STRESZCZENIE

Określanie dźwięków instrumentów bywa często nazywane kwestia subiektywną, ale istnieją pewne cechy charakterystyczne pozwalające na dywersyfikacje ich brzmień. Różnice pomiędzy nimi wywodzą się z właściwości fizycznych tych fal (drgań). Łatwy oraz szybki dostęp do określania tych brzmień mógłby zagwarantować lepszy dobór instrumentów do nastroju i charakterystyki dzieła muzycznego. Praca ma na celu znalezienie tych różnic pomiędzy brzmieniami, oraz przygotowaniu urządzenia które pozwoliłoby na określenie ich rodzaju. Do wykonania projektu wybrano instrument klawiszowy, a następnie zebrano próbki klawisza A4 (a razkreślne) o częstotliwości 440 Hz dla dwóch powszechnie i umownie określonych brzmień: „jasny”, „miękki”. Po znalezieniu zależności, polegających na intensywnościach oraz liczby składowych drgań harmonicznych dźwięku, przygotowano MEL-spektrogramy danych treningowych. Użyto ich w tworzeniu modelu konwolucyjnej sieci neuronowej zdolnej do rozróżnienia tych klas. Ze względu na ograniczenia czasowe oraz porównaniu modeli tworzonych własnoręcznie, postanowiono skorzystać z frameworku „Teachable Machines” autorstwa Google, udostępnionego do użytku publicznego, pozwalającego na stworzenie modelu będącego w stanie dokonać predykcji z zadowalającą dokładnością. Następnie przygotowano przenośne urządzenie pozwalające na użytkowanie modelu, Wyniki projektu wykazują, że różnice występujące w dźwiękach nie tylko pozwalają na analityczne rozróżnienie barw, ale także na stworzenie modelu będącego w stanie je określać.

Słowa kluczowe:

MEL-spektrogramy, muzyka, analiza dźwięku, sztuczna inteligencja, konwolucyjne sieci neuronowe, programowanie, Python, komputer jednopłytkowy, RaspberryPi, urządzenia embedded.

ABSTRACT

Defining the sounds of instruments is often called a subjective matter, but there are certain characteristics that allow for the diversification of their sounds. The differences between them are derived from the physical properties of these waves (vibrations). Easy and quick access to defining these sounds could guarantee a better selection of instruments for the mood and characteristics of a musical work. The work aims to find these differences between sounds, and to prepare a device that would allow for determining their type. A keyboard instrument was selected for the project, and then samples of the A4 (middle A) key with a frequency of 440 Hz were collected for two commonly and conventionally defined sounds: "bright", "soft". After finding the relationships, consisting in the intensities and the number of components of harmonic vibrations of the sound, MEL-spectrograms of training data were prepared. They were used to create a convolutional neural network model capable of distinguishing these classes. Due to time constraints and the comparison of models created by hand, it was decided to use the Google "Teachable Machines" framework, made available for public use, which allows the creation of a model capable of making predictions with satisfactory accuracy. Then, a portable device was prepared to allow the use of the model. The results of the project show that the differences occurring in sounds not only allow for analytical distinction of colors, but also for the creation of a model capable of defining them.

Keywords:

MEL-spectrograms, music, sound analysis, artificial intelligence, convolutional neural networks, programming, Python, single-board computer, RaspberryPi, embedded devices.

SPIS TREŚCI

[Wykaz ważniejszych słów i skrótów 6](#_Toc190055113)

1. [Cel pracy 7](#_Toc190055114)

2. [Wstęp teoretyczny 8](#_Toc190055115)

2.1. [Dźwięk oraz jego analiza 9](#_Toc190055116)

*2.1.1.* [*Charakterystyka dźwięku oraz badanego instrumentu 9*](#_Toc190055117)

*2.1.2.* [*MEL-spektrogramy 14*](#_Toc190055118)

*2.1.3.* [*Transformata Fouriera 16*](#_Toc190055119)

*2.1.4.* [*Analiza dźwięku 17*](#_Toc190055120)

2.2. [Sztuczne sieci neuronowe 18](#_Toc190055121)

*2.2.1.* [*Działanie oraz zastosowanie sztucznych sieci neuronowych 18*](#_Toc190055122)

*2.2.2.* [*Konwolucyjne sieci neuronowe i ich zastosowanie w projekcie 19*](#_Toc190055123)

*2.2.3.* [*Framework Teachable machines 20*](#_Toc190055124)

2.3. [Język programowania Python 21](#_Toc190055125)

*2.3.1.* [*Charakterystyka języka 21*](#_Toc190055126)

*2.3.2.* [*Wykorzystane biblioteki 22*](#_Toc190055127)

2.4. [Urządzenia embedded 23](#_Toc190055128)

*2.4.1.* [*Ogólna charakterystyka 23*](#_Toc190055129)

*2.4.2.* [*RaspberryPi 24*](#_Toc190055130)

3. [Przebieg badania i metodologia 25](#_Toc190055131)

3.1. [Dane 26](#_Toc190055132)

*3.1.1.* [*Pozyskiwanie danych 27*](#_Toc190055133)

*3.1.2.* [*Analiza 28*](#_Toc190055134)

*3.1.3.* [*Przygotowanie zbiorów treningowych 29*](#_Toc190055135)

3.2. [Stworzenie modelu sieci neuronowej 30](#_Toc190055136)

3.3. [Aplikacja do klasyfikacji dźwięku 31](#_Toc190055137)

*3.3.1.* [*Struktura i działanie aplikacji 32*](#_Toc190055138)

*3.3.2.* [*Elementy graficzne 33*](#_Toc190055139)

*3.3.3.* [*Implementacja i funkcjonalność modelu sieci 34*](#_Toc190055140)

3.4. [Obudowa urządzenia 35](#_Toc190055141)

4. [Podsumowanie 36](#_Toc190055142)

[Wykaz literatury 37](#_Toc190055143)

[Wykaz rysunków 38](#_Toc190055144)

[Wykaz tabel 39](#_Toc190055145)

[Materiały dodatkowe: Repozytorium projektu 40](#_Toc190055146)

# WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SŁÓW I SKRÓTÓW

Hz – Herc, jednostka miary częstotliwości.

CNN – konwolucyjna sieć neuronowa (od ang. Convolutional Neural Network).

zmienna – w języku programowania oznacza to nośnik danych w programie bądź funkcji .

funkcja – w języku programowania jest to definiowalna metoda, która przyjmuje zmienne oraz wykonuje operacje logiczne.

epoka – jedno kompletne przejście zestawu danych treningowych przez algorytm

barwa dźwięku – inne określenie na charakterystykę brzmienia instrumentu.

dynamika – w kontekście muzycznym jest to opisanie sposobów gry na fortepianie (np. głośno, cicho), polega na kontrolowaniu siły użytej podczas przyciskania klawiszy.

MFCC – (od ang. Mel-Frequency Cepstrum Coefficients) współczynniki cepstralne skali MEL.

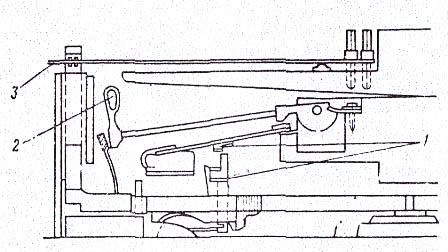
STFT – (od and. Short Time Fourier Transform) to jedna z technik analizy sygnału zmiennego w czasie.

# 1. CEL PRACY

Praca ma na celu stworzenie urządzenia zdolnego do wykrywania różnic w drganiach harmonicznych dźwięku A4, którego częstotliwość to 440 Hz. Wykrywanie odbywa się za pomocą modelu sieci neuronowej. Dzięki przeprowadzonym badaniom znaleziono różnice pomiędzy intensywnościami i występowaniem harmonicznych pomiędzy poszczególnymi brzmieniami instrumentu. Dzięki wytrenowaniu modelu sieci w celu klasyfikacji tych brzmień, możliwe jest stworzenie przenośnego urządzenia pozwalającego na łatwiejsze określanie brzmienia, co może ułatwić wybór i przygotowania instrumentów do odtwarzania specyficznych utworów, bądź dodawania detali w nowych kompozycjach.

# 2. WSTĘP TEORETYCZNY

Muzyka towarzyszy człowiekowi od bardzo dawna, a jej prymitywne korzenie szacuje się na czasy pradawne. Mimo tak rozległego czasu istnienia, forma oraz instrumenty muzyczne są rozwijane po dzień dzisiejszy. Dźwięk nie jest niczym innym, niż falą mechaniczną, która jest odbierana poprzez człowieka za pomocą wibracji[1]. Dzięki rozwojowi instrumentów oraz sposobów wydobywania z nich brzmień, powstała możliwość stworzenia isntrumentu jakim jest fortepian. Działanie tego instrumentu można uprościć do prostego modelu młoteczka uderzającego w strunę o zdefiniowanym naprężeniu (nastrojeniu), powodując różnicę w amplitudzie drgań tej struny. Na poniższym rysunku przedstawiono uproszczony przekrój prostego mechanizmu dla 1 klawisza:



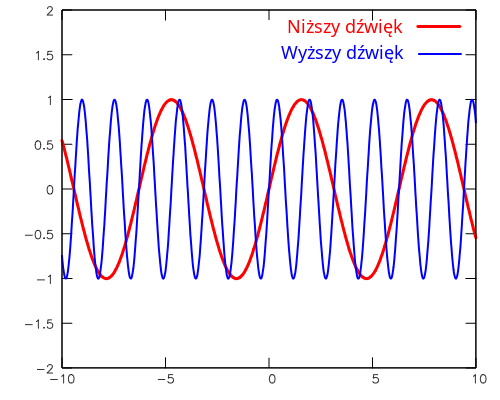
*Rys 2.1 – Schemat mechanizmu, gdzie 1 to dźwignie, 2 to młoteczek a 3 to struna*

Pomimo faktu podobnego, a wręcz ideowo identycznego, mechanizmu zawartego we wszystkich instrumentach fortepianowych możemy usłyszeć różnice w odniesieniu do postrzegania wydobywających się z nich dźwięków. Możliwe jest skategoryzowanie ich na subiektywnie stworzone kategorie; niektóre brzmienia są bardziej miękkie oraz delikatniejsze, z kolei inne bardziej wyraziste, jasne. Co prawda brzmienie te można uzyskiwać za pomocą kontrolowanej wartości siły podczas naciskania klawiszy, lecz możliwe jest spreparowanie lub stworzenie instrumentu, który cechowałby się specyficznym brzmieniem bez względu na dynamikę grania (bez względu na dynamikę gry cechy charakterystyczne barwy dźwięku dla danego instrumentu będą zawsze słyszalne).

## 2.1. Dźwięk oraz jego analiza

### 2.1.1. Charakterystyka dźwięku oraz badanego instrumentu

W fizyce dźwięk to wibracja, która rozprzestrzenia się jako fala akustyczna przez medium transmisyjne, takie jak gaz, ciecz lub ciało stałe[2]. Fala akustyczna jest opisana funkcja sinusoidalną, a wysokość dźwięku jest jednoznaczny z jej częstotliwością wprost proporcjonalnie; zwiększając częstotliwość podwyższamy dźwięk.



*Rys 2.2 – Przykład fali akustycznej wraz z zilustrowaną zależnością*

Poza główną częstotliwością, występują także częstotliwości harmoniczne. W fizyce i akustyce harmoniczna to fala sinusoidalna o częstotliwości będącej dodatnią całkowitą wielokrotnością częstotliwości podstawowej fali. Częstotliwość podstawowa jest również nazywana pierwszą harmoniczną; pozostałe harmoniczne są znane jako wyższe harmoniczne. Zestaw harmonicznych tworzy szereg harmoniczny[3], czyli w przypadku akustyki, słyszany przez człowieka dźwięk. Dokładniej zjawisko to zostanie opisane w podrozdziale 2.1.3.

W tym przypadku, wytwarzaną falę dźwiękową można opisać jako wypadkową falę, powstająca na wskutek wygaszania i wzmacniania fal powstających podczas odbijania się od punktu zamocowania drugiego końca struny (2.1) [4]:

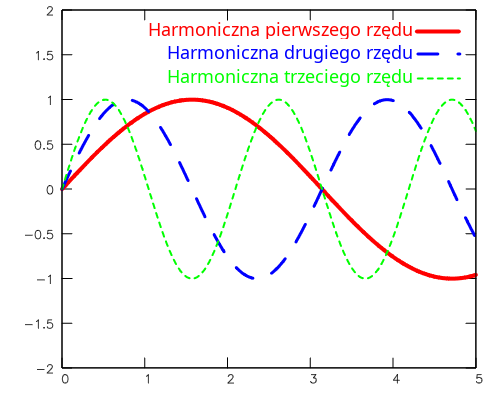
|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.1) |

Gdzie to amplituda, k jest liczbą falowa (), x to położenie na strunie, jest częstością kołową, t jest równe czasowi a to przesunięcie fazowe.

Dla dowolnej częstotliwości, wizualizacje harmonicznych można opisać prostym wzorem funkcji sinusoidalnej, pomijając czynniki fizyczne (2.2):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.2) |

Gdzie to rząd harmonicznej.



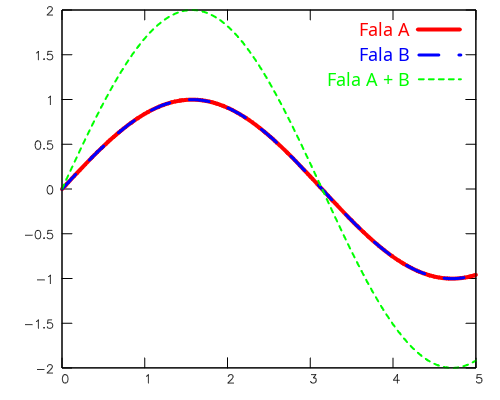
*Rys 2.3 – Wizualizacja pierwszej harmonicznej wraz z dwoma wyższymi harmonicznymi dla dowolnej częstotliwości x*

Zjawisko to jest kluczowe w zrozumieniu charakterystyk dźwięku instrumentu, ponieważ uderzana struna fortepianowa tworzy taką właśnie falę, która po głębszej analizie okazuje się być szeregiem harmonicznym. Ma to olbrzymi wpływ na znalezienie oraz zrozumienie różnic pomiędzy poszczególnymi brzmieniami. Dane wstępne zebrano z dostępnego instrumentu cyfrowego Yamaha Arius YDP-143.

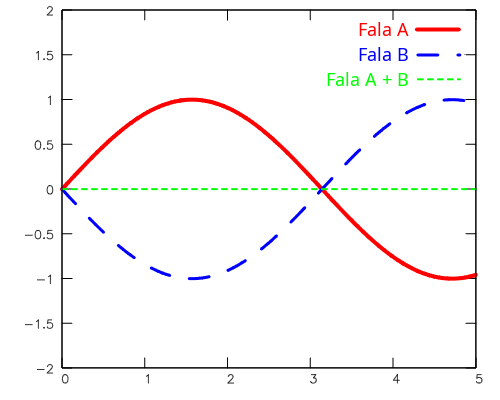


*Rys 2.4 – Instrument którym posłużono się do zebrania danych dźwiękowych*

Fundamentalną różnicą pomiędzy instrumentem analogowym a cyfrowym jest sposób generowania dźwięku. W fortepianie polega to na fizycznym zjawisku wzbudzania struny w drgania. Najczęściej instrument ten posiada więcej strun przypadających na młoteczek, co przekłada się na ilości oraz intensywności harmonicznych. Bardzo ważną różnicą jest także obecność pudła rezonansowego, które amplifikuje dźwięk i pozwala na zachodzenie zjawisk fizycznych fal, takie jak wzmacnianie i wygaszanie[5]. Uproszczona wizualizacja tych interferencji została przedstawiona na rysunkach 2.5 oraz 2.6 poniżej.



*Rys 2.5 – Wizualizacja zjawiska wzmacniania fal stojących*

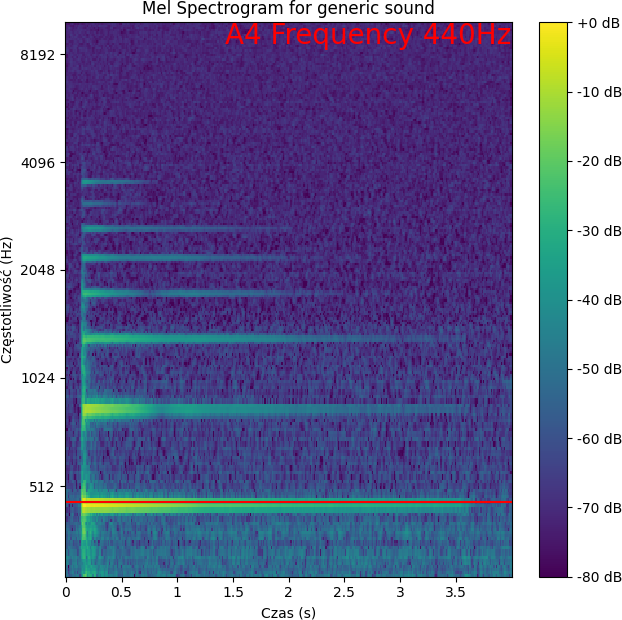


*Rys 2.6 – Wizualizacja zjawiska wygaszania fal stojących*

W instrumencie cyfrowym zjawiska te nie mają miejsca, ponieważ dźwięk wydobywa się przez głośniki urządzenia, co powoduje brak zachodzenia modulacji fal dźwiękowych. Skutkuje to gorszą jakością danych, ponieważ wydobywane są tylko niektóre harmoniczne, charakteryzujące specyfikację danego brzmienia. Dzięki udostepnieniu fortepianów przez Akademię Muzyczną im. Stanisława Moniuszki w Gdańsku zebrane dane dźwiękowe z instrumentów akustycznych, w celu poprawienia precyzji modelu. [po przeprowadzeniu badań opiszę te instrumenty oraz ponownie podczas opisywania zbierania danych]

### 2.1.2. MEL-spektrogramy

Spektrogramy MEL różnią się od zwykłych spektrogramów tym, że są przedstawiane na skali logarytmicznej.

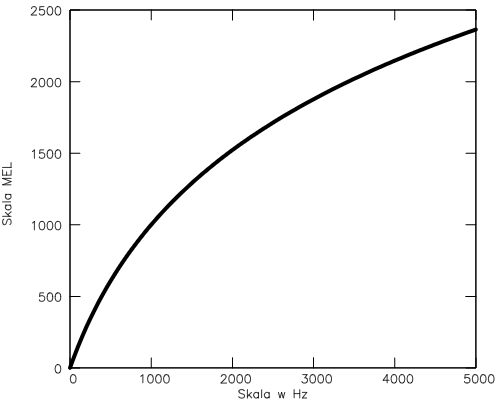


*Rys 2.7 – przykład spektrogramu MEL stworzony z danych treningowych dla barwy „generic”*

Skala ta jest wyliczona ze wzoru (2.3) [6]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.3) |

Gdzie jest skalą logarytmiczną normalnej skali częstotliwości .



*Rys 2.8 – przykład funkcji skali melowej*

Spektrogramy MEL są niezwykle skuteczne w rozpoznawaniu dźwięku oraz modelowaniu subiektywnej zawartości wysokości i częstotliwości sygnałów audio. Dzieje się tak za pomocą przedstawionej powyżej skali logarytmicznej, która pozwala na przedstawienie dźwięku za pomocą spektrogramu w klarowniejszy sposób. Dzięki temu zawrzeć możemy na wykresie więcej intensywniejszych częstotliwości harmonicznych, a same dane nie nachodzą na siebie, co nie będzie powodowało artefaktów w wyodrębnionych cechach charakterystycznych podczas treningu modelu CNN.

Posiadając skalę MEL spektrogramu jesteśmy w stanie zbadać występujące w sygnale cechy MFCC. Cepstrum to odwrotna transformata Fouriera widma sygnału. Opiera się na Fourierowskiej analizie sygnału wyrażonego w skali decybelowej (logarytmiczna skala Mel przedstawiona wzorem numer 3) [8] [9]. Sygnał analizowany jest za pomocą transformacji Fouriera, opisanej w podrozdziale 2.1.3. Cepstrum postrzegane jest jako informacja o prędkości zmian w poszczególnych pasmach częstotliwości widma o znanej funkcji. Służy do analizy widma akustycznego [10]. W przypadku tego projektu analiza jest oparta o występujące częstotliwości, ponieważ w każdym przypadku występuje dźwięk bazowy o tej samej częstotliwości, a mianowicie 440Hz. Przez wygaszanie fal w instrumencie dźwięk jest tłumiony po pewnym czasie, więc zebrane częstotliwości nie nachodzą na siebie. Dzięki cepstrum możliwe jest sporządzenie wykresu nasilenia występujących częstotliwości w zależności od czasu trwania dźwięku.

### 2.1.3. Transformata Fouriera

Analiza Fourierowska sygnału pozwala na analizę jego składowych, których wypadkowa funkcja będzie tożsama z badaną. Jest to niezbędny etap projektów, ponieważ mimo iż częstotliwość dźwięków jest taka sama, to różnice w ich brzmieniu są spowodowane różnymi intensywnościami występujących składowych harmonicznych. Różnice te zostały dokładnie opisane w podrozdziale 2.1.4.

Sygnały mogą zostać podzielone za pomocą kryterium opisujące ich zmienność w czasie. Za pomocą takiej segregacji możemy je opisać jako stacjonarne oraz niestacjonarne. Sygnały stacjonarne nie podlegają zmianom w trakcie ich trwania, a z kolei niestacjonarne ulegają różnym zjawiskom, takim jak: wzmacnianie, wygaszanie oraz inne zjawiska powodujące możliwość określenia składowych sygnałów polegając jedynie na prawdopodobieństwie [11]. Tradycyjna transformata Fouriera może zostać opisana za pomocą poniższego równania (2.4) dla ilości próbek sygnału [12]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.4) |

Gdzie jest jednym z zespolonych pierwiastków sygnału a jest jednostką urojoną. Dla i indeksy oraz należą do przedziału .

Dzięki takiej operacji, istnieje możliwość zbadania cech charakterystycznych składowych oryginalnego sygnału. Badany sygnał jest sygnałem niestacjonarnym, ponieważ w trakcie jego trwania podlega wygaszaniu; z powodu sił fizycznych działających na strunę zmniejsza ona w czasie amplitudę swoich drgań. Aby móc dokładnie zanalizować zmienny sygnał, konieczne jest wzięcie pod uwagę parametru czasowego dzięki któremu jesteśmy w stanie przeprowadzić analizę, biorąc pod uwagę zmianę sygnału w czasie. Stosując takie rozwiązanie możemy użyć krótkookresowej transformacji Fouriera (STFT), dzięki której jesteśmy poznać parametry sygnału w ramach chwili . Równanie opisujące tą transformatę to [11]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.5) |

Gdzie to sygnał w chwili obserwowalny w wybranej ramie czasowej, z czego funkcja pozwala na anihilację funkcji znajdującej się poza danym oknem czasowym. Opisana dokładniej w podrozdziale 2.3.2, biblioteka języka python librosa pozwala na tworzenie spektrogramów melowych za pomocą STFT [13] dostosowując parametry funkcji.

### 2.1.4. Analiza dźwięku

Analiza dźwięku polegała na znalezieniu różnic w cechach występujących częstotliwości. Dokonano tego analizując dane wstępne, zebrane z instrumentu cyfrowego. Zestawiono ze sobą wykresy i porównano ich cechy charakterystyczne. Poniżej przedstawiono te spektrogramy melowe dla trzech klas.

## 2.2. Sztuczne sieci neuronowe

### 2.2.1. Działanie oraz zastosowanie sztucznych sieci neuronowych

### 2.2.2. Konwolucyjne sieci neuronowe i ich zastosowanie w projekcie

### 2.2.3. Framework Teachable machines

## 2.3. Język programowania Python

### 2.3.1. Charakterystyka języka

### 2.3.2. Wykorzystane biblioteki

## 2.4. Urządzenia embedded

### 2.4.1. Ogólna charakterystyka

### 2.4.2. RaspberryPi

# 3. PRZEBIEG BADANIA I METODOLOGIA

Gdyby podczas badań bądź użytku pojawiła się inna częstotliwość niż badana postanowiono dodać trzecia kategorię brzmienia pod nazwą „niekreślone”. Po zebraniu danych dźwiękowych zamieniono je na dane liczbowe używając transformaty Fouriera, a następnie sporządzono z nich MEL-spektrogramy. Po zauważeniu różnic w występujących częstotliwościach harmonicznych oraz ich intensywnościach, zebrano próbki dźwiękowe z pianina cyfrowego dla każdego z brzmień, przygotowano model konwolucyjnej sieci neuronowej a następnie wytrenowano go przy użyciu MEL-spektrogramów, w ilości 240 plików dla każdego z przypadków. Dla przygotowanego modelu w języku Python została napisana aplikacja analizująca dźwięk instrumentu klawiszowego, informująca o predykcji klasy oraz pewności modelu podana w procentach. Została również zaimplementowana graficzna pomoc w obsłudze oraz wyświetlanie MEL-spektrogramu próbki. Jako urządzenie obliczeniowe, które pozwoliłoby na budowę przenośnego urządzenia o możliwości wyświetlania graficznych funkcjonalności aplikacji, wykorzystano jednopłytkowy komputer RaspberryPi model 4B.

## 3.1. Dane

### 3.1.1. Pozyskiwanie danych

### 3.1.2. Analiza

### 3.1.3. Przygotowanie zbiorów treningowych

## 3.2. Stworzenie modelu sieci neuronowej

## 3.3. Aplikacja do klasyfikacji dźwięku

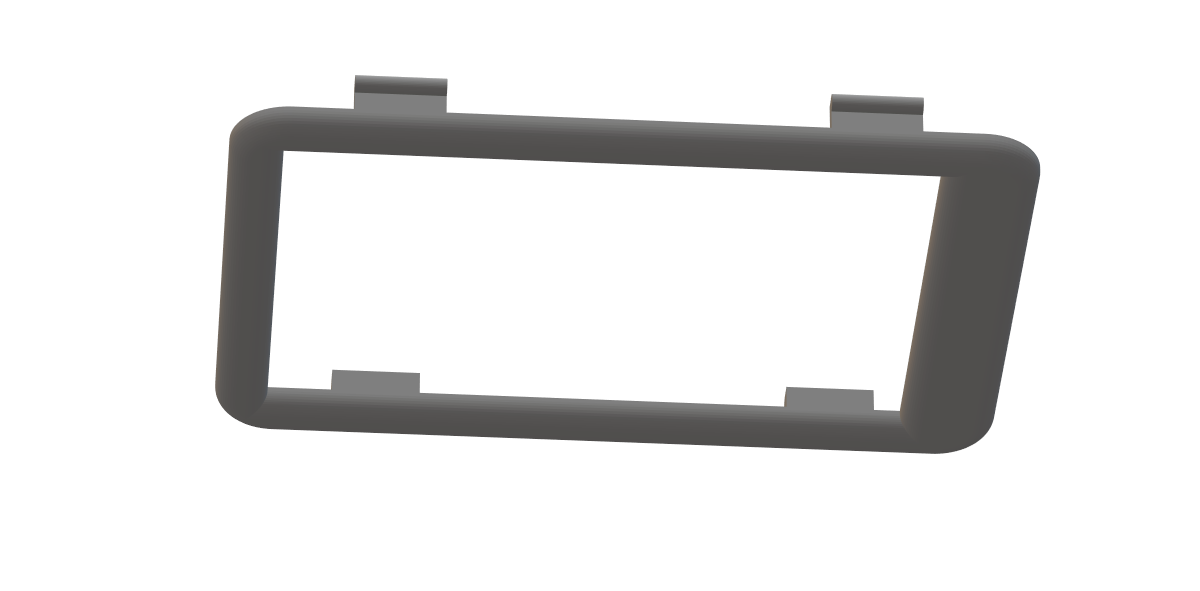
### 3.3.1. Struktura i działanie aplikacji

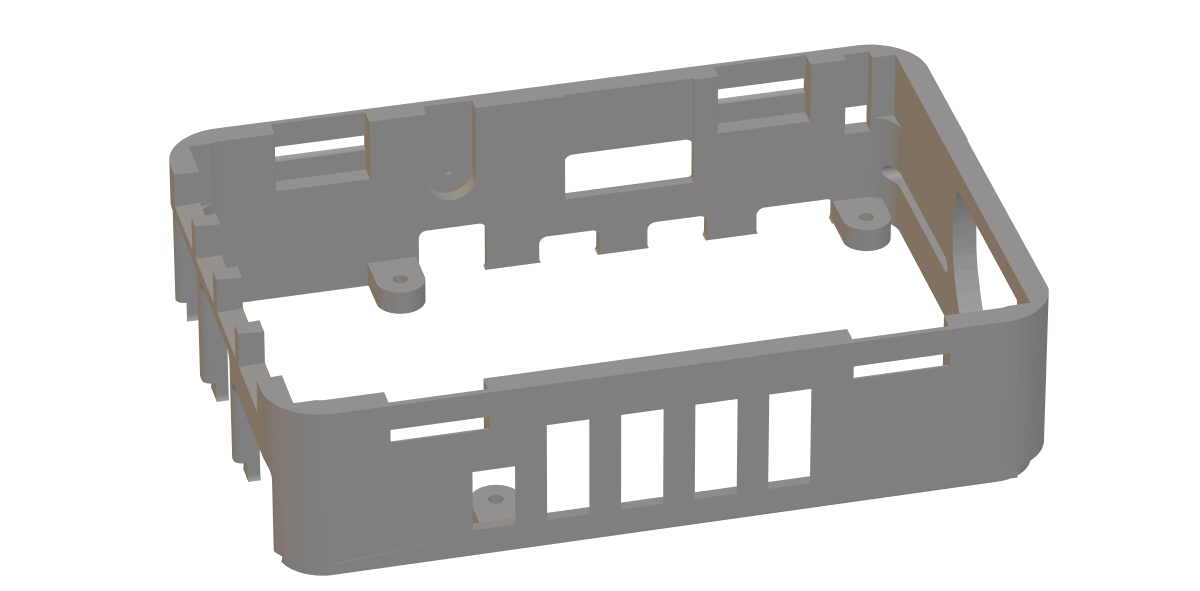
### 3.3.2. Elementy graficzne

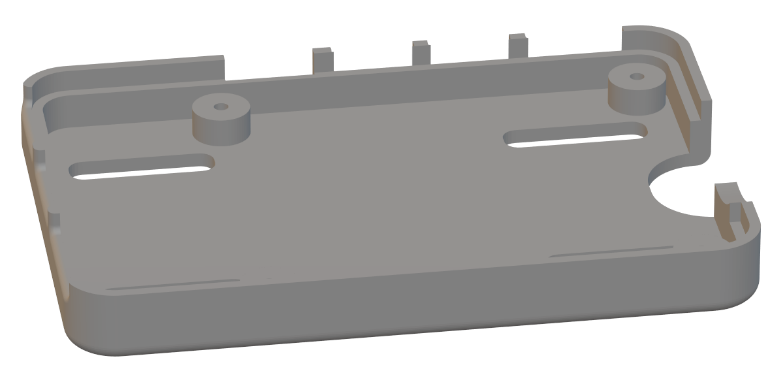
### 3.3.3. Implementacja i funkcjonalność modelu sieci

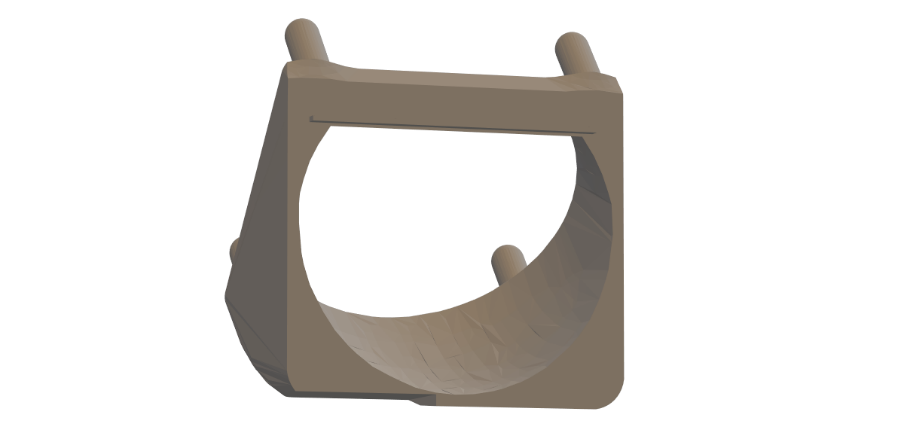
## 3.4. Obudowa urządzenia

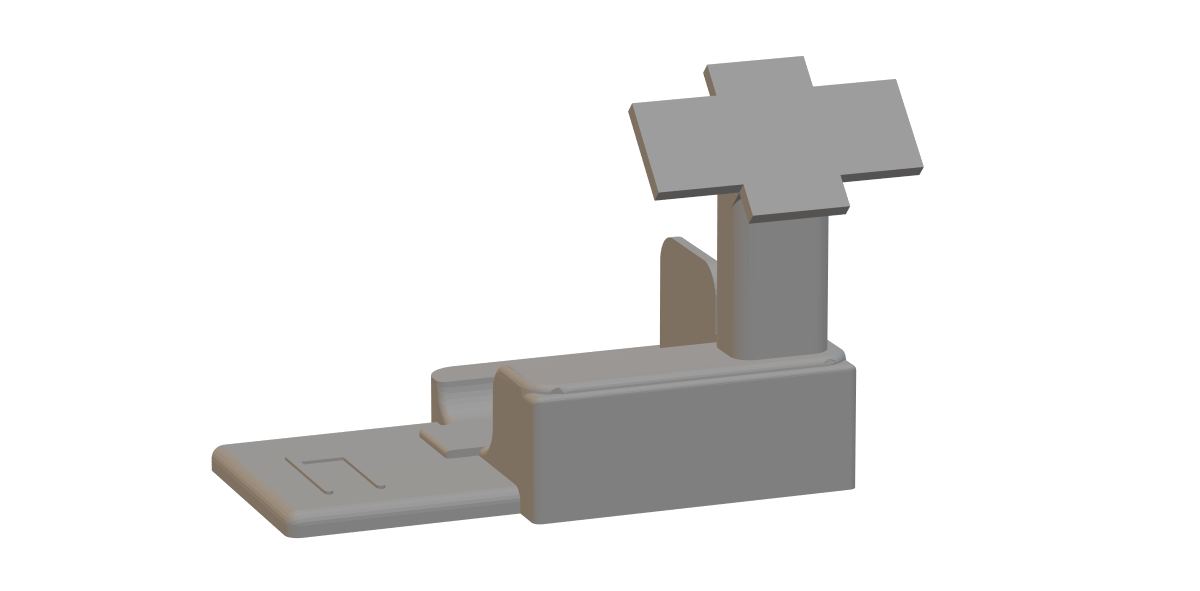
Obudowa oraz stelaż dla urządzenia zostały przygotowane w programie do modelowania 3D oraz wydrukowane na drukarce 3D, używając materiału PET-G. Poszczególne elementy oraz złożony projekt zostały przedstawione na rysunkach poniżej.

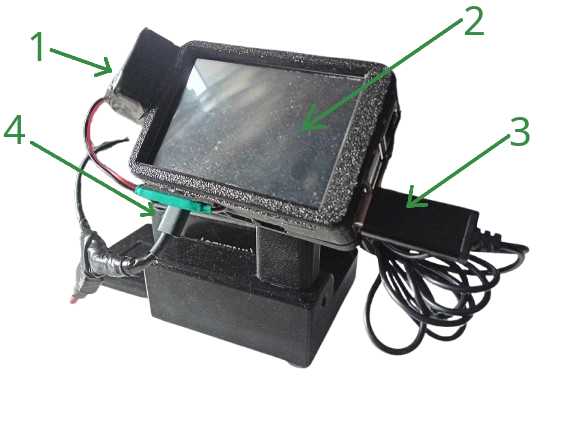












# 4. PODSUMOWANIE

# WYKAZ LITERATURY

[1] Casati R., Dokic J., Sounds, Stanford Encyclopedia of Philosophy, CSLI, Stanford University.

[2] Fundamentals of Telephone Communication Systems. Western Electrical Company.

[3] https://www.if.pw.edu.pl/~anadam/WykLadyFO/FoWWW\_13a.html [04.03.2025]

[4] https://home.agh.edu.pl/~kakol/efizyka/w13/main13e.html [04.03.2025]

[5] https://zpe.gov.pl/a/przeczytaj/DdtkgmBMy [04.03.2025]

[6] Min Xu, Ling - Yu Duan, Jianfei Cai, Liang-Tien Chia, Changsheng Xu2 and Qi Tian, „HMM-Based Audio Keyword Generation”

[7] Fang Zheng, Guoliang Zhang and Zhanjiang Song (2001), „Comparison of Different Implementations of MFCC”

[8] Reflecting on Echoes and the Cepstrum: A Look at Quefrency Alanysis and Hearing [11.03.2025]

[9] APD Politechniki Warszawskiej - MFCC: [11.03.2025] https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://p ages.mini.pw.edu.pl/~rafalkoj/www/%3Fdownload%3DAPD%2520- %2520MFCC.pdf&ved=2ahUKEwiXxIekt4KMAxXqPRAIHRCoH2wQFnoECBgQAQ& usg=AOvVaw1FpNVb78NoHxvCEKNCJDCG

[10] Grzegorz Graczyk, Andrzej Stasiak, „Analiza częstotliwości podstawowej dźwięku”, Serwis Wayback machine[11.03.2025]

[11] Artur Zacniewski, „Analiza porównawcza wybranych transformat

w kontekście zobrazowania zaszumionego sygnału harmonicznego”

[12] Centrum pomocy MatLab - https://www.mathworks.com/help/matlab/math/fourier- transforms.html [17.03.2025]

[13] Dokumentacja biblioteki librosa - [21.03.2025] https://librosa.org/doc/main/generated/librosa.feature.melspectrogram.html

# WYKAZ RYSUNKÓW

Rys 2.1 – http://www.strojenie-pianin.pl/index.php?strona=historia [04.03.2025]

Rys 2.2 – materiały własne

Rys 2.3 – materiały własne

Rys 2.4 – https://pl.yamaha.com/pl/products/musical\_instruments/pianos/arius/ydp-

143/index.html [04.03.2025]

Rys 2.5 – materiały własne

Rys 2.6 – materiały własne

Rys 2.7 – materiały własne

Rys 2.8 – materiały własne

# WYKAZ TABEL

# Materiały dodatkowe: Repozytorium projektu

https://github.com/Kiryl24/Master-thesis-project