

**Kamil Maliński**

nr albumu: 30572

kierunek studiów: Elektrotechnika

forma studiów: studia stacjonarne

specjalność: systemy elektroenergetyczne

## **AUTONOMICZNY SYSTEM KALIBRACJI I POMIARÓW INSTALACJI AUDIO**

## **AUTONOMOUS SYSTEM OF AUDIO INSTALLATIONS CALIBRATION AND MEASUREMENTS**

Praca dyplomowa magisterska

napisana pod kierunkiem:

**dr inż. Eugeniusza Kornatowskiego**

Katedra Przetwarzania Sygnałów i Inżynierii Multimedialnej

Data wydania tematu pracy: 19.12.2017 r.

Data złożenia pracy: 12.09.2018 r.

Szczecin, 2018



**OŚWIADCZENIE**  
**AUTORA PRACY DYPLOMOWEJ**

Oświadczam, że praca dyplomowa magisterska pt.  
„Autonomiczny system kalibracji i pomiarów instalacji audio”  
napisana pod kierunkiem:  
dr inż. Eugeniusza Kornatowskiego  
jest w całości moim samodzielnym autorskim opracowaniem sporządzonym przy  
wykorzystaniu wykazanej w pracy literatury przedmiotu i materiałów źródłowych.  
Złożona w dziekanacie Wydziału Elektrycznego treść mojej pracy dyplomowej  
w formie elektronicznej jest zgodna z treścią w formie pisemnej.

Oświadczam ponadto, że złożona w dziekanacie praca dyplomowa ani jej fragmenty nie  
były wcześniej przedmiotem procedur procesu dyplomowania związanych z uzyskaniem  
tytułu zawodowego w uczelniach wyższych.

.....  
podpis dyplomanta

Szczecin, dn. ....

## **Streszczenie pracy**

Celem pracy jest opis najważniejszych parametrów akustycznych pomieszczeń odsłuchowych oraz systemów głośnikowych, a także zaprojektowanie i zbudowanie systemu, który umożliwi ich zmierzenie i ułatwi kalibrację. W części teoretycznej omówione są zagadnienia związane z właściwościami akustycznymi przestrzeni i ich wpływem na wrażenia słuchowe użytkowników tychże przestrzeni. Ponadto zawiera informacje o problemach związanych z konfiguracją systemów głośnikowych, a także przybliża zagadnienia techniczne związane z akustyką oraz nagrywaniem i przetwarzaniem dźwięku. Część praktyczna pracy składa się z opisu procesu projektowania urządzenia pomiarowego i jego budowy. Ostatnia część niniejszej pracy zawiera analizę wyników pomiarów wykonanych za pomocą stworzonego zestawu oraz wnioski wyciągnięte z całego procesu.

## **Słowa kluczowe**

Akustyka, Pomiary akustyczne, Analiza częstotliwościowa, FFT, Mikrokontroler

## **Abstract**

The main purpose of this thesis is the description of the most important parameters for listening spaces and audio speakers, as well as designing and building of a system which will allow their measurements and simplifies calibration. The theoretical portion talks about the properties of acoustic spaces and their influence over the listeners' auditory experience. It also contains information about problems associated with sound system configuration and technical details concerning acoustics and sound recording. The practical part is composed of the descriptions of the design process of a measurement device and its building. The last part of this thesis contains the analysis of the results acquired by the created system as well as the conclusions derived from the entire process.

## **Keywords**

Acoustics, acoustic measurements, frequency Analysis, FFT, Microcontroller

# Spis treści

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Wprowadzenie</b> .....                                                    | 7  |
| <b>Parametry akustyczne pomieszczeń i zestawów głośnikowych</b> .....        | 8  |
| 1.1. Parametry akustyczne pomieszczeń odsłuchowych .....                     | 8  |
| 1.1.1. Poziom Szumu otoczenia .....                                          | 8  |
| 1.1.2. Czasy pogłosu RT60, RT30, EDT .....                                   | 10 |
| 1.1.3. Współczynniki przejrzystości C50 i C80 .....                          | 12 |
| 1.1.4. Współczynnik zrozumiałości D50 .....                                  | 12 |
| 1.2. Parametry akustyczne systemów głośnikowych .....                        | 12 |
| 1.2.1. Pasma przenoszenia .....                                              | 13 |
| 1.2.2. Charakterystyka kierunkowa .....                                      | 14 |
| 1.2.3. Opóźnienia czasowe odtwarzanych sygnałów .....                        | 14 |
| <b>Metodyka pomiarów parametrów akustycznych i analizy wyników</b> .....     | 16 |
| 2.1. Sprzęt pomiarowy .....                                                  | 16 |
| 2.1.1. Mikrofon .....                                                        | 16 |
| 2.1.2. Przetwornik analogowo-cyfrowy.....                                    | 24 |
| 2.1.3. Procesor .....                                                        | 26 |
| 2.2. Sygnały testowe .....                                                   | 27 |
| 2.2.1. Szum.....                                                             | 27 |
| 2.2.2. Impuls.....                                                           | 29 |
| 2.2.3. Sweep.....                                                            | 30 |
| 2.3. Metody pomiarów .....                                                   | 31 |
| 2.3.1. Pomiary akustyki pomieszczeń.....                                     | 31 |
| 2.3.2. Pomiary pasma przenoszenia głośników .....                            | 32 |
| 2.3.3. Pomiary charakterystyki kierunkowej głośnika.....                     | 33 |
| 2.4. Analiza wyników .....                                                   | 34 |
| 2.4.1. Analiza częstotliwościowa sygnałów.....                               | 34 |
| 2.4.2. Rozplot.....                                                          | 35 |
| <b>Projekt i budowa systemu kalibracji i pomiarów instalacji audio</b> ..... | 37 |
| 3.1. Projekt urządzenia .....                                                | 37 |
| 3.1.1. Układ zasilania.....                                                  | 38 |
| 3.1.2. Generator szumów .....                                                | 39 |
| 3.1.3. Mikroprocesorowy układ sterowania.....                                | 41 |

|                                              |           |
|----------------------------------------------|-----------|
| 3.2. Budowa i programowanie urządzenia ..... | 44        |
| 3.2.1. Budowa prototypu.....                 | 44        |
| 3.2.2. Programowanie mikrokontrolera .....   | 45        |
| 3.3. Pomiary i analiza wyników.....          | 51        |
| 3.3.1. Testy generatora szumów .....         | 51        |
| 3.3.2. Pomiar akustyki pomieszczeń.....      | 53        |
| 3.3.3. Pomiar parametrów głośników .....     | 55        |
| <b>Zakończenie .....</b>                     | <b>57</b> |
| <b>Bibliografia.....</b>                     | <b>58</b> |
| <b>Spis tabel .....</b>                      | <b>59</b> |
| <b>Spis rysunków.....</b>                    | <b>60</b> |

# **Wprowadzenie**

Akustyka jest fascynującą dziedziną nauki, która bada zjawiska dźwiękowe otaczające nas ze wszystkich stron, a mimo to dla większości ludzi są całkowitą zagadką. Odpowiednia analiza pomieszczeń, w których przebywamy, pod kątem akustycznym pomaga nie tylko profesjonalistom w studiach nagrań, ale także pozwala na poprawę komfortu codziennego życia każdego człowieka. Niestety komercyjny sprzęt do pomiarów akustycznych jest poza zasięgiem przeciętnego człowieka z powodu astronomicznych kosztów.

Niniejsza praca przybliży tematykę akustyki pomieszczeń oraz systemów audio. Opowiada o najważniejszych ich parametrach, a także o tym, jak te parametry wpływają na osoby z nich korzystające. Opisane są także problemy związane z nagrywaniem i analizą dźwięku w celach pomiarowych.

Część praktyczna pracy jest próbą zaprojektowania i stworzenia urządzenia, które jest w stanie dokonać tych pomiarów. W odróżnieniu od dostępnej aparatury pomiarowej projektowany system będzie zbudowany z niedrogich, ogólnodostępnych komponentów.

Po części praktycznej znajdują się wyniki pomiarów testowych wykonanych przy pomocy zbudowanego zestawu, ich analiza oraz wnioski z nich wyciągnięte.

## **Cel pracy**

Przybliżenie zagadnień związanych z akustyką pomieszczeń odsłuchowych i systemów głośnikowych, a także stworzenie systemu umożliwiającego określenie najważniejszych ich parametrów.

## **Zakres pracy**

Projekt i budowa urządzenia mikroprocesorowego, umożliwiającego pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń (czasów pogłosu, zrozumiałości, przejrzystości), oraz systemów głośnikowych (pasmo przenoszenia w polu bliskim poszczególnych głośników, pasmo przenoszenia całego zestawu). Urządzenie komunikuje się z komputerem PC za pomocą Bluetooth i umożliwia analizę uzyskanych danych.

## ROZDZIAŁ 1

# Parametry akustyczne pomieszczeń i zestawów głośnikowych

Walory odsłuchowe są często kwestią subiektywną i w pewnej mierze zależą od preferencji słuchacza. Niemniej jednak istnieją obiektywne miary określające akustyczne cechy pomieszczeń oraz systemów głośnikowych, które pozwalają na określenie ich jakości. Niniejszy rozdział opisuje najważniejsze z tych parametrów.

### 1.1. Parametry akustyczne pomieszczeń odsłuchowych

Jednym z najważniejszych czynników wpływających na dźwięk słyszany przez odbiorcę jest akustyka otoczenia. Wielkość i geometria pomieszczenia, w którym znajduje się słuchacz, decydują o sposobie rozchodzenia się poszczególnych częstotliwości fal akustycznych. Z kolei wszelakie powierzchnie będą w różnych stopniach odbijać i tłumić dźwięk, w zależności od materiału, którego zostały wykonane. Modelowanie zachowania fali dźwiękowej w typowych pomieszczeniach jest bardzo trudne ze względu na bardzo skomplikowaną geometrię i różnorodność materiałów. Dlatego też najczęściej mierzy się kilka parametrów w miejscu odsłuchu, które pozwalają ocenić wpływ akustyki pomieszczenia na dźwięk odbierany w miejscu odsłuchu.

#### 1.1.1. Poziom szumu otoczenia

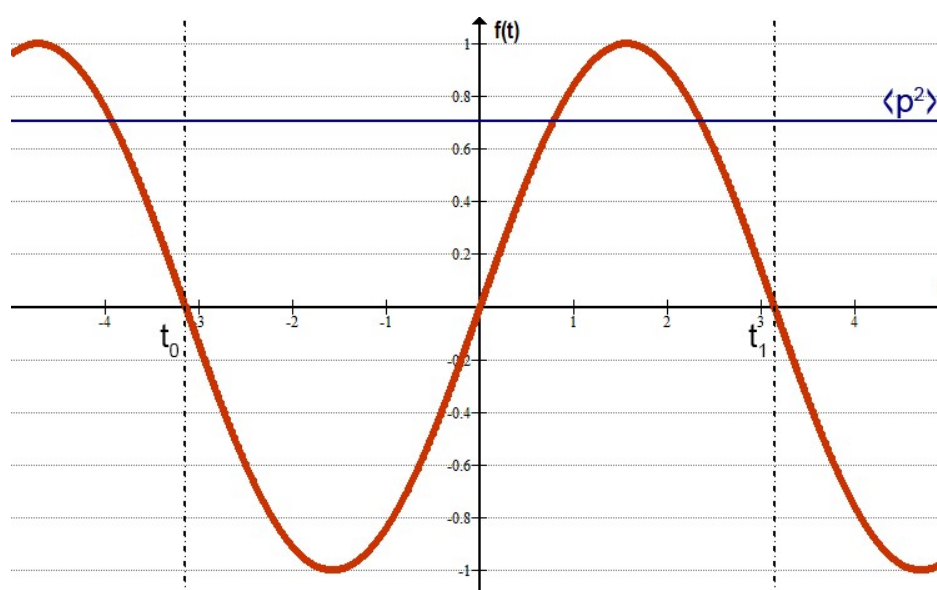
Najbardziej podstawowym parametrem akustycznym pomieszczenia jest poziom szumu. Jest to wartość określająca poziom ciśnienia akustycznego w miejscu odsłuchu, podczas gdy nie jest odtwarzany żaden dźwięk. Jednostką poziomu ciśnienia akustycznego jest dB SPL (ang. Sound Pressure Level), a obliczany jest za pomocą wzoru (1.1), gdzie  $\langle p^2 \rangle$  to średnia kwadratowa ciśnienia akustycznego, natomiast  $p_0$  to wartość ciśnienia odniesienia.

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{\langle p^2 \rangle}{p_0^2} \quad (1.1)$$

Dla funkcji i sygnałów ciągłych średnia kwadratowa jest obliczana według wzoru (1.2).

$$\langle p^2 \rangle = \sqrt{\frac{1}{t_1 - t_0}} \cdot \int_{t_0}^{t_1} [f(t)]^2 dt \quad (1.2)$$

Dla funkcji okresowych granice całki powinny być od siebie oddalone o jeden okres. Da to taki sam wynik jak obliczanie całki nieskończonej. Jeżeli badanym sygnałem jest przebieg wartości natężenia prądu przemiennego, średnia kwadratowa jest wartością skuteczną natężenia. W przypadku sygnałów nieokresowych, wartości  $t_0$  i  $t_1$  należy dobrać tak, aby uzyskana wartość odzwierciedlała średnią kwadratową w zakresie czasu odpowiednim do dalszych obliczeń.



**Rysunek 1.1.** Sygnał sinusoidalnie zmienny i jego średnia kwadratowa

Źródło: Opracowanie własne

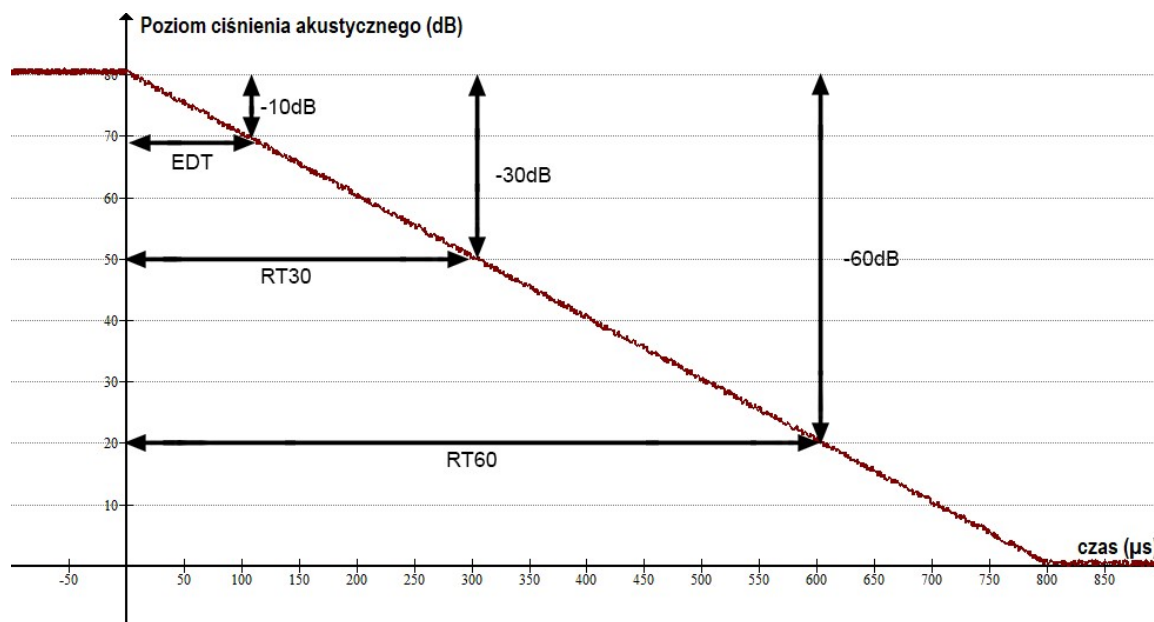
Najczęściej stosowaną wartością ciśnienia odniesienia jest  $2 \times 10^{-5}$  Pa, która stanowi typowy próg słyszalności ucha ludzkiego dla fali o częstotliwości 1kHz. Wysoki poziom szumu może oznaczać, że ciche dźwięki dochodzące z głośników będą niesłyszalne, a więc zakres dynamiczny odsłuchiowanych nagrań zostanie ograniczony. Przybliżona wartość szumu dla typowego domu to 40dB, dla sypialni nocą wynosi ona 30dB, a w profesjonalnie wygłuszonym studio nagrań – poniżej 20dB.

### **1.1.2. Czasy pogłosu RT60, RT30, EDT**

Kolejnym wyznacznikiem akustyki pomieszczeń jest czas pogłosu. Im dłużej fala akustyczna odbija się wewnątrz pomieszczenia odsłuchowego i pozostaje słyszalna, tym bardziej cierpi dynamika dźwięku. Pogłos to stopniowy zanik energii dźwięku po nagłym wyłączeniu źródła. Spowodowany jest odbijaniem się fali akustycznej od powierzchni pomieszczenia. Składa się z następujących elementów:

1. Dźwięk bezpośredni – docierający bezpośrednio ze źródła do ucha słuchacza. Ma główne znaczenie w umożliwieniu słuchaczowi określenia kierunku źródła dźwięku.
2. Pierwsze odbicie – decyduje o subiektywnym wrażeniu wielkości pomieszczenia odsłuchowego. W dobrych salach koncertowych pierwsze odbicie dociera do słuchacza w okolicach 15 do 30ms. Czas krótszy da wrażenie mniejszego pomieszczenia, a dłuższy – większego. Opóźnienie pierwszego odbicia większe niż 100ms zostanie odebrane przez ucho jako echo.
3. Wczesne odbicia – odbierane przez słuchacza w czasie krótszym niż 80ms od emisji fali. Im więcej kierunków, z których dochodzą wczesne odbicia, tym większe wrażenie zwiększania poziomu dźwięku bezpośredniego i pełni brzmienia.
4. Ogon pogłosowy – dalsze odbicia, aż do całkowitego wygaśnięcia fali akustycznej. Poziom tłumienia fali w pomieszczeniu odpowiada za to, jak długo ogon jest słyszalny, a więc za czas pogłosu.

Czas pogłosu jest definiowany jako czas, w którym poziom ciśnienia akustycznego spada o określoną wartość względem ustalonego poziomu początkowego. Trzy najczęściej używane czasy pogłosu to EDT (ang. Early Decay Time), RT30 (ang. Reverberation Time 30) i RT60 (ang. Reverberation Time 60), które oznaczają czas spadku ciśnienia akustycznego o odpowiednio 10dB, 30dB i 60dB.



**Rysunek 1.2.** Graficzna reprezentacja czasów pogłosu EDT, RT30 i RT60

Źródło: Opracowanie własne

Najważniejszym z tych współczynników jest czas RT60. Dzięki niemu można dość skutecznie określić, czy pomieszczenie jest odpowiednio wytłumione do odsłuchów mowy lub muzyki. Istnieją wzory pozwalające na oszacowanie czasu RT60 bez potrzeby dokonywania pomiarów akustycznych. Dla dużych pomieszczeń, z małą i równomiernie rozłożoną chłonnością akustyczną używa się wzoru Sabine'a (1.3).

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A} \quad (1.3)$$

Współczynnik 0,161 został dobrany eksperymentalnie. V oznacza objętość pomieszczenia, a A – całkowitą chłonność akustyczną pomieszczenia.

Jeżeli pomieszczenie jest silnie wytłumione używa się wzoru Eyringa (1.4).

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_{sr})} \quad (1.4)$$

Parametr S to powierzchnia całkowita wnętrza, a  $\alpha_{sr}$  to średnia chłonność jego powierzchni. W przypadkach, gdy ze względu na różnorodność chłonności powierzchni, trudno jest wyznaczyć chłonność średnią, używa się wzoru Millington-Sette'a (1.5)

$$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{-\sum_i S_i \ln(1 - \alpha_i)} \quad (1.5)$$

W którym powierzchnia całkowita i chłonność średnia zostały zastąpione wartościami odpowiednimi dla poszczególnych powierzchni.

### 1.1.3. Współczynniki przejrzystości C50 i C80

Przejrzystość (ang. Clarity) to współczynnik, który określa zdolność rozróżniania kolejno następujących dźwięków na podstawie stosunku energii sygnału, która dociera do słuchacza w krótkim czasie do energii, która dociera po tym czasie. Odbicia fali, które dotrą do ucha w początkowej fazie pogłosu, wzmacniają sygnał bezpośredni, jednak po pewnym czasie zaczynają rozmywać sygnał i zlewać się z kolejnymi dźwiękami napływającymi z głośników. Dwa progi czasowe, które przyjmuje się podczas pomiarów to 50ms (C50) i 80ms (C80). Zostały one wyznaczone w sposób eksperymentalny. Parametr C50 wyraża zdolność do rozróżniania poszczególnych sylab w mowie ludzkiej, a C80 – zdolność do rozpoznawania poszczególnych instrumentów podczas słuchania szybkiej muzyki. Oba parametry wyrażane są w decybelach i obliczane według wzorów (1.6) i (1.7).

$$C_{50} = 10 \cdot \log \left( \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (1.6)$$

$$C_{80} = 10 \cdot \log \left( \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (1.7)$$

### 1.1.4. Współczynnik zrozumiałości D50

Parametr D50, zwany także wyrazistością (ang. Definition), podobnie jak C50, jest stosunkiem energii sygnału docierającego do słuchacza przez pierwsze 50ms do energii docierającej po 50ms. Wyrażany jest jednak w procentach i wyznaczany wzorem (1.8).

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt} \cdot 100\% \quad (1.8)$$

Parametr ten jest często uznawany za wyznacznik zrozumiałości mowy w danym pomieszczeniu.

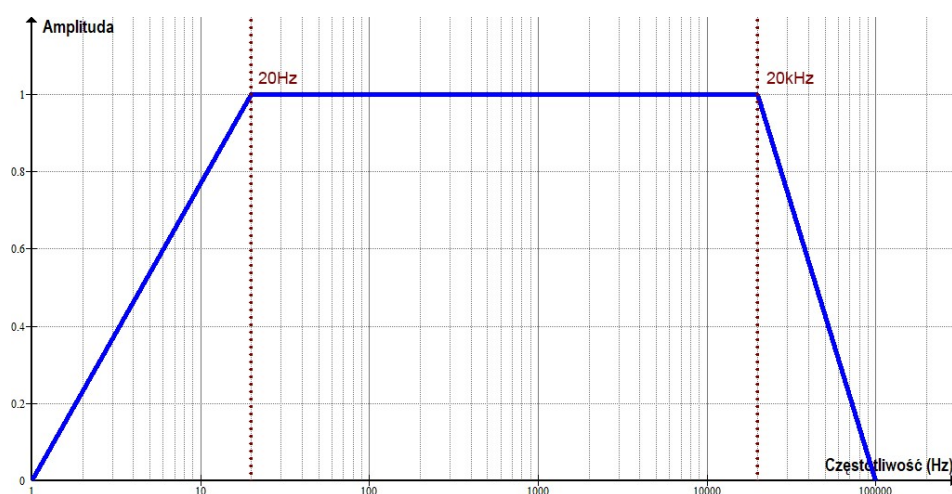
## 1.2. Parametry akustyczne systemów głośnikowych

Użyty zestaw głośnikowy odgrywa kluczową rolę podczas odsłuchu. Głośniki powinny być jak najbardziej transparentne akustycznie, przetwarzając sygnał elektryczny na falę dźwiękową bez wpływania na jego przebieg. Ponadto należy zwrócić uwagę na to, w jaki sposób sygnał z każdego z głośników dociera do miejsca odsłuchu, a także wpływ interakcji między nimi na ostateczny dźwięk. W tej części pracy zostaną

omówione główne parametry zestawów głośnikowych, które należy rozważyć w celu zapewnienia optymalnych wrażeń słuchowych.

### 1.2.1. Pasmo przenoszenia

Pasmo przenoszenia kolumny głośnikowej definiuje się jako zakres częstotliwości, w którym spadek amplitudy odtwarzanego sygnału jest mniejszy niż 3dB. Te wartości określa się na podstawie charakterystyki częstotliwościowej, czyli przebiegu ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości, dla stałej pozycji względem głośnika. Ważne jest, aby charakterystyka częstotliwościowa była jak najbardziej płaska w zakresie słyszalności ucha ludzkiego (20Hz – 20kHz), a pozostałe częstotliwości tłumione tak, aby nie uszkodzić systemu audio. Wykres idealnej charakterystyki częstotliwościowej pokazuje rysunek 1.3.



**Rysunek 1.3.** Przykład idealnej charakterystyki częstotliwościowej sprzętu audio

Źródło: Opracowanie własne

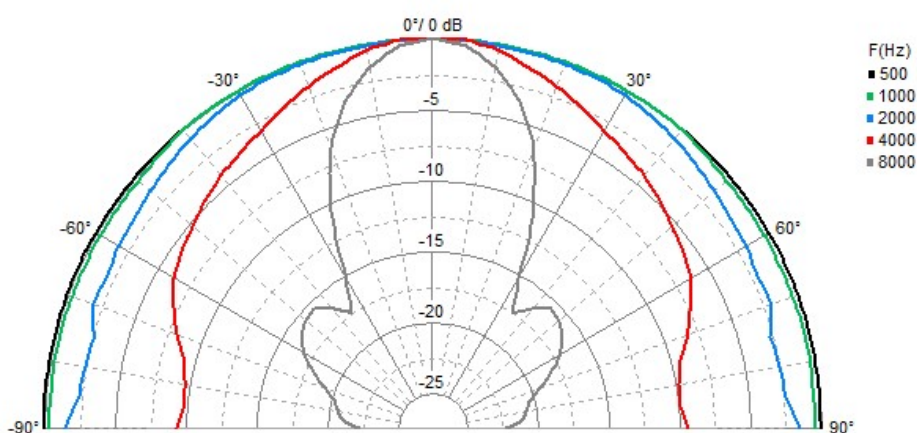
Ze względu na swoją budowę, przetworniki elektroakustyczne nie są w stanie traktować dźwięku o każdej częstotliwości tak samo. Tony niskie wymagają przemieszczenia dużej ilości powietrza, a wysokie – szybkich wibracji membrany głośnika. Aby odtworzyć pełne spektrum słyszalnych dźwięków bez zniekształceń, w głośnikach stosuje się więc zestawy przetworników, w których każdy element odpowiada za inny zakres częstotliwości. Często też stosuje się różne typy głośników (subwoofer, wysokotonowe, pełnozakresowe) jednocześnie, np. w zestawach kina domowego. Pozwala to wiernie odtworzyć dźwięki w pełnym zakresie słyszalności, nie musząc przy tym projektować wielu głośników pełnozakresowych. Komercyjne głośniki mają najczęściej znaną, zmierzoną przez producenta charakterystykę częstotliwościową, jednak akustyka pomieszczenia ma na nią wpływ, więc najlepiej dokonywać pomiarów w pomieszczeniu odsłuchowym.

Poza pasmem każdej kolumny głośnikowej z osobna ważne jest także to, w jaki sposób oddziałują one na siebie nawzajem. Dlatego też mierzy się charakterystykę

częstotliwością dźwięku w miejscu odsłuchu, dla sygnałów odtwarzanych ze wszystkich głośników w systemie jednocześnie. Daje to ostateczną reprezentację odpowiedzi częstotliwościowej zestawu, którą odczuje słuchacz.

### 1.2.2. Charakterystyka kierunkowa

Charakterystyka kierunkowa głośnika, to zależność poziomu ciśnienia akustycznego, które on wytwarza od kąta między osią głośnika. Tępy wysokie są najczęściej promieniowane bardziej kierunkowo niż niskie (patrz Rysunek 1.4). Ten fakt często jest wykorzystywany podczas aranżacji systemów głośnikowych, kiedy ustawienie głośników wysokotonowych jest skrupulatnie dobierane, natomiast położenie subwoofera nie ma praktycznie znaczenia.



**Rysunek 1.4.**Charakterystyka kierunkowa przetwornika Visaton W 130

Źródło: Opracowanie na podstawie [4]

Na charakterystykę kierunkową głośnika ma wpływ także jego geometria. Mechaniczne osłony wokół przetwornika spowodują zwężenie kąta promieniowania dźwięku, co pozwala na dokładniejszą kontrolę nad tym, które sygnały docierają do słuchacza. Trzeba też jednak pamiętać, że fala dźwiękowa może się odbić od ścian, bądź innych obiektów w pomieszczeniu i trafić w niepożądane miejsce.

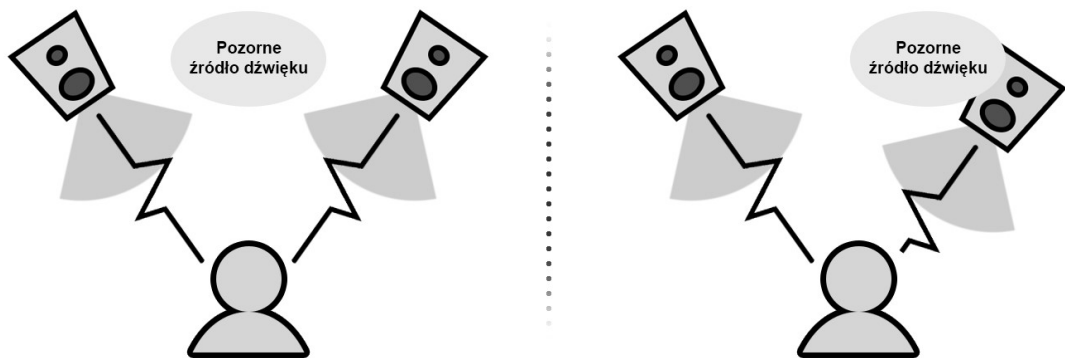
Głośniki powinny być ustawione tak, aby słuchacz znajdował się jak najbliżej kierunku promieniowania każdego z głośników. W przypadku jednego słuchacza nie jest to skomplikowane, jednak gdy mamy do czynienia np. z salą koncertową lub kinem, gdzie znajdują się dziesiątki słuchaczy, zapewnienie pokrycia sali optymalną odpowiedzią głośników jest niemal niewykonalne, a system głośnikowy musi zostać ustawiony tak, aby zapewnić jak najlepsze wrażenia jak największej ilości widzów.

### 1.2.3. Opóźnienia czasowe odtwarzanych sygnałów

Fala akustyczna, jest falą mechaniczną, poruszającą się w powietrzu z ograniczoną prędkością, która jest zależna od wielu czynników (temperatura, wilgotność, natężenie

fali). W warunkach typowego pomieszczenia odsłuchowego ta prędkość wynosi w przybliżeniu 340 m/s. Oznacza to, że oddalenie się o jeden metr od głośnika spowoduje, że sygnał dźwiękowy będzie docierał do ucha ok. 3ms później. Ludzkie ucho wykorzystuje drobne opóźnienie w czasie docierania dźwięku i jego pogłosu w celu zlokalizowania źródła dźwięku. Jeżeli więc dźwięk, który powinien dotrzeć z obu głośników jednocześnie, jest opóźniony w jednym kanale, pozorne źródło dźwięku przesuwa się bliżej tego głośnika, który usłyszymy pierwszy (patrz Rysunek 1.5). Przy bardzo dużych pomieszczeniach odsłuchowych odległości między głośnikami mogą być tak znaczące, że słuchacz zinterpretuje opóźnienia z nimi związane jako echo.

W sytuacji idealnej każdy głośnik byłby ustawiony w takiej samej odległości od słuchacza, jednak bardzo rzadko istnieje taka możliwość, szczególnie w warunkach domowych. Dlatego w celu wyrównywania czasów docierania sygnałów z głośników opóźnia się sprzętowo sygnały wysyłane do głośników, na podstawie wcześniejszych pomiarów.



**Rysunek 1.4.**Przykład wpływu różnicy odległości głośników od słuchacza na położenie pozornego źródła dźwięku

Źródło: Opracowanie własne

## **ROZDZIAŁ 2**

# **Metodyka pomiarów parametrów akustycznych i analizy wyników**

Określenie parametrów akustycznych instalacji audio pozwala na identyfikację i korektę ewentualnych problemów, a co za tym idzie poprawę wrażen słuchacza. W celu uzyskania odpowiednich wyników i wyciągnięcia właściwych wniosków należy przede wszystkim prawidłowo przeprowadzić pomiary. Niniejszy rozdział przybliży kwestie doboru sprzętu pomiarowego i jego konfiguracji, a także najczęściej stosowane sygnały testowe i metody matematyczne analizy danych.

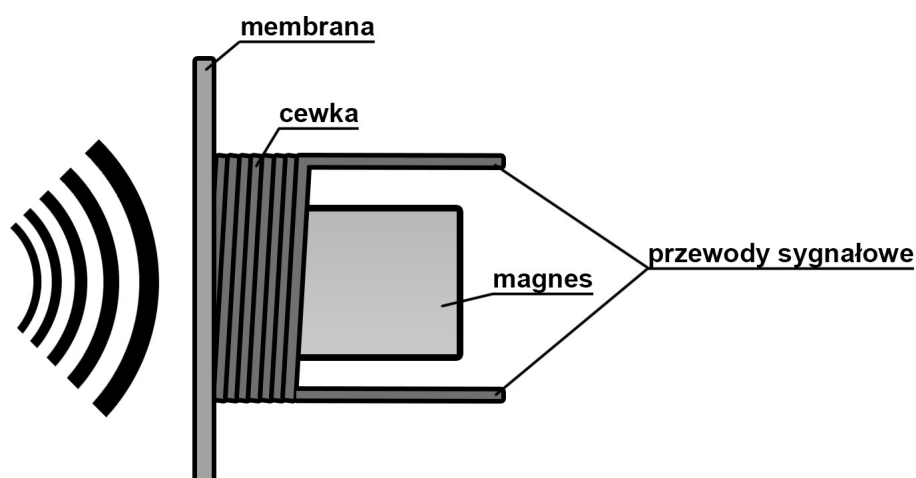
## **2.1. Sprzęt pomiarowy**

Profesjonalne pomiary akustyczne korzystają z kombinacji różnych technik i konfiguracji sprzętowych. W ujęciu ogólnym cały zestaw powinien być jak najbardziej transparentny akustycznie, aby wiernie oddać charakterystykę obiektu pomiarów. Wiąże się to z wyborem elementów o jak najniższym szumie własnym i jak najbardziej płaskiej charakterystyce częstotliwościowej. Trzy uniwersalne elementy, niezbędne do dokonania pomiarów to mikrofon, przetwornik analogowo-cyfrowy i urządzenie do przetwarzania uzyskanych danych. Odpowiednie ich dobranie jest niezbędne, aby uzyskać satysfakcjonujące wyniki.

### **2.1.1. Mikrofon**

Pierwszym elementem toru pomiarowego jest mikrofon. Służy on do zamiany fali akustycznej na sygnał elektryczny. Istnieje wiele rodzajów mikrofonów, które różnią się zasadą działania. Najczęściej spotykane są mikrofony dynamiczne, pojemnościowe, elektretowe i piezoelektryczne. Spotyka się także między innymi mikrofony wstęgowe, węglowe czy optyczne.

Mikrofon dynamiczny (magnetoelektryczny) zamienia wibracje membrany na sygnał elektryczny za pomocą cewki, połączonej z membraną, która drga wokół magnesu (patrz Rysunek. 2.1).

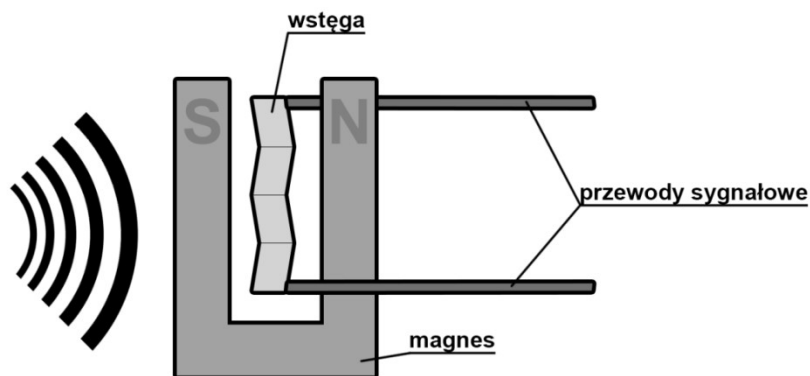


**Rysunek 2.1.** Budowa mikrofonu dynamicznego

Źródło: Opracowanie własne

Nie potrzebuje on dodatkowego zasilania, jednak aby wytworzyć wyższe napięcie na wyjściu mikrofonu potrzeba więcej zwojów cewki, co zwiększa jej masę i jednocześnie zmniejsza czułość na wysokie częstotliwości. Elementy budowy mikrofonu dynamicznego są takie same jak elementy głośnika. Dzięki temu można w wyjątkowych sytuacjach używać mikrofonu dynamicznego jako głośnika lub odwrotnie. Ze względu na prostotę konstrukcji jest jednym z najczęściej stosowanych rodzajów mikrofonów.

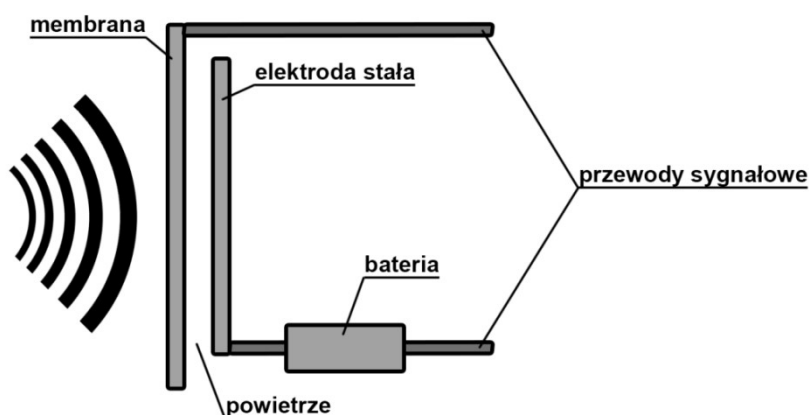
Rzadziej spotykaną odmianą mikrofonów dynamicznych są mikrofony wstęgowe. Ich zasada działania polega na lekkim pasku materiału przewodzącego, zawieszonym w polu magnetycznym. Drgania wstęgi indukują w niej prąd, który jest odzwierciedleniem fali akustycznej. Aby uzyskać wysoką czułość, wstęga jest bardzo cienka i pofałdowana wzdłuż. Sprawia to, że mikrofony wstęgowe są podatne na uszkodzenie mechaniczne spowodowane np. silnym wiatrem.



**Rysunek 2.2.** Budowa mikrofonu wstęgowego

Źródło: Opracowanie własne

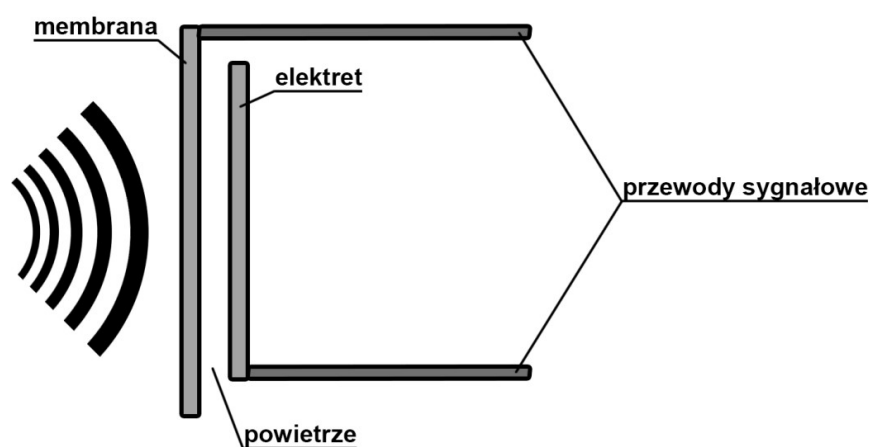
Mikrofon pojemnościowy (elektrostatyczny) składa się z dwóch, odizolowanych powietrzem elektrod, z których jedna jest ruchoma, a druga stała. Dzięki temu powstaje kondensator, którego pojemność zmienia się wraz z drganiem jednej z elektrod (membrany), ponieważ zmienia się odległość między jego okładkami. Do działania mikrofonu pojemnościowego potrzebne jest dodatkowe zasilanie – tzw. zasilanie Phantom – najczęściej 48V (w rysunku 2.3 oznaczone jako bateria). Jest ono doprowadzane do mikrofonu z osobnego zasilacza, lub z baterii wewnątrz urządzenia. Dzięki temu, że membrana nie musi poruszać cewki, może być wykonana z bardzo lekkiego i cienkiego materiału, co daje wysokie możliwości reprodukcji wysokich tonów lub sygnałów impulsowych. Stosowane są najczęściej w zastosowaniach profesjonalnych.



**Rysunek 2.3.** Budowa mikrofonu pojemnościowego

Źródło: Opracowanie własne

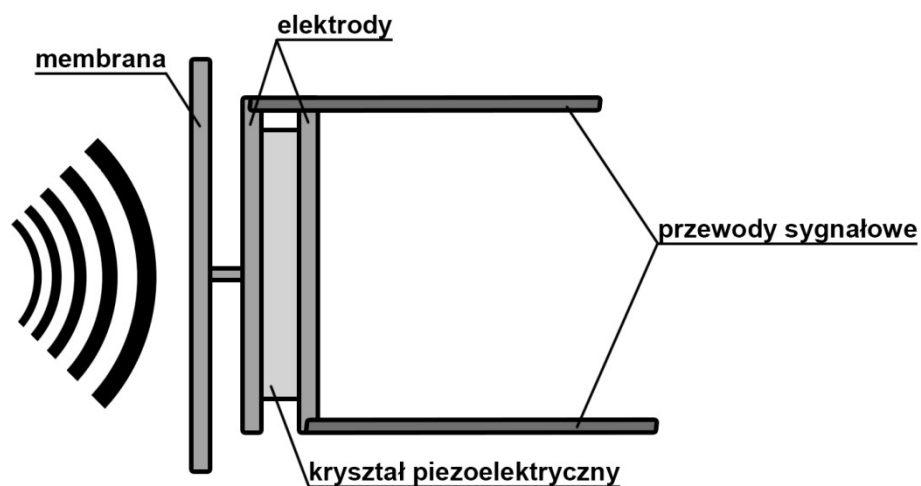
Mikrofony elektretowe (elektrostatyczny) są odmianą mikrofonów pojemnościowych. Jedną z elektrod w tychże mikrofonach jest wykonana z elektretu, czyli dielektryka o trwałej polaryzacji elektrycznej (patrz. Rysunek 2.4). Eliminuje to potrzebę dodatkowego zasilania i upraszcza ich budowę. Ze względu na ich niską cenę, a także mierne parametry wczesnych modeli, mikrofony te mają kiepską opinię wśród profesjonalistów, mimo że współczesne mikrofony elektretowe często nie odbiegają jakością od znacznie droższych alternatyw. Tego typu mikrofony są najczęściej spotykane w powszechnie stosowanych urządzeniach elektrycznych typu telefony komórkowe.



**Rysunek 2.4.** Budowa mikrofonu elektretowego

Źródło: Opracowanie własne

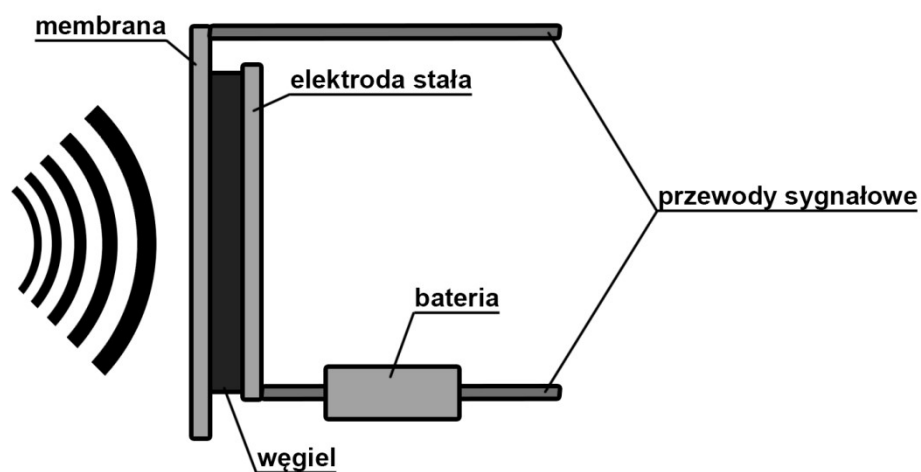
Mikrofon piezoelektryczny wykorzystuje zjawisko piezoelektryczności w celu przetworzenia wibracji powietrza na sygnał elektryczny. Krysztal znajdujący się między dwoma elektrodami jest odkształcany poprzez ruchy membrany, co powoduje wytworzenie na elektrodach proporcjonalnego napięcia (patrz Rysunek 2.5). Tego typu urządzenia znalazły szerokie zastosowanie w elektronice użytkowej, np. w telefonach stacjonarnych. Ze względu na wysoką odporność mechaniczną, są często stosowane jako mikrofony kontaktowe. Membrana jest bezpośrednio przymocowana do powierzchni obiektu wydającego rejestrowany dźwięk (np. pudło rezonansowe gitary), co pozwala na zarejestrowanie dźwięku w warunkach, w jakich użycie innych mikrofonów byłoby praktycznie niemożliwe.



**Rysunek 2.5.** Budowa mikrofonu piezoelektrycznego

Źródło: Opracowanie własne

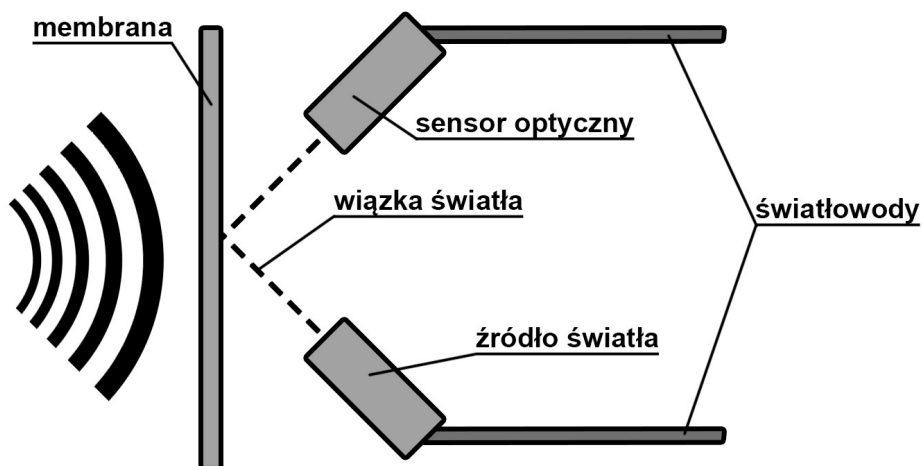
Jednym z najstarszych rodzajów mikrofonów jest mikrofon węglowy. Składa się on z dwóch elektrod, pomiędzy którymi znajduje się warstwa proszku węgla (patrz Rysunek 2.6). Wibracje jednej z nich powodują kompresję cząstek węgla, co zmienia jego rezystancję. Do działania mikrofonu potrzebne jest więc zasilanie. Mikrofony węglowe zostały już niemal całkowicie wyparte z użytku, ze względu na kiepskie parametry akustyczne.



**Rysunek 2.6.** Budowa mikrofonu węglowego

Źródło: Opracowanie własne

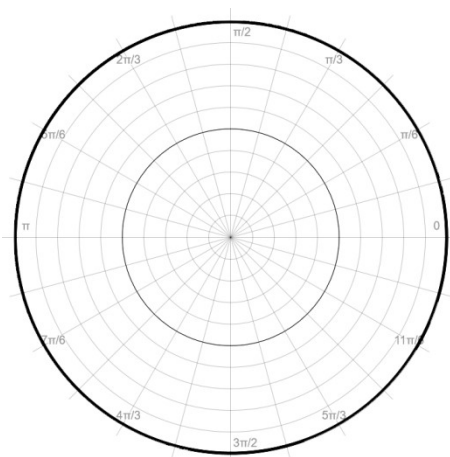
Ciekawą alternatywą tradycyjnych mikrofonów są mikrofony optyczne, które dzielą się na światłowodowe i laserowe. W obu przypadkach mamy do czynienia ze źródłem światła (światłowodem lub laserem), które odbija wiązkę światła od membrany w kierunku sensora optycznego. Drgania membrany powodują zmiany w intensywności światła odebranego przez fotodiode. Mikrofony laserowe używają jako membrany dowolnej gładkiej powierzchni, która może się znajdować daleko od samego mikrofonu. Dzięki niemu można nasłuchiwać z dużej odległości, np. rejestrując drgania szyby w odległym budynku.



**Rysunek 2.7.** Budowa mikrofonu optycznego

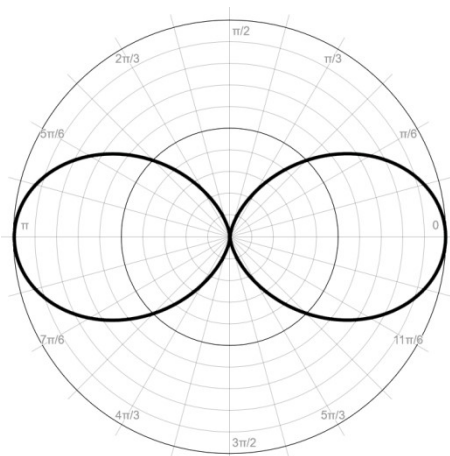
Źródło: Opracowanie własne

Oprócz zasady działania mikrofonu, ważna jest jego kierunkowość, czyli zależność między zdolnością rejestrowania dźwięku przez mikrofon od kąta, pod którym znajduje się źródło fali dźwiękowej. Ze względu na charakterystykę kierunkową mikrofony dzieli się na trzy główne grupy: dookólne, dwukierunkowe i kardoidalne. Charakterystykę dookólną (wszechkierunkową) mają mikrofony ciśnieniowe, a więc takie, w których membrana jest z jednej strony szczelnie zamknięta. Pozwala to na zbieranie dźwięku ze wszystkich stron jednakowo (patrz Rysunek 2.8). Umożliwia to ustawienie jednego mikrofonu w centrum nagrywanego miejsca, który zarejestruje wszystkie zdarzenia z każdego kierunku.



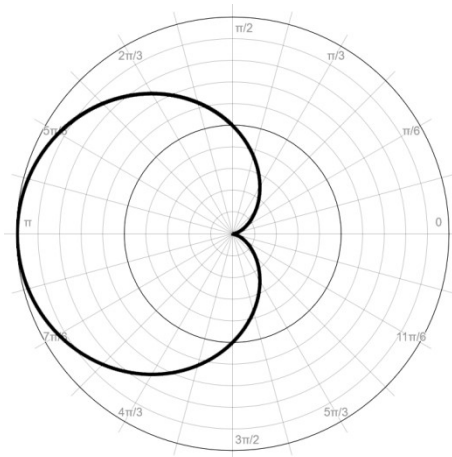
**Rysunek 2.8.** Przykładowa charakterystyka mikrofonu dookólnego  
Źródło: Opracowanie własne

Mikrofony gradientowe, czyli te, w których membrana jest otwarta z obu stron, mają charakterystykę dwukierunkową, zwaną także ósemkową (patrz Rysunek 2.9). Tego typu mikrofon można ustawić pomiędzy dwoma rozmawiającymi osobami i nagrać ich głosy jednocześnie tłumiąc pozostałe dźwięki z otoczenia.

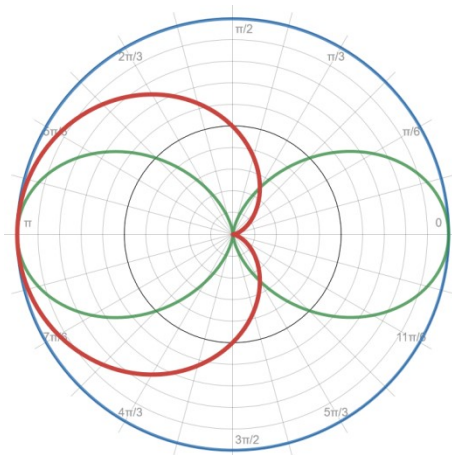


**Rysunek 2.9.** Przykładowa charakterystyka mikrofonu dwukierunkowego  
Źródło: Opracowanie własne

W przypadku, gdy fala dźwiękowa może się dostać do drugiej strony membrany w sposób kontrolowany mechanicznie (za pomocą odpowiednich otworów i kanałów), mamy do czynienia z mikrofonami ciśnieniowo-gradientowymi lub ciśnieniowo-gradientowo-interferencyjnymi. Są one najbardziej czułe na fale dźwiękowe napływające z jednego konkretnego kierunku (patrz Rysunek 2.10). Dzięki temu możemy uzyskać nagranie jednego źródła dźwięku pomijając niepożądany hałas z otoczenia (np. wywiad przy ruchliwej ulicy).



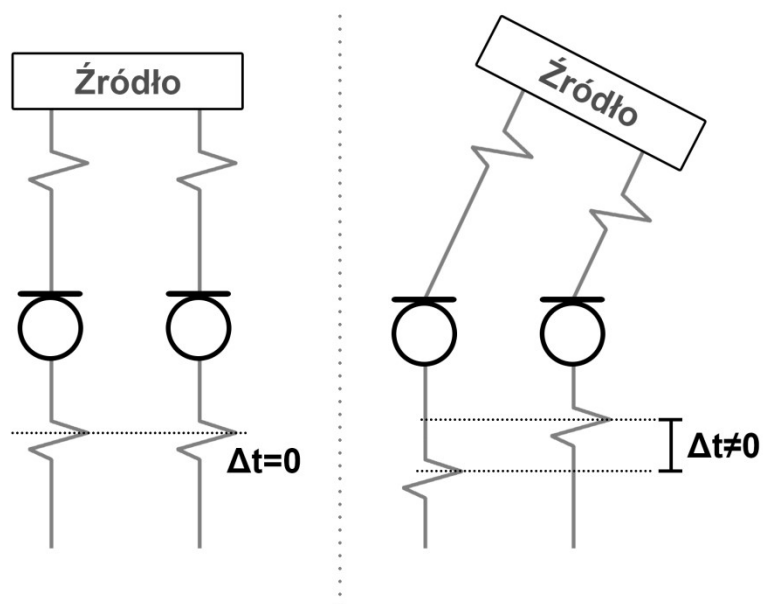
**Rysunek 2.10.** Przykładowa charakterystyka mikrofonu kardoidalnego  
 Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 2.11.** Porównanie trzech podstawowych kształtów charakterystyki kierunkowej mikrofonów – dookólnych (kolor niebieski), kardoidalnych (kolor czerwony) i dwukierunkowych (kolor zielony)  
 Źródło: Opracowanie własne

Do większości podstawowych badań używa się mikrofonów dookólnych, które zbierają fale akustyczne z każdego kąta jednakowo. Eliminuje to wpływ ustawienia mikrofonu względem źródeł fal akustycznych. W sytuacjach bardziej wymagających, jak np. badanie akustyki hal koncertowych stosuje się tzw. macierze mikrofonowe, czyli zestawy mikrofonów pracujących jednocześnie. Analiza sygnałów z wielu mikrofonów pozwala na określenie własności akustycznych w wielu miejscach jednocześnie (np. w różnych rzędach foteli kinowych), a także obliczanie wartości średnich. Pozwala on także na określenie położenia źródła dźwięku (np. zlokalizowanie pochodzenia

niechcianego szumu) poprzez badanie różnic w czasie zarejestrowania sygnału poprzez mikrofony.

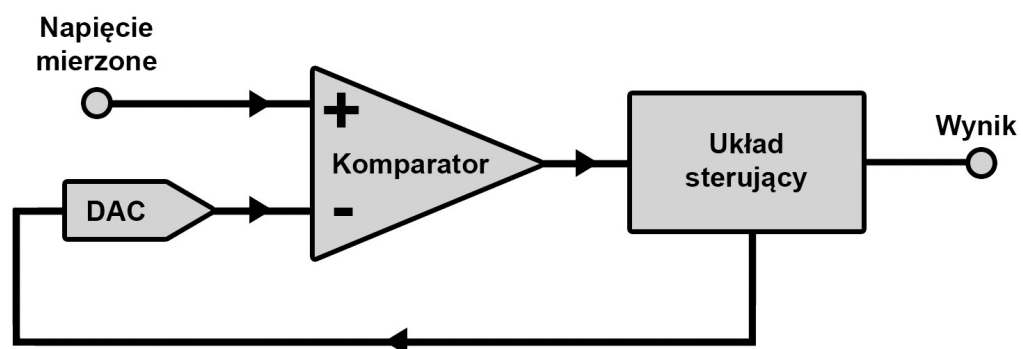


**Rysunek 2.12.** Schemat ideowy metody określenia źródła fali za pomocą macierzy mikrofonów  
Źródło: Opracowanie własne

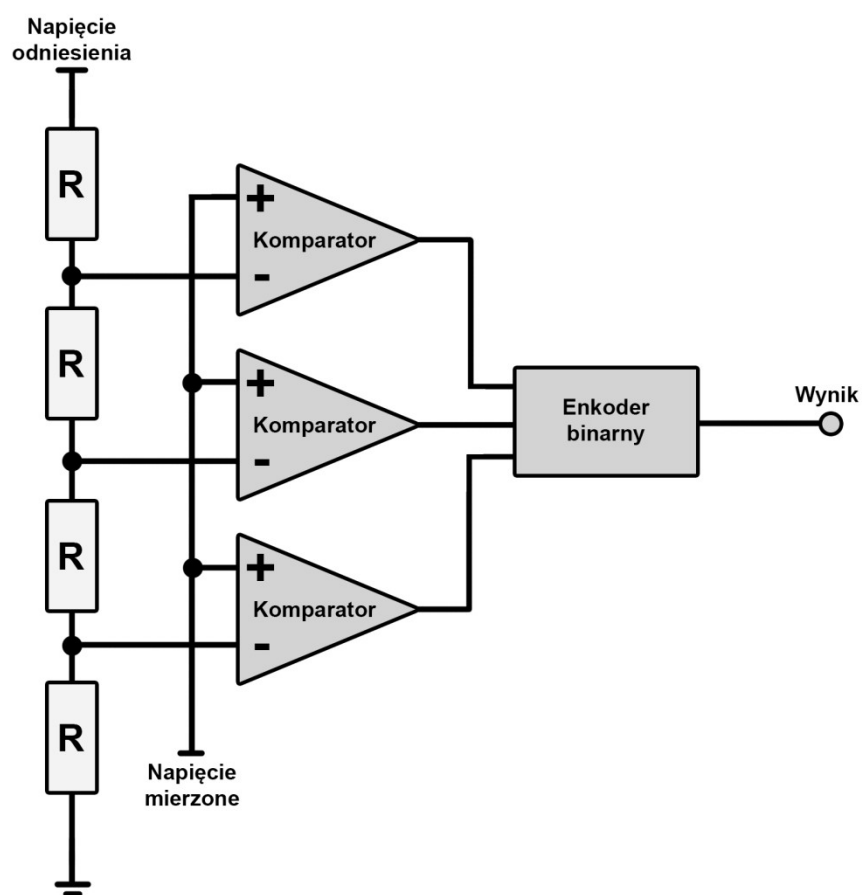
Ciekawym przykładem macierzy mikrofonowych są sztuczne głowy stosowane podczas nagrań binauralnych. Używają one dwóch mikrofonów umieszczonych w miejscu uszu na modelu ludzkiej głowy i pozwalają na nagranie dźwięku tak, jakby odebrały je ludzkie uszy.

### 2.1.2. Przetwornik analogowo-cyfrowy

Po zarejestrowaniu sygnału przez mikrofon, jest on przetwarzany na postać cyfrową, w celu numerycznego przetworzenia uzyskanych informacji. Do tego celu służy przetwornik analogowo-cyfrowy, zwany inaczej ADC (z ang. Analog-to-Digital Converter). Wykorzystują one komparatory do porównywania napięcia wejściowego z napięciem odniesienia. Najczęściej stosuje się metodę iteracyjną, w której jeden komparator porównuje sygnał z kolejnymi napięciami odniesienia generowanymi przez układ sterujący, na podstawie poprzednich bitów (patrz Rysunek 2.13). Drugim sposobem jest przetwarzanie równoległe, gdzie wiele komparatorów działa jednocześnie. Każdy z nich ma na jednym z wejść swoje konkretne napięcie odniesienia (inne dla każdego komparatora), a na drugim sygnał z mikrofonu. Wyniki porównań są kodowane jako wartość binarna za pomocą enkodera lub samych bramek logicznych (patrz Rysunek 2.14).

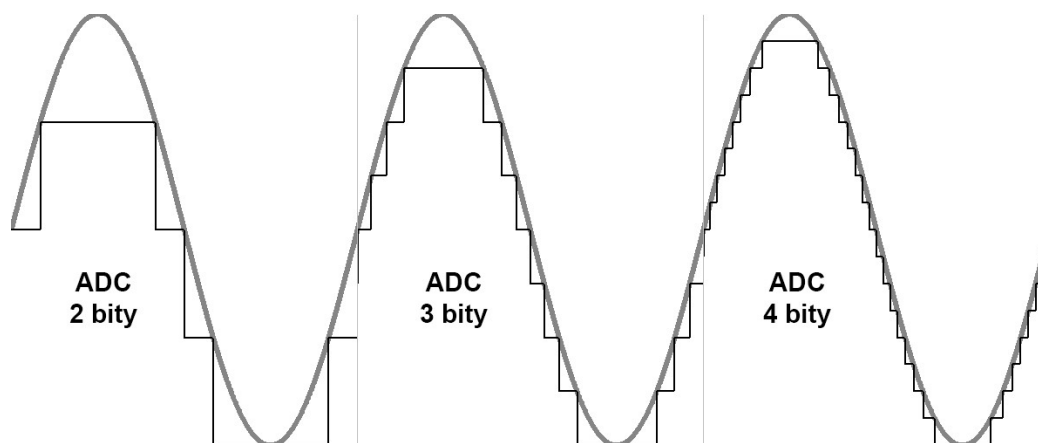


**Rysunek 2.13.** Schemat blokowy przetwornika ADC działającego metodą iteracyjną  
Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 2.14.** Schemat blokowy przetwornika ADC działającego metodą równoległą  
Źródło: Opracowanie własne

Ilość porównań wpływa na dokładność konwersji, czyli jej rozdzielczość. Przykładowo przetwornik ośmiobitowy jest w stanie zarejestrować 256 poziomów napięcia, a dziesięciobitowy – 1024 poziomy. Aby maksymalnie wykorzystać rozdzielczość przetwornika, należy odpowiednio spreparować sygnał wejściowy, tak aby całkowicie wypełniał zakres napięć działania ADC, nie przekraczając jednak wartości granicznych.



**Rysunek 2.15.** Wyniki przetwarzania sinusoidy przez przetworniki ADC o różnych rozdzielczościach

Źródło: Opracowanie własne

Oprócz rozdzielczości ważna jest także częstotliwość próbkowania. Zgodnie z twierdzeniem Whittakera-Nyquista-Shannona, aby wiernie odtworzyć sygnał analogowy musi być ona co najmniej dwa razy większa niż najwyższa częstotliwość składowa widmowa tego sygnału. Zakres częstotliwości słyszalnych przez ucho ludzkie to w przybliżeniu 20Hz-20kHz. Aby móc przeanalizować interesujące nas spektrum, potrzebujemy więc przetwornika ADC o częstotliwości próbkowania wyższej niż 40kHz. Na podstawie tego samego twierdzenia, możemy dla danej częstotliwości próbkowania wyznaczyć częstotliwość Nyquista, czyli maksymalną częstotliwość, jaką można odtworzyć z próbek uzyskanych za pomocą przetwornika. Jest ona równa połowie częstotliwości próbkowania. Oznacza to, że jeżeli zarejestrujemy sygnał z częstotliwością próbkowania 10kHz, to maksymalny zakres częstotliwości, jaki możemy analizować na podstawie tego nagrania kończy się na 5kHz.

### 2.1.3. Procesor

Po przetworzeniu na sygnał cyfrowy, nagranie zostaje przeanalizowane matematycznie. Do tego celu bardzo często używa się komputerów osobistych z odpowiednim oprogramowaniem. Są one bardzo szybkie i wszechstronne i pozwalają na manipulację danych w dowolny sposób. W przypadku dedykowanych urządzeń pomiarowych, processing sygnału dokonywany jest przez mikroprocesor. Bardzo ważny jest w takich przypadkach dobór kontrolera, szczególnie jeżeli wymagana jest analiza

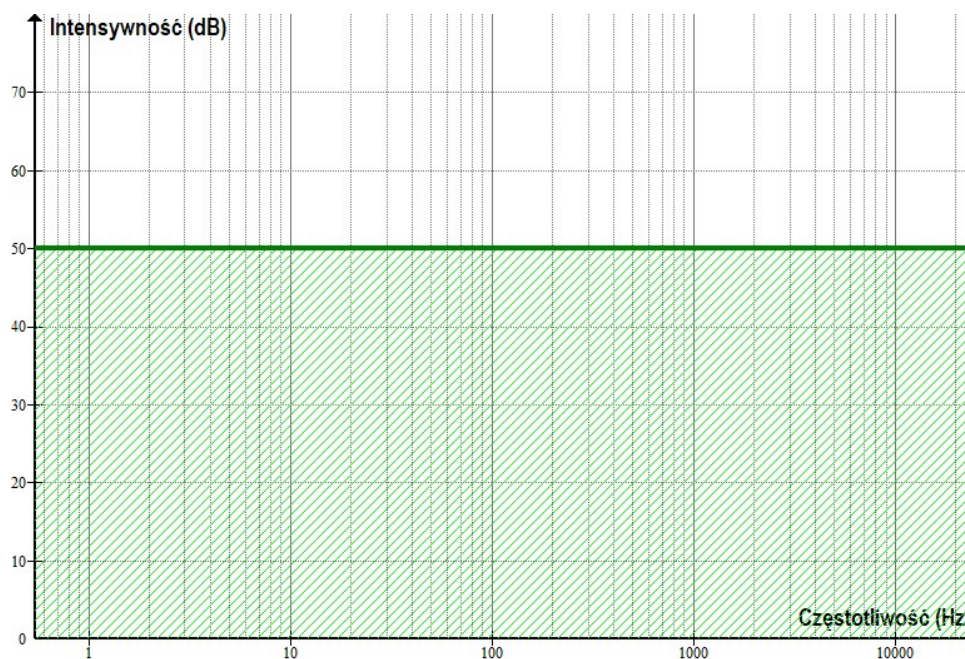
częstotliwościowa sygnału. Istnieje specjalna klasa mikrokontrolerów zwana procesorami sygnałowymi, która ma wbudowane moduły sprzętowe dedykowane przetwarzaniu sygnałów, działające niezależnie od głównego wątku procesora. Znacznie poprawiają one wydajność urządzenia w trakcie analizy sygnału.

## 2.2. Sygnały testowe

Aby zmierzyć odpowiedzi pomieszczenia bądź zestawu głośnikowego należy użyć odpowiednich sygnałów próbnych, które odtworzone w naszym systemie pozwolą na pomiar jego parametrów akustycznych. Muszą one zawierać w sobie składowe częstotliwościowe obejmujące całe interesujące nas spektrum i umożliwiać dalszą matematyczną analizę danych.

### 2.2.1. Szum

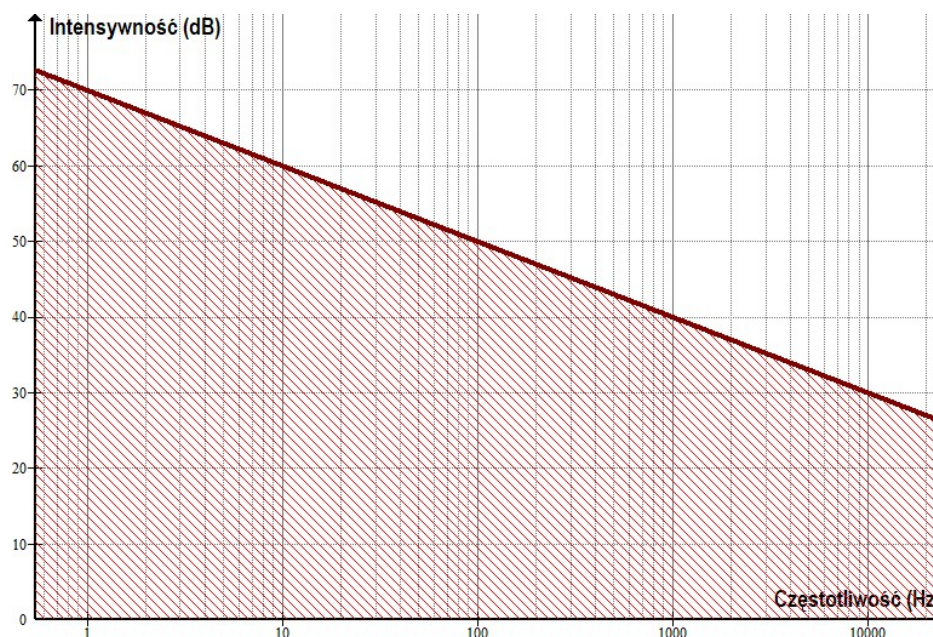
Szum akustyczny jest sygnałem losowym, nieprzewidywalnym w czasie, o określonej amplitudzie maksymalnej i stałym widmie. Dwoma najczęściej używanymi rodzajami szumu w akustyce są szum biały i różowy. Ten pierwszy charakteryzuje się płaską charakterystyką częstotliwościową. Oznacza to, że na każdy herc w całym paśmie przypada taka sama moc sygnału (patrz Rysunek 2.16).



Rysunek 2.16. Widmo idealnego szumu białego

Źródło: Opracowanie własne

Z kolei różowy szum ma widmo opadające wraz z częstotliwością, jak przedstawiono na rysunku 2.17.



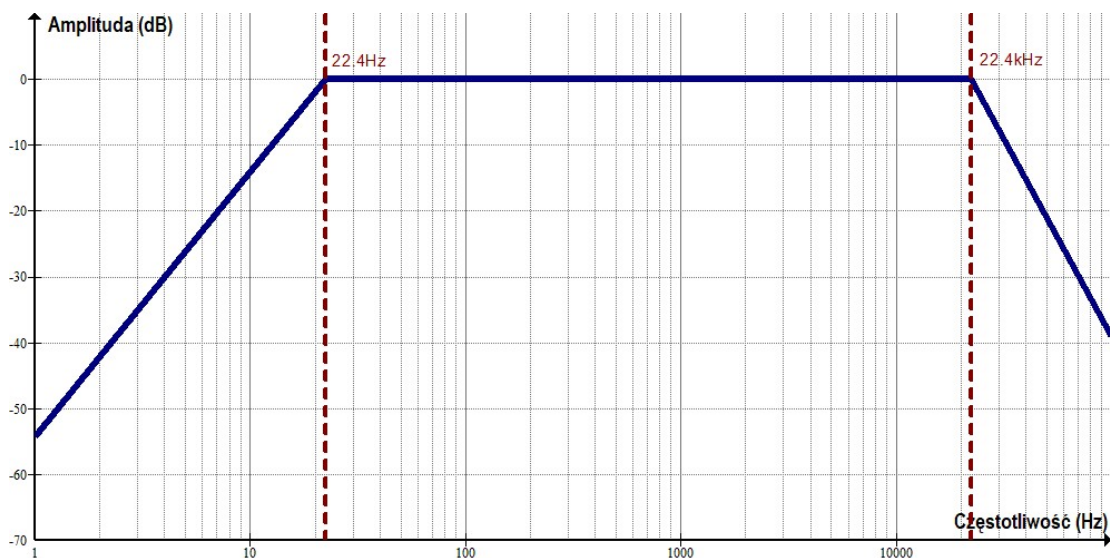
**Rysunek 2.17.** Widmo idealnego szumu różowego

Źródło: Opracowanie własne

Dzięki takiemu rozkładowi widma, poziom ciśnienia akustycznego dla każdej oktawy jest stały.

Istnieje wiele sposobów na generację szumu, zarówno za pomocą technik analogowych, jak i cyfrowych. Przy projektowaniu sprzętowych generatorów, jako źródło szumu używa się najczęściej diody, lub tranzystora. Uzyskany w ten sposób szum ograniczamy do pasma częstotliwości słyszalnych (20Hz-20kHz), za pomocą odpowiednich filtrów. Aby uzyskać szum różowy, stosuje się dodatkowo filtr dolnoprzepustowy, którego charakterystyka opada o 3dB co oktawę. W urządzeniach cyfrowych szumy są najczęściej tworzone poprzez przetwarzanie ciągu liczb losowych odpowiednim filtrem cyfrowym, który zapewni oczekiwaną charakterystykę, lub sumowanie wartości wielu generatorów liczb losowych, które zmieniają swoją wartość z różnymi częstotliwościami, dopasowanymi do wymagań. Istnieją także bezpośrednie algorytmy numeryczne, wytwarzające szumy o zadanym widmie, poprzez zakładanie losowego przesunięcia fazowego dla każdej częstotliwości, a następnie zastosowanie odwrotnej transformaty Fouriera.

Według normy IEC 60268-1, szum do testów akustycznych powinien być przekształcony filtrem pasmowoprzepustowym, o częstotliwościach granicznych 22,4Hz i 22,4kHz. Nachylenie charakterystyki filtra poniżej dolnej drancicy częstotliwości to 12dB na oktawę, a powyżej górnej – 18 dB na oktawę (patrz Rysunek 2.18).



**Rysunek 2.18.** Pasmo przenoszenia filtra sygnału szumu pomiarowego

Źródło: Opracowanie własne

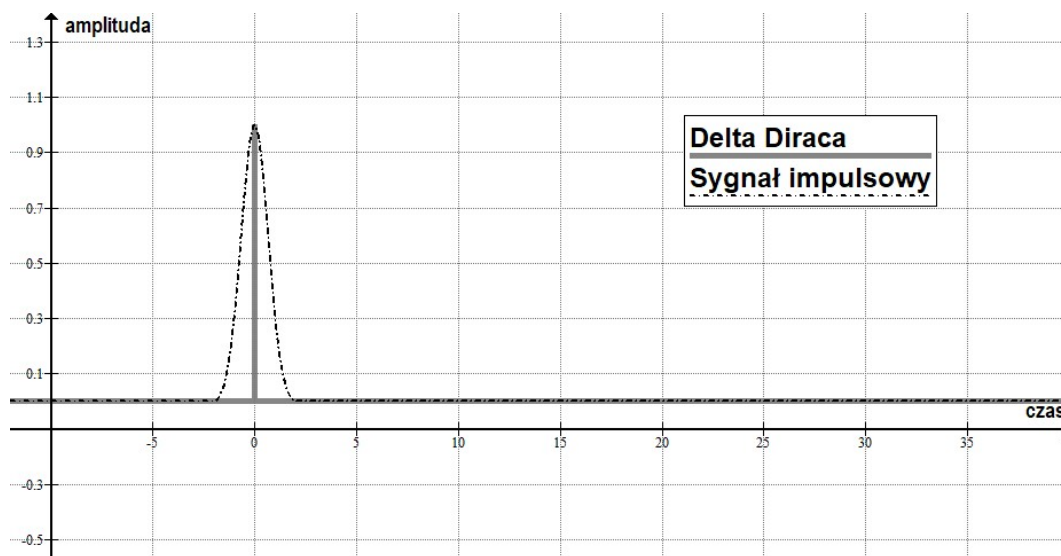
### 2.2.2. Impuls

Płaską charakterystykę częstotliwościową ma także sygnał impulsowy. W teorii impuls powinien mieć kształt delty Diraca, definiowanej wzorami (2.1) i (2.2).

$$\delta(x) = \begin{cases} 0, & x \neq 0 \\ \infty, & x = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1 \quad (2.2)$$

Z matematycznego punktu widzenia, ta definicja jest sprzeczna, ponieważ całka tej funkcji wynosi zero. Jest to więc definicja nieformalna, która jednak w prosty sposób obrazuje najważniejsze cechy delty Diraca. W wyniku analizy częstotliwościowej takiego sygnału otrzymujemy nieskończoną ilość cosinusoid o zerowym kącie fazowym. Wzmacniają one siebie wzajemnie w punkcie 0, a tłumią w pozostałych. Aby uzyskać nieskończenie wąski impuls, potrzeba nieskończenie wysokich częstotliwości. Zarówno wygenerowanie takiego sygnału, jak i jego odtworzenie są w praktyce niemożliwe. Podczas pomiarów stosuje się więc źródła głośnych, lecz krótkich dźwięków, takie jak strzał z pistoletu, przebicie balona czy kłaśnięcie dłoni.

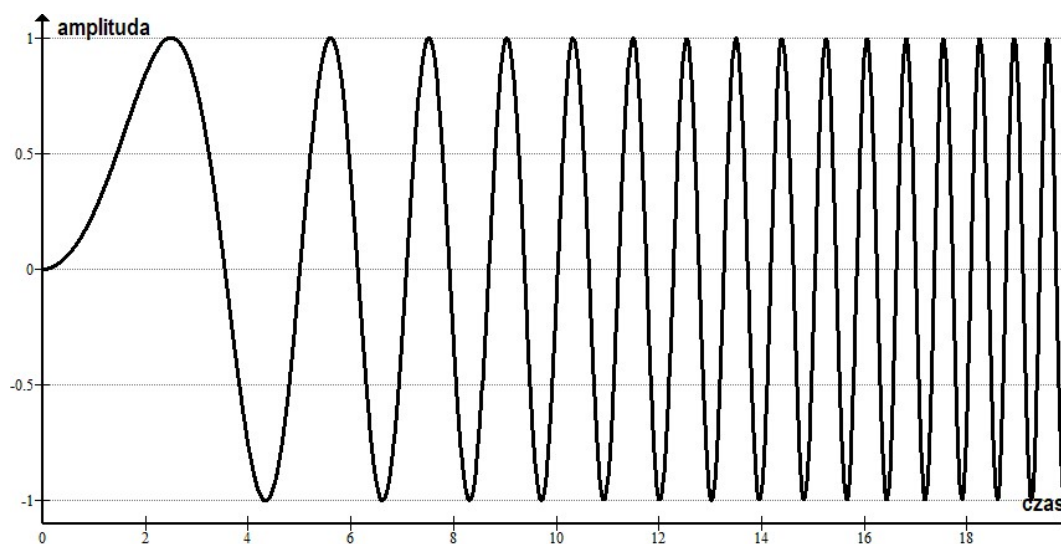


**Rysunek 2.19.** Przebieg delty Diraca i sygnału impulsowego na niej opartego

Źródło: Opracowanie własne

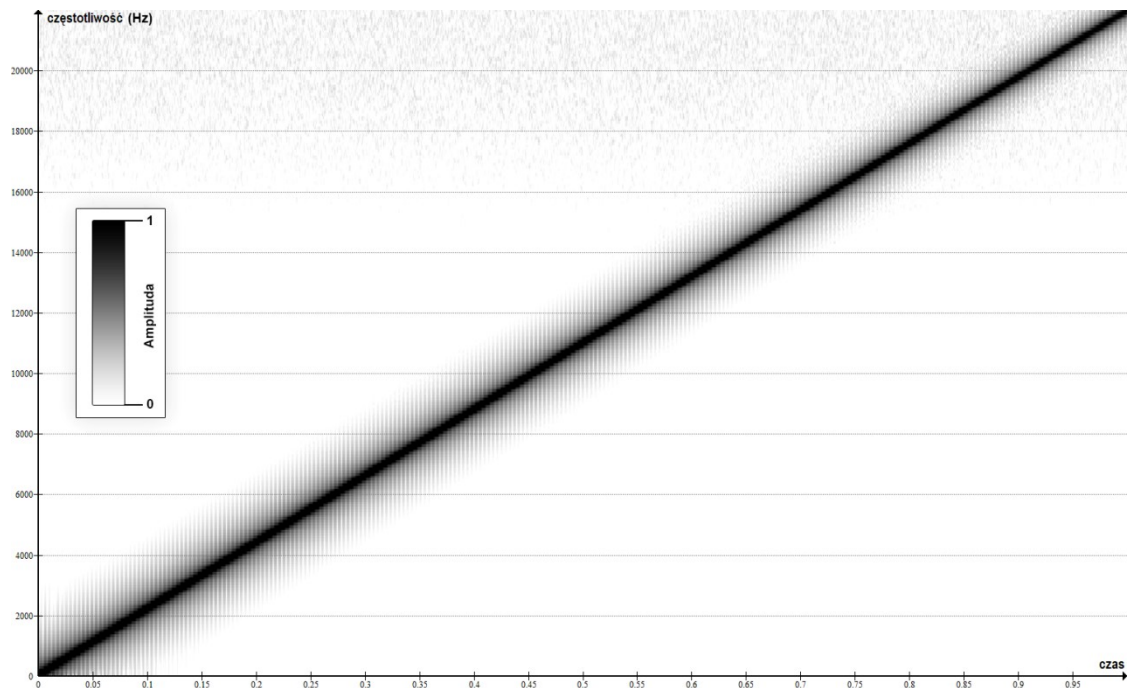
### 2.2.3. Sweep

Zarówno szum, jak i impulsy, to sygnały, na które składają się wszystkie częstotliwości jednocześnie. Ich stosowanie jest jednak czasem problematyczne, najczęściej ze względu na ograniczenia techniczne. W takich sytuacjach używa się sygnału sweep (nazywanego czasem „świergotem”), czyli czystej sinusoidy o zmiennej w czasie częstotliwości.



**Rysunek 2.20.** Przebieg przykładowego sygnału sweep

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 2.21.** Widmo sygnału sweep zmieniającego częstotliwość w paśmie 1Hz-22kHz  
Źródło: Opracowanie własne

Pozwala to na zbadanie odpowiedzi systemu dźwiękowego dla każdej częstotliwości z osobna, a następnie połączenie wyników w jedną całość, odzwierciedlającą charakterystykę częstotliwościową w całym interesującym nas paśmie.

## 2.3. Metody pomiarów

Metodyka badań akustycznych skupia się głównie na takim ustawieniu sprzętu pomiarowego, aby wiernie zarejestrować fale akustyczne, które wydobywają się z głośników i przemieszczają się po pomieszczeniu, odbijając się od każdej powierzchni. Kluczową rolą w każdym pomiarze jest umiejscowienie mikrofonu rejestrującego, które ma wpływ na wszystkie otrzymane wyniki. Niemal wszystkie parametry akustyczne zależą od częstotliwości, więc musi być to wzięte pod uwagę podczas pomiarów, a także podczas analizy wyników.

### 2.3.1. Pomiary akustyki pomieszczeń

Podczas badania pomieszczeń odsłuchowych, mikrofon zastępuje słuchacza. Umieszcza się więc go jak najbliżej miejsca, w którym podczas normalnego użytkowania pomieszczenia, znajdują się odbiorca. Jeżeli pomieszczenie ma służyć

wielu osobom jednocześnie, badania najlepiej powtórzyć w jak największej ilości miejsc. Bez odtwarzania sygnałów próbnych mierzy się poziom szumu otoczenia. Należy jednak pamiętać, że jest on najczęściej zależny od pory dnia. Zarówno czasy pogłosu, jak i współczynniki przejrzystości i zrozumiałości można zmierzyć jednocześnie. System pomiarowy w kontrolowany sposób odtworzy sygnał testowy i nagra odpowiedź pomieszczenia.

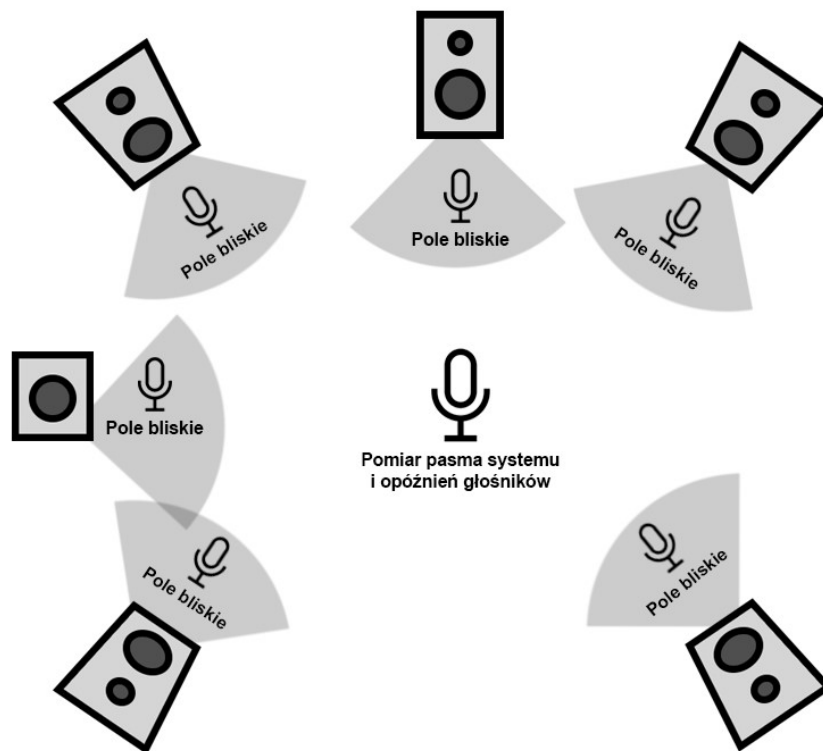


**Rysunek 2.22.** Schemat ideowy pomiaru akustyki pomieszczenia

Źródło: Opracowanie własne

### 2.3.2. Pomiary pasma przenoszenia głośników

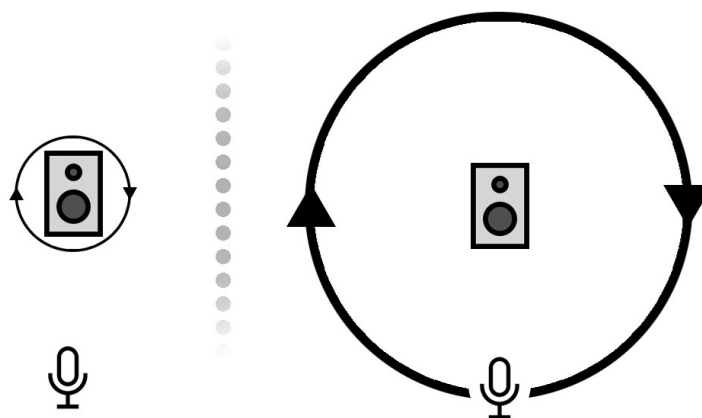
Pasmo przenoszenia systemu głośnikowego mierzy się dwójako: w polu bliskim dla każdego z głośników i w miejscu słuchacza dla całego zestawu. Mierzenie w polu bliskim daje nam obraz charakterystyki każdego głośnika z osobna. Dzięki temu wiemy, czy głośnik pracuje odpowiednio w całym paśmie dla niego przeznaczonym. Jednak fale dźwiękowe emitowane przez głośniki interferują ze sobą nawzajem i odbijają się od wszystkich powierzchni, dlatego też mierzone jest pasmo wszystkich głośników jednocześnie, słyszane w miejscu odsłuchu. W tym samym miejscu mierzy się także opóźnienie czasowe każdego z głośników poprzez pomiar czasu między odtworzeniem sygnału w głośniku, a jego dotarciem do mikrofonu.



**Rysunek 2.23.** Schemat ideowy pomiaru pasma przenoszenia systemu głośników oraz czasu opóźnień dotarcia sygnałów  
 Źródło: Opracowanie własne

### 2.3.3. Pomiary charakterystyki kierunkowej głośnika

Do pomiaru charakterystyki kierunkowej głośnika potrzebujemy wygenerować z niego dźwięk o stałej amplitudzie, a następnie zmierzyć ciśnienie akustyczne w stałej odległości, pod każdym kątem dookoła głośnika. Najczęściej stosowanym sposobem takiego pomiaru jest umieszczenie głośnika na obrotowej podstawie, a mikrofonu w stałym miejscu. Następnie głośnik jest obracany dookoła własnej osi podczas jednoczesnego odtwarzania sygnału testowego i jego pomiaru przez mikrofon. W przypadku głośników dużych i ciężkich lub przytwierdzonych na stałe stosuje się metodę odwrotną. Głośnik stoi w centrum okręgu, a mikrofon na specjalnym statywie porusza się wokół jego krawędzi.



**Rysunek 2.24.** Metody pomiarów charakterystyki kierunkowej głośnika  
Źródło: Opracowanie własne

## 2.4. Analiza wyników

Przed wyciągnięciem jakichkolwiek wniosków, zmierzone dane muszą zostać matematycznie przeanalizowane. Większość wzorów na parametry akustyczne jest prosta do zaimplementowania w postaci cyfrowej. Na szczególną uwagę zasługują dwie procedury matematyczne, używane podczas analizy pomiarów akustycznych: analiza częstotliwościowa oraz rozplot.

### 2.4.1. Analiza częstotliwościowa sygnałów

W celu wydobywania poszczególnych częstotliwości z nagranych sygnałów stosuje się transformację Fouriera, definiowaną wzorem (2.1), gdzie  $g$  jest funkcją zespoloną,  $f$  funkcją analizowaną, a  $\xi$  oznacza częstotliwość.

$$g(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-2\pi x\xi} dx \quad (2.1)$$

Działa ona na funkcjach ciągłych, okresowych i nieskończonych. Cyfrowe nagranie nie spełnia żadnego z tych wymagań, więc potrzebne jest odpowiednie przekształcenie wzoru. W postaci cyfrowej, działającej na ciągu liczb  $f_x$  o długości  $N$  transformata wygląda następująco:

$$g(k) = \sum_{x=0}^{N-1} f_x \cdot e^{-\frac{2\pi i}{N} kx} \quad (2.2)$$

Ta postać nazywana jest Dyskretną Transformacją Fouriera (DFT). Dzieli ona spektrum częstotliwości na  $N/2$  równych obszarów, od 0Hz do częstotliwości Nyquista dla danej częstotliwości próbkowania sygnału. DFT można zastosować już bezpośrednio na próbkach sygnału cyfrowego, jednakże jest to operacja bardzo kosztowna komputacyjnie -  $O(N^2)$ . Aby zniwelować ten problem stosuje się FFT, czyli Szybką Transformację Fouriera. Polega ona na sukcesywnym rozbijaniu sygnału na elementy parzyste i nieparzyste i stosowanie wzoru (2.3).

$$g(k) = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} f_{2m} \cdot e^{-\frac{2\pi i}{N} km} + e^{-\frac{2\pi i}{N} k} \cdot \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} f_{2m+1} \cdot e^{-\frac{2\pi i}{N} km} \quad (2.3)$$

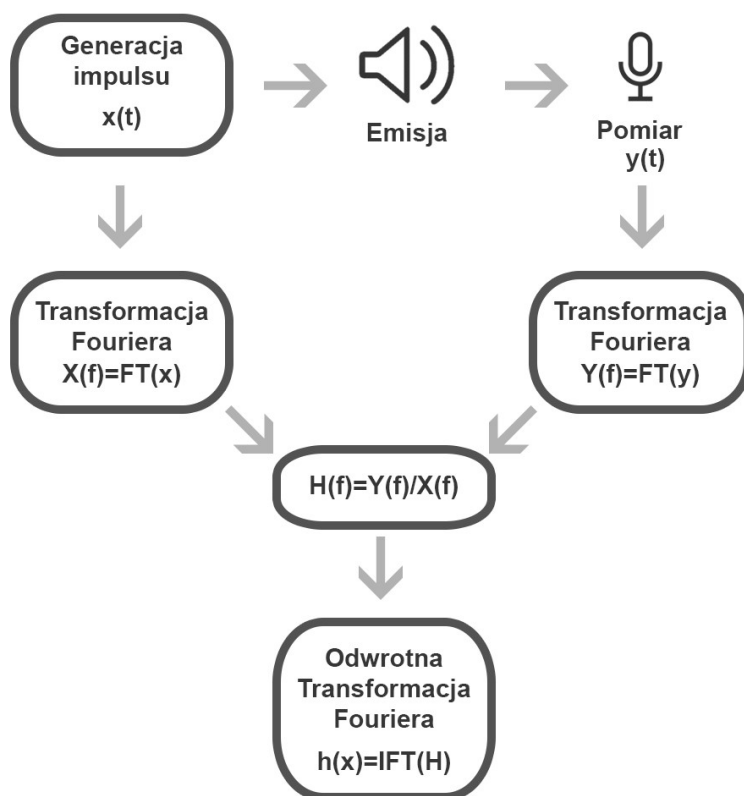
Sygnał wejściowy jest rozbijany na coraz mniejsze części metodą „dziel i zwyciężaj” tak długo, aż obliczenie sumy będzie trywialne. Algorytm FFT ma złożoność obliczeniową  $O(N \log(N))$ , a więc znacznie lepszą niż standardowe DFT, zwłaszcza w przypadku dużej ilości próbek.

### 2.4.2. Rozplot

Podczas badania systemu akustycznego za pomocą impulsu, będzie on w pewien sposób wpływać na przebieg sygnału testowego. Ten wpływ nazywany jest odpowiedzią impulsową systemu. Jej znajomość pozwala na obliczenie, w jaki sposób dany system wpłynie na dowolny sygnał wejściowy. Przy pobudzeniu systemu o odpowiedzi impulsowej  $h$ , sygnałem  $x$ , zmierzony sygnał wyjściowy  $y$  będzie wynikiem splotu funkcji  $h$  i  $y$ .

$$y(n) = h(n) * x(n) \quad (2.4)$$

Aby obliczyć  $h$ , stosuje się fakt, że operacji splotu dwóch funkcji w dziedzinie czasu odpowiada operacja mnożenia w dziedzinie częstotliwości. Impuls testowy, jak i zarejestrowana odpowiedź pomieszczenia zostają przekształcone na dziedzinę czasu za pomocą transformacji Fouriera. Iloraz otrzymanych widm jest jednocześnie widmem odpowiedzi impulsowej systemu. Używając odwrotnej transformacji Fouriera otrzymujemy odpowiedź impulsową w dziedzinie czasu (patrz Rys. 2.25).



**Rysunek 2.25.** Algorytm wyznaczania odpowiedzi impulsowej za pomocą operacji rozplotu  
Źródło: Opracowanie własne

## **ROZDZIAŁ 3**

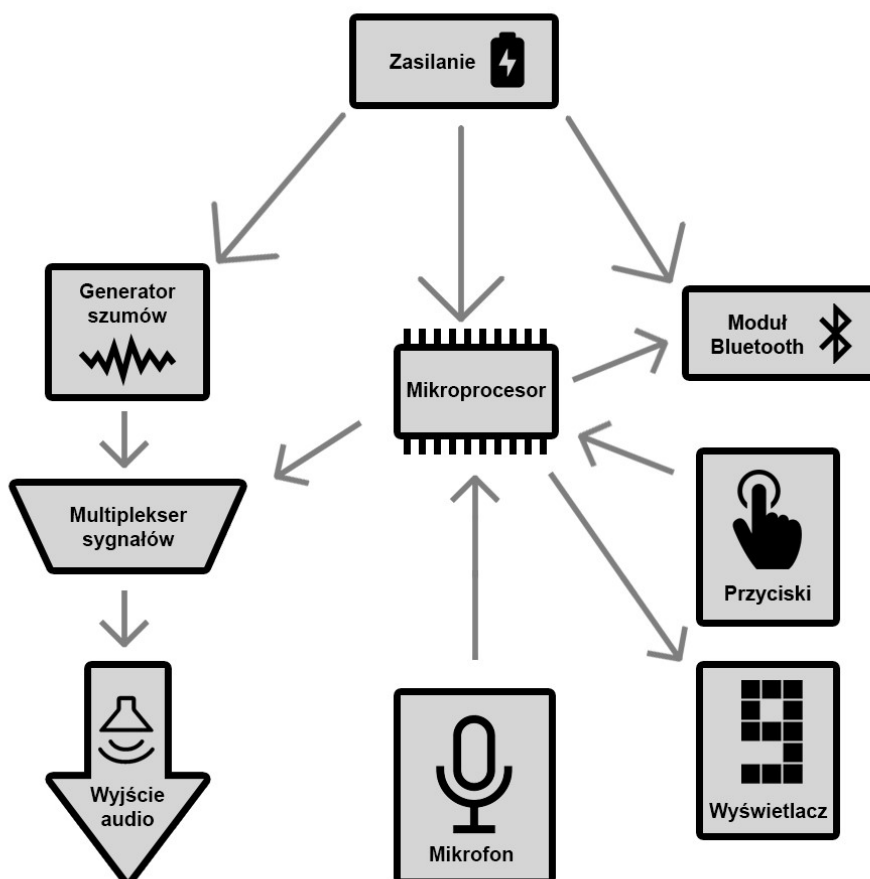
# **Projekt i budowa systemu kalibracji i pomiarów instalacji audio**

W poniższym rozdziale zostaną omówione wszelkie kwestie związane z projektowaniem i budową systemu do pomiaru najważniejszych parametrów akustycznych zarówno pomieszczeń akustycznych, jak i zestawów głośnikowych. Urządzenie składa się z dwóch części: analogowej i cyfrowej. Część analogowa odpowiada za generowanie szumu białego i różowego oraz przełączanie między nimi. Część cyfrowa dokonuje analizy sygnału z mikrofonu, a także komunikuje się z użytkownikiem oraz urządzeniami Bluetooth.

### **3.1. Projekt urządzenia**

Dwa główne cele, które kierowały procesem projektowania systemu to prostota i uniwersalność. Całe urządzenie jest więc mniejsze niż kartka formatu A5, a w swojej konstrukcji używa niedrogich, ogólnodostępnych komponentów, które w razie potrzeby można zastąpić licznymi zamiennikami. Mimo tego jest w stanie zmierzyć większość najważniejszych parametrów przestrzeni odsłuchowych – poziom szumu, czasy pogłosu, charakterystyki częstotliwościowe, czasy opóźnień oraz współczynniki zrozumiałości i przejrzystości. Największym powodem wątpliwości jest użycie taniego mikrofonu elektretowego, zainstalowanego bezpośrednio na płytce, który jednak w testach sprawował się bez zarzutu, a w razie potrzeby może być łatwo podmieniony na tradycyjne gniazdo mikrofonowe.

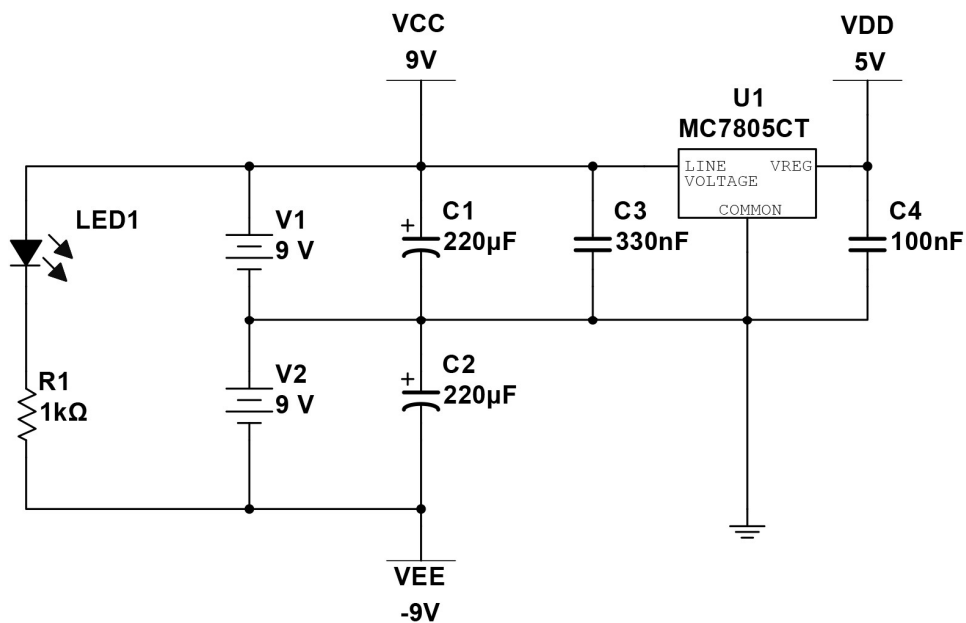
Główne jego elementy urządzenia pomiarowego to układ zasilający, generator szumów i mikroprocesorowy układ sterowania (patrz Rysunek 3.1).



**Rysunek 3.1.** Schemat blokowy projektowanego urządzenia  
Źródło: Opracowanie własne

### 3.1.1. Układ zasilania

Źródłem zasilania prototypu są dwie baterie PP3 (9V). Połączone są ze sobą szeregowo, a punkt połączenia stanowi masę całego układu. Dzięki temu część analogowa układu uzyskuje dostęp do napięć +9V i -9V. Obie linie zasilające są stabilizowane kondensatorami 220μF. Do linii +9V podłączony jest stabilizator napięcia LM7805, który zasila część cyfrową urządzenia. Powoduje to nierównomierne rozładowywanie baterii podczas użytkowania urządzenia, jednak nie ma to żadnego widocznego wpływu na jego działanie. Ostatnim elementem jest dioda zasilania wraz z rezystorem ograniczającym natężenie prądu płynącego przez nią.



**Rysunek 3.2.** Schemat układu zasilacza

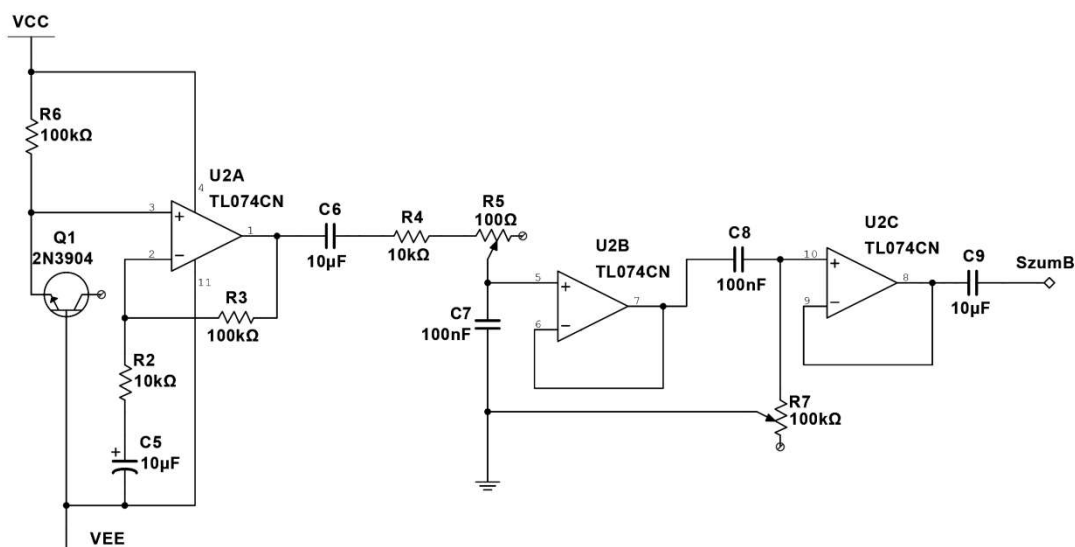
Źródło: Opracowanie własne

### 3.1.2. Generator szumów

Jako sygnał testowy do wszystkich pomiarów, których urządzenie dokonuje, używany jest szum biały lub różowy. Generator tych szumów jest analogowy i opiera się na odwrotnie spolaryzowanym złączu B-E tranzystora jako źródle szumu. Amplituda szumu jest zwiększana wzmacniaczem operacyjnym, a następnie pasmo zawężone do częstotliwości słyszalnych dwoma aktywnymi filtrami. Pierwszy filtr jest dolnoprzepustowy o granicy 22.4kHz, a drugi – górnoprzepustowy o granicy 20Hz. W obu filtrach zostały użyte kondensatory 0.1μF. Korzystając ze wzoru (3.1), gdzie  $C$  to pojemność kondensatora, a  $f$  to częstotliwość graniczna, obliczone zostały wartości rezystancji potrzebne do uzyskania żądanej częstotliwości granicznej.

$$R = \frac{1}{2\pi Cf} \quad (3.1)$$

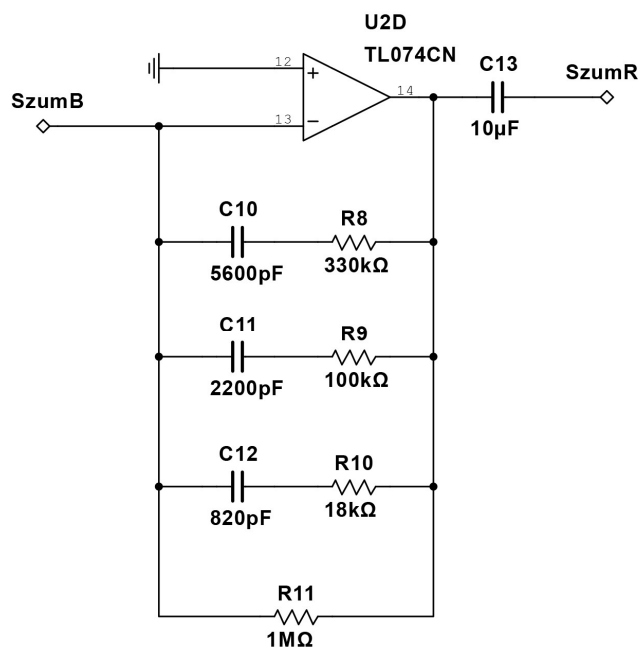
Dla filtru dolnoprzepustowego wymagana rezystancja to 71,051Ω, natomiast dla filtru górnoprzepustowego wynosi ona 79,58kΩ. Uzyskanie tych wartości przy pomocy standardowych rezystorów byłoby trudne, więc w układzie zostały użyte potencjometry o maksymalnej rezystancji odpowiednio 100Ω i 100kΩ. Pozwala to na dokładne dostrojenie filtrów. W efekcie połączenia kaskadowego uzyskanych filtrów powstaje jeden, pasmowo-przepustowy filtr o charakterystyce zbliżonej do tej z rysunku 1.3.



**Rysunek 3.3.** Schemat generatora szumu białego wraz z filtrami

Źródło: Opracowanie własne

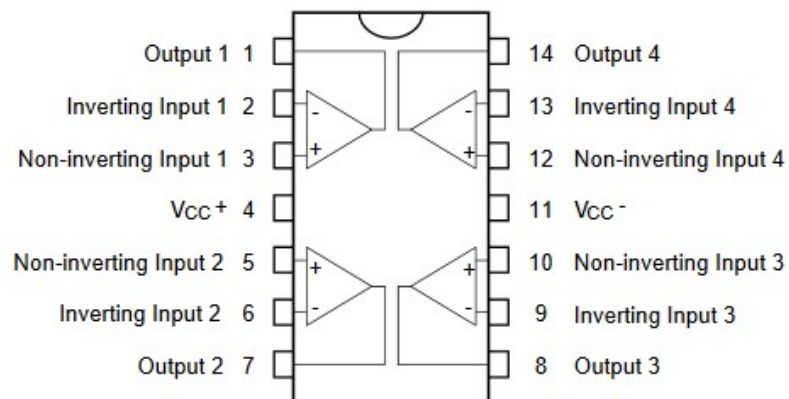
W ten sposób zostaje wytworzony szum biały, o zakresie częstotliwości dobranym do możliwości ucha ludzkiego. Aby uzyskać szum różowy, potrzebny jest filtr dolnoprzepustowy, o nachyleniu 3dB/oktawę. W urządzeniu został użyty filtr aktywny z trzema biegunami.



**Rysunek 3.4.** Schemat filtra szumu różowego

Źródło: Opracowanie własne

Generator szumów wymaga użycia czterech wzmacniaczy operacyjnych. Użyty więc został układ scalony TL074CN – poczwórny wzmacniacz operacyjny, często używany w sprzęcie audio.

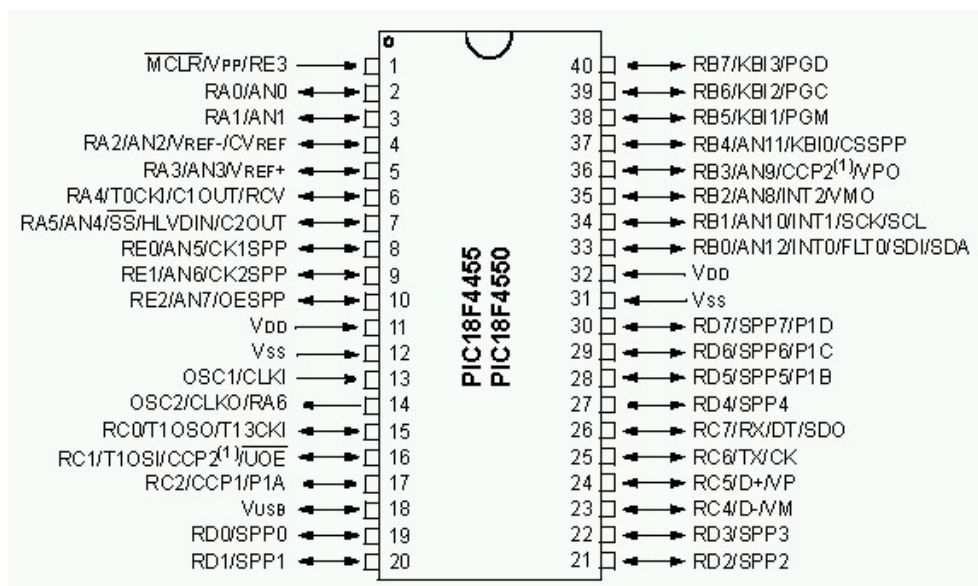


**Rysunek 3.5.** Oznaczenia pinów wzmacniacza operacyjnego TL074CN

Źródło: Na podstawie [7]

### 3.1.3. Mikroprocesorowy układ sterowania

Układ sterowania jest najważniejszą częścią urządzenia. To ten układ zajmuje się interakcją z użytkownikiem, sterowaniem sygnałami testowymi, nagrywaniem i analizą dźwięku, a także komunikacją bezprzewodową. Sercem układu jest mikrokontroler PIC18F4550 (patrz Rysunek 3.5), który jest w stanie dokonywać kompleksowej analizy sygnału w czasie rzeczywistym dzięki implementacji sprzętowego mnożnika 8x8. Jest to bardzo ważne przy stosowaniu algorytmu FFT.



**Rysunek 3.6.** Oznaczenia pinów mikrokontrolera PIC18F4550

Źródło: Na podstawie [5]

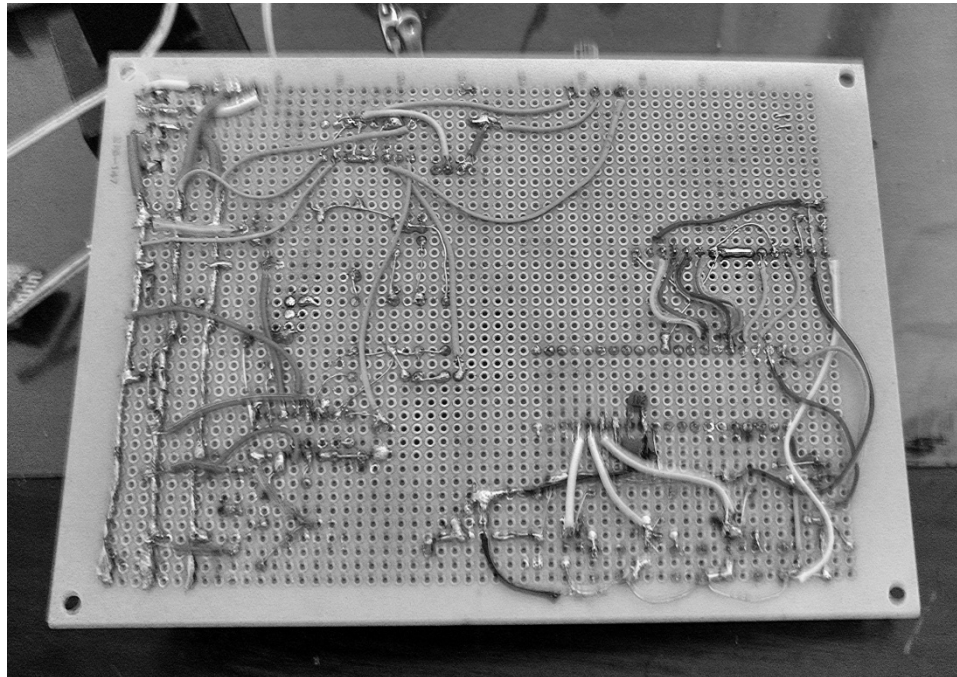
Do mikrokontrolera podłączony jest mikrofon elektretowy z tranzystorowym wzmacniaczem w konfiguracji wspólnego emitera, który dodatkowo podnosi napięcie o 2,5V, dzięki czemu procesor dostaje sygnał w zakresie 0V-5V. Interfejs użytkownika stanowią trzy przyciski z rezystorami pull-up i kondensatorami redukującymi drgania oraz ekran LCD 16x2, zgodny ze standardem Hitachi HD44780. Port szeregowy mikrokontrolera jest połączony z modułem Bluetooth HC-05, który przesyła informacje o dokonanych pomiarach do komputera. Moduł używa do komunikacji napięcia 3.3V, więc użyty został potencjometr służący do dostosowania napięcia pracy linii transmisyjnej.

Ostatnim elementem układu sterowania jest multiplekser analogowy HCF4052 (patrz Rysunek 3.5). Pozwala on mikrokontrolerowi wybierać rodzaj szumu do pomiarów oraz sterować jego odtwarzaniem.



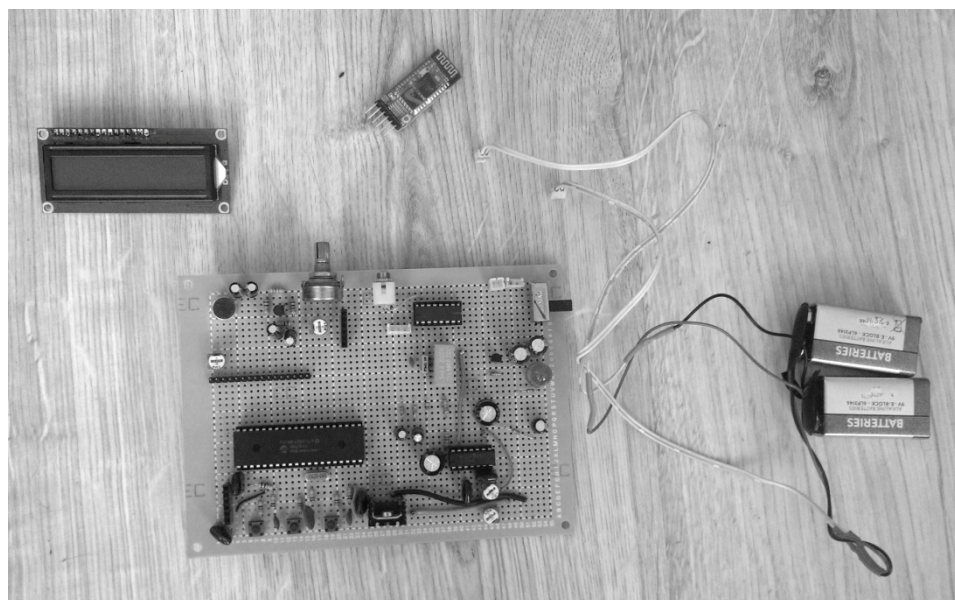


byłoby niepraktyczne. Wszystkie użyte układy scalone zostały umieszczone w podstawkach. Moduł Bluetooth i wyświetlacz LCD mają dedykowane konektory na płytce, dzięki czemu mogą być łatwo wyjęte.



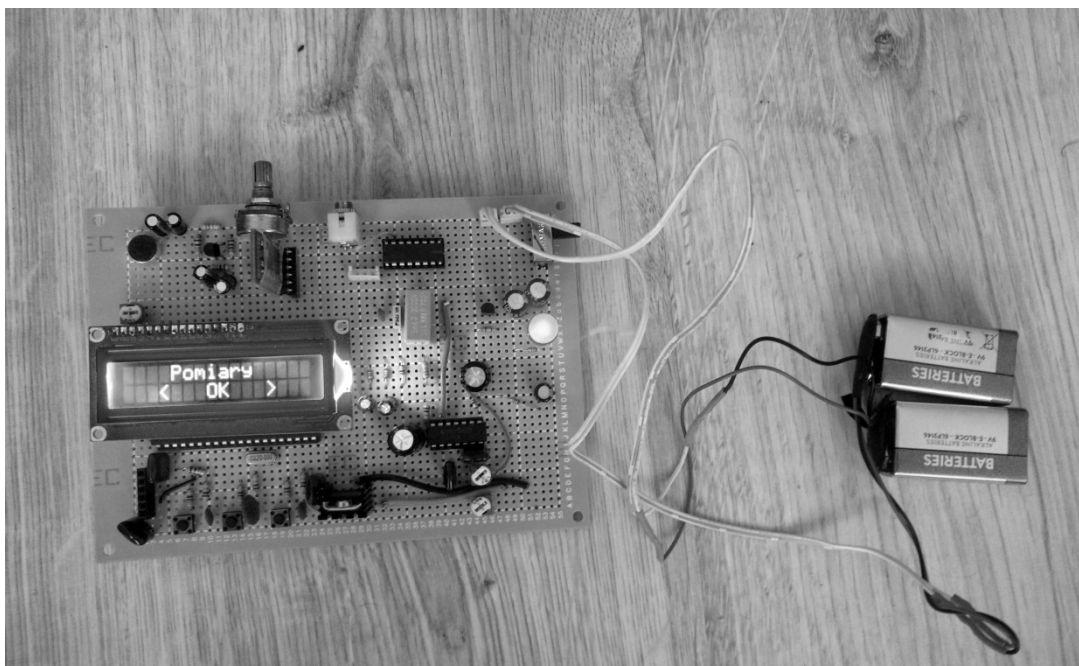
**Rysunek 3.10.** Tył urządzenia w trakcie budowania

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 3.11.** Elementy składowe prototypu

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 3.12.** Działający prototyp

Źródło: Opracowanie własne

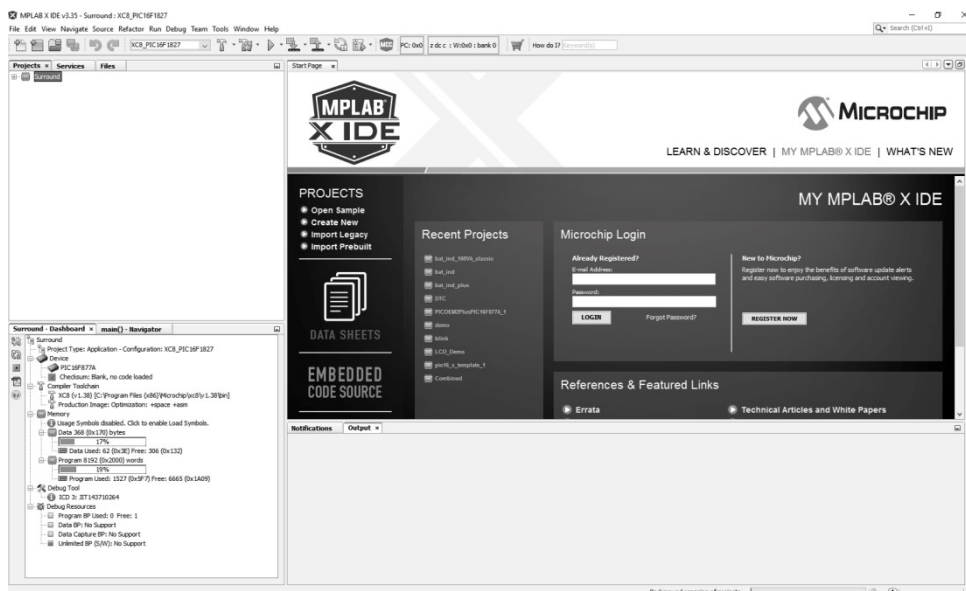
### 3.2.2. Programowanie mikrokontrolera

Programowanie mikrokontrolera było najważniejszą i najbardziej czasochłonną częścią projektu. Oprogramowanie urządzenia zostało napisane w języku C. Użyty został programator Microchip ICD3 (patrz Rysunek 3.13) i środowisko MPLAB X IDE (patrz Rysunek 3.14). Prototyp ma specjalny port, do którego podłączany jest programator.



**Rysunek 3.13.** Programator mikrokontrolerów używany podczas pracy

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 3.14.** Okno środowiska MPLAB X IDE

Źródło: Opracowanie własne

Ograniczone możliwości mikrokontrolera stworzyły kilka ciekawych problemów do rozwiązania. Finalne oprogramowanie pozwala przeprowadzić wszystkie pomiary za pomocą prostego interfejsu użytkownika. Po włączeniu urządzenie wyświetla menu główne, w którym znajdują się trzy pozycje: „Generator szumu”, „Pomiary” i „Transfer”.

## Generator szumu

- Wybrany Szum
  - Biały
  - Różowy
- Odtwórz szum
- Powrót

## Pomiary

- Poziom hałasu
- Akustyka
- Opóźnienie
- Analiza FFT
- Test pasma
- Powrót

## Transfer

- Rozpocznij
- Powrót

**Rysunek 3.15.** Struktura menu urządzenia

Źródło: Opracowanie własne

W sekcji „Generator szumu” użytkownik wybiera, który rodzaj szumu używać podczas pomiarów, oraz ma możliwość odtworzenia wybranego szumu bez wykonywania pomiarów. Sekcja „Transfer” pozwala na przesłanie uzyskanych wyników z pamięci

urządzenia poprzez Bluetooth. Menu „Pomiary” pozwala na wykonanie procedur mierzących parametry akustyczne.

Pierwszym krokiem programowania funkcji pomiarowych, było skalibrowanie wartości poziomu ciśnienia akustycznego, na którym bazują pozostałe pomiary. W tym celu, został stworzony specjalny program kalibracyjny, który jedynie wyświetlał wskazania przetwornika analogowo-cyfrowego. W użytym mikrokontrolerze, wynik pomiaru ADC jest liczbą dziesięciobitową, więc mieści się w zakresie 0-1023. Podczas kalibracji. W tym samym miejscu co kalibrowane urządzenie został położony telefon z włączoną aplikacją mierzącą poziom dźwięku w dB. Z głośnika postawionego jak najbliżej mikrofonów obu urządzeń odtwarzany był szum o coraz większym poziomie głośności. Na podstawie tych wyników został dobrany wzór na konwersję wartości ADC do dB:

$$SPL(ADC) = 20 \cdot \log ((ADC - 71) * 2,7) \quad (3.1)$$

Wyniki pomiarów oraz konwersji za pomocą wzoru 3.1 zostały przedstawione w tabeli 3.1.



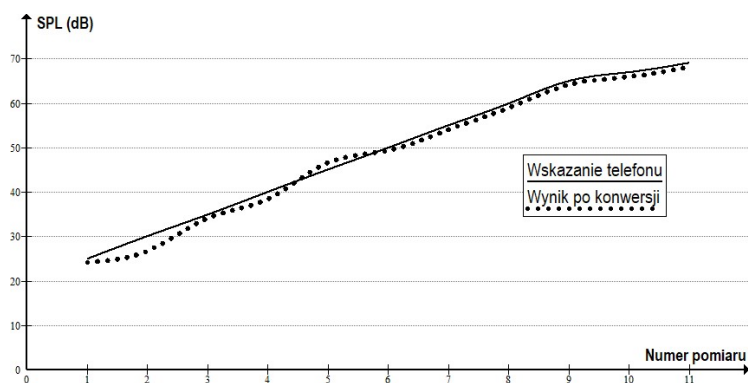
**Rysunek 3.16.** Metoda kalibracji urządzenia

Źródło: Opracowanie własne

**Tabela 3.1 Wyniki pomiarów służących kalibracji urządzenia**

Źródło: Opracowanie własne

| Wskazanie telefonu | Wskazanie urządzenia | Wynik konwersji |
|--------------------|----------------------|-----------------|
| 25dB               | 77                   | 24,19           |
| 30dB               | 79                   | 26,70           |
| 35dB               | 90                   | 34,20           |
| 40dB               | 102                  | 38,45           |
| 45dB               | 150                  | 46,58           |
| 50dB               | 179                  | 49,30           |
| 55dB               | 259                  | 54,11           |
| 60dB               | 402                  | 59,02           |
| 65dB               | 670                  | 64,18           |
| 67dB               | 801                  | 65,90           |
| 69dB               | 1019                 | 68,16           |



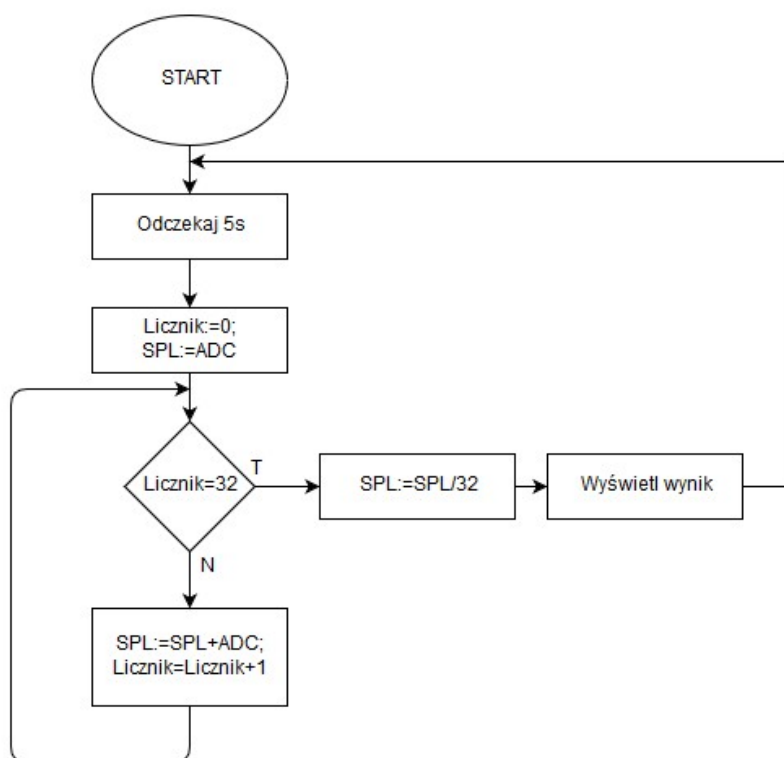
**Rysunek 3.17.** Porównanie wskazań telefonu ze wskazaniami skalibrowanego systemu pomiarowego

Źródło: Opracowanie własne

Po skalibrowaniu urządzenia przyszła kolej na zaprogramowanie funkcjonalności właściwej. Rysunek 3.18 przedstawia schemat zastosowanego algorytmu pomiaru poziomu hałasu, natomiast Rysunek 3.19 – algorytmu pomiaru akustyki pomieszczenia. W obu rysunkach „ADC” oznacza wynik pomiaru natężenia dźwięku przez przetwornik ADC zamieniony na skalę decybelową według wzoru 3.1. Pomiar opóźnienia głośnika odbywa się w bardzo prosty sposób – urządzenie włącza wybrany sygnał szumu i mierzy czas, aż do skoku natężenia poziomu dźwięku o co najmniej 20dB. Do analizy częstotliwościowej został użyty algorytm FFT, który jest dostarczany przez producenta mikrokontrolera i dzieli całkowity zakres częstotliwości na 32 równe części. W trybie „Analiza FFT” urządzenie tylko analizuje sygnał z mikrofonu i zapisuje uzyskane wyniki, natomiast w trybie „Test pasma” dodatkowo odtwarza wybrany sygnał szumu.

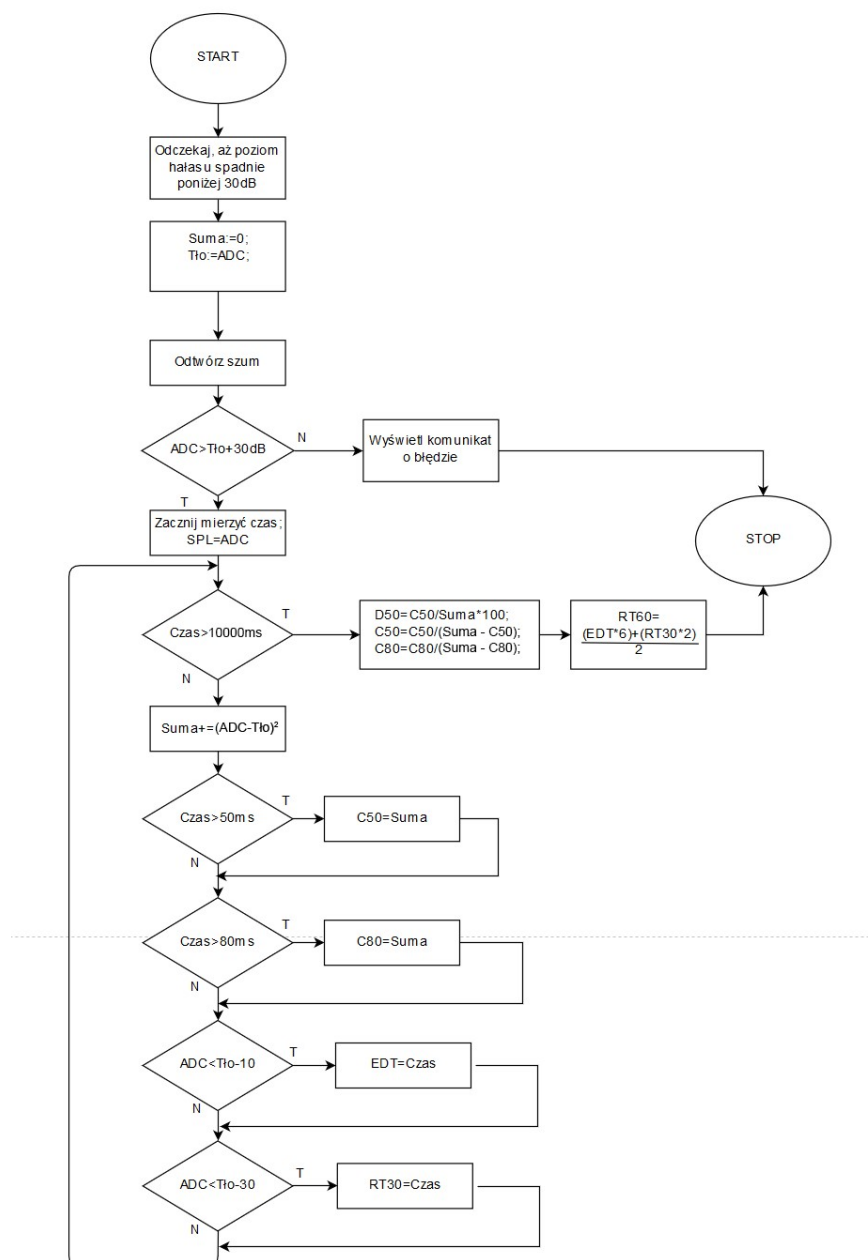
Ze względu na ograniczenia przetwornika analogowo-cyfrowego w mikrokontrolerze niektóre procedury musiały zostać ograniczone. Ze względu na to,

że maksymalny poziom dźwięku, jaki urządzenie może zmierzyć to ok. 70dB, a poziom hałasu niższy niż 10dB jest spotykany tylko w laboratoriach, parametr RT60 jest wyznaczany na podstawie parametrów RT30 i EDT, zakładając, że naturalny spadek poziomu dźwięku jest liniowy. Czas pomiaru przetwornika ADC to 50 $\mu$ s. Oznacza to częstotliwość próbkowania równą 20kHz, a co za tym idzie częstotliwość Nyquista wynoszącą 10kHz. Dlatego też, analizy pasma dokonywane przez urządzenie kończą się na tej właśnie częstotliwości.



**Rysunek 3.18.** Schemat blokowy algorytmu pomiaru poziomu hałasu

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 3.19.** Schemat blokowy algorytmu pomiaru akustyki pomieszczenia  
Źródło: Opracowanie własne

### 3.3. Pomiary i analiza wyników

#### 3.3.1. Testy generatora szumów

Pierwszym krokiem w ocenie jakości zbudowanego urządzenia, było zbadanie generowanych szumów, ponieważ wszelkie kolejne pomiary na nich się opierają. W tym celu wyjście audio prototypu zostało podłączone do gniazda mikrofonowego komputera PC. Oba rodzaje szumu zostały nagrane i przeanalizowane pod kątem charakterystyki

częstotliwościowej. Jak widać na rysunkach 3.20, 3.21, 3.22 i 3.23 oba filtry działają prawidłowo, choć nie idealnie.



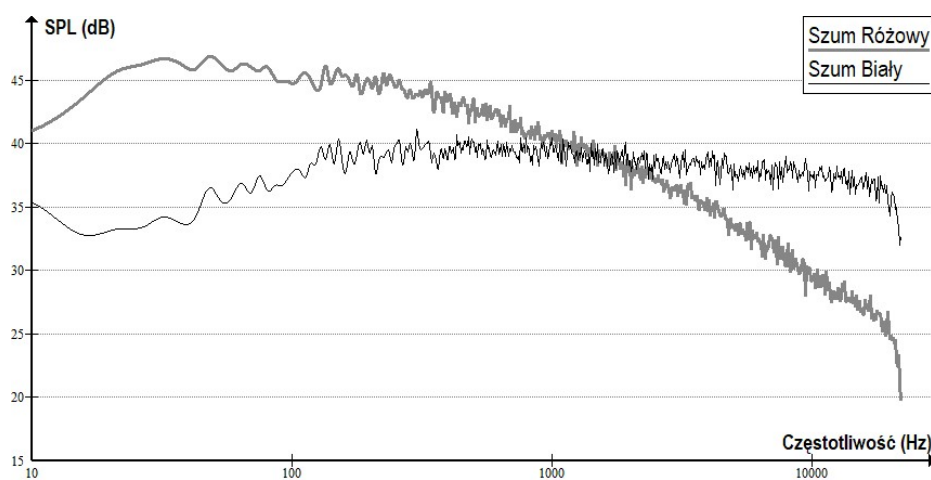
**Rysunek 3.20.** Widmo częstotliwościowe szumu białego

Źródło: Opracowanie własne



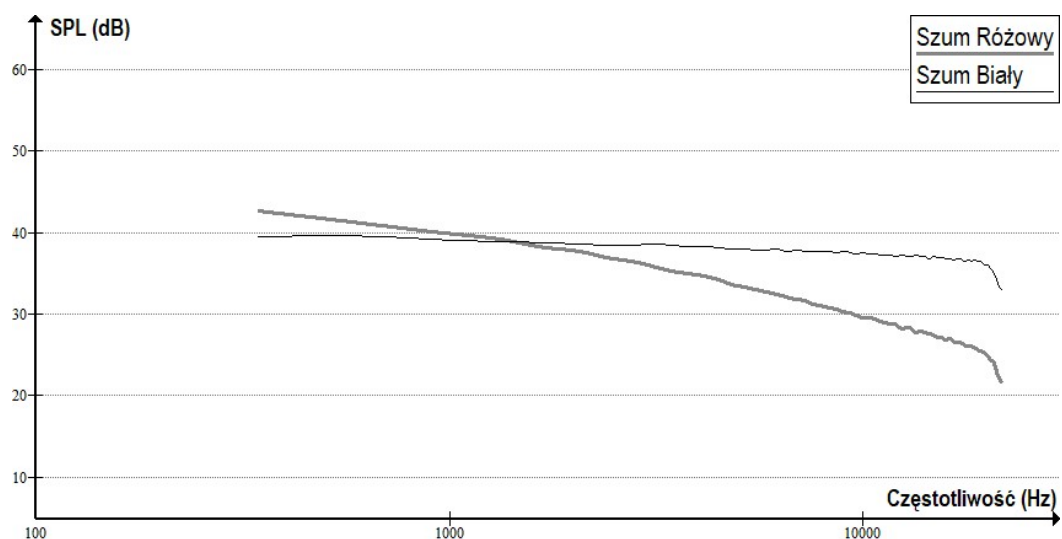
**Rysunek 3.21.** Widmo częstotliwościowe szumu różowego

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 3.22.** Porównanie charakterystyk częstotliwościowych szumów z generatora

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 3.23.** Porównanie uproszczonych charakterystyk częstotliwościowych szumów z generatora

Źródło: Opracowanie własne

### 3.3.2. Pomiar akustyki pomieszczeń

Pierwszy test urządzenia polegał na mierzeniu poziomu szumu otoczenia. W tym celu wykonywano pomiary co trzy godziny, wewnątrz mieszkania i przy dość ruchliwej ulicy. W obu przypadkach urządzenie leżało na twardym podłożu. Wyniki pomiarów przedstawia Tabela 3.2 i zgadzają się z typowymi wartościami z literatury, jednak bez profesjonalnego miernika do porównania, trudno określić wiarygodność tych rezultatów.

**Tabela 3.2** Wyniki pomiarów poziomu hałasu

Źródło: Opracowanie własne

| Godzina          | Hałas w mieszkaniu [dB] | Hałas przy ulicy [dB] |
|------------------|-------------------------|-----------------------|
| 9 <sup>00</sup>  | 30                      | 62                    |
| 12 <sup>00</sup> | 31                      | 59                    |
| 15 <sup>00</sup> | 35                      | 64                    |
| 18 <sup>00</sup> | 37                      | 62                    |
| 21 <sup>00</sup> | 34                      | 54                    |
| 0 <sup>00</sup>  | 28                      | 50                    |

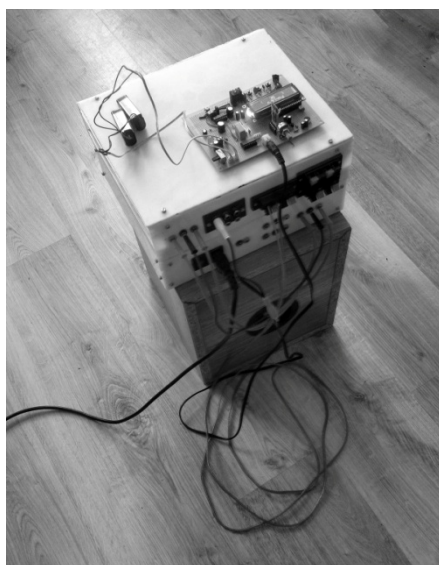
Aby zmierzyć parametry akustyczne pomieszczenia, potrzebne było źródło dźwięku. W tym celu zostały użyte elementy systemu audio zbudowanego przez autora w ramach

pracy inżynierskiej. Wyjście audio urządzenia pomiarowego zostało podłączone do wzmacniacza, do którego z kolei podłączony jest głośnik (patrz Rysunek 3.22).



**Rysunek 3.24.** Zestaw do pomiarów akustyki pomieszczeń

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 3.25.** Zestaw do pomiarów akustyki pomieszczeń – widok z tyłu

Źródło: Opracowanie własne

Tak przygotowany zestaw został użyty do przeprowadzenia pomiarów dwóch pomieszczeń – salonu i łazienki. W obu przypadkach stał na środku pomieszczenia, a badania zostały wykonane przy zamkniętych drzwiach.

**Tabela 3.3 Wyniki pomiarów akustyki pomieszczeń**

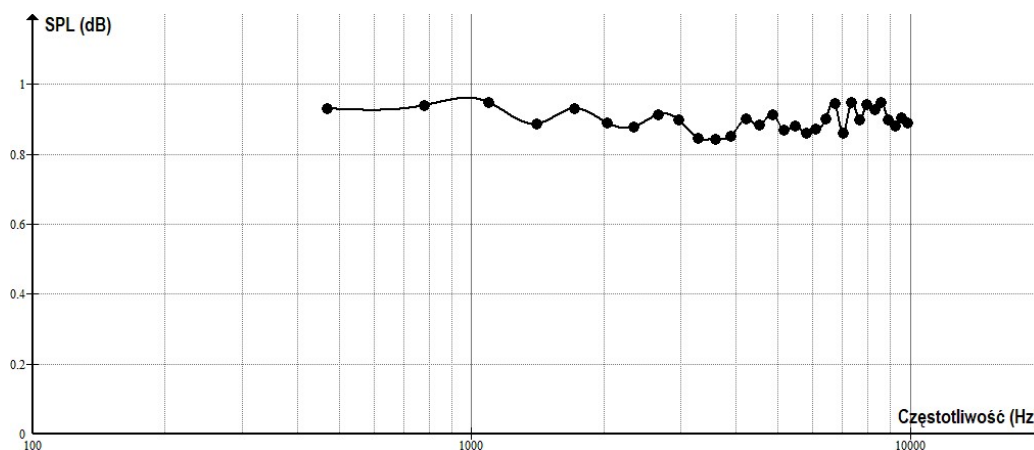
Źródło: Opracowanie własne

| Parametr  | Salon | Łazienka |
|-----------|-------|----------|
| $C_{50}$  | 0,7dB | -2,3dB   |
| $C_{80}$  | 5,3dB | -1,3dB   |
| $D_{50}$  | 76%   | 56%      |
| EDT       | 0,1s  | 0,3s     |
| $RT_{30}$ | 0,4s  | 0,9s     |
| $RT_{60}$ | 0,7s  | 1,8s     |

Tak samo, jak w przypadku pomiaru hałasu – wyniki wydają się zgodne z typowymi wartościami, jednak nie ma możliwości skonfrontowania ich z profesjonalnym sprzętem do pomiarów.

### 3.3.3. Pomiar parametrów głośników

W celu zmierzenia pasma przenoszenia głośnika, układ pomiarowy został umieszczony bezpośrednio przed nim i wybrano tryb „Test pasma” w urządzeniu. Test został wykonany na dwóch głośnikach –pełnozakresowym i subwooferze. Wyniki zostały następnie przesłane na komputer przez Bluetooth. Wykresy znormalizowanych pomiarów widać na rysunkach 3.24 i 3.25. W obu przypadkach wykresy wyglądają prawidłowo, choć rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości nie jest imponująca.



**Rysunek 3.26.** Wyniki pomiaru pasma przenoszenia głośnika szerokopasmowego

Źródło: Opracowanie własne



**Rysunek 3.27.** Wyniki pomiaru pasma przenoszenia subwoofera

Źródło: Opracowanie własne

Ostatnim testem był pomiar czasu opóźnienia głośnika. W tym celu głośnik odsunięto na odległość 1m i uruchomiono test „Opóźnienie”. Po zapisaniu wyniku, badanie powtórzono jeszcze kilka razy, za każdym razem przesuwając głośnik o pół metra dalej. Wyniki badania przedstawia Tabela 3.4.

**Tabela 3.4** Wyniki pomiarów opóźnienia głośnika w zależności od odległości

Źródło: Opracowanie własne

| Odległość [m] | Opóźnienie [ms] |
|---------------|-----------------|
| 1             | 3,7             |
| 1,5           | 5               |
| 2             | 7,1             |
| 2,5           | 8,1             |
| 3             | 9,9             |
| 3,5           | 11,5            |
| 4             | 13,2            |

## Zakończenie

Budowa akustycznego systemu pomiarowego okazała się nie lada wyzwaniem. Mimo iż teoretycznie większość badanych zagadnień nie jest bardzo skomplikowana, zaprojektowanie prostego i intuicyjnego urządzenia, które będzie w stanie wiarygodnie zmierzyć wszystkie parametry akustyczne, sprawia dużo problemów. Choć w tej pracy udało się takie urządzenie zbudować, to jednak nie był to całkowity sukces.

Stworzony zestaw ma sporo mankamentów. Użyte komponenty nie są najwyższej jakości, a uzyskane wyniki nie imponują dokładnością. Ze względu na brak profesjonalnego sprzętu pomiarowego, kalibracja urządzenia jest przybliżona. Dlatego też rezultaty uzyskane podczas jego użytkowania nie zostałyby uznane za wiarygodne w przypadku komercyjnych zastosowań. Jednakże do testów warunkach domowych, kiedy użytkownik nie potrzebuje laboratoryjnej dokładności, a jedynie poglądową analizę zestaw spisuje się adekwatnie i może się okazać bardzo pomocny.

Stworzony system jest jednak mimo wszystko prototypem. Wiele elementów można w nim w przyszłości ulepszyć. Zastosowanie procesora sygnałowego dałoby o wiele szybsze i dokładniejsze pomiary. Możliwość podłączenia profesjonalnego mikrofonu pomiarowego także zwiększyłaby możliwości w znaczący sposób. Ponadto, zastosowanie większego, graficznego wyświetlacza pozwoliłoby na wykonywanie większej części pracy bezpośrednio na urządzeniu, bez potrzeby transferowania danych do komputera.

# Bibliografia

- [1] Everest F.A.: *Master Handbook of Acoustics*, McGraw-Hill, 2001
- [2] Eargle J.: *Handbook of Recording Engineering*, Springer Science & Business Media, 2005
- [3] Witort A.: Mikrofony, *Radioelektronik*, vol. 7, no. 2, pp. 87-105, 2000
- [4] Nota katalogowa Visaton W 130
- [5] Nota katalogowa PIC18F4550
- [6] Nota katalogowa HCF4052
- [7] Nota katalogowa TL074CN
- [8] Topa M. Toma N.: *Evaluation of acoustic parameters in a room*, 2010, URL: <http://www.gust.org.pl/PDF/BIUL/06/01-jmn.pdf>
- [9] Crandell C.: *Classroom Acoustics: Understanding Barriers to Learning*, Alexander Graham Bell Association for the Deaf and Hard of Hearing, 2001
- [10] Rossing T.: *Springer Handbook of Acoustics*, Springer, 2015
- [11] Eargle J.: *The Microphone Book*, Focal Press, 2001
- [12] Association of Professional Recording Services: *Sound Recording Practise*, Oxford University Press, 1996
- [13] Kjaer B.: *Measurements in Building Acoustics*, Brüel & Kjær, 1980
- [14] Thomson D.: *Understanding Audio*, Hal Leonard Corporation, 2005
- [15] Kadis J.: *The science of sound recording*, Elsevier Science, 2012
- [16] Brixen E.: *Audio Metering: Measurements, Standards and Practice*, Taylor & Francis, 2010
- [17] Winer E.: *The Audio Expert*, Elsevier Science, 2012
- [18] Hassal J.R.: *Acoustic Noise Measurements*, Bruël & Kjaer, 1979
- [19] Instrukcja obsługi. HC-05, Guangzhou HC Information Technology, Kanton, 2007
- [20] Barnett R.: *Embedded C programming and the microchip PIC*, Delmar Learning, 2004
- [21] Guski M.: *Influences of external error sources on measurements of room acoustic parameters*, Logos Verlag Berlin GmbH, 2015

## Spis tabel

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1. Wyniki pomiarów służących kalibracji urządzenia .....                | 49 |
| Tabela 3.2. Wyniki pomiarów poziomu hałasu.....                                  | 53 |
| Tabela 3.3. Wyniki pomiarów akustyki pomieszczeń.....                            | 55 |
| Tabela 3.4. Wyniki pomiarów opóznienia głośnika w zależności od odległości ..... | 56 |

# Spis rysunków

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Rysunek 1.1. Sygnał sinusoidalnie zmienny i jego średnia kwadratowa .....                                                | 9  |
| Rysunek 1.2. Graficzna reprezentacja czasów pogłosu EDT, RT30 i RT60 .....                                               | 11 |
| Rysunek 1.3..Przykład idealnej charakterystyki częstotliwościowej sprzętu audio.....                                     | 13 |
| Rysunek 1.4.Charakterystyka kierunkowa przetwornika Visaton W 130 .....                                                  | 14 |
| Rysunek 1.5..Przykład wpływu różnicy odległości głośników od słuchacza na położenie<br>pozornego źródła dźwięku .....    | 15 |
| Rysunek 2.1. Budowa mikrofonu dynamicznego.....                                                                          | 17 |
| Rysunek 2.2. Budowa mikrofonu wstęgowego .....                                                                           | 18 |
| Rysunek 2.3. Budowa mikrofonu pojemnościowego.....                                                                       | 18 |
| Rysunek 2.4. Budowa mikrofonu elektretowego .....                                                                        | 19 |
| Rysunek 2.5. Budowa mikrofonu piezoelektrycznego.....                                                                    | 20 |
| Rysunek 2.6. Budowa mikrofonu węglowego .....                                                                            | 20 |
| Rysunek 2.7. Budowa mikrofonu optycznego .....                                                                           | 21 |
| Rysunek 2.8. Przykładowa charakterystyka mikrofonu dookólnego .....                                                      | 22 |
| Rysunek 2.9. Przykładowa charakterystyka mikrofonu dwukierunkowego .....                                                 | 22 |
| Rysunek 2.10. Przykładowa charakterystyka mikrofonu kardoidalnego .....                                                  | 23 |
| Rysunek 2.11. Porównanie trzech podstawowych kształtów charakterystyki<br>kierunkowej mikrofonów.....                    | 23 |
| Rysunek 2.12. Schemat ideowy metody określenia źródła fali za pomocą macierzy<br>mikrofonów.....                         | 24 |
| Rysunek 2.13. Schemat blokowy przetwornika ADC działającego metodą iteracyjną .                                          | 25 |
| Rysunek 2.14. Schemat blokowy przetwornika ADC działającego metodą równoległą                                            | 25 |
| Rysunek 2.15. Wyniki przetwarzania sinusoidy przez przetworniki ADC o różnych<br>rozdzielczościach .....                 | 26 |
| Rysunek 2.16. Widmo idealnego szumu białego.....                                                                         | 27 |
| Rysunek 2.17. Widmo idealnego szumu różowego .....                                                                       | 28 |
| Rysunek 2.18. Pasma przenoszenia filtra sygnału szumu pomiarowego .....                                                  | 29 |
| Rysunek 2.19. Przebieg delty Diraca i sygnału impulsowego na niej opartego.....                                          | 30 |
| Rysunek 2.20. Przebieg przykładowego sygnału sweep .....                                                                 | 30 |
| Rysunek 2.21. Widmo sygnału sweep zmieniającego częstotliwość w paśmie 1Hz-<br>22kHz.....                                | 31 |
| Rysunek 2.22. Schemat ideowy pomiaru akustyki pomieszczenia .....                                                        | 32 |
| Rysunek 2.23. Schemat ideowy pomiaru pasma przenoszenia systemu głośników oraz<br>czasu opóźnień dotarcia sygnałów ..... | 33 |
| Rysunek 2.24. Metody pomiarów charakterystyki kierunkowej głośnika .....                                                 | 34 |
| Rysunek 2.25. Algorytm wyznaczania odpowiedzi impulsowej za pomocą operacji<br>rozplotu .....                            | 36 |
| Rysunek 3.1. Schemat blokowy projektowanego urządzenia.....                                                              | 38 |
| Rysunek 3.2. Schemat układu zasilacza .....                                                                              | 39 |

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Rysunek 3.3 .Schemat generatora szumu białego wraz z filtrami .....                                    | 40 |
| Rysunek 3.4. Schemat filtra szumu różowego.....                                                        | 40 |
| Rysunek 3.5. Oznaczenia pinów wzmacniacza operacyjnego TL074CN .....                                   | 41 |
| Rysunek 3.6. Oznaczenia pinów mikrokontrolera PIC18F4550.....                                          | 42 |
| Rysunek 3.7. Oznaczenia pinów multipleksera HCF4052.....                                               | 43 |
| Rysunek 3.8. Schemat układu sterowania .....                                                           | 43 |
| Rysunek 3.9. Schemat całego urządzenia .....                                                           | 44 |
| Rysunek 3.10. Tył urządzenia w trakcie budowania .....                                                 | 45 |
| Rysunek 3.11. Elementy składowe prototypu.....                                                         | 45 |
| Rysunek 3.12. Działający prototyp .....                                                                | 46 |
| Rysunek 3.13. Programator mikrokontrolerów używany podczas pracy .....                                 | 46 |
| Rysunek 3.14. Okno środowiska MPLAB X IDE .....                                                        | 47 |
| Rysunek 3.15. Struktura menu urządzenia .....                                                          | 47 |
| Rysunek 3.16. Metoda kalibracji urządzenia .....                                                       | 48 |
| Rysunek 3.17. Porównanie wskazań telefonu ze wskazaniem skalibrowanego systemu<br>pomiarowego.....     | 49 |
| Rysunek 3.18. Schemat blokowy algorytmu pomiaru poziomu hałasu .....                                   | 50 |
| Rysunek 3.19. Schemat blokowy algorytmu pomiaru akustyki pomieszczenia .....                           | 51 |
| Rysunek 3.20. Widmo częstotliwościowe szumu białego .....                                              | 52 |
| Rysunek 3.21. Widmo częstotliwościowe szumu białego.....                                               | 52 |
| Rysunek 3.22. Porównanie charakterystyk częstotliwościowych szumów z generatora<br>.....               | 52 |
| Rysunek 3.23. Porównanie uproszczonych charakterystyk częstotliwościowych szumów<br>z generatora ..... | 53 |
| Rysunek 3.24. Zestaw do pomiarów akustyki pomieszczeń .....                                            | 54 |
| Rysunek 3.25. Zestaw do pomiarów akustyki pomieszczeń – widok z tyłu.....                              | 54 |
| Rysunek 3.25. Zestaw do pomiarów akustyki pomieszczeń – widok z tyłu.....                              | 55 |
| Rysunek 3.27. Wyniki pomiaru pasma przenoszenia subwoofera.....                                        | 56 |