyniera dźwięku, konieczne było ustalenie łatwego do odmierzenia promienia. Odległość $d1$ widoczna na Rys. 3.4. różniła się dla każdego badanego głośnika. Jako punkt odniesienia wybrano zewnętrzną granicę kopułki przeciwpylowej. W ten sposób promień jest na tyle duży, żeby sygnały rejestrowane we wszystkich 8 punktach miały szansę różnić się od siebie i na tyle krótki, aby wpływ mocowania przewodów był znaczący. Promienie kopulek badanych głośników mieszczą się w zakresie od 2,5 do 5 cm. W celach kontrolnych, wykonane zostały również pomiary na dłuższym promieniu, jednakowym dla wszystkich głośników, równym 7 cm. Uzyskane wyniki miały na celu zweryfikowanie czy zależności zaobserwowane dla mniejszych promieni, istnieją dla większych odległości od środka membrany.

Ponieważ mikrofon ustawiano ręcznie, w każdym z punktów konieczne było zwiększenie liczby pomiarów, w celu skorygowania wpływu czynnika ludzkiego. Dla celów statystycznych wykonano po pięć pomiarów we wszystkich punktach, poczynając od pojedynczego pomiaru w każdym z nich, przedstawiając mikrofon zgodnie z kierunkiem ruchów wskazówek zegara (zatem 5 "okrążeń"). Ze względu na dużą czasochłonność wybranej metody pomiarowej, dla pomiarów kontrolnych na promieniu 7 cm, wykonano po 3 pomiary w każdym punkcie: minimum konieczne do dalszej analizy statystycznej.

3.3. Analiza danych

Wszystkie analizy danych wykonane zostały w środowisku Matlab 2020a.

3.3.1. Środek ciężkości widma

Pierwszym krokiem było porównanie środków ciężkości widma odpowiedzi impulsowych we wszystkich punktach. Parametr ten można powiązać z subiektywnym pojęciem jasności barwy, a dokładny wzór znajduje się poniżej:

$$\mu_1 = \frac{\sum_{k=b_1}^{b_2} f_k s_k}{\sum_{k=b_1}^{b_2} s_k} \quad (3.2)$$

gdzie:

f_k - częstotliwość prążka k [Hz],

s_k - wartość prążka k (amplituda),

b_1, b_2 - górna i dolna granica pasma, z którego liczony jest środek ciężkości widma.

Do wyznaczenia środka ciężkości użyto funkcji *spectralCentroid(audio,fs)*, gdzie *audio* - wektor wartości sygnału zmiennego w czasie, *fs* - częstotliwość próbkowania równa 48 kHz. Ponieważ powyższa funkcja zwraca parametr zmienny w czasie, komendę do komendy dodano uśrednianie arytmetyczne: *mean(spectralCentroid(audio,fs))* w celu uzyskania jednoliczbowej wartości.

3.3.2. Kurtoza widmowa (spłaszczenie widma)

Drugim jednoliczbowym parametrem wykorzystanym do analizy sygnałów jest kurtoza widmowa, którą można interpretować jako spłaszczenie widma wokół jego środka ciężkości. Pozwala poglądowo ocenić zawartość ostrych szczytów w charakterystyce amplitudowo-częstotliwościowej. Może być wyznacznikiem subiektywnej ostrości brzmienia.

Do wyznaczenia kurtozy widmowej użyto funkcji *spectralKurtosis(audio,fs)*, gdzie *audio* - wektor wartości sygnału zmiennego w czasie, *fs* - częstotliwość próbkowania. Analogicznie do środka ciężkości widma, powyższą komendę rozszerzono o uśrednianie arytmetyczne: *mean(spectralKurtosis(audio,fs))* w celu uzyskania jednoliczbowej wartości.

$$\mu_3 = \frac{\sum_{k=b_1}^{b_2} (f_k - \mu_1)^4 s_k}{(\mu_2)^4 \sum_{k=b_1}^{b_2} s_k} \quad (3.3)$$

gdzie:

f_k - częstotliwość prążka k [Hz],

s_k - wartość prążka k (amplituda),

b_1, b_2 - górna i dolna granica pasma, z którego liczony jest,

μ_1 - środek ciężkości widma,

μ_2 - rozpiętość widmowa - wyznaczana ze wzoru poniżej:

$$\mu_2 = \sqrt{\frac{\sum_{k=b_1}^{b_2} (f_k - \mu_1)^2 s_k}{\sum_{k=b_1}^{b_2} s_k}} \quad (3.4)$$

3.3.3. Porównanie widm w pasmach oktaowych

Oprócz porównywania widm sygnałów na podstawie jednolicebnych wartości powstała bardziej rozbudowana analiza, do której konieczne było odpowiednie przygotowanie danych:

- podzielono widma sygnałów na pasma oktaowe z wykorzystaniem funkcji *poctave()*,
- w każdym paśmie uśredniono wartości ze wszystkich pomiarów w danym punkcie,
- wyznaczono niepewność rozszerzoną z uśrednionych wartości oraz odpowiednio przeliczono wyniki na dB. Do wyznaczenia wspomnianej niepewności rozszerzonej wykorzystano wzór:

$$U(y) = k u_c(y) \quad (3.5)$$

gdzie:

$U(y)$ - niepewność rozszerzona,

y - pomiar/obserwacja,

k - współczynnik rozszerzenia,

$u_c(y)$ - niepewność złożona (wzór 3.6).

Według [4] przyjmuje się, że standardową, najdogodniejszą w większości sytuacji wartością współczynnika rozszerzenia jest $k = 2$. Poniżej znajduje się wzór na niepewność złożoną pomiaru powtarzanego utożsamianą z estymatorem odchylenia standardowego średniej:

$$u_c(y) = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n(n-1)}} \quad (3.6)$$

gdzie:

n - seria/liczba pomiarów,

$u_c(y)$ - niepewność złożona.

Pomimo niewielkiej próby, sprawdzono normalność rozkładów każdej grupy danych przy pomocy testu statystycznego. Na podstawie [5] podjęto decyzję o wykorzystaniu testu cechującego się największą mocą, tj. Shapiro-Wilka. W tym celu skorzystano z zewnętrznej funkcji *swtest()* autorstwa Ahmed Ben Sada (17 marca 2009, revision 3.0).

3.3.4. Porównanie dwóch punktów oraz półsfer

W celach porównawczych, na wykresach słupkowych przedstawiono podzielone na pasma oktawowe charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe dla widma odpowiedzi impulsowej w punkcie 1 (nad przewodami) i 5 (po drugiej stronie) oraz punktów na dwóch półsferach (półsfera nad przewodami- punkty: 1, 2, 8, druga półsfera - punkty: 4, 5, 6) uśrednionych w pasmach oktawowych.

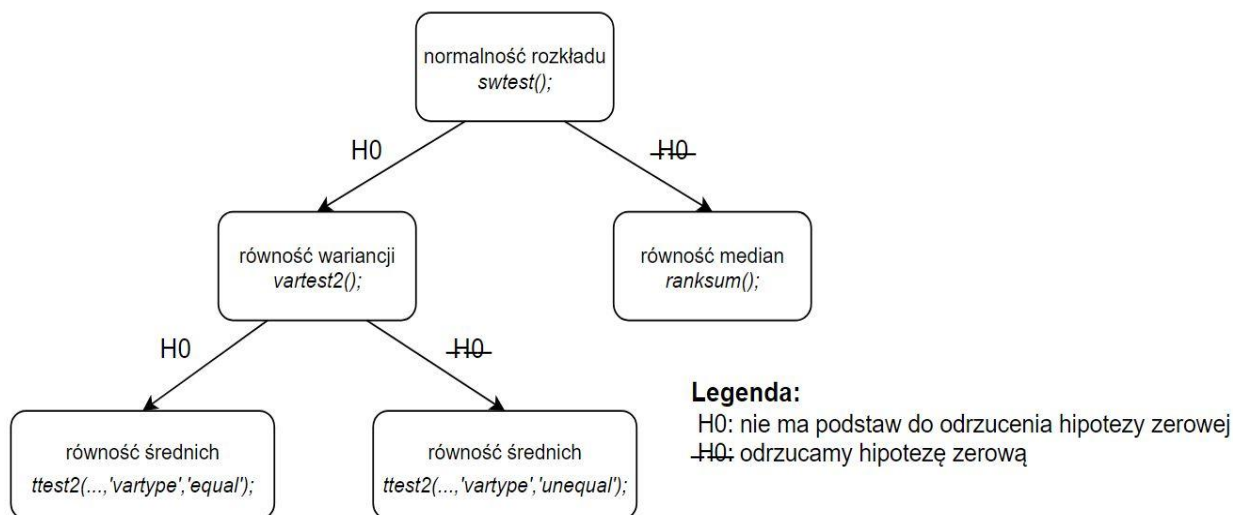
Dodatkowo do wyników dołączono tabele zawierające informacje o wynikach testów statystycznych (normalność rozkładów oraz równość median). W wierszach *normalność* znajduje się informacja o wynikach testów na normalność Shapiro-Wilk *swtest()*:

- **0**: “Nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Rozkład normalny dobrze opisuje rozkład danych”,
- **1**: “Odrzucamy hipotezę zerową. Rozkład normalny nie opisuje dobrze rozkładu danych”,

Wiersz *mediany* zawiera informacje zgodnie z poniższą legendą:

- **0**: “Mediany są sobie równe”,
- **1**: “Mediana rozkładu 1 jest większa od mediany rozkładu 2”,
- **2**: “Mediana rozkładu 2 jest większa od mediany rozkładu 1”.

Informacje te uzyskane zostały w wyniku testu na równość średnich t-Studenta *ttest2()* dla rozkładów normalnych (średnia = mediana), i testu na równość dwóch median *ranksum()* dla rozkładów niebędących rozkładami normalnymi. Ponieważ hipoteza alternatywna brzmi: “Średnie/mediany danych z obu wektorów nie są sobie równe”, w celu zweryfikowania która z nich jest większa, porównano ich wartości bezpośrednio, bez użycia kolejnego testu.



Rys. 3.5. Wizualizacja kolejnych kroków statystycznych analizy równości średnich/median rozkładów.

3.3.5. Test K-W

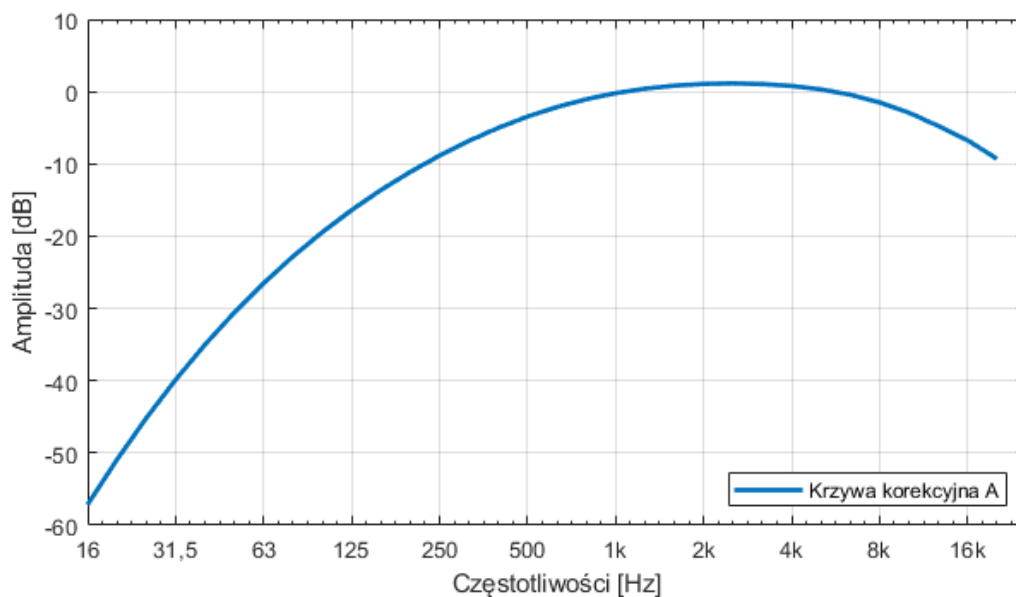
Kolejną przeprowadzoną analizą statystyczną jest test Kruskala-Wallisa wywołany funkcją *kruskalwalli()*. Poniżej znajdują się treści hipotezy zerowej i alternatywnej:

- H0: Dane ze wszystkich grup pochodzą z tego samego rozkładu,
- H1: Dane z co najmniej jednej grupy nie pochodzą z tego samego rozkładu.

W przypadku odrzucenia hipotezy zerowej, można sprawdzić między którymi grupami zachodzą różnice przy wykorzystaniu funkcji *multcompare()*. Na wykresach przedstawiono średnie wartości pomiarów z niepewnościami rozszerzonymi w danym paśmie, w zależności od punktu pomiarowego. Wyniki testu K-W zostały wykorzystane do ustalenia, dla których pasm oktaowych wyświetlane są te wykresy.

3.3.6. Usunięcie najbardziej odstającego pomiaru

Dodatkowo dla danych przy kopulce przeciwpylowej pozbyto się po jednym najbardziej odstającym pomiarze. Podstawą do odrzucenia była suma bezwzględnych różnic pomiędzy wartościami konkretnego pomiaru we wszystkich pasmach oktaowych z osobna, a średnią wartością ze wszystkich pomiarów w odpowiadającym paśmie. Przy wyznaczaniu wspomnianych wartości uwzględniono ważenie częstotliwościowe funkcją A. Zabieg ten dla najbardziej odstającego przypadku zmniejszył niepewność rozszerzoną o 1,4 dB. Rys. 3.6 jest wizualnym przedstawieniem krzywej korekcyjnej A. W przybliżeniu jest to odwrócona izofona (krzywa jednakowego poziomu dźwięku) dla 40 fonów i stosuje się ją aby uwzględnić własności ucha ludzkiego [6].



Rys. 3.6. Krzywa korekcyjna A.

3.4. Badane głośniki

Poniżej znajduje się spis badanych w tej pracy głośników:

- 12" 8 Ohm Fender Special Design Heavy Duty Speaker, nr seryjny 020910, (w dalszej części pracy nazywany *Fender*),
- 12" 8 Ohm Eminence EGTR-S1712-8, nr seryjny 11 27D 0086, (w dalszej części pracy nazywany *Eminence*),
- 12" 8 Ohm Celestion Seventy 80, nr seryjny GE797562G20, (w dalszej części pracy nazywany *Celestion 1*),
- 12" 8 Ohm Celestion Custom Design GI2P-80, nr seryjny 71106, (w dalszej części pracy nazywany *Celestion 2*).

4. Wyniki

4.1. Porównanie dwóch przeciwległych punktów

W tym podrozdziale znajdują się wyniki pierwszej analizy, jaką było porównanie uśrednionych wartości pasm oktaowych widma odpowiedzi impulsowej w punkcie 1 (nad przewodami: niebieskie) i 5 (po drugiej stronie: czerwone). Oprócz wizualnej reprezentacji jaką są wykresy słupkowe, nad nimi znajdują się również tabele zawierające wyniki testu S-W (test na normalność rozkładów danych), oraz dodatkowy wiersz informujący o wynikach testu na równość median, uzyskanych zgodnie z algorytmem widocznym na Rys. 3.5.

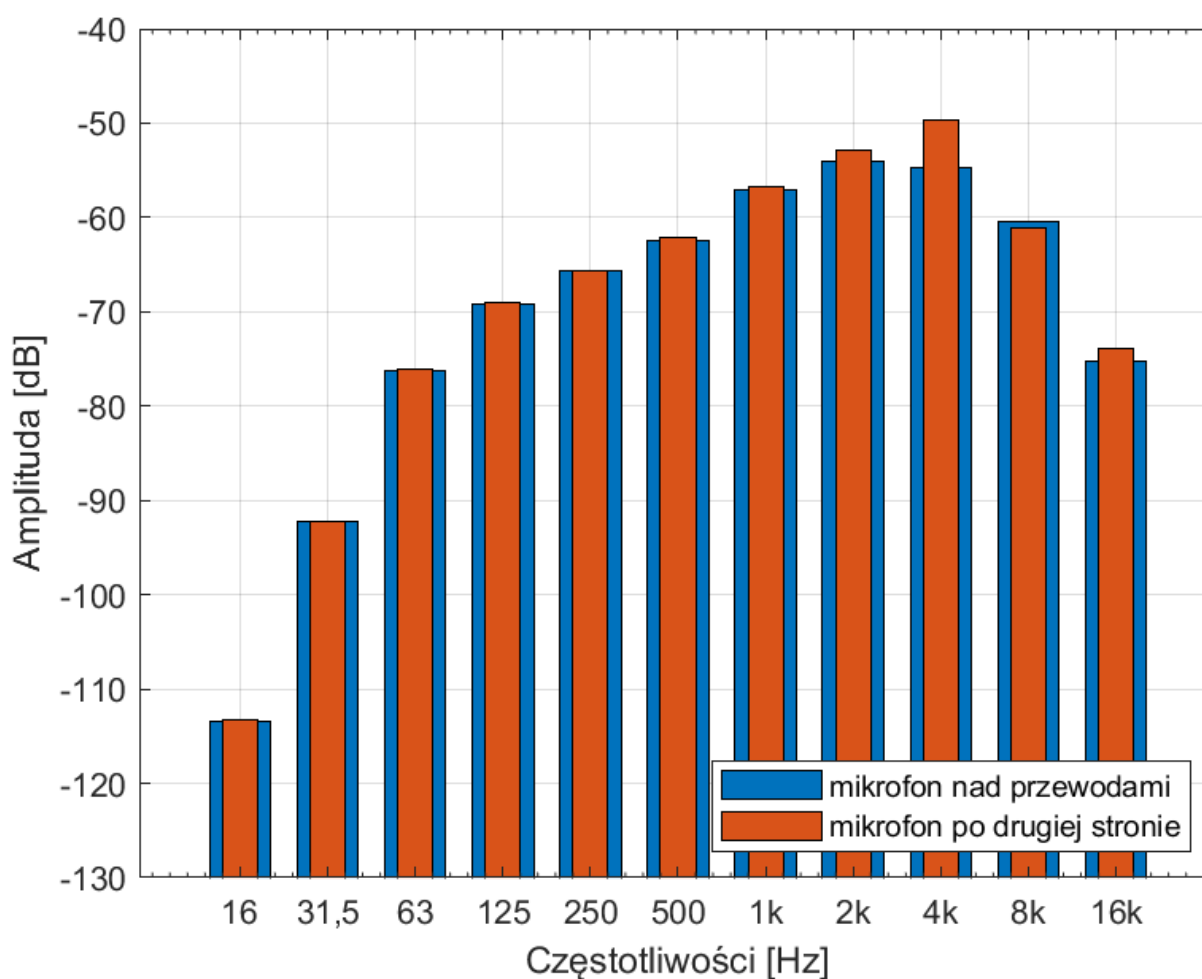
Tab. 4.1. Legenda oznaczeń wykorzystanych w Tab. 4.2 - 4.17.

Legenda	
0	nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ można stwierdzić, że rozkład normalny dobrze opisuje rozkład danych.
1	odrzucaamy hipotezę zerową. Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ nie można stwierdzić, że rozkład normalny dobrze opisuje rozkład danych.
0	nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ można stwierdzić, że mediany danych z obu grup są równe.
1	odrzucaamy hipotezę zerową. Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ nie można stwierdzić, że mediany rozkładów z obu grup są równe. *Mediana rozkładu 1 jest większa.
2	odrzucaamy hipotezę zerową. Na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ nie można stwierdzić, że mediany rozkładów z obu grup są równe. *Mediana rozkładu 2 jest większa.

W Tab. 4.2 i Rys. 4.1 przedstawiono wyniki analiz dla zewnętrznej granicy kopułki przeciwpylowej głośnika Fender.

Tab.4.2. Wyniki testów statystycznych dla danych z zewnętrznej granicy kopułki przeciwpylowej: Fender. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z punktu 1 (nad przewodami), czerwony: punkt 5 (po drugiej stronie).

pasma oktauwowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
normalność rozkładu 2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
równość median	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0	2

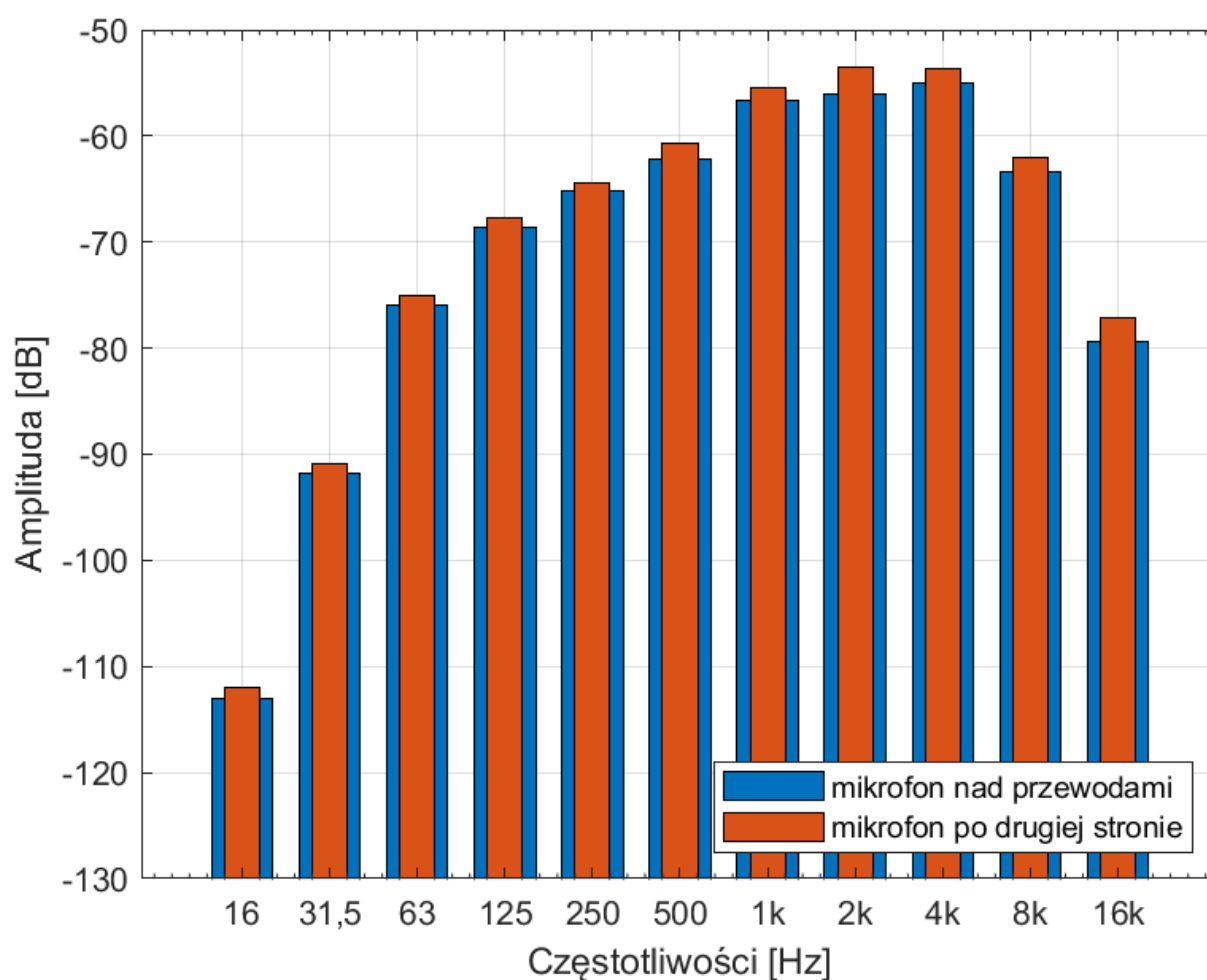


Rys. 4.1. Widmo odpowiedzi impulsowej głośnika Fender z granicy kopułki przeciwpylowej w pasmach oktauwowych.

Tab. 4.3 oraz Rys. 4.2 przedstawiają wyniki dla głośnika Fender na promieniu 7 cm.

Tab. 4.3. Wyniki testów statystycznych pierwszej analizy dla promienia 7 cm: głośnik Fender. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z punktu 1 (nad przewodami), czerwony: punkt 5 (po drugiej stronie).

pasma oktauwowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
normalność rozkładu 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
równość median	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0

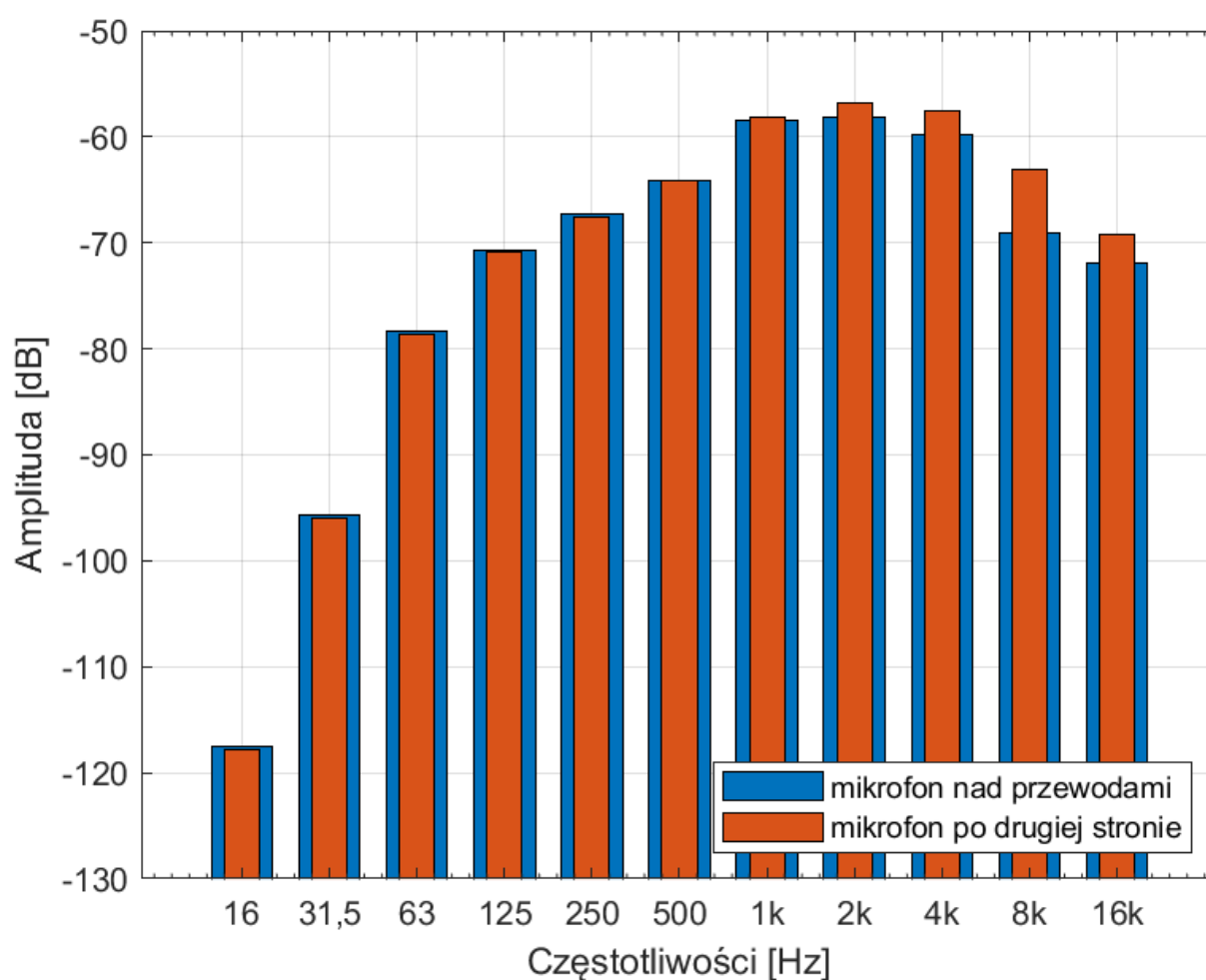


Rys. 4.2. Widmo odpowiedzi impulsowej głośnika Fender na promieniu 7 cm w pasmach oktauwowych.

W Tab. 4.4 i Rys. 4.3 przedstawiono wyniki analiz dla zewnętrznej granicy kopułki przeciwpływowej głośnika Eminence.

Tab. 4.4. Wyniki testów statystycznych pierwszej analizy dla zewnętrznej granicy kopułki przeciwpływowej głośnika Eminence. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z punktu 1 (nad przewodami), czerwony: punkt 5 (po drugiej stronie).

pasma oktauwowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
normalność rozkładu 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
równość median	0	0	0	0	0	0	2	0	2	2	2

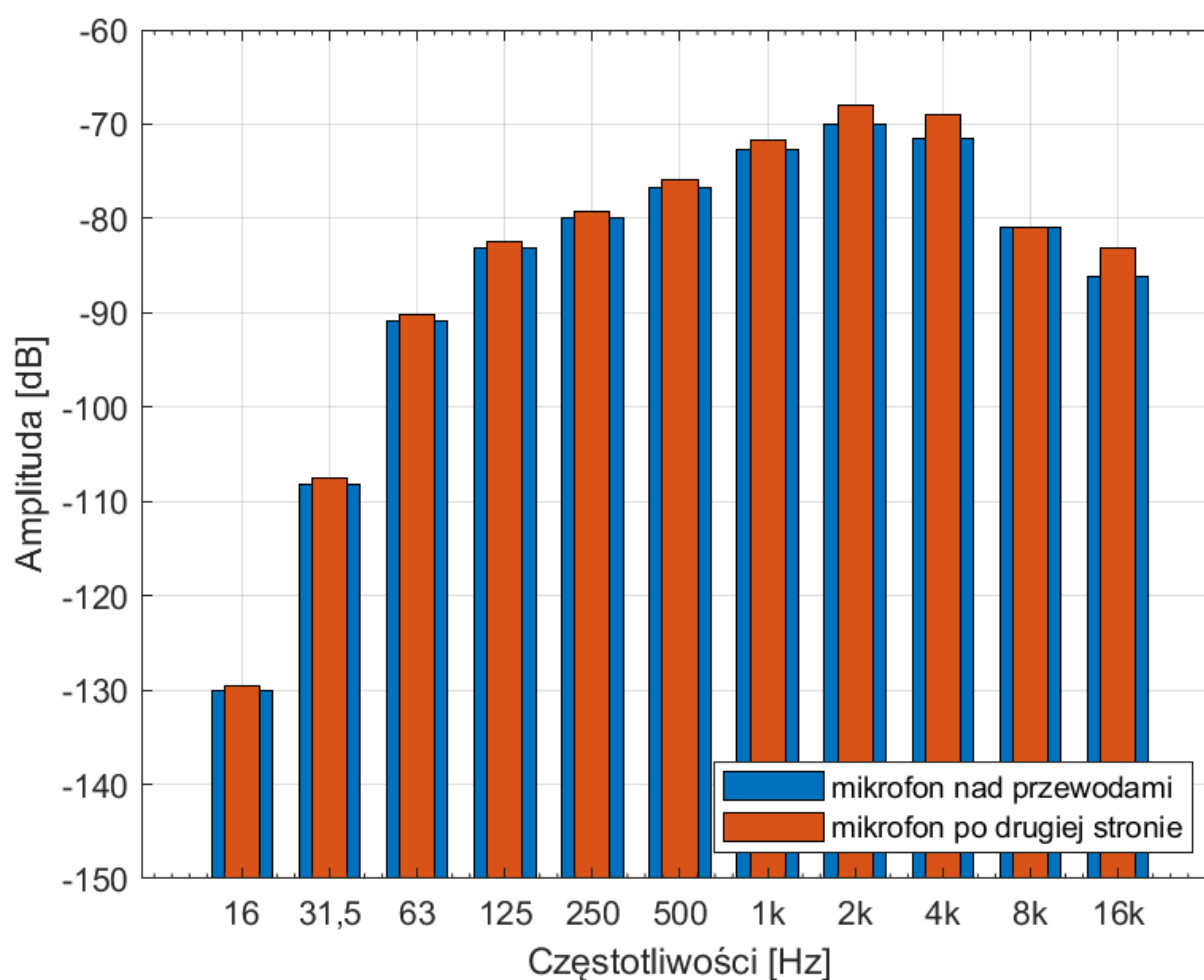


Rys. 4.3. Widmo odpowiedzi impulsowej głośnika Eminence z granicy kopułki przeciwpływowej w pasmach oktauwowych.

Tab. 4.5 i Rys. 4.4 przedstawiają wyniki dla głośnika Eminence na promieniu 7 cm.

Tab. 4.5. Wyniki testów statystycznych pierwszej analizy dla promienia 7 cm dla głośnika Eminence. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z punktu 1 (nad przewodami), czerwony: punkt 5 (po drugiej stronie).

pasma oktauwowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
normalność rozkładu 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
równość median	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0

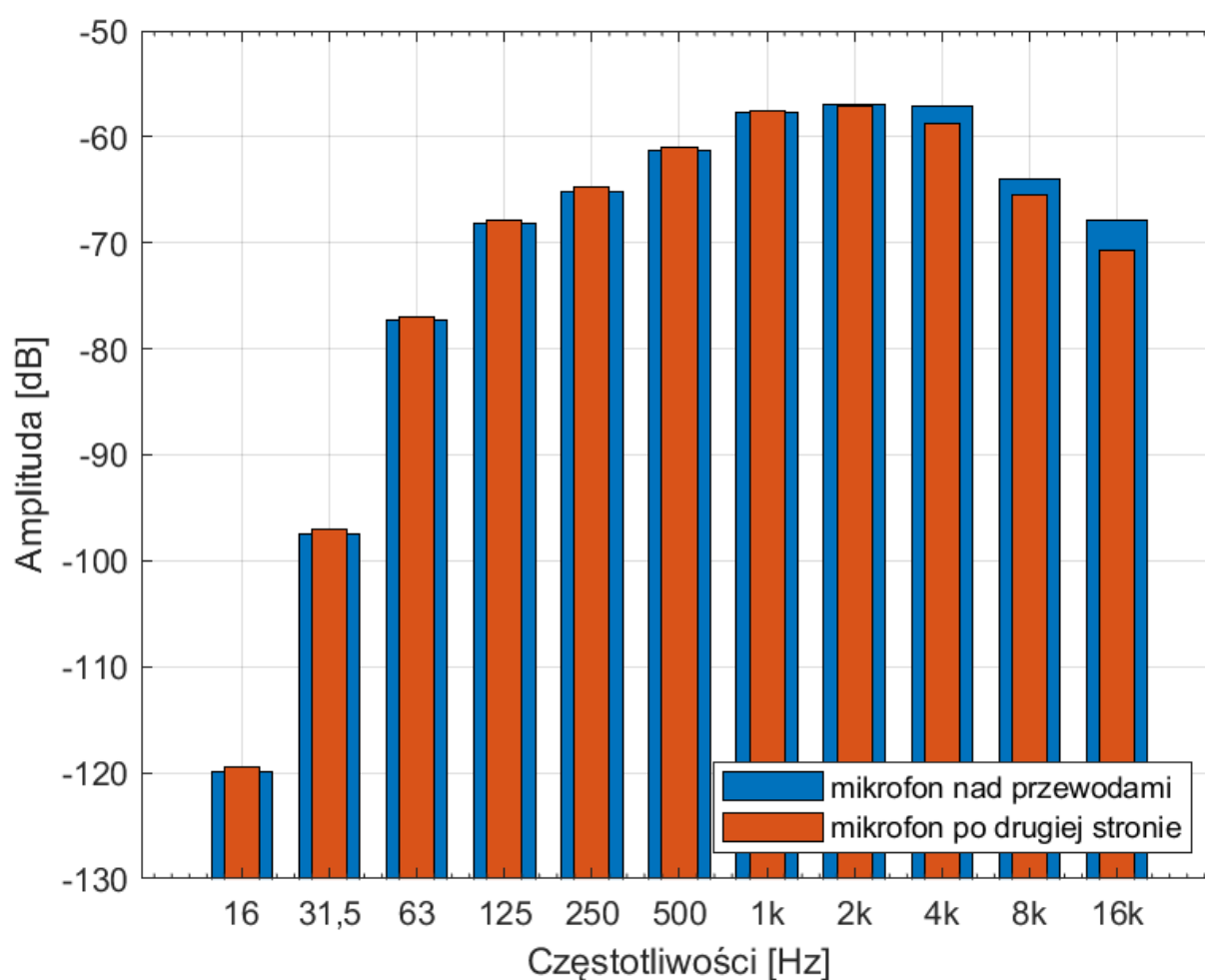


Rys. 4.4. Widmo odpowiedzi impulsowej głośnika Eminence na promieniu 7 cm w pasmach oktauwowych.

W Tab. 4.6 i Rys. 4.5 przedstawiono wyniki analiz dla zewnętrznej granicy kopułki przeciwpływowej głośnika Celestion 1.

Tab. 4.6. Wyniki testów statystycznych pierwszej analizy dla zewnętrznej granicy kopułki przeciwpływowej głośnika Celestion 1. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z punktu 1 (nad przewodami), czerwony: punkt 5 (po drugiej stronie).

pasma oktauwowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
normalność rozkładu 2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
równość median	2	2	2	2	2	2	2	0	1	1	1

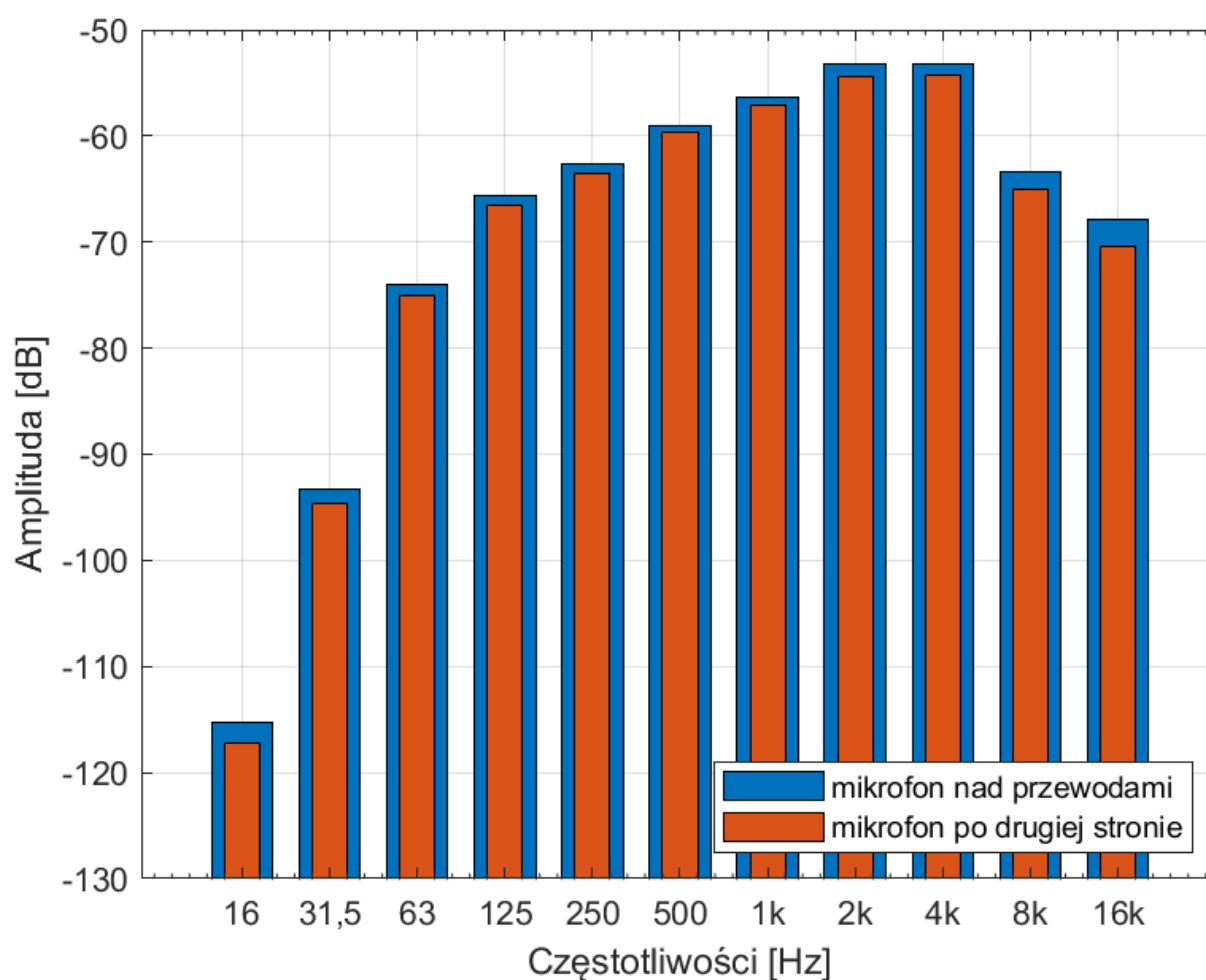


Rys. 4.5. Widmo odpowiedzi impulsowej głośnika Celestion 1 z granicy kopułki przeciwpływowej w pasmach oktauwowych.

Tab. 4.7 i Rys. 4.6 przedstawiają wyniki dla głośnika Celestion 1 na promieniu 7 cm.

Tab. 4.7. Wyniki testów statystycznych pierwszej analizy dla promienia 7 cm dla głośnika Celestion 1. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z punktu 1 (nad przewodami), czerwony: punkt 5 (po drugiej stronie).

pasma oktauwowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
normalność rozkładu 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
równość median	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

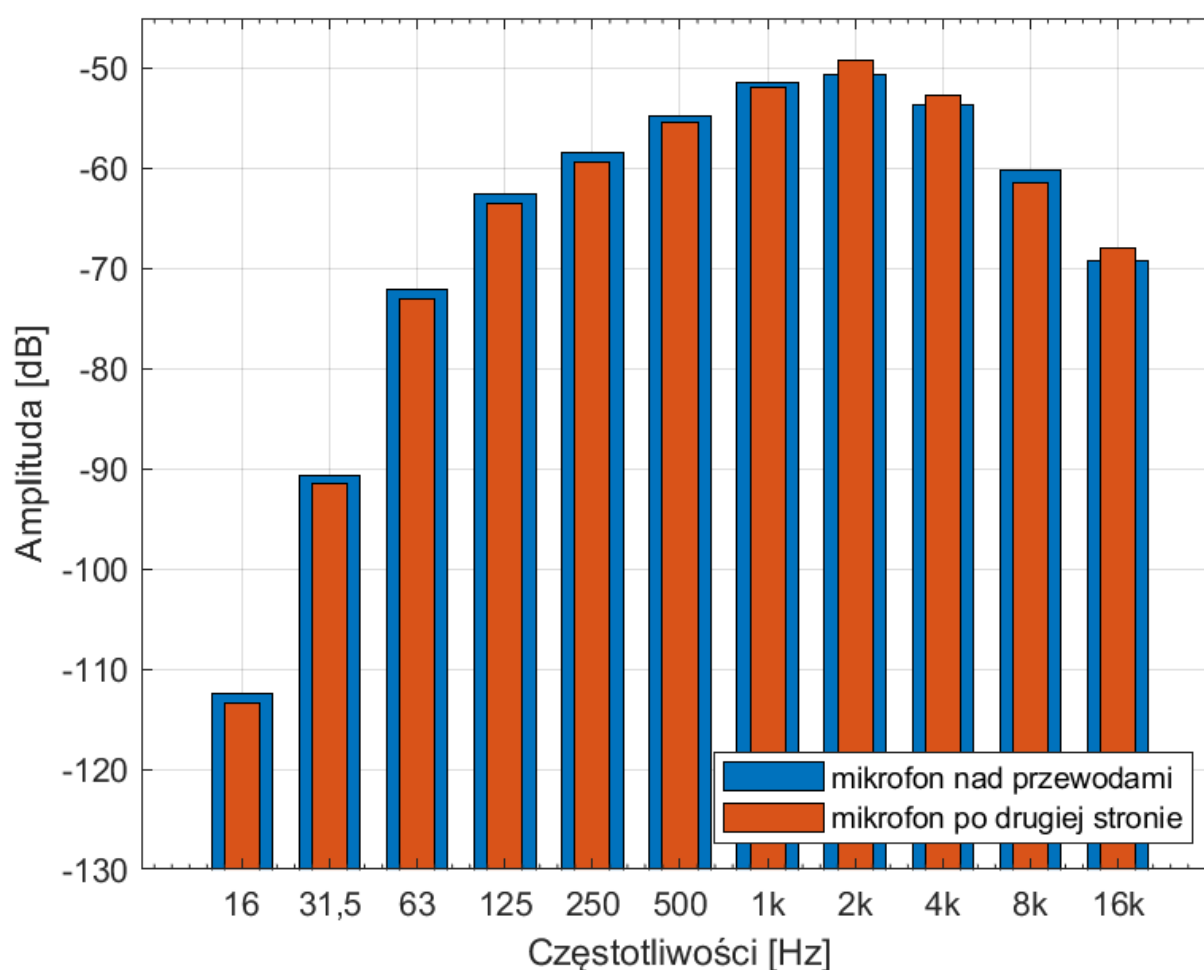


Rys. 4.6. Widmo odpowiedzi impulsowej głośnika Celestion 1 na promieniu 7 cm w pasmach oktauwowych.

W Tab. 4.8 i Rys. 4.7 przedstawiono wyniki analiz dla zewnętrznej granicy kopułki przeciwpylowej głośnika Celestion 2.

Tab. 4.8. Wyniki testów statystycznych pierwszej analizy dla zewnętrznej granicy kopułki przeciwpylowej głośnika Celestion 2. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z punktu 1 (nad przewodami), czerwony: punkt 5 (po drugiej stronie).

pasma oktaowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
normalność rozkładu 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
równość median	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2

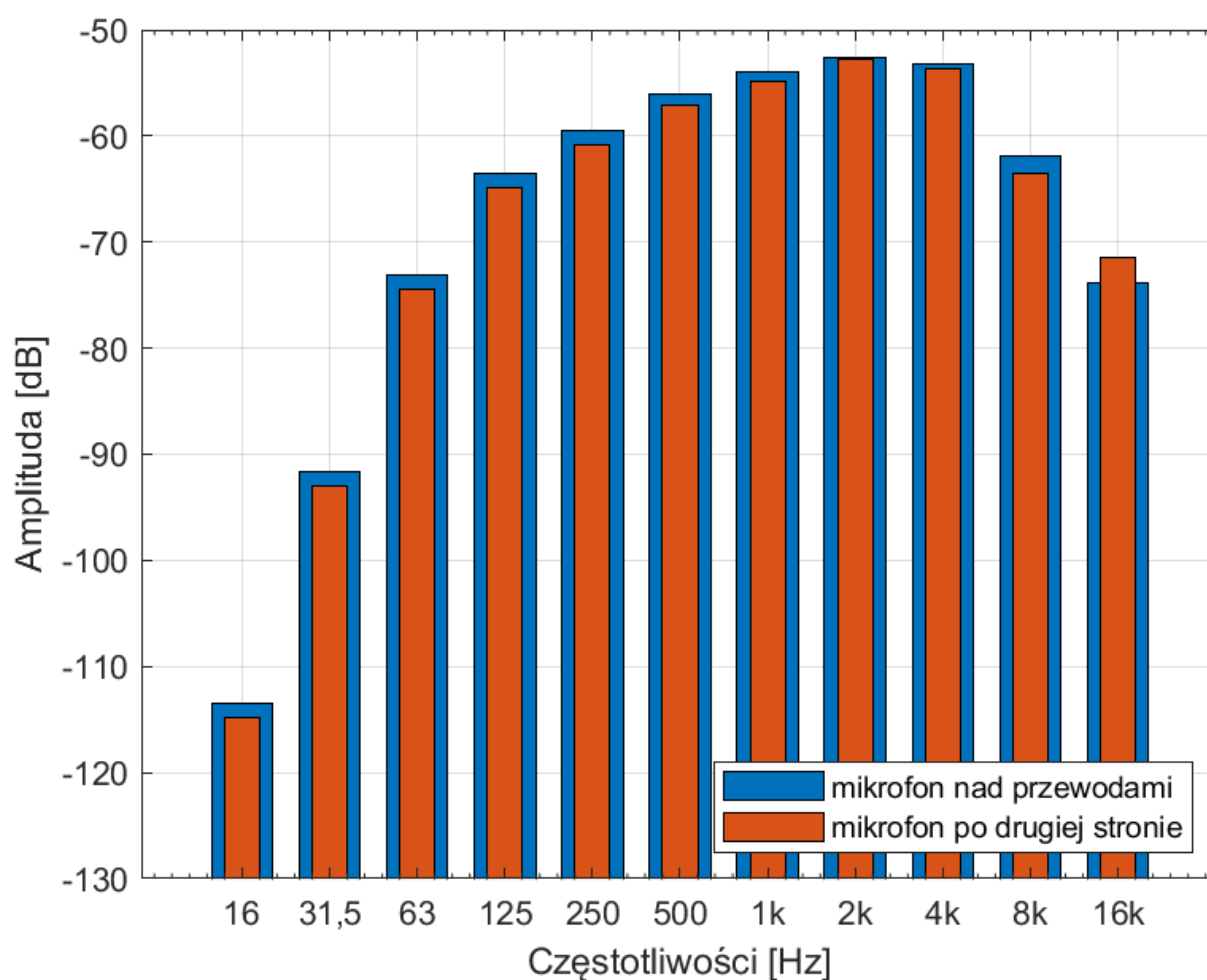


Rys. 4.7. Widmo odpowiedzi impulsowej głośnika Celestion 2 z granicy kopułki przeciwpylowej w pasmach oktaowych.

Tab. 4.9 i Rys. 4.8. przedstawiają wyniki dla głośnika Celestion 2 na promieniu 7 cm.

Tab. 4.9. Wyniki testów statystycznych pierwszej analizy dla promienia 7 cm dla głośnika Celestion 2. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z punktu 1 (nad przewodami), czerwony: punkt 5 (po drugiej stronie).

pasma oktauwowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
normalność rozkładu 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
równość median	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2



Rys. 4.8. Widmo odpowiedzi impulsowej głośnika Celestion 2 na promieniu 7 cm w pasmach oktauwowych.

4.2. Porównanie dwóch pólser

Poniżej znajdują się wyniki drugiej analizy, przedstawione w sposób podobny do pierwszej, bez uwzględnienia wykresów poglądowych. Polegała ona na porównaniu uśrednionych wartości widm odpowiedzi impulsowych w pasmach oktaowych w punktach 1, 2 i 8 (półsera nad przewodami: niebieska) oraz 4, 5 i 6 (półsera po drugiej stronie: czerwona). Oznaczenia widoczne w Tab. 4.10 - 4.17. zakodowane zostały zgodnie z legendą przedstawioną w Tab. 4.1.

Fender

Tab. 4.10. Wyniki testów statystycznych dla danych z półser przy zewnętrznej granicy kopułki przeciwpływowej: głośnik Fender. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z półsfery nad przewodami, czerwony: półsera po drugiej stronie.

pasma oktaowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
normalność rozkładu 2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
równość median	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tab. 4.11. Wyniki testów statystycznych drugiej analizy dla promienia 7 cm: głośnik Fender. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z półsfery nad przewodami, czerwony: półsera po drugiej stronie.

pasma oktaowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
normalność rozkładu 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
równość median	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2

Eminence

Tab. 4.12. Wyniki testów statystycznych dla danych z półser przy zewnętrznej granicy kopułki przeciwpływowej: głośnik Eminence. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z półsfery nad przewodami, czerwony: półsera po drugiej stronie.

pasma oktaowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
normalność rozkładu 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
równość median	2	0	0	0	0	2	2	0	2	2	1

Tab. 4.13. Wyniki testów statystycznych drugiej analizy dla promienia 7 cm dla głośnika Eminence. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z półsfery nad przewodami, czerwony: półsera po drugiej stronie.

pasma oktaowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
normalność rozkładu 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
równość median	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	1

Celestion 1

Tab. 4.14. Wyniki testów statystycznych dla danych z pólser przy zewnętrznej granicy kopułki przeciwpylowej: głośnik Celestion 1. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z pólser nad przewodami, czerwony: pólsera po drugiej stronie.

pasma oktaowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
normalność rozkładu 2	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
równość median	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0

Tab. 4.15. Wyniki testów statystycznych drugiej analizy dla promienia 7 cm: głośnik Celestion 1. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z pólser nad przewodami, czerwony: pólsera po drugiej stronie.

pasma oktaowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
normalność rozkładu 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
równość median	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0

Celestion 2

Tab. 4.16. Wyniki testów statystycznych dla danych z pólser przy zewnętrznej granicy kopułki przeciwpylowej: głośnik Celestion 2. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z pólser nad przewodami, czerwony: pólsera po drugiej stronie.

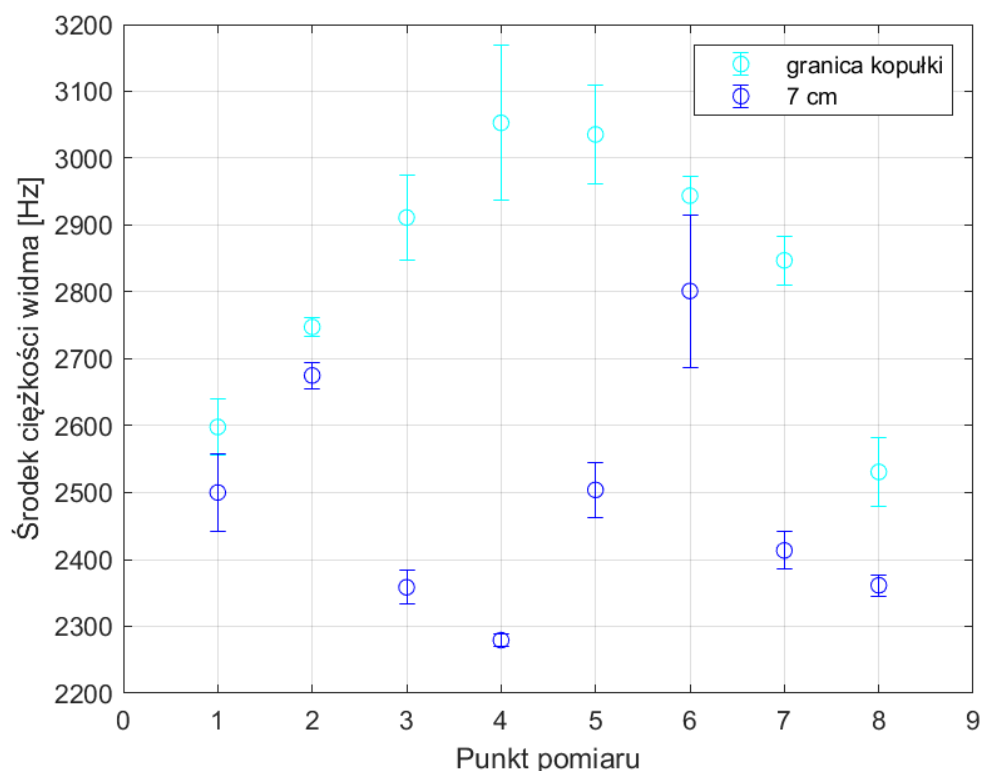
pasma oktaowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
normalność rozkładu 2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
równość median	0	0	0	0	0	0	2	2	1	1	2

Tab. 4.17. Wyniki testów statystycznych drugiej analizy dla promienia 7 cm dla głośnika Celestion 2. Kolor ciemnoniebieski reprezentuje dane z pólser nad przewodami, czerwony: pólsera po drugiej stronie.

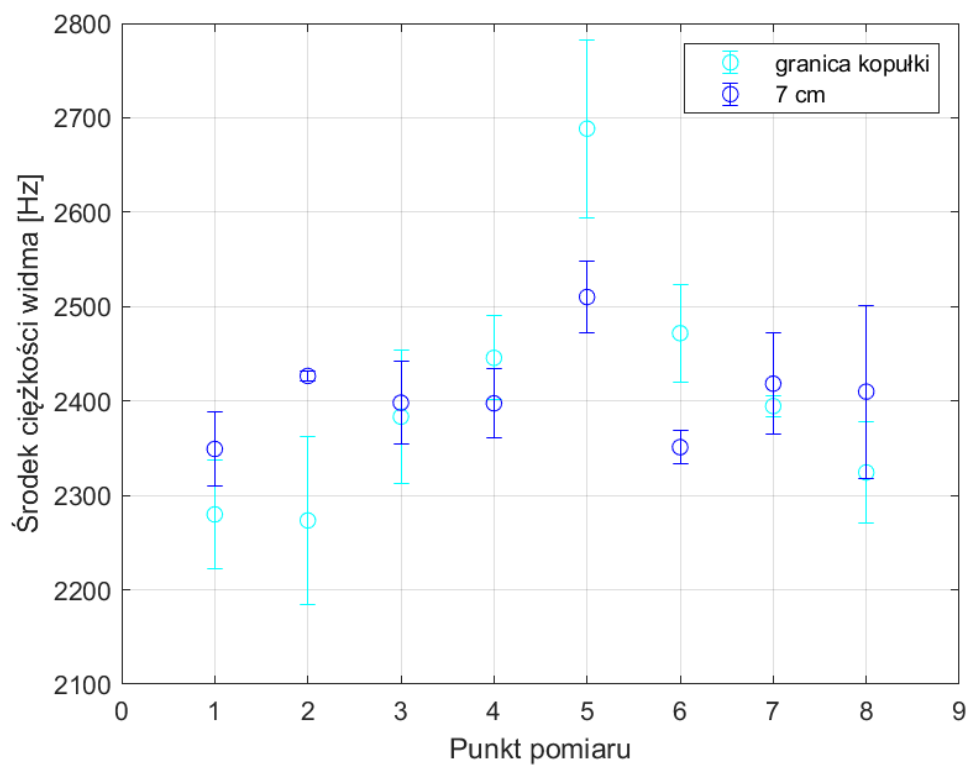
pasma oktaowe [Hz]	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
normalność rozkładu 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
normalność rozkładu 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
równość median	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

4.3. Porównanie środków ciężkości widma

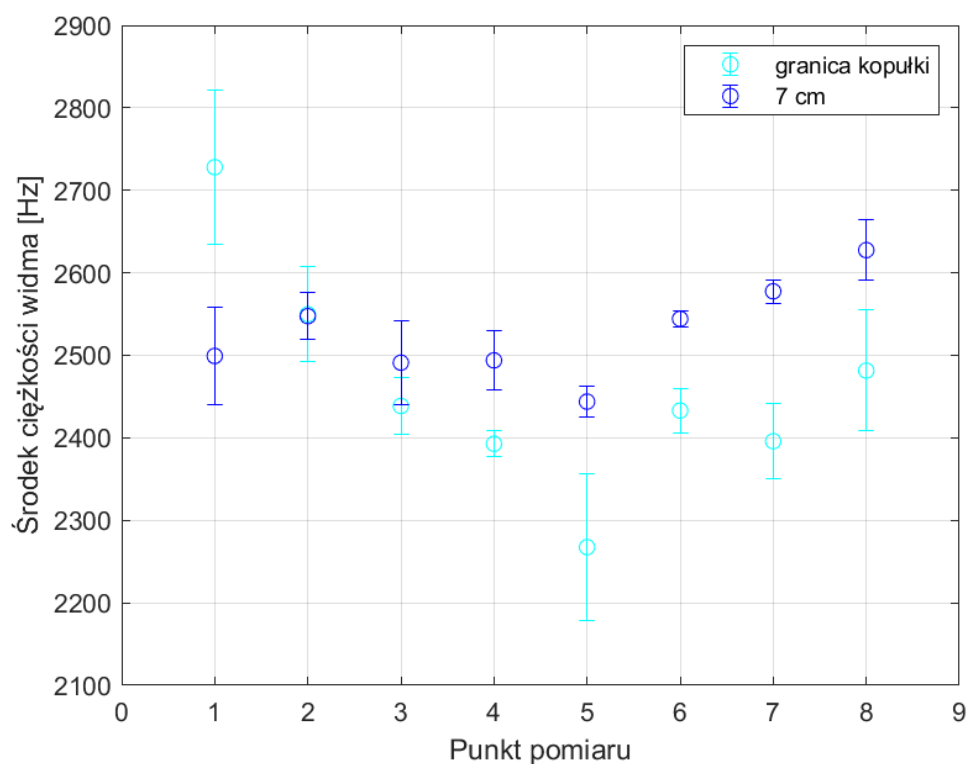
Rys. 4.9 - 4.12. przedstawiają wyniki trzeciej analizy, jaką było porównanie środków ciężkości widma odpowiedzi impulsowych głośników we wszystkich badanych punktach. Dla każdego głośnika przygotowano po jednym wykresie umożliwiającym porównanie wyników na promieniu krótkim (zewnątrzna granica kopułki przeciwpływowej) i długim (7 cm, połowa promienia membrany). W punkcie 1 mikrofon ustawiony jest nad przewodami, w punkcie 5 rozpatrujemy pozycję po drugiej stronie, a idąc dalej zbliżamy się ponownie do punktu wyjścia. Wyniki w każdym punkcie zostały uśrednione ze wszystkich dostępnych pomiarów.



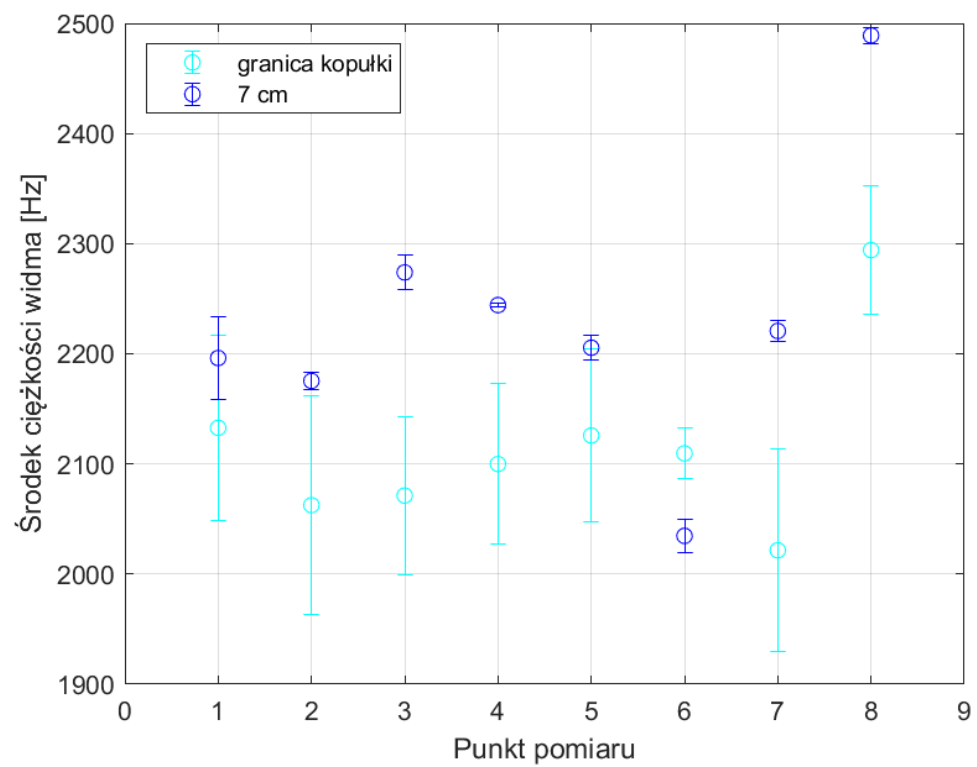
Rys. 4.9. Uśrednione środki ciężkości widma wraz z odchyleniami standardowymi odpowiedzi impulsowych głośnika Fender.



Rys. 4.10. Uśrednione środki ciężkości widma wraz z odchyleniami standardowymi odpowiedzi impulsowych głośnika Eminence.



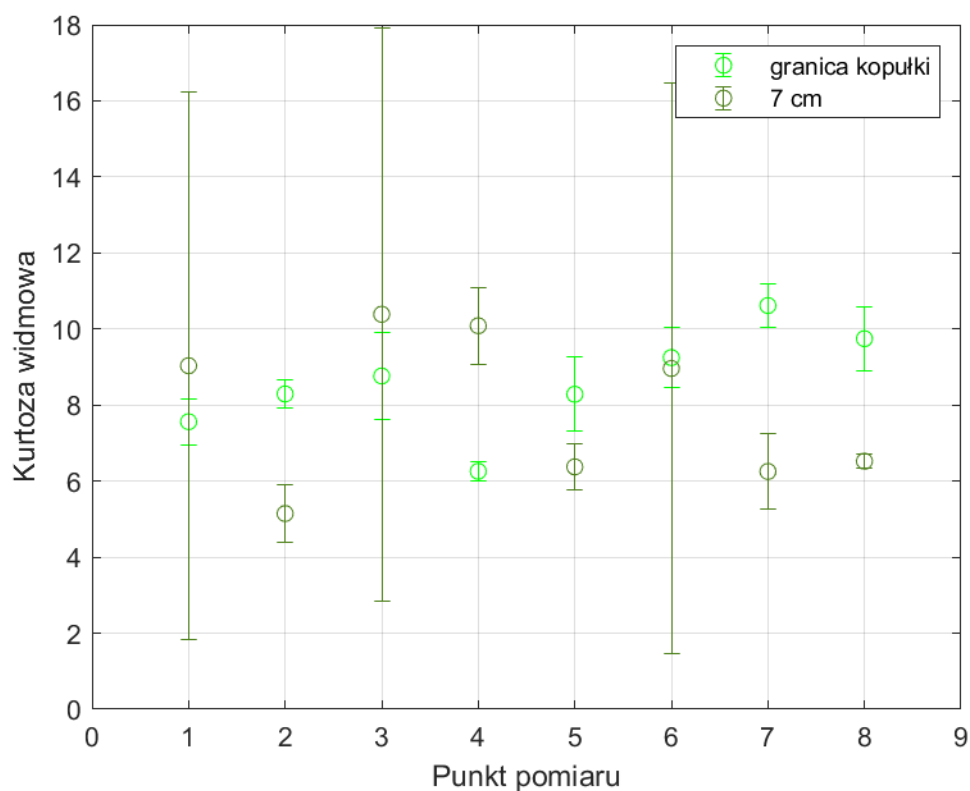
Rys. 4.11. Uśrednione środki ciężkości widma wraz z odchyleniami standardowymi odpowiedzi impulsowych głośnika Celestion 1.



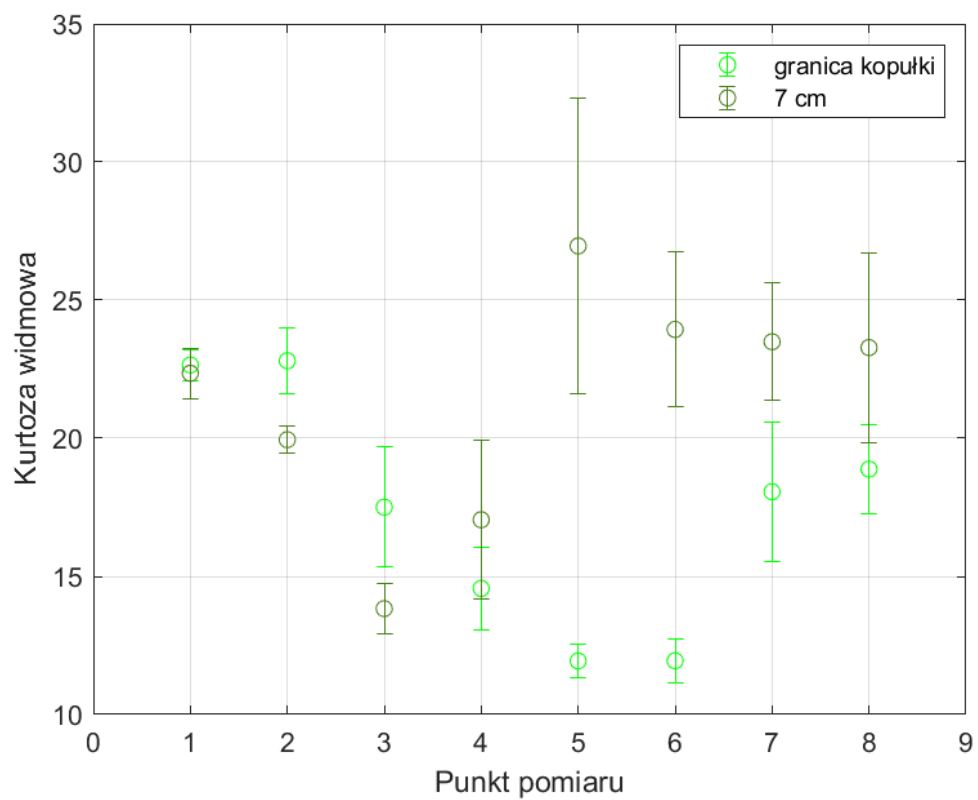
Rys. 4.12. Uśrednione środki ciężkości widma wraz z odchyleniami standardowymi odpowiedzi impulsowych głośnika Celestion 2.

4.4. Porównanie kurtozy widmowej (spłaszczenia widma)

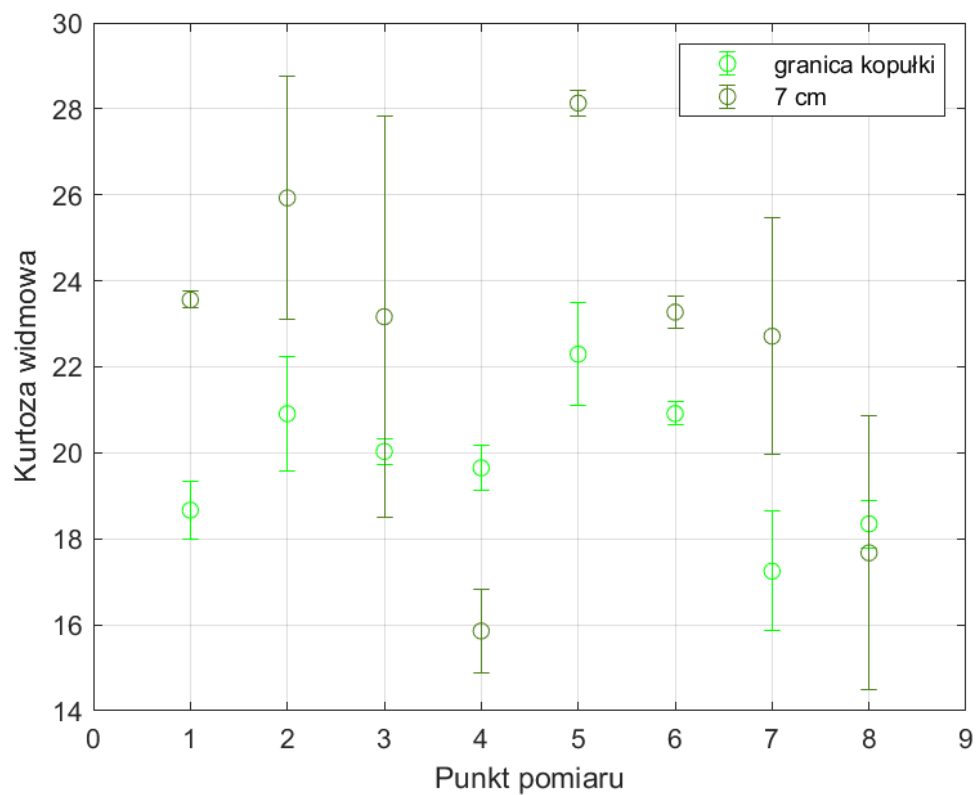
Rys. 4.13 - 4.16. przedstawiają wyniki czwartej analizy, jaką było porównanie kurtozy widmowej odpowiedzi impulsowych głośników we wszystkich badanych punktach. Dla każdego głośnika przygotowano po jednym wykresie umożliwiającym porównanie wyników na promieniu krótkim (zewnątrzna granica kopułki przeciwpływowej) i długim (7 cm, połowa promienia membrany). Wyniki w każdym punkcie zostały uśrednione ze wszystkich dostępnych pomiarów.



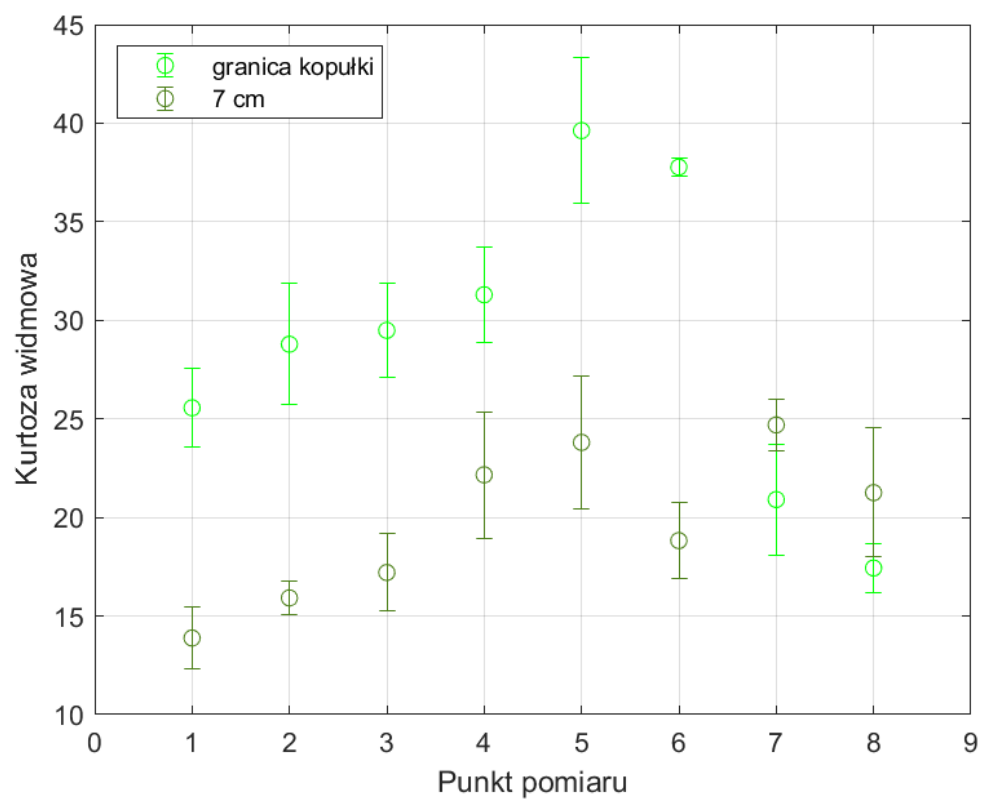
Rys. 4.13. Uśrednione wartości wraz z odchyleniami standardowymi kurtozy widmowej odpowiedzi impulsowych głośnika Fender.



Rys. 4.14. Uśrednione wartości wraz z odchyleniami standardowymi kurtozy widmowej odpowiedzi impulsowych głośnika Eminence.



Rys. 4.15. Uśrednione wartości wraz z odchyleniami standardowymi kurtozy widmowej odpowiedzi impulsowych głośnika Celestion 1.

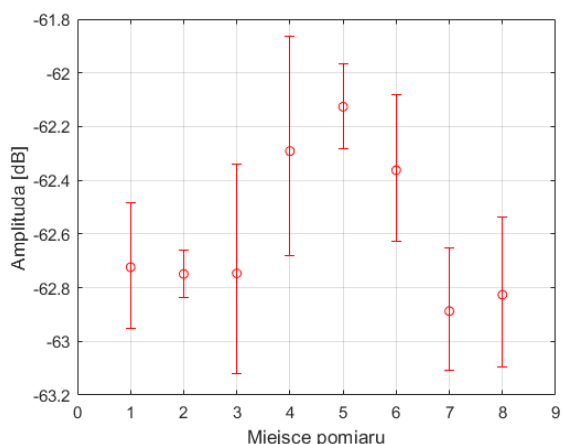


Rys. 4.16. Uśrednione wartości wraz z odchyleniami standardowymi kurtozy widmowej odpowiedzi impulsowych głośnika Celestion 2.

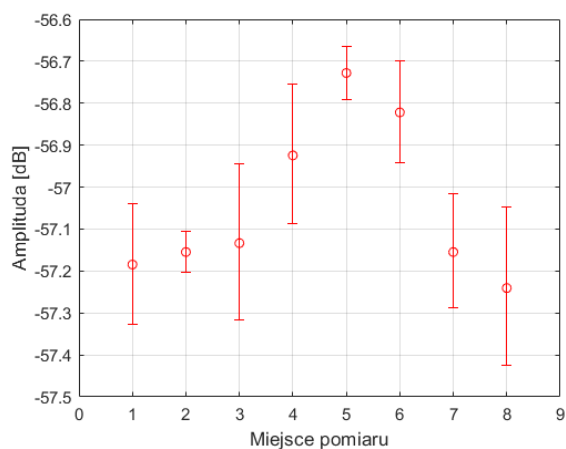
4.5. Średnie wartości wraz z niepewnością rozszerzoną dla pasm oktaowych, w zależności od punktu pomiarowego

Na podstawie wyniku testu K-W na każdej grupie danych (wartości energii odpowiedzi impulsowej w danym paśmie oktaowym ze wszystkich pomiarów dla konkretnego punktu) podejmowano decyzję o wyświetleniu wykresu. Rys. 4.17 - 4.46. przedstawiają wykresy tych danych, dla których powyższy test statystyczny odrzucił hipotezę zerową o równości median wszystkich grup danych. Wykresy pogrupowano dla każdego głośnika z osobna, przy uwzględnieniu promienia, na jakim wykonywane były pomiary.

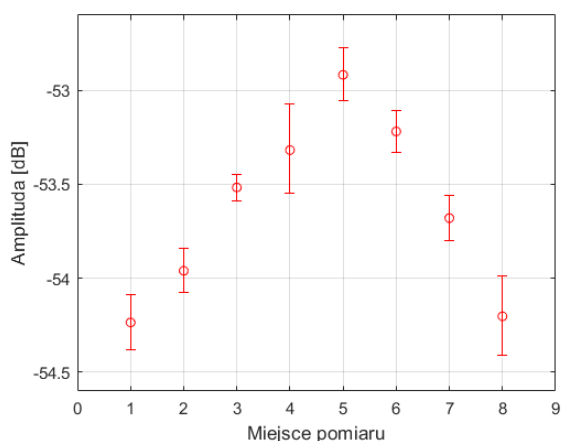
Fender (zewnętrzna granica kopułki przeciwpyłowej)



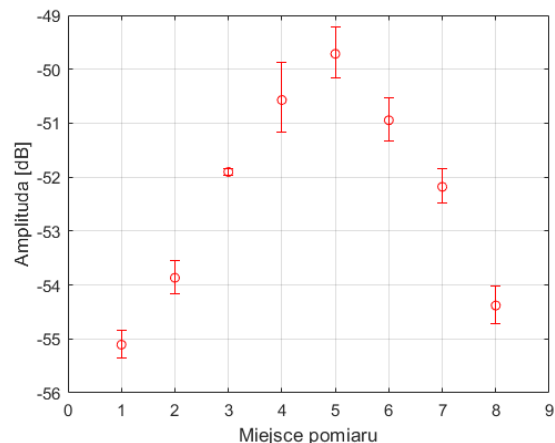
Rys. 4.17. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 500 Hz, głośnik Fender, zewnętrzna granica kopułki.



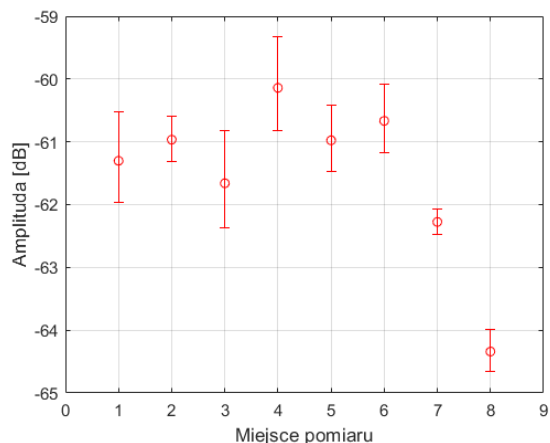
Rys. 4.18. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 1 kHz, głośnik Fender, zewnętrzna granica kopułki.



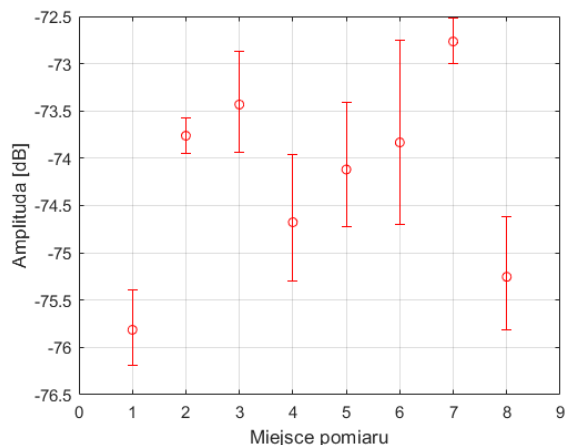
Rys. 4.19. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 2 kHz, głośnik Fender, zewnętrzna granica kopułki.



Rys. 4.20. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 4 kHz, głośnik Fender, zewnętrzna granica kopułki.

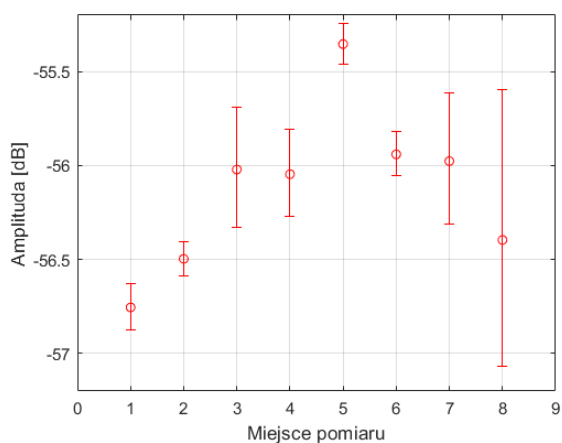


Rys. 4.21. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 8 kHz, głośnik Fender, zewnętrzna granica kopułki.

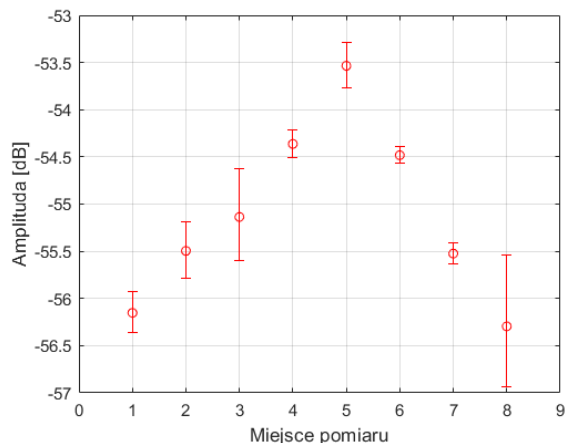


Rys. 4.22. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 16 kHz, głośnik Fender, zewnętrzna granica kopułki.

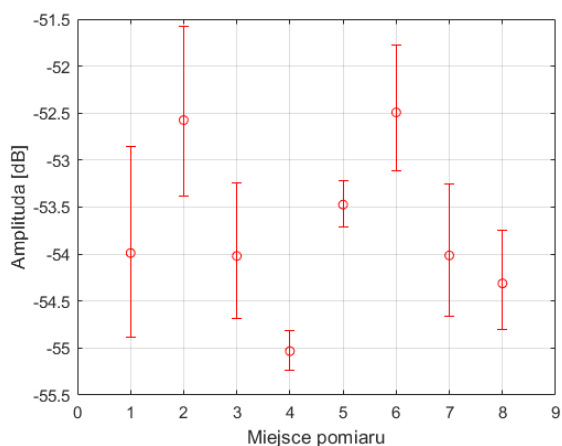
Fender (promień 7 cm)



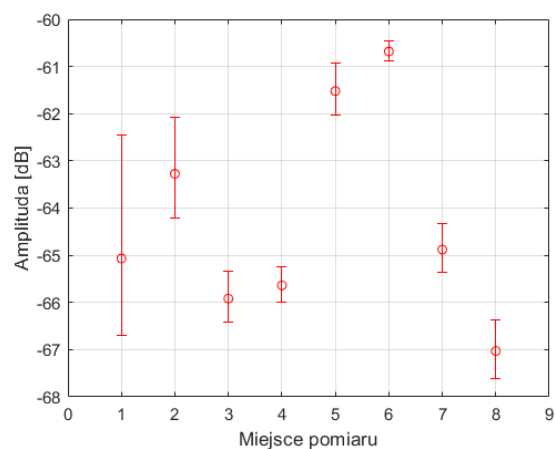
Rys. 4.23. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 1 kHz, głośnik Fender, promień 7 cm.



Rys. 4.24. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 2 kHz, głośnik Fender, promień 7 cm.

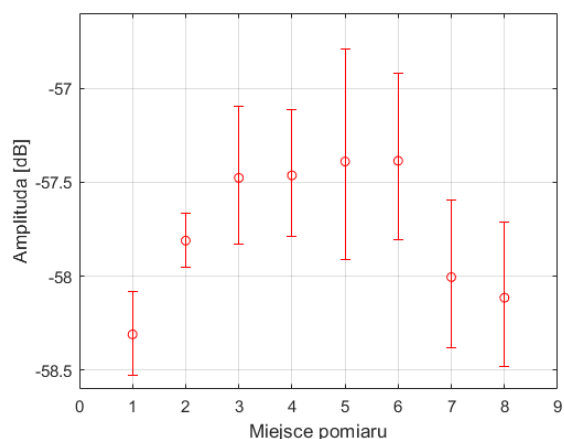


Rys. 4.25. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 4 kHz, głośnik Fender, promień 7 cm.

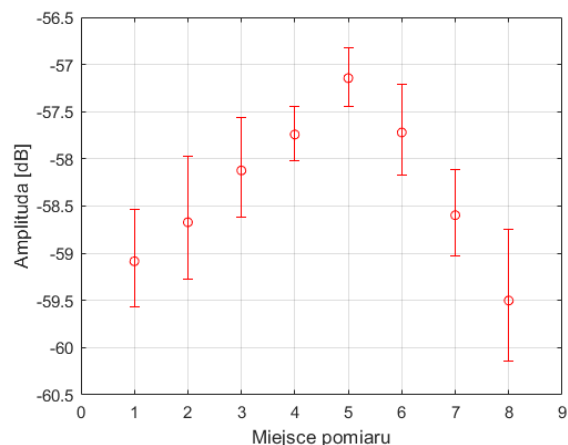


Rys. 4.26. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 8 kHz, głośnik Fender, promień 7 cm.

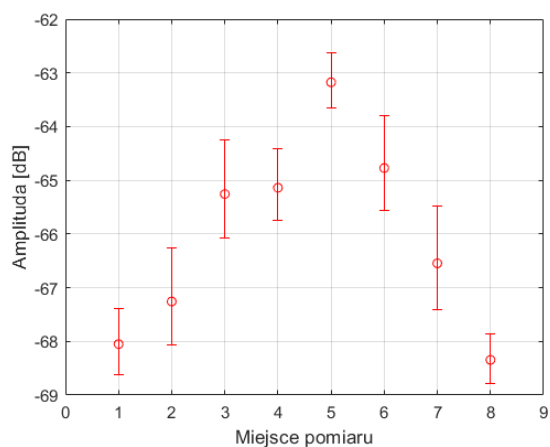
Eminence (zewnętrzna granica kopułki przeciwpływowej)



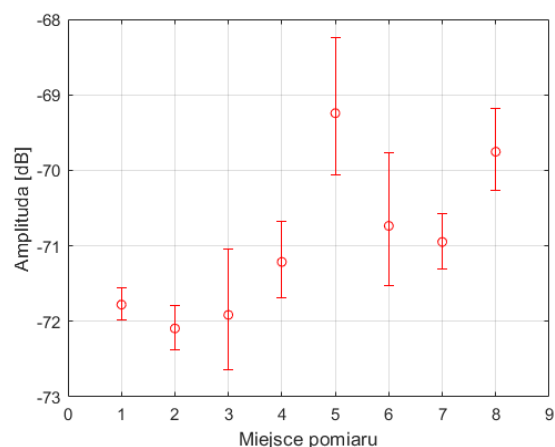
Rys. 4.27. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 1 kHz, głośnik Eminence, zewnętrzna granica kopułki.



Rys. 4.28. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 4 kHz, głośnik Eminence, zewnętrzna granica kopułki.

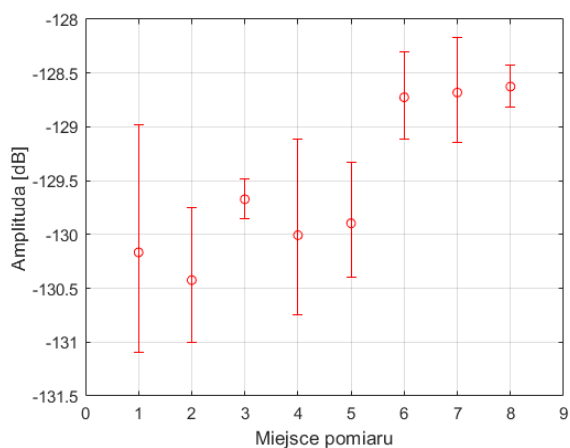


Rys. 4.29. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 8 kHz, głośnik Eminence, zewnętrzna granica kopułki.

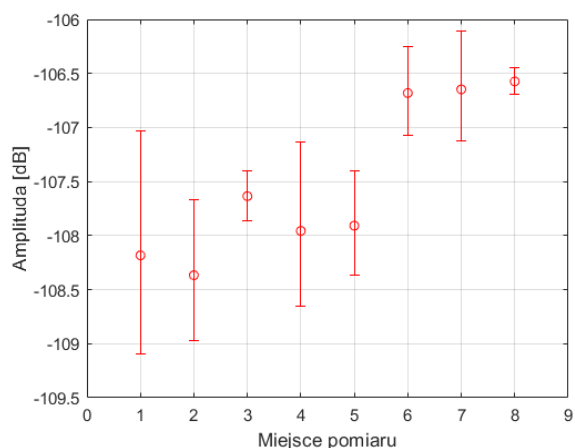


Rys. 4.30. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 16 kHz, głośnik Eminence, zewnętrzna granica kopułki.

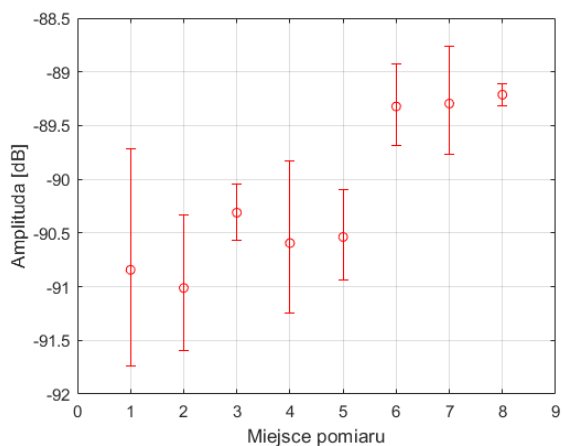
Eminence (promień 7 cm)



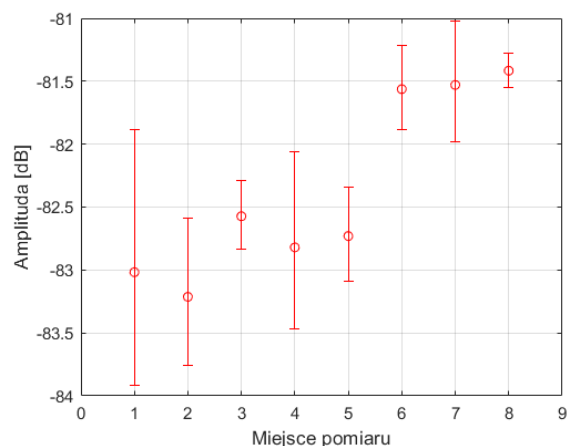
Rys. 4.31. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 16 Hz, głośnik Eminence, promień 7 cm.



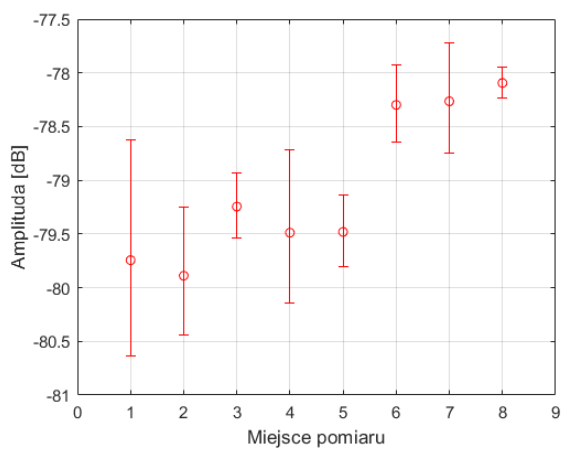
Rys. 4.32. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 31,5 Hz, głośnik Eminence, promień 7 cm.



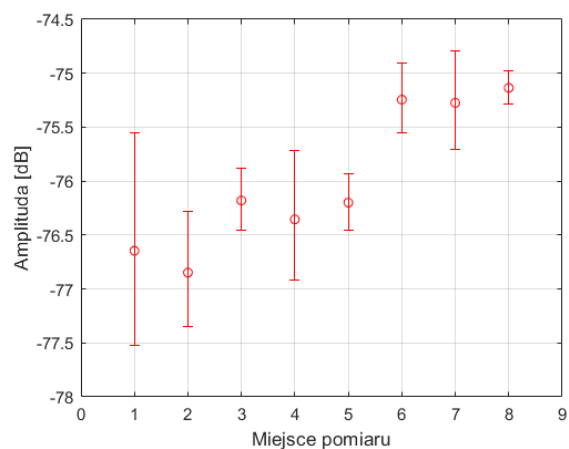
Rys. 4.33. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 63 Hz, głośnik Eminence, promień 7 cm.



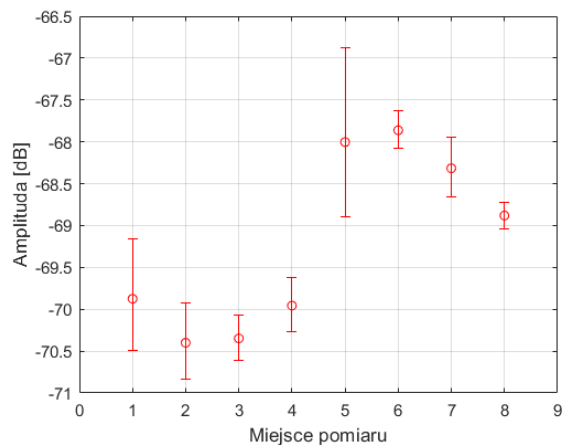
Rys. 4.34. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 125 Hz, głośnik Eminence, promień 7 cm.



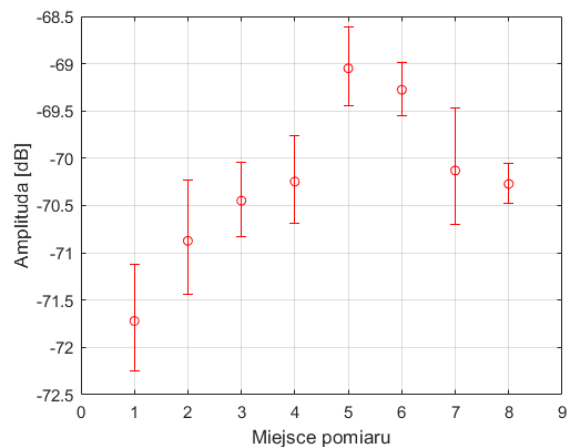
Rys. 4.35. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 250 Hz, głośnik Eminence, promień 7 cm.



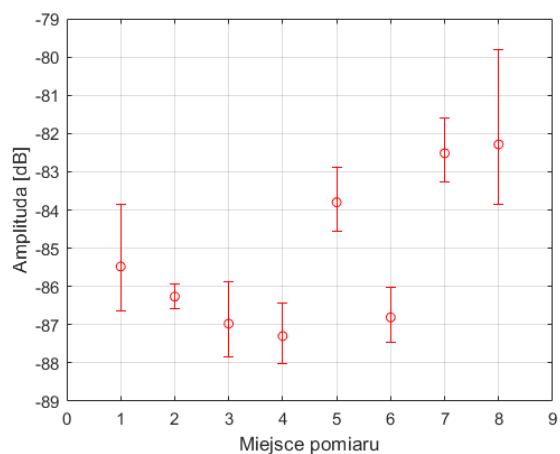
Rys. 4.36. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 500 Hz, głośnik Eminence, promień 7 cm.



Rys. 4.37. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 2 kHz, głośnik Eminence, promień 7 cm.

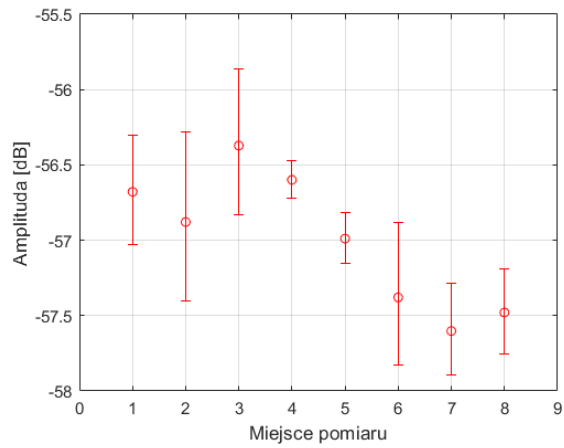


Rys. 4.38. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 4 kHz, głośnik Eminence, promień 7 cm.

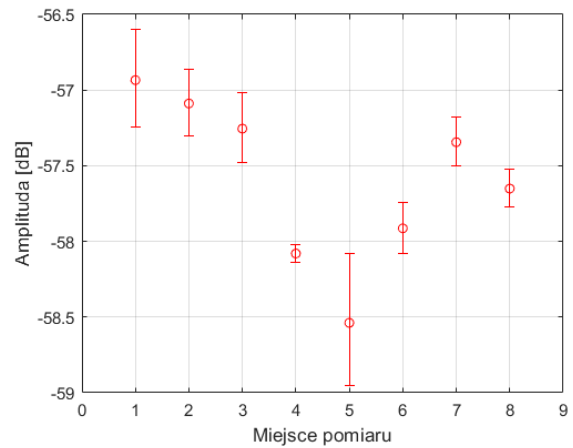


Rys. 4.39. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 16 kHz, głośnik Eminence, promień 7 cm.

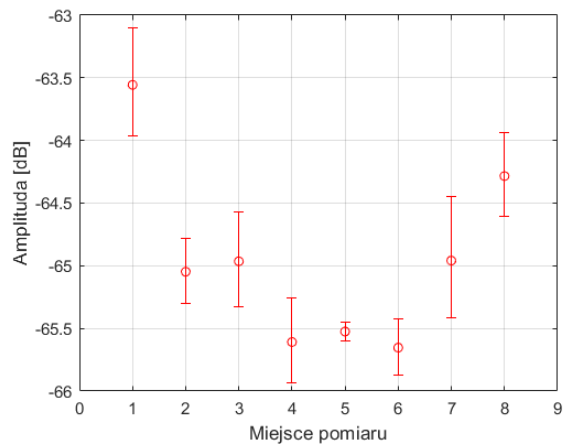
Celestion 1 (zewnętrzna granica kopułki przeciwpylowej)



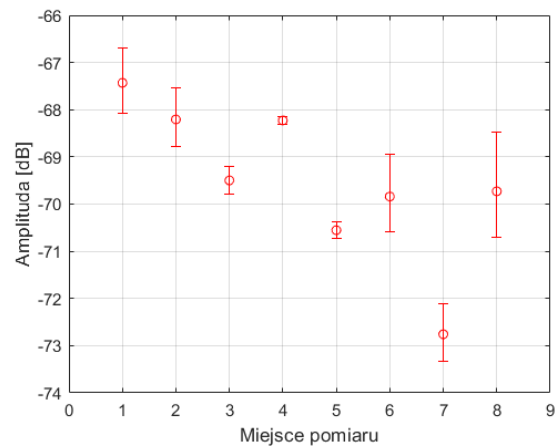
Rys. 4.40. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 2 kHz, głośnik Celestion 1, zewnętrzna granica kopułki.



Rys. 4.41. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 4 kHz, głośnik Celestion 1, zewnętrzna granica kopułki.

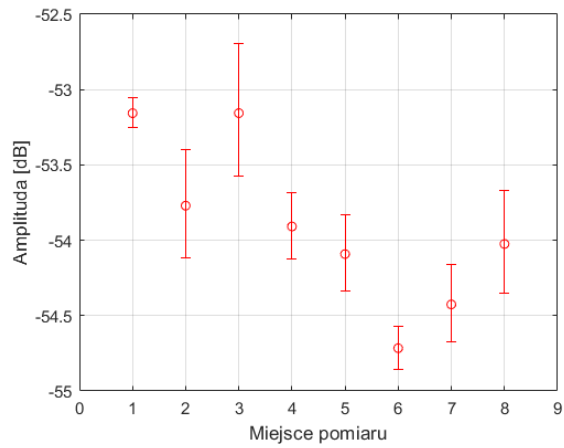


Rys. 4.42. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 8 kHz, głośnik Celestion 1, zewnętrzna granica kopułki.

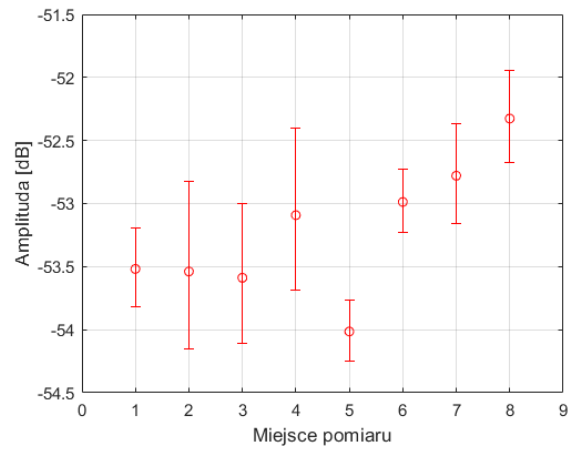


Rys. 4.43. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 16 kHz, głośnik Celestion 1, zewnętrzna granica kopułki.

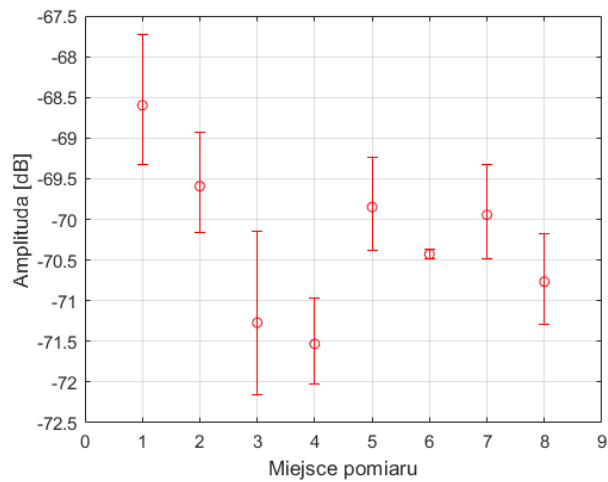
Celestion 1 (promień 7 cm)



Rys. 4.44. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 2 kHz, głośnik Celestion 1, promień 7 cm.

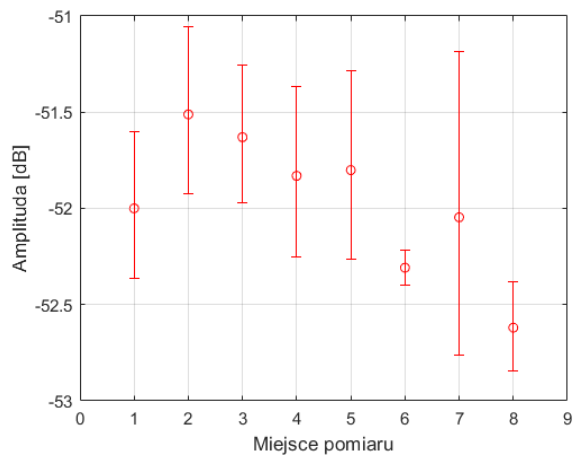


Rys. 4.45. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 4 kHz, głośnik Celestion 1, promień 7 cm.

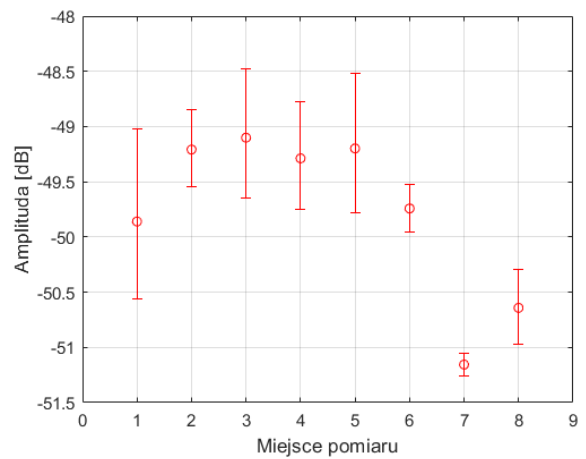


Rys. 4.46. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 16 kHz, głośnik Celestion 1, promień 7 cm.

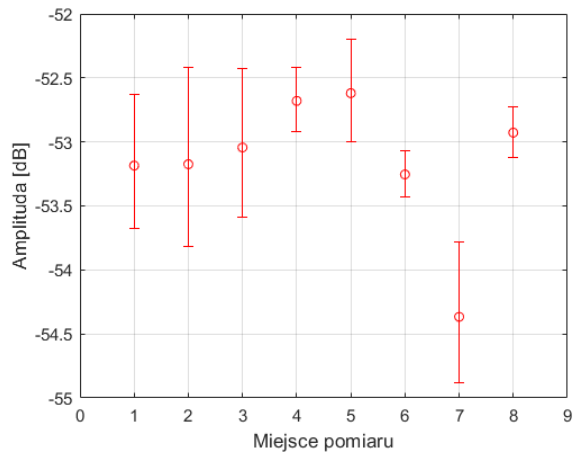
Celestion 2 (zewnętrzna granica kopułki przeciwpylowej)



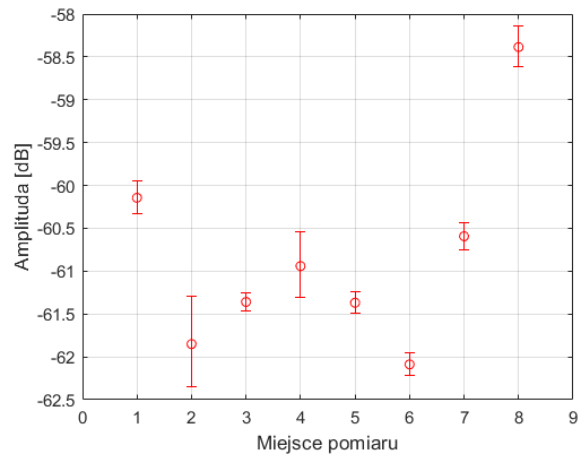
Rys. 4.47. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 1 kHz, głośnik Celestion 2, zewnętrzna granica kopułki.



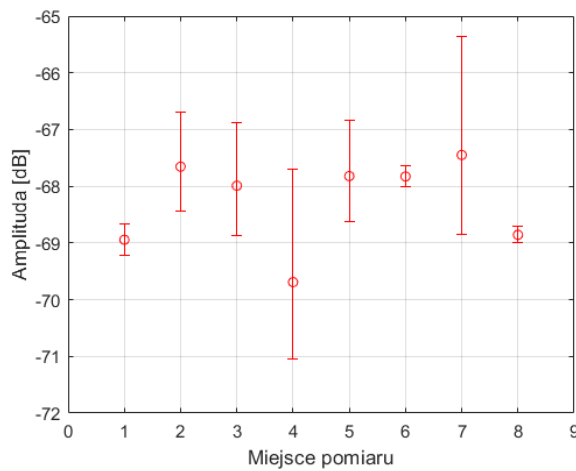
Rys. 4.48. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 2 kHz, głośnik Celestion 2, zewnętrzna granica kopułki.



Rys. 4.49. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 4 kHz, głośnik Celestion 2, zewnętrzna granica kopułki.

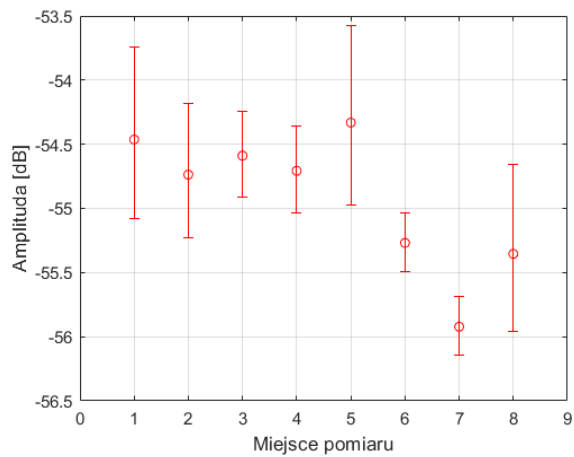


Rys. 4.50. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 8 kHz, głośnik Celestion 2, zewnętrzna granica kopułki.

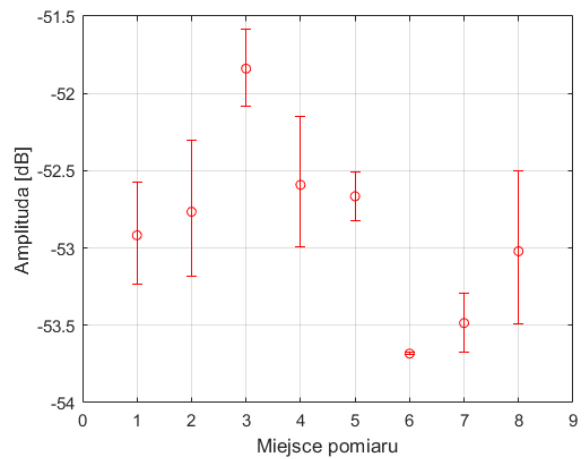


Rys. 4.51. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 16 kHz, głośnik Celestion 2, zewnętrzna granica kopułki.

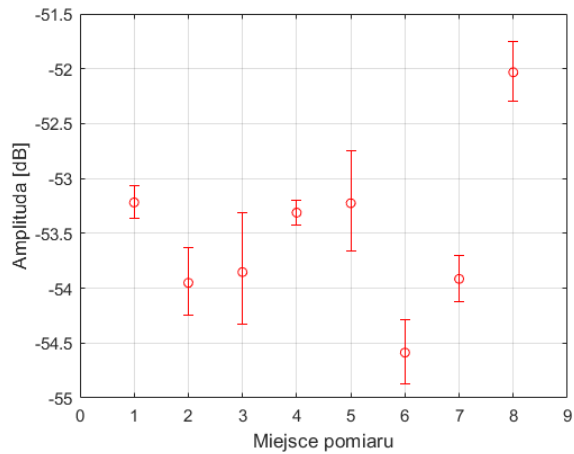
Celestion 2 (promień 7 cm)



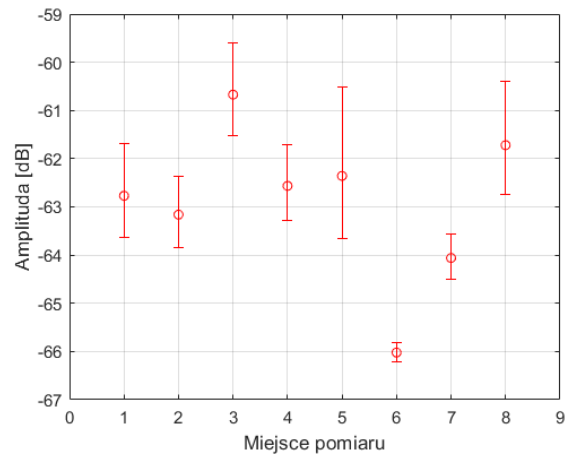
Rys. 4.52. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 1 kHz, głośnik Celestion 2, promień 7 cm.



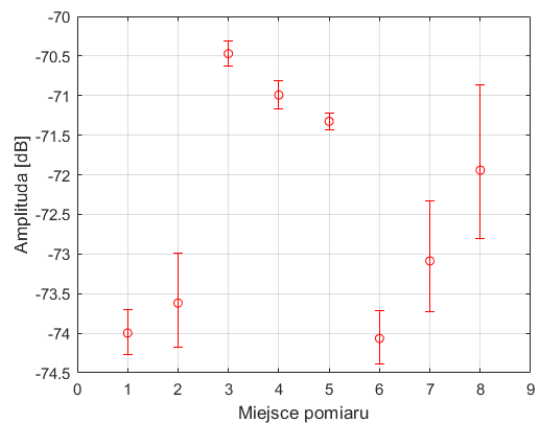
Rys. 4.53. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 2 kHz, głośnik Celestion 2, promień 7 cm.



Rys. 4.54. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 4 kHz, głośnik Celestion 2, promień 7 cm.



Rys. 4.55. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 8 kHz, głośnik Celestion 2, promień 7 cm.



Rys. 4.56. Średnie i niepewności rozszerzone dla pasma 16 kHz, głośnik Celestion 2, promień 7 cm.

5. Omówienie wyników

Przedstawione wyniki nie sugerują losowości danych. Pojawiają się pewne zależności widoczne lepiej w jednych głośnikach i nieco gorzej w innych. Pozostaje odpowiedzieć na pytanie do jakich prowadzą wniosków i jakie mogą mieć one znaczenie dla inżynierów dźwięku pracujących z sygnałem generowanym przez kolumny gitarowe.

5.1. Porównanie dwóch punktów

Przy porównywaniu dwóch punktów, test na normalność rozkładów danych dla zdecydowanej większości grup zwrócił informację o braku podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej (na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ można uznać, że dane należą do rozkładów normalnych). Wskazywać to może na dosyć dobrą dokładność ręcznego ustawiania mikrofonu pomiarowego, pomimo ograniczeń ludzkiego aparatu ruchowego.

Na podstawie wyników testów na równość median rozkładów można jednoznacznie stwierdzić, że punkt pomiarowy nad przewodami (1) na granicy kopułki przeciwpyłowej dla głośników Fender oraz Eminence odznacza się mniejszą ilością informacji w pasmach częstotliwości średnich i wysokich. Podobnie prezentują się wyniki dla tych samych głośników na promieniu 7 cm. Sytuacja wygląda inaczej dla głośnika Celestion 1. Na krótszym promieniu, punkt nad przewodami (1) dominuje w pasmach częstotliwości wysokich, natomiast od pasma 1 kHz aż do najniższego 16 Hz, to punkt po drugiej stronie (5) wykazuje się większą ilością energii. Przenosząc się na promień 7 cm, nie widać tak wyraźnych zmian w charakterystykach. Pozostaje głośnik Celestion 2, dla którego znaczące różnice pojawiają się ponownie w najwyższych pasmach częstotliwościowych. Na obu promieniach w paśmie 16 kHz jednoznacznie większa okazuje się być mediana rozkładu danych punktu 5, na przekór czemu na krótszym promieniu w paśmie 8 kHz, to właśnie punkt 1 wykazuje się większą ilością energii.

5.2. Porównanie dwóch pólster

Normalność rozkładów w analizie uśrednionych wartości widm odpowiedzi impulsowych w pasmach oktaowych dla dwóch pólster prezentuje się gorzej niż dla pojedynczych punktów - w zdecydowanej większości test zwrócił informację o odrzuceniu hipotezy zerowej. Nie jest to jednak informacja, która dyskwalifikuje wnioski wyciągnięte na podstawie dalszych testów - zamiast średnich (które dla rozkładu normalnego równe są medianie), testowane były mediany. Takie wyniki były również możliwe do przewidzenia, ze względu na naturę podejmowanych działań (uśrednianie danych z różnych punktów pomiarowych).

W głośniku Fender, półsfera po przeciwnej do przewodów stronie zawiera więcej informacji we wszystkich pasmach oktaowych na krótszym promieniu i w pasmach powyżej 2 kHz na promieniu 7 cm. Mniej jednoznacznie prezentują się wyniki dla głośnika Eminence, na obu promieniach nadal można jednak zauważyć przewagę środkowych i wysokich częstotliwości na półsferze po przeciwnej stronie do przewodów, za wyłączeniem pasma najwyższego, gdzie sytuacja jest odwrotna. Różnice wskazane przez testy dla pasma 16 Hz

nie są w tym przypadku rozważane ze względu na fakt, że dla wszystkich pomiarów, różnica pomiędzy wartościami w tym paśmie, a najwyższymi (znajdującymi się zazwyczaj w okolicy 1 - 4 kHz) wynosi ponad 100 dB (100000-krotna różnica energii). Zależności dla głośnika Celestion 1 można uprościć do stwierdzenia, iż są odwrotne do tych zaobserwowanych dla głośnika Fender. W tym przypadku to półsfera nad przewodami cechuje się większą ilością energii. Głośnik Celestion 2 nie podsuwa jednoznacznych wniosków przy zewnętrznej granicy kopułki przeciwpylowej. Mediany rozkładów danych w 4 kHz i 8 kHz są większe dla półsfery nad przewodami, lecz mniejsze w pasmach 1 kHz, 2 kHz i 16 kHz, gdzie dominuje półsfera po drugiej stronie. Na promieniu 7 cm wyniki są bardziej jednostronne: półsfera nad przewodami zawiera więcej informacji w pasmach powyżej 1 kHz.

5.3. Porównanie środków ciężkości widma

Środki ciężkości widma wyznaczone z pomiarów na krótszym promieniu dla głośnika Fender wyraźnie sugerują zwiększenie subiektywnego pojęcia jasności barwy (z którym utożsamiany jest badany parametr) przy oddalaniu się od okolic umiejscowienia przewodów. Ta zależność zanika dla promienia 7 cm, gdzie to wręcz punkt bliżej przeciwnej strony membrany okazuje się być subiektywnie „najciemniejszy”. Podobnie wygląda sytuacja dla głośnika Eminence przy dużo większych różnicach pomiędzy sąsiadującymi punktami (dla poprzedniego głośnika zmiany te były nieco bardziej stopniowe, bez dużych skoków). Tym razem jednak punkt „najjaśniejszy” na promieniu 7 cm odpowiada temu na granicy kopułki. Sytuację odwrotną można zaobserwować dla głośnika Celestion 1, gdzie to oddalając się od punktu umiejscowienia przewodów, środek ciężkości widma maleje. Zależność ta jest widoczna dla obu promieni, przy czym na 7 cm różnice są mniejsze. Oprócz tego dla zdecydowanej większości punktów barwa okazuje się „jaśniejsza” na dłuższym promieniu, co jest również widoczne w głośniku Celestion 2. W punkcie 8 posiada on wyraźne maksimum badanego parametru w obu przypadkach. Poza tym, duża część wyników nie sugeruje powtarzalności zależności na obu promieniach, podobnie jak dla głośnika Fender.

5.4. Porównanie kurtozy widmowej (spłaszczenia widma)

Wyniki analizy porównawczej parametru spłaszczenia widma nie podsuwają jasnych wniosków. Dla głośnika Celestion 1 w większości punktów kurtoza widmowa jest większa na promieniu 7 cm. Zależność ta jednak prezentuje się odwrotnie dla głośnika Celestion 2, gdzie wyznaczone wartości są mniejsze na dłuższym promieniu. Wyniki dla głośników Fender oraz Eminence wydają się nieco bardziej losowe, nie jest widoczne jednoznaczne powiązanie badanych wartości z promieniem ani punktem pomiarowym.

5.5. Test K-W

Najbardziej obszerny zbiór wyników zapewniła ostatnia analiza oparta na wizualnej ocenie wykresów średnich wraz z niepewnościami rozszerzonymi w pasmach, dla których test statystyczny K-W odrzucił hipotezę zerową o równości median wszystkich grup danych.

Dla głośnika Fender przy zewnętrznej granicy kopułki przeciwpyłowej w pasmach od 500 Hz do 4 kHz widoczny jest związek punktu pomiarowego z ilością energii generowanej przez membranę w tych pasmach (Rys. 4.17-20). Pozostałe pasma (8 kHz i 16 kHz) nie wykazały tak wyraźnych zależności, nadal jednak to punkty w pobliżu przewodów zawierają najmniej informacji. Na promieniu 7 cm powtórzyła się zaobserwowana wcześniej prawidłowość, tym razem jednak jedynie w pasmach 1 kHz oraz 2 kHz. W paśmie 4 kHz pojawiły się dwa zbliżone wartości maksimum w punkcie 2 i 6, oraz minimum w punkcie 4. Wykres ostatniego branego pod uwagę pasma, tj. 8 kHz, nie powiela uprzednich zależności.

Analogicznie do wyników poprzedniego głośnika, Eminence wykazuje związek punktu pomiarowego z ilością energii generowanej w pasmach 1 kHz, 4 kHz i 8 kHz dla zewnętrznej granicy kopułki przeciwpyłowej. W paśmie 16 kHz również najwięcej informacji można zaobserwować w punkcie 5, najmniej natomiast w punkcie 2. Na promieniu 7 cm jedynie dla pasm 1 kHz i 8 kHz test K-W zwrócił informację o braku podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. We wszystkich pozostałych pasmach widoczna jest powtarzająca się przewaga ilości energii zawartej w okolicy punktów 6-8 z uwzględnieniem punktu 5 powyżej pasma 2 kHz.

W głośniku Celestion 1 na krótszym promieniu, różnice median stwierdzone zostały dla czterech najwyższych pasm oktaowych. W pasmach 4 kHz i 8 kHz widoczna jest zależność odwrotna do zaobserwowanych w dwóch poprzednich głośnikach. To w punkcie nad przewodami zmierzono w nich największą ilość energii, najmniej informacji znajduje się natomiast w punkcie po drugiej stronie (5). Można zauważyć podobne, lecz przesunięte zachowanie mierzonej charakterystyki w paśmie 2 kHz, gdzie w punkcie 3 jest maksimum, natomiast minimum w punkcie 7. Dla 16 kHz ponownie punkt nad przewodami wykazuje się największą ilością energii. Na promieniu 7 cm w trzech branych pod uwagę pasmach, maksimum ponownie znajduje się w punkcie 1 lub sąsiadującym 8.

Dla głośnika Celestion 2 ciężko stwierdzić jasną i powtarzalną zależność we wszystkich analizowanych pasmach, zarówno dla zewnętrznej granicy kopułki przeciwpyłowej, jak i dla dłuższego promienia. Maksima i minima różnią się w zależności od pasma częstotliwościowego jak i promienia, a widoczne charakterystyki nie są powtarzalne pomiędzy pasmami i wydają się nie zależeć od branego do tej pory pod uwagę umiejscowienia przewodów doprowadzających sygnał do cewki. Jedynie wykresy dla trzech pierwszych badanych pasm w pomiarach przy granicy kopułki (1 kHz, 2 kHz, 4 kHz) można wizualnie porównać ze sobą. Ich kształt sugeruje więcej informacji zawartych w okolicy punktów 1-5, podobnie jak na wykresach dla pasm 1 kHz i 2 kHz na promieniu 7 cm.

6. Podsumowanie i wnioski

Pomimo zbliżonej budowy wszystkich badanych głośników, wyniki różnią się pomiędzy nimi, nawet dla egzemplarzy tego samego producenta. Zaczynając od analizy kurtozy widmowej, która wykazała najmniej konkretnych zależności, można stwierdzić że zwiększając odległość od środka membrany (promień), charakterystyka w większości punktów będzie bardziej wygładzona (Celestion 1), lub wręcz przeciwnie (Celestion 2). Promień może również wcale nie wpływać jednoznacznie na ten parametr, co wykazały dwa pozostałe głośniki.

Wyniki pomiarów głośników Fender, Eminence i Celestion 1 sugerują korelację obecności przewodów sygnałowych na membranie z subiektywnym pojęciem jasności barwy, szczególnie w pasmach najbardziej znaczących dla instrumentu jakim jest gitara elektryczna. Stwierdzenie „najbardziej znaczące dla gitary elektrycznej pasma częstotliwościowe” zostało użyte na podstawie doświadczenia autora, konsultacji z aktywnymi pracownikami branży audio, oraz wizualnej prezentacji charakterystyk częstotliwościowych na Rys. 4.1-8. Najwięcej energii zawiera się w pasmach 1 kHz, 2 kHz i 4 kHz. Powyżej widoczny jest wyraźny spadek, dla pasma 16 kHz wynoszący około 30 dB. Energia we wszystkich niższych pasmach również maleje wraz z częstotliwością: dla najniższego pasma spadek wynosi ponad 100 dB.

Dwa pierwsze głośniki odznaczają się ciemniejszą barwą w okolicy miejsca, w którym znajdują się przewody sygnałowe, na krótszym z badanych promieni. Dokładnie odwrotną zależność wykazały pomiary głośnika Celestion 1. Na podstawie otrzymanych wyników, dla głośnika Celestion 2 nie można stwierdzić jednoznacznej zależności jasności barwy od obecności przewodów.

Ponieważ grupa badanych głośników była niewielka, a wyniki dla wszystkich z nich nie są jednoznaczne, ciężko wyciągnąć wnioski i wskazać zależności, które mogą dotyczyć większej populacji głośników gitarowych. W celu uogólnienia diagnozy konieczne byłoby zbadanie zdecydowanie większej liczby głośników różnych producentów. Oprócz tego eksperyment można rozszerzyć o głośniki o różnych średnicach.

W tym celu mile widziane byłoby wykorzystanie statywu z automatycznym manipulatorem o znanej dokładności, aby uniknąć konieczności powtarzania pomiarów dla celów statystycznych. Zmniejszyłoby to czasochłonność eksperymentu oraz umożliwiło pozbycie się całej części obliczeniowej związanej ze statystyką. Podobnym rozwiązaniem mogącym ułatwić badanie jest wykorzystanie statycznej siatki mikrofonów, która jednak mogłaby w znaczący sposób wpłynąć na pole akustyczne przed membraną.

Istotnym rozszerzeniem metody walidacji otrzymanych wyników mogłoby być wykonanie ślepych testów psychoakustycznych na dużej grupie osób, w celu oceny czy zaobserwowane fizyczne różnice mają przełożenie na rzeczywisty odbiór subiektywnie ocenianego brzmienia. Warto byłoby podzielić badanych pod kątem wykształcenia muzycznego lub doświadczenia w pracy z audio.

Pomimo ograniczeń wykorzystanej metody, na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że w 75% zbadanych głośników, przy zewnętrznej granicy kopułki przeciwpływowej widoczny jest wpływ przewodów sygnałowych przebijających membranę, na sygnał rejestrowany w polu bliskim. Należy zauważyć, że zależność ta zanika przy większym promieniu. W celu bardziej świadomej pracy z sygnałem kolumny gitarowej, omawiany element konstrukcyjny wart jest uwagi realizatora dźwięku. Świadomość możliwości zmiany

barwy instrumentu opartej na tej asymetrii, może okazać się równie użyteczna jak zauważony przez Alex'a Case [10] wpływ odległości mikrofonu od środka membrany, od kolumny, czy nawet kąt jego ustawienia.

W celu umożliwienia własnoręcznej oceny zachowania dostępnych danej osobie głośników, należy zastanowić się nad koniecznością wykorzystywania profesjonalnego sprzętu pomiarowego, a w szczególności nad wykonywaniem pomiarów w warunkach studyjnych, czy nawet domowych, zamiast korzystania z komory bezekowej, do której zdecydowana większość pasjonatów nie ma dostępu. W celu usprawiedliwienia takich decyzji można zaznaczyć, że analizowane są wartości względne, a nie bezwzględne charakterystyki mierzone zgodnie z normami w odpowiednich warunkach przy wykorzystaniu skalibrowanego sprzętu. Można zastanowić się nad wykorzystaniem względnie tanich mikrofonów takich jak Shure SM57, czy Sennheiser e906, używanych powszechnie do nagrywania czy też nagłaśniania kolumn gitarowych. W taki sposób każda chętna osoba byłaby w stanie poznać wpływ przewodów sygnałowych na membranie swojego głośnika gitarowego na sygnał rejestrowany w polu bliskim, co może otworzyć wiele możliwości kształtowania własnego brzmienia w trakcie nagrań lub na koncertach na żywo.

Literatura

- [1] R. Makarewicz (2004), *“Dźwięki i fale”*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- [2] PN-EN 60268-5:2004 - *“Urządzenia systemów elektroakustycznych -- głośniki i zestawy głośnikowe”*.
- [3] G.B. Stan, J.J. Embrechts, D. Archambeau (2002), *“Comparison of different impulse response measurement techniques”*.
- [4] JCGM 100:2008 (2008), *“Ewaluacja danych pomiarowych - Przewodnik wyrażania niepewności pomiaru”*.
- [5] Nornadiah Mohd Razali, Yap Bee Wah (2011), *“Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests”*, Journal of Statistical Modeling and Analytics Vol.2 No.1, 21-33, 2011.
- [6] PN-EN 61672-1:2014-03 - *“Elektroakustyka -- Mierniki poziomu dźwięku -- Część 1: Wymagania”*.
- [7] Brian C. J. Moore (1999), *“Wprowadzenie do psychologii słyszenia”*, w przełożeniu Aleksander Sęk i Ewa Skrodzka, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa - Poznań.
- [8] José M. Martinez (2004), *“MPEG-7 Overview (version 10)”*, ISO/IEC JTC1/SC29/WG11N6828, *“Coding of Moving Pictures and Audio”*.
- [9] *“Guitar Tone Secrets: The Dark Side of the Cone”*. Dostępny: <https://www.youtube.com/watch?v=y0w4YFVl77w> (strona odwiedzona 20.11.2021).
- [10] A. Case (2010), *“Recording Electric Guitar—The Science and the Myth,”* J. Audio Eng. Soc., vol. 58, no. 1/2, pp. 80-83.
- [11] Ignazio Vagnone (2021), *“The Speakers for Electric Guitar”*, Gitarre & Bass 08.21.
- [12] Dokumentacja środowiska programowego Matlab 2020a.