



Praca dyplomowa inżynierska

Przetwarzanie głosu w modelu hełmu Szturmowca
Voice processing in Stormtrooper helmet model

Autor: Bartosz Trela

Kierunek Studiów: Inżynieria Akustyczna

Opiekun Pracy: dr inż. Marcin Witkowski

Spis treści

1 Wstęp teoretyczny	1
1.1 Wstęp	1
1.2 Cel i założenia pracy	2
2 Dostępne modele Hełmu imperialnego Szturmowca	4
2.1 Star Wars Black Series - Stormtrooper	4
2.2 Rubie's Collector's Helmet	5
2.3 Przegląd rozwiązań	6
3 Przegląd literatury	7
3.1 Definicje wykorzystywane w pracy	7
3.2 Druk 3D	8
3.2.1 Technologie druku 3D	9
3.2.2 Wybrane materiały wykorzystywane do druku 3D	10
4 Część praktyczna projektu	11
4.1 Zdefiniowanie docelowego brzmienia szturmowca	11
4.1.1 Nagranie mowy nieprzetworzonej	12
4.1.2 Określenie łańcucha efektów oraz ich parametrów	13
4.2 Techniczne informacje o Raspberry Pi i częściach elektronicznych użytych w projekcie	15
4.2.1 Mikrokomputer	16
4.2.2 Zasilanie	17
4.2.3 Głośnik	17
4.2.4 Mikrofon	18
4.3 Oprogramowanie	18
4.3.1 Python i PyAudio	18
4.3.2 C++ i JUCE	18
4.4 Praktyczne testy oprogramowania i przygotowanego toru akustycznego	20
4.4.1 Eliminacja pętli akustycznego sprzężenia zwrotnego – komora na głośnik	21
4.4.2 Rozwiążanie problemu zbyt niskiej głośności wyjściowej	23

4.5 Wykonanie hełmu z użyciem technologii druku 3D	23
4.5.1 Wybór materiału i technologii druku	23
4.5.2 Złożenie hełmu	24
5 Weryfikacja i wyniki pomiarów	25
5.1 Analiza brzmienia głosu modelu	28
6 Podsumowanie i wnioski	33
6.1 Dalsze prace	34
Bibliografia	36

1 Wstęp teoretyczny

1.1 Wstęp

Projekt opisany w niniejszej pracy inżynierskiej skupia się na opracowaniu od podstaw prototypu hełmu, zawierającego moduł przetwarzania głosu, w celu upodobnienia go do brzmienia głosu szturmowców z serii filmów Gwiezdne Wojny. Głównym celem projektu było stworzenie w pełni funkcjonalnego urządzenia, które spełniałoby oczekiwania hobbystów, kolekcjonerów oraz osób pragnących odtworzyć ulubione fragmenty filmowe z zachowaniem autentyczności oprawy audiowizualnej.

Gwiezdne Wojny to jedna z najbardziej rozpoznawalnych franczyz filmowych na świecie, zapoczątkowana w 1977 roku przez George'a Lucasa premierą filmu Gwiezdne Wojny: Część IV – Nowa nadzieja. Elementem ikonicznym tego uniwersum są szturmowcy, których wizerunek – w tym charakterystyczny hełm – stał się symbolem popkultury.

Pomysł na projekt powstał podczas analizy dostępnych na rynku modeli hełmów szturmowców. Zdecydowana większość z nich znajdowała się powyżej założonego progu cenowego określonego na maksymalnie 600zł. Modele spełniające ten wymóg nie odwzorowywały wiernie wyglądu hełmu. Ponadto istniejące rozwiązania rzadko uwzględniały aspekt modulacji głosu użytkownika, co pozostawia niezaspokojoną lukę w tym obszarze. Więcej detali dotyczących dostępnych opcji zawarto w rozdziale 2.

Głównym założeniem autora było przeprowadzenie pełnego procesu projektowania i produkcji, którego efektem końcowym miał być materialny, gotowy do działania prototyp produktu. W trakcie pracy szczególną uwagę poświęcano funkcjonalności urządzenia, niezawodności oraz precyzji wykonania, aby zrealizowany projekt stanie się nie tylko rozwiązanie techniczne, ale także odpowiedź na potrzeby entuzjastów kultowego uniwersum Gwiezdnych Wojen.

1.2 Cel i założenia pracy

Główym celem pracy było stworzenie i wykonanie materialnego modelu hełmu zdolnego do modulowania głosu użytkownika.

W pracy przyjęto następujące założenia:

1. Prototyp powinien przypominać wyglądem hełm szturmowca z Gwiezdnych Wojen.
2. Brzmienie głosu w odległości 1m przed osobą mającą założony hełm powinno przypominać brzmienie głosu szturmowca z Gwiezdnych Wojen:
 - Latencja przetwarzania w całym torze audio systemu aktywnego przetwarzania nie powinna przekraczać 50ms.
 - Hełm powinien redukować poziom dźwięku głosu użytkownika w określonych zakresach częstotliwości, które nie występują w mowie szturmowca.
 - System powinien być zaprojektowany w sposób eliminujący ryzyko wystąpienia sprzężenia akustycznego w układzie aktywnego przetwarzania dźwięku.
3. Moduł przetwarzania głosu powinien w całości znajdować się wewnątrz modelu hełmu.

W pierwszym rozdziale, zatytułowanym "Wstęp teoretyczny", przedstawiono ogólne zagadnienia związane z tematem oraz zaprezentowano wstępny zarys projektu. Określono także główny cel pracy, przedstawiono założenia, które należy spełnić w trakcie realizacji projektu oraz opis struktury pracy.

W rozdziale drugim dokonano przeglądu dostępnych produktów i rozwiązań oferowanych na rynku, stanowiących inspirację dla opisanego projektu.

Trzeci rozdział zawiera opis najważniejszych definicji potrzebnych do pełnego zrozumienia istoty projektu. Zawarte są w nim informacje na temat narzędzi i metod wykorzystywanych w celu zapewnienia obiektywnej oceny postępu i realizacji projektu.

Czwarty rozdział został podzielony na podrozdziały i opisuje wykonanie projektu. Kolejne sekcje przedstawiają kroki podjęte przy tworzeniu urządzenia. W

pierwszej części rozdziału zdefiniowano docelową charakterystykę brzmienia szturmowca oraz opisano proces rekonstrukcji nagrania mowy, który polegał na określeniu i zastosowaniu odpowiedniego łańcucha efektów. Drugi podrozdział zawiera informacje techniczne na temat komponentów elektronicznych użytych do skonstruowania toru audio. W następnej części rozdziału opisano aplikację implementującą wcześniej zdefiniowany łańcuch efektów w czasie rzeczywistym. Czwarty podrozdział przedstawia proces eliminacji problemów, które wystąpiły podczas tworzenia modelu hełmu:

- Eliminację pętli sprzężenia akustycznego,
- Rozwiążanie problemu niskiego poziomu głośności wyjściowej.

Ostatni podrozdział opisuje proces wykonania bazy hełmu z wykorzystaniem technologii 3D, podjęte decyzje konstrukcyjne oraz złożenie całego projektu w całość.

W rozdziale piątym zweryfikowano stopień realizacji poszczególnych części projektu. Szczegółowo opisano wyniki przeprowadzonych testów i badań, a większą część poświęcono analizie brzmienia głosu modelu.

Rozdział szósty stanowi podsumowanie całej pracy, zawierając analizę zrealizowanych części projektu oraz spełnionych założeń. Wskazano także możliwe kierunki dalszego rozwoju projektu.

Na końcu pracy zamieszczono spis literatury wykorzystanej w trakcie realizacji projektu.

2 Dostępne modele Hełmu imperialnego Szturmowca

Przed rozpoczęciem prac nad budową hełmu wykonano przegląd alternatyw dostępnych obecnie na rynku. Sprawdzono, czy rzeczywiście istnieje realna potrzeba tworzenia projektu hełmu. Zwracano szczególną uwagę m.in. na wizualne podobieństwo do oryginalnego hełmu użytego w filmach. Przede wszystkim jednak odnotowano, czy model wyposażony został w moduł cyfrowego przetwarzania głosu użytkownika i jeśli tak, to jakiej był on jakości. W tym rozdziale przedstawiono wybrane modele hełmów szturmowca dostępne na rynku, które stanowiły inspirację dla projektu opisanego w niniejszej pracy.

2.1 Star Wars Black Series - Stormtrooper



1

Rysunek 1: Model hełmu firmy Hasbro: "Black Series - Stormtrooper"

Pierwszym i zarazem najbardziej obiecującym modelem dostępnym do zakupu był hełm "Star Wars Black Series - Stormtrooper" wykonany przez firmę Hasbro (koszt ok. 860zł). Pod względem wizualnym była to wiernie odwzorowana replika oryginalnego hełmu, wykonana z dbałością o szczegóły. Jest to również jeden z niewielu pro-

duktów, przy którym podjęto próbę modulacji głosu użytkownika. Videorecenzje²³ użytkowników, którzy zakupili tego typu hełm, pokazały jednak, że pod względem przetwarzania audio nie jest on jednak wykonany najlepiej. Pierwszym widocznym problemem jest montaż wyjścia modułu zmieniającego głos w tylnej części hełmu. Samo przetwarzanie sygnału zastosowane w modelu praktycznie nie jest słyszalne w polu przed użytkownikiem, zatem nie spełnia założeń postawionych w niniejszej pracy.

2.2 Rubie's Collector's Helmet



Rysunek 2: Model hełmu od producenta Rubie: "Collector's Helmet"

Zaletą kolejnego modelu⁴ jest niewątpliwie jego relatywnie niska (ok. 500zł) cena w porównaniu do konkurencji. Wizualnie model nie jest jednak wiernym odwzorowaniem oryginalnego hełmu. Produkt nie został również wyposażony w żaden moduł pozwalający na modulację głosu, co jest jednym z głównych celów pracy. Oznacza to, że ten produkt nie spełnia założeń postawionych w projekcie.

²<https://youtu.be/GjHivmNUNmI?si=3TD1ML0-Yy-auDnR>, Dostęp: 26.12.2024

³<https://youtu.be/YliR7dVSoUk?si=MdGwtAWhdлизKBvA>, Dostęp 26.12.2024

⁴https://www.amazon.pl/Star-Wars-integralny-rozmiar-uniwersalny/dp/B00J43ZC8E?source=ps-sl-shoppingads-lpcontext&ref_=fplfs&psc=1&smid=A2R2221NX79QZP, Dostęp 26.12.2024

2.3 Przegląd rozwiązań

Znaczna część modeli(np. Denuonovo⁵) dobrze imituje oryginalny hełm szturmowca pod względem wizualnym. Niestety znaleziono tylko jeden produkt, w którym podjęto próbę upodobnienia głosu użytkownika do szturmowca. Większość entuzjastów jest zmuszona do kupowania modułów zmieniających głos, takich jak na przykład Stormtrooper Voice Amplification Unit, sprzedawany przez Stormtrooper Store USA. By następnie zamontować go wewnątrz hełmu. Próbę skonstruowania kompleksowego modelu wyposażonego w taki moduł uznano więc za uzasadnioną.



Rysunek 3: Moduł wzmacniania głosu szturmowca Stormtrooper Store: "Stormtrooper Voice Amplification Unit"

⁵<https://www.denuonovo.com/products/star-wars-classic-imperial-stormtrooper-helmet#description-flex>

3 Przegląd literatury

3.1 Definicje wykorzystywane w pracy

Widmowa gęstość mocy (Power Spectral Density) Również gęstość widmowa, gęstość widmowa mocy - funkcja używana do analizy częstotliwościowej sygnałów losowych. Dla sygnałów cyfrowych stosuje się metodę Welch'a do estymaty PSD jako wartości oczekiwanej z widma krótkoczasowego [10].

Gęstość widmowa jest użyteczna w projekcie ze względu na fakt, że uśrednia ona widma z wielu segmentów sygnału. Ta procedura zmniejsza wariancję i zapewnia bardziej stabilne wyniki niż jednorazowe zastosowanie algorytmu FFT. PSD zostało wyliczone w projekcie w rozdziałach 4.1.2, oraz 5.

Dwie poniższe definicje zostały wykorzystane do opisu wykresów w rozdziale 5.

Rezonans akustyczny To zjawisko, w którym układ akustyczny (np. pomieszczenie, instrument muzyczny lub inny obiekt) powoduje intensyfikację dźwięków o specyficznych częstotliwościach, nazywanych częstotliwościami rezonansowymi. Występuje ono wtedy, gdy częstotliwość działającego bodźca zewnętrznego zbiega się z naturalną częstotliwością drgań układu, co skutkuje zwiększeniem amplitudy tych drgań [2].

Przesłuch (ang. crosstalk) w akustyce to zjawisko, w którym dźwięk emitowany przez jedno źródło jest odbierany przez inne, niezależne źródło lub kanał, powodując niepożądane zakłócenia. Zjawisko to występuje mimo fizycznej separacji między źródłami, jeżeli fale dźwiękowe mogą propagować się w przestrzeni z podobną prędkością, przenikając między kanałami lub przestrzeniami [5].

Energia sygnału To wskaźnik całkowitej "ilości energii" przekazywanej przez sygnał w danym okresie. W przypadku sygnałów matematycznych lub elektronicznych energia obliczana jest jako suma kwadratów wartości sygnału w czasie [10]. Energia sygnału pozwala na ocenę, jak duży wpływ ma dany sygnał w określonym czasie w rozdziałach 4.4.1 oraz 5.

Akustyczne sprzężenie zwrotne Jest to zjawisko powstające, gdy dźwięk generowany przez głośnik (lub inne źródło dźwięku) zostaje przechwycony przez mikrofon (lub inne urządzenie rejestrujące), a następnie z powrotem wzmacniony, tworząc cykliczny proces. Ten cykl może prowadzić do niekontrolowanego wzrostu poziomu dźwięku, który często objawia się w postaci niepożądanych pisków lub hałasu. Przyyczyny powstawania akustycznego sprzężenia zwrotnego:

- Bliskość mikrofonu do głośnika: Im mniejsza odległość między mikrofonem a głośnikiem, tym większe ryzyko, że dźwięk z głośnika zostanie przechwycony przez mikrofon i ponownie wzmacniony, co może prowadzić do sprzężenia zwrotnego.
- Czułość mikrofonu oraz poziom wzmacnienia: Wysoka czułość mikrofonu oraz ustawienie wysokiego wzmacnienia w systemie audio mogą sprzyjać powstawaniu tego zjawiska.
- Odbicia dźwięku w ośrodku: W przestrzeniach o nieodpowiedniej akustyce dźwięk może odbijać się od ścian i innych powierzchni, co również może przyczyniać się do powstania sprzężenia zwrotnego [2].

Powyżej opisane zjawisko wystąpiło w trakcie pracy nad projektem. W rozdziale 4.4.1 opisano, w jaki sposób zminimalizowano szanse na jego wystąpienie.

Mikrokomputer to układ elektroniczny z mikroprocesorem w roli jednostki centralnej. Zawiera główne elementy komputera, takie jak procesor, pamięć czy system operacyjny, na jednym lub kilku układach scalonych. Ich cechą charakterystyczną są niski pobór mocy, niewielkie rozmiary oraz stosunkowo niskie koszty. Często znajdują zastosowanie w urządzeniach domowych, w automatyce lub edukacji [1].

3.2 Druk 3D

Waczną częścią projektu było stworzenie prototypu hełmu wyglądającego zgodnie z oczekiwaniami. Jednym z możliwych sposobów na wykonanie fizycznego hełmu szturmowca są różne technologie druku 3D. Poniżej opisano niektóre z nich oraz skupiono się na finalnie wybranej do wykonania projektu.

3.2.1 Technologie druku 3D

Druk 3D w technologii FDM (Fused Deposition Modeling) polega na nakładaniu cienkich warstw stopionego materiału termoplastycznego i w ten sposób wytworzaniu obiektu. Materiał w formie filamentu jest dostarczany do podgrzewanej dyszy, która precyjnie osadza go na stole roboczym zgodnie z zaprogramowaną trajektorią. Po ostygnięciu materiału warstwa zostaje trwale utwardzona, połączona z poprzednią, tworząc finalny model. Technologia FDM charakteryzuje się prostotą, dostępnością oraz możliwością stosowania szerokiej gamy materiałów, między innymi PLA, PET-G czy ABS, które dokładniej opisano w rozdziale 3.2.2.

Zdecydowano się wykorzystać tę technologię głównie ze względu na wytrzymałość oraz trwałość wydruków wykonywanych z wykorzystaniem tej technologii - w szczególności z użyciem materiałów takich jak ABS, PET-G [8].

Druk 3D w technologii SLA (Stereolithography) opiera się na wykorzystaniu wiązki lasera lub światła UV w celu selektywnego utwardzenia płynnej żywicy fotopolimerowej. Proces polega na naświetlaniu kolejnych warstw materiału w miejscach, które odpowiadają przekrojowi drukowanego obiektu, powodując ich polimeryzację i utwardzenie. Następnie model jest wyjmowany z kadzi z żywicą w celu dalszej obróbki, np. dodatkowym utwardzaniu w świetle UV. SLA wyróżnia się wysoką precyzją, gładką powierzchnią wydruków i możliwością tworzenia skomplikowanych detali [8].

Nie zdecydowano się jednak na użycie tej technologii ze względu na kilka czynników.

- Niższa niż w przypadku użycia technologii FDM trwałość wydruków.
- Możliwa przy zastosowaniu tej technologii wysoka dokładność detali nie jest wymagana w tym projekcie.
- Wyzsza, według analizy znanego dostawcy filamentów Formlabs, cena materiałów stosowanych przy druku w technologii SLA w porównaniu z FDM.

Temperatura zeszklenia (oznaczenie to T_g) to temperatura, w której materiał, jak szkło lub tworzywo sztuczne, ogólnie nazywane amorficznym, przestaje być

twardy i kruchy i staje się elastyczny i plastyczny, jednak jeszcze nie płynny. W tej pracy ten punkt temperaturowy jest niezmiernie istotny, gdyż zdefiniował on, z jakiego materiału zostaną wykonane soczewki. Dokonano tego poprzez znalezienie materiału dla soczewek o temperaturze zeszklenia zbliżonej do materiału hełmu, co pozwoliło uformować ich kształt w przeznaczonym na nie miejscu, idealnie je dopasowując w łatwy sposób [8].

3.2.2 Wybrane materiały wykorzystywane do druku 3D

W tym podrozdziale opisano wybrane materiały wykorzystywane w druku 3D. Szczegółowe omówienie finalnie użytego materiału zamieszczono w rozdziale 4.5.1

PET-G (Polyethylene Terephthalate Glycol-modified) jest modyfikowaną wersją PET (Polyethylene Terephthalate), wzbogaconą o glikol, co nadaje materiałowi większą elastyczność i odporność na pęknięcia. Materiał ten łączy w sobie właściwości wytrzymałościowe i łatwość drukowania. PET-G cechuje się wysoką odpornością chemiczną, wilgocią i temperaturą, dzięki czemu znajduje zastosowanie w elementach technicznych, a także przedmiotach użytkowych. Temperatura zeszklenia: ok. 80°C [8].

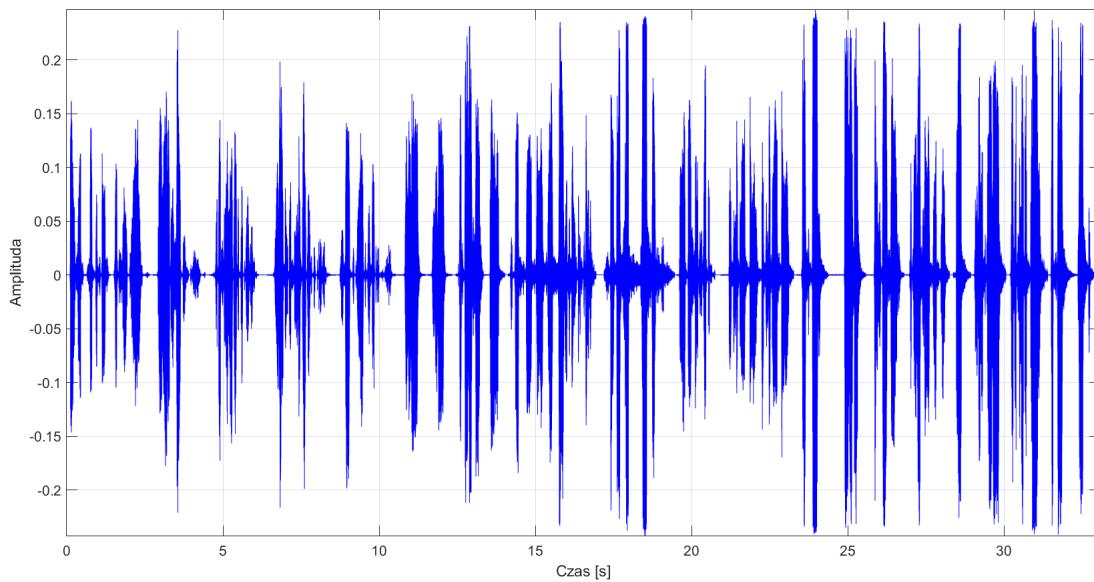
ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) jest materiałem termoplastycznym, który charakteryzuje się wysoką wytrzymałością mechaniczną i odpornością na uderzenia. Jego cechy czynią go idealnym do zastosowań przemysłowych i prototypowania. Drukowanie z ABS wymaga wyższej temperatury oraz zamkniętej komory roboczej, aby uniknąć deformacji wynikających z kurczenia się materiału podczas stygnięcia. Temperatura zeszklenia: ok. 105°C [8].

PLA (Polylactic Acid) to biodegradowalny materiał termoplastyczny produkowany z odnawialnych surowców, takich jak skrobia kukurydziana. Jest łatwy w drukowaniu dzięki niskiemu skurczowi i niskiej temperaturze przetwarzania. PLA jest popularny w zastosowaniach hobbyistycznych i edukacyjnych, jednak jego ograniczenia to stosunkowo niska odporność termiczna i mechaniczna w porównaniu z innymi materiałami, takimi jak ABS czy PET-G. Temperatura zeszklenia: ok. 60°C [8].

4 Część praktyczna projektu

4.1 Zdefiniowanie docelowego brzmienia szturmowca

Według autora pracy, w celu utworzenia urządzenia modulującego głos na wzór brzmienia głosu szturmowca, najlepszym podejściem byłoby powtórzenie technik wykorzystanych podczas nagrań na planie filmowym Gwiezdnych Wojen. Z uwagi na charakterystykę pracy nad obróbką dźwiękową przy tego typu dużych produkcjach filmowych, informacje o procesie kształtowania brzmienia głosu szturmowców nie są jednak ogólnie dostępne. Na podstawie książki "The Sounds of Star Wars" [7], w której główny inżynier dźwięku na Planie Gwiezdnych - Ben Burtt omawia proces powstawania dźwięków, możemy stwierdzić, że Szturmowcy swoje charakterystyczne brzmienie uzyskali dzięki zastosowaniu w nagraniach mikrofonów węglowych. Poza tym nie udało się jednak znaleźć rzetelnych źródeł dotyczących technik realizacji nagrań. Ze względu na fakt, że różni aktorzy używali głosu filmowego Szturmowcom, nie jest możliwe jednoznaczne określenie jednego, konkretnego docelowego brzmienia. Ostatecznie postanowiono więc wykorzystać ogólnie dostępne „oryginalne nagrań mowy”⁶ szturmowców jako główny punkt odniesienia.



Rysunek 4: Oscylogram oryginalnych nagrań mowy szturmowców używanych w pracy

Na rysunku 4 przedstawiono trwający 33s przebieg amplitudy oryginalnych nagrań w funkcji czasu.

⁶<https://youtu.be/BQj6apGax0Y?si=EJ1M1Cvzc2CS8hqu>, Dostęp 28.12.2024

4.1.1 Nagranie mowy nieprzetworzonej

Praca w założeniu powinna przyjmować na wejściu czystą mowę użytkownika hełmu i następnie ją przetwarzać. W celu umożliwienia znalezienia odpowiedniego łańcucha efektów, upodabniającego mowę użytkownika do mowy szturmowca, oprócz nagrania mowy szturmowca potrzebne jest również nieprzetworzone nagranie mowy użytkownika modelu hełmu.

Na podstawie wykonanego transkryptu oryginalnego nagrania mowy szturmowca, przedstawionego na Rysunku 4, wykonano nagrania kwestii wypowiadanych przez autora pracy. Wypowiadane teksty przedstawiono w Tabeli 1.

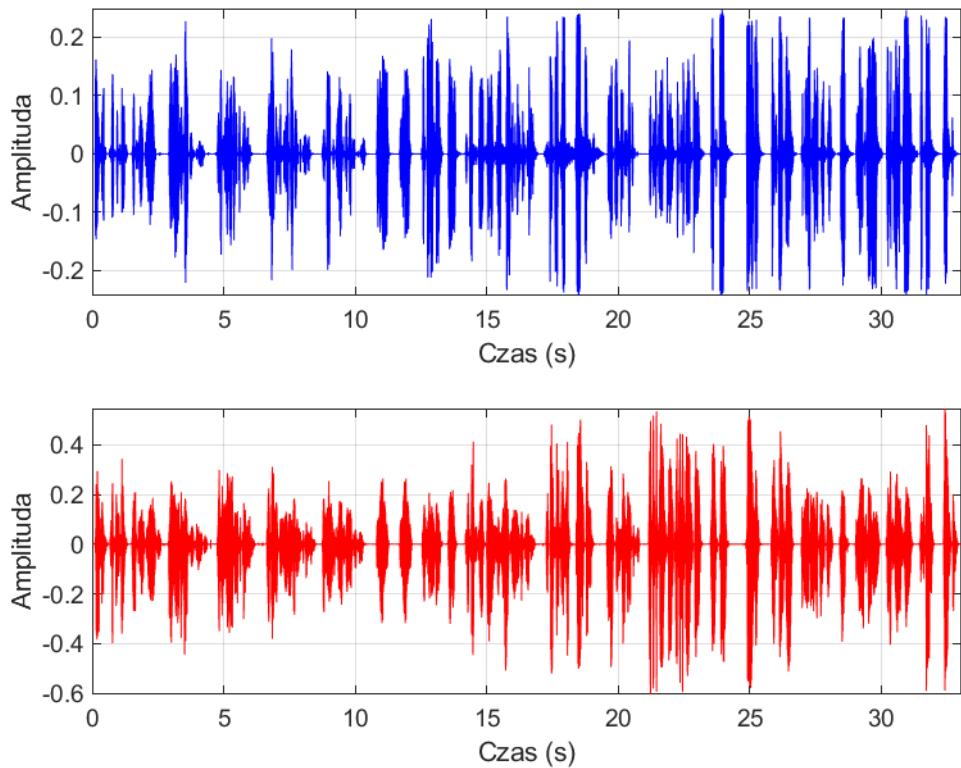
n.p.	Wypowiadane teksty
1	There's one, set for stun.
2	Look, sir, droids.
3	How long have you had these droids?
4	Let me see your identification.
5	We don't need to see his identification.
6	These aren't the droids we're looking for.
7	Move along, move along.
8	There's no one here.
9	Alright.
10	The Death Star plans are not in the main computer.
11	Stop that ship, blast them!
12	Alright, men, load your weapons.
13	Open the blast doors! Open the blast doors!
14	Look, there!
15	Follow me!
16	You stand guard.
17	Give me regular reports please... Right.
18	Do you know what's going on?
19	Maybe it's another drill...
20	It's them! Blast them!

Tabela 1: Lista tekstów wypowiadanych na nagraniu

W celu minimalizacji niedokładności wykonane nagranie jak najbardziej upodobniono do oryginalnego:

- Obydwa nagrania mają ten sam czas trwania - 33s.
- Podczas nagrywania zadbano aby prędkość i intonacja wypowiadanych tekstów obydwu nagrań oraz ich tekst były jak najbardziej zbliżone.

Nagrania wykonano wykorzystując kardioidalny "PROFILE USB Microphone" firmy Sennheiser w pomieszczeniu o niskim czasie pogłosu. Całość zapisano w bezstratnym formacie .wav. Na Rysunku 5 przedstawiono porównanie oscylogramów nagrania mowy autora pracy i oryginalnego nagrania mowy szturmowca.

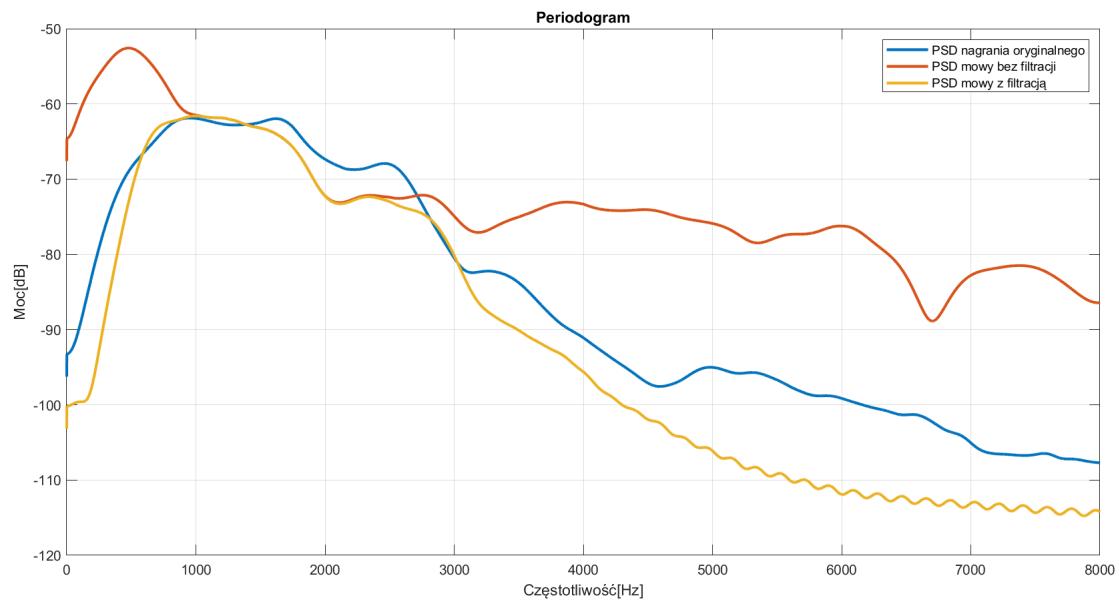


Rysunek 5: Porównanie oscylogramów oryginalnego nagrania mowy szturmowca i nagrania mowy autora pracy

4.1.2 Określenie łańcucha efektów oraz ich parametrów

Jako główne kryterium weryfikacji efektów przetwarzania ustalono zgodność PSD przetworzonego nagrania mowy użytkownika hełmu w zestawieniu z nagraniem oryginalnej mowy Szturmowca. Proces rozpoczęto od wyznaczenia gęstości widmowej

dla poszczególnych sygnałów z nagrania. Dokonano tego bazując na implementacjach dostępnych w środowisku MatLab. Bazując na wyliczonym PSD nagrania oryginalnej mowy szturmowca oraz subiektywnym odbiorze oryginalnego nagrania przez autora pracy zdecydowano się na użycie dwóch filtrów - dolnoprzepustowego i górnoprzepustowego. Oszacowano ich przybliżone częstotliwości odcięcia, a następnie wykonano iteracyjny proces dobrania parametrów filtrów w taki sposób, aby po wykonaniu filtracji na nagraniu mowy autora pracy, różnica norm PSD nagrania oryginalnego i nagrania przetworzonego była minimalna. Sprawdzono częstotliwości odcięcia od 2500Hz do 2900Hz dla filtra dolnoprzepustowego oraz od 500Hz do 900Hz dla filtra górnoprzepustowego. W celu przyspieszenia procesu częstotliwości odcięcia zmieniano co 5Hz.



Rysunek 6: Wykres zestawiający gęstości widmowe nagrań

Ostatecznie częstotliwości odcięcia dla filtrów 5 rzędu z najniższą wartością normy różnicy gęstości widmowych to 755 Hz oraz 2800 Hz. Na Rysunku 6 przedstawiono gęstości widmowe:

1. Wybranego oryginalnego nagrania mowy szturmowca.
2. Nagrania mowy autora.
3. Nagrania mowy autora po zastosowaniu filtrów.

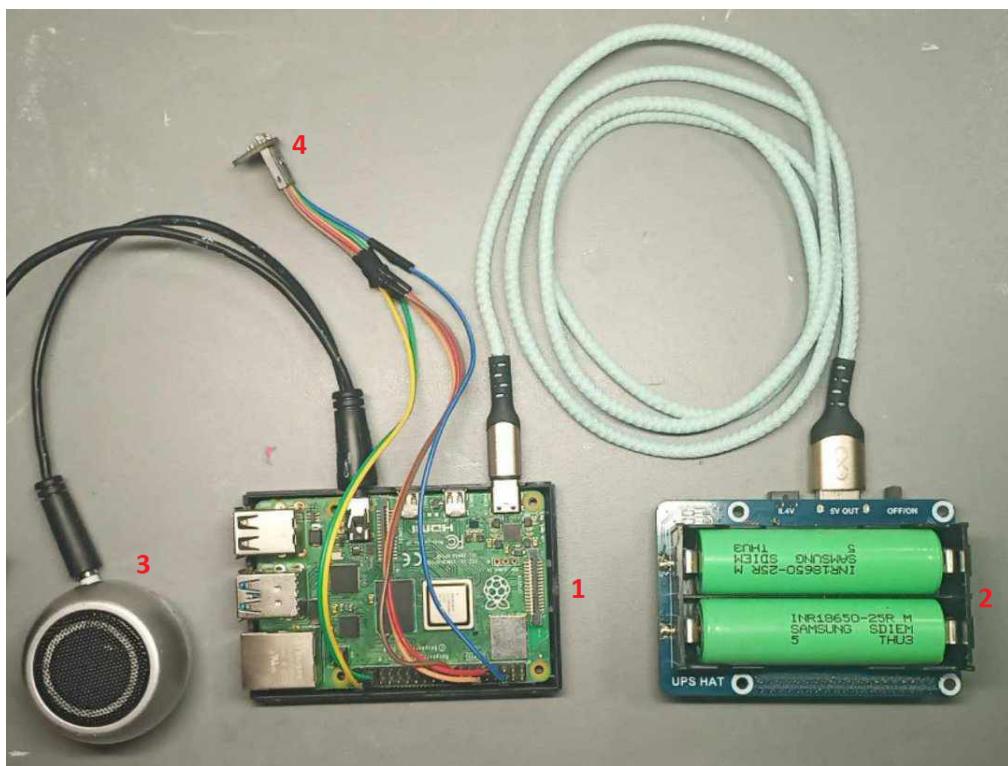
Dokładne wyniki przedstawiono w rozdziale 5.

4.2 Techniczne informacje o Raspberry Pi i częściach elektronicznych użytych w projekcie

Niniejszy podrozdział zawiera opis poszczególnych części układu elektronicznego stworzonego jako jednej z części tej pracy. Ponadto do każdego z podzespołów podano ich specyfikację oraz powód, dlaczego akurat ten podzespół został wybrany i dlaczego spełnia założenia projektowe.

Poniżej na Rysunku 7 przedstawiono finalny układ z ponumerowanymi poszczególnymi podzespołami:

1. mikrokomputer,
2. zasilanie,
3. głośnik,
4. mikrofon.



Rysunek 7: Zdjęcie złożonego toru akustycznego modułu przetwarzającego głos z ponumerowanymi elementami.

4.2.1 Mikrokomputer

Przetwarzanie sygnałów w czasie rzeczywistym może być zadaniem skomplikowanym i wymagającym sprzętowo. W celu zapewnienia płynności pracy zdecydowano się wykorzystać łatwo i ekonomicznie dostępny mikrokomputer Raspberry Pi model 4B. Posiada on odpowiednie specyfikacje, spełniające wymagania postawione w tym projekcie. Jego dodatkową zaletą jest wyposażenie w wyjście audio TRRS 3,5mm, ułatwiające montaż odpowiedniego głośnika.

Aby umożliwić utworzenie modułu do przetwarzania mowy z użyciem Raspberry Pi oraz jego późniejszy montaż w hełmie, niezbędne są: zasilanie, głośnik i mikrofon.

4.2.2 Zasilanie

W projekcie użyto nakładki zasilającej do Raspberry Pi – Waveshare 18306 o cenie około 70zł o napięciu wyjściowym 5V, czyli dokładnie takim, jakie potrzebuje moduł Raspberry Pi do poprawnego funkcjonowania. Część ta pozwala na sztywne umiejscowienie akumulatorów, co znacznie ułatwiło przymocowanie ich do wnętrza hełmu. Ponadto niewielkie rozmiary nakładki - 56 milimetrów szerokości oraz 85 milimetrów długości nie sprawiły problemów w montażu w ograniczonej przestrzeni. Jest ona zasilana za pomocą dwóch akumulatorów litowo-jonowych wysokoprądowych 18650 firmy Samsung o napięciu ładowania 3.6V oraz pojemności 2.5Ah. Zakupione one zostały za kwotę 10zł za sztukę. Nakładki użyto, ponieważ w przeciwieństwie do zwykłej baterii jest ona wyposażona w ochronę przed nadmiernym ładowaniem i rozładowaniem, ochronę nad-prądową oraz ochronę przed zwarciem. Stosując ją, zmniejszamy ryzyko uszkodzenia układu.

4.2.3 Głośnik

Znaleziono i zakupiono produkt o nazwie: "Głośnik do laptopa mini wtyk zewnętrzny stacyjny". Spełnia on większość parametrów, na jakie zwracano uwagę przy doborze odpowiedniego głośnika:

- Odpowiedni rozmiar – ze względu na ograniczone miejsce wewnętrz hełmu, założono maksymalną dopuszczalną średnicę głośnika: 4,5cm.
- Zasilanie – głośnik wyposażony jest w wewnętrzną baterię 3,7V 350mAh pozwalającą mu na niezależne działanie, bez konieczności ciągłego zasilania.
- Cena i dostępność – niski koszt głośnika (32zł) oraz jego łatwa dostępność pozwoliły na zakup 3 sztuk w celach doświadczalnych.
- Moc wyjściowa głośnika - 3W.

4.2.4 Mikrofon

Początkowo podłączono przez USB tani mikrofon elektretowy wymontowany z zestawu biurkowego. Jego zbyt mała kierunkowość oraz częste wzbudzanie pętli sprzężenia zwrotnego w układzie wymusiły jednak jego wymianę na mikrofon typu MEMS - SPH0645LM4H firmy Adafruit o zakresie pracy od 50Hz do 15kHz. Mikrofon ten również spełnił najważniejsze wymagania, czyli niewielki rozmiar, łatwość podłączenia oraz niska cena, około 35zł. Mikrofon zasilono z wykorzystaniem pinów 3,3V oraz Ground dostępnych na Raspberry Pi. Wykorzystanie I2S pozwoliło natomiast na odczyt danych z mikrofonu z użyciem 3 pinów cyfrowych zamiast wyjścia analogowego.

4.3 Oprogramowanie

4.3.1 Python i PyAudio

Pierwsza wersja projektu zakładała napisanie skryptu w języku Python, opartego głównie na bibliotekach NumPy oraz PyAudio.

Wykorzystane funkcje okazały się jednak zbyt wolne. Opóźnienie między mową na wejściu a sygnałem na wyjściu było wyraźnie słyszalne, oszacowane na około 0.7 sekundy. Utrudniało ono płynne składanie sentencji oraz uniemożliwiało zrozumienie mówcy.

4.3.2 C++ i JUCE

Zdecydowano się napisać aplikację w języku programowania niższego poziomu – C++ oraz wykorzystać do tego platformę do budowania aplikacji audio – JUCE [6]. Niestety nie istniała wersja tej platformy przeznaczona do użycia z systemem zainstalowanym na Raspberry Pi. Konieczne było skompilowanie JUCE'a na odpowiedni system (Raspberry Pi OS 64), w krokach:

1. Zainstalowano podstawowe narzędzia do budowania aplikacji oraz biblioteki wymagane do obsługi audio.
2. Pobrano kod źródłowy JUCE'a z oficjalnego repozytorium na GitHub.
3. Zbudowano aplikację.

Następnie napisano i skompilowano aplikację służącą do przetwarzania mowy w czasie rzeczywistym. Aplikację podzielono na trzy główne pliki:

- Main.cpp - Plik główny odpowiadający za inicjalizację aplikacji i otwarcie jej okna, oraz za uruchomienie głównego komponentu aplikacji.
- MainComponent.h – Plik nagłówkowy w którym zdefiniowano klasę MainComponent. Zawarto w nim deklaracje filtrów i metod odpowiedzialnych za przetwarzanie audio.
- MainComponent.cpp - Plik implementacyjny zawierający szczegółowe definicje metod przetwarzających dźwięk w czasie rzeczywistym.

Do najważniejszych części kodu należały:

- `prepareToPlay` - Metoda wywoływana na etapie inicjalizacji przetwarzania. Określano w niej dane takie jak częstotliwość próbkowania, maksymalny rozmiar bloku próbek oraz liczbę kanałów. Metoda przygotowuje filtry do pracy w czasie rzeczywistym definiując ich parametry wyznaczone wcześniej w rozdziale 4.1.2:
 - Częstotliwość odcięcia filtru górnoprzepustowego: 2800Hz
 - Częstotliwość odcięcia filtru dolnoprzepustowego: 755Hz
 - Rząd filtru: 5

```
1 void prepareToPlay(
2     int samplesPerBlockExpected, double sampleRate)
3 {
4     spec.sampleRate = sampleRate;
5     spec.maximumBlockSize = samplesPerBlockExpected;
6     spec.numChannels = 1;
7
8     filterChain.prepare(spec);
9     filterChain.get<0>().coefficients =
10        juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeHighPass(
11            sampleRate, 755.0f, 5.0f);
12     filterChain.get<1>().coefficients =
13        juce::dsp::IIR::Coefficients<float>::makeLowPass(
14            sampleRate, 2800.0f, 5.0f);
15 }
```

- `getNextAudioBlock` - Metoda odpowiadająca za przetwarzanie bloków audio. Pobiera ona blok próbek wejściowych, przepuszcza go przez łańcuch filtrów i zwraca na wyjście przetworzony blok.

```
1 void getNextAudioBlock(
2     const juce:: AudioSourceChannelInfo& bufferToFill)
3 {
4     juce::dsp:: AudioBlock<float> block (*bufferToFill.buffer);
5     juce::dsp:: ProcessContextReplacing<float> context (block);
6     filterChain.process (context);
7     (...)
```

- Ustalono również łańcuch efektów. Składał się on z dwóch filtrów: High-pass i Low-pass.

```
1 juce::dsp:: ProcessorChain<
2     juce::dsp:: IIR::Filter<float>, // High-pass filter
3     juce::dsp:: IIR::Filter<float> // Low-pass filter
4 > filterChain;
```

Ostatnim krokiem było skompilowanie aplikacji do pliku wykonywalnego. Dzięki zastosowaniu frameworka JUCE rozwiązano problem zbyt wysokiej latencji, jaki występował przy pracy z użyciem bibliotek PyAudio w środowisku Python.

4.4 Praktyczne testy oprogramowania i przygotowanego toru akustycznego

Aby spełnione zostały założenia projektu, wykonany moduł przetwarzający głos należało umieścić w specjalnie przygotowanym modelu hełmu Szturmowca. Założono jednak, że proces przygotowania takiego modelu pochłonie dużą ilość materiałów i czasu. Zanim hełm został wykonany, zdecydowano się więc przeprowadzić test działania układu modulującego w praktyce. Całość modułu przetwarzającego głos, w szczególności mikrofon oraz głośnik, zamontowano wewnątrz dostępnego wtedy prototypu hełmu.

Próbne uruchomienie zestawu ukazało 2 problemy:

1. Niewielka odległość pomiędzy głośnikiem i mikrofonem powodowała wzbudzanie się pętli akustycznego sprzężenia zwrotnego.

2. Poziom głośności mowy bezpośredniej był podobny do poziomu głośności mowy przetworzonej, odtwarzanej z głośnika, przez co wysokie częstotliwości tłumione przez tor akustyczny nadal były słyszalne w polu przed modelem hełmu.

4.4.1 Eliminacja pętli akustycznego sprzężenia zwrotnego – komora na głośnik

Proces eliminacji sprzężenia rozpoczęto od zmniejszenia wzmacnienia mikrofonu. Brak pozytywnej zmiany i wzbudzanie się sprzężenia nawet w przypadku braku mowy na wejściu układu wymusiły decyzję o wymianie mikrofonu na mikrofon typu MEMS firmy Adafruit. Ostatecznie podjęto decyzję o konieczności akustycznego odizolowania głośnika od mikrofonu.

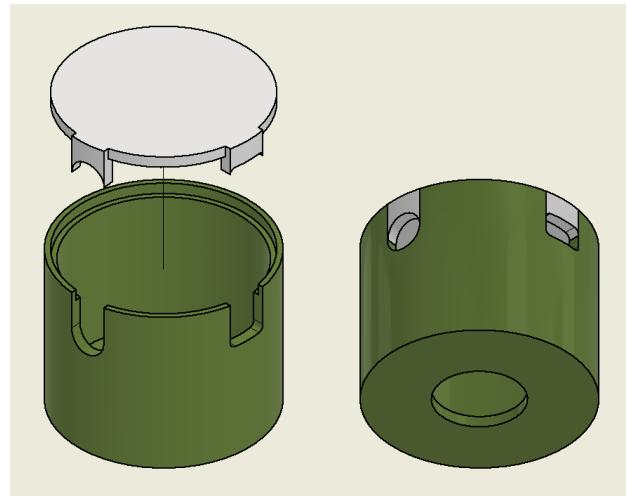
Rozpoczęto od stworzenia punktu odniesienia - nagrania sygnału docierającego z głośnika z powrotem do mikrofonu. Na rysunku 8 na następnej stronie przedstawiono zdjęcie układu pomiarowego. Nagranie wykonano w komorze bezechowej, aby zapewnić minimalny wpływ szumów zewnętrznych na pomiar. Zaprojektowano używając programu Autodesk Inventor, a następnie wydrukowano z użyciem technologii druku 3D specjalną komorę, w której został umieszczony głośnik. Rysunek 9 poglądowy komory zamieszczono dalej w tekście. Projekt kształtu komory musiał przewidzieć dwa otwory na przewody:

- zasilający – do ładowania głośnika,
- audio – do podłączenia głośnika do toru audio

Należało zadbać o zachowanie odpowiednich kątów pomiędzy otworami. W wykonanej komorze umieszczono głośnik, który następnie zalano miękkim silikonem formierskim w celu minimalizacji przenoszenia się drgań na model hełmu. Powtórzono nagranie tego samego sygnału, tym razem z głośnikiem umieszczonym w komorze. Na rysunku 10 na następnej stronie przedstawiono zdjęcie układu pomiarowego z zainstalowaną komorą. Na koniec wyznaczono stosunek energii obydwu nagrań. Różnica poziomów energii wyniosła ok. 15dB. Dokładne wyniki i analizę przedstawiono w rozdziale 5.



Rysunek 8: Układ pomiarowy



Rysunek 9: Eksplodowany schemat zaprojektowanej komory na głośnik



Rysunek 10: Eksplodowany schemat zaprojektowanej komory na głośnik

4.4.2 Rozwiązywanie problemu zbyt niskiej głośności wyjściowej

Rozważano dwa potencjalne rozwiązania problemu ze słyszalnością modulacji: zwiększenie poziomu głośności sygnału modulowanego lub zmniejszenie poziomu głośności mowy bezpośredniej. W celu zwiększenia poziomu dźwięku modulacji należałoby wymienić źródło dźwięku na takie o większej mocy lub dodać kolejne źródło o tej samej mocy. Nie zdecydowano się jednak na to rozwiązanie ze względu na konieczność instalacji oraz podłączenia do Raspberry Pi kolejnego głośnika, co również mogłoby powodować zwiększenie sprzężeń. Zdecydowano się całkowicie uszczelnić przednią część hełmu oraz zwiększyć grubość ścianek hełmu i gęstość ich wypełnienia wewnętrznego w celu poprawy izolacji akustycznej hełmu. W celu weryfikacji zastosowanego rozwiązania przeprowadzono pomiary. Zamontowano w hełmie głośnik odtwarzający 30-sekundowe nagranie tekstu wypowiadanego przez autora pracy i zmierzono poziom ciśnienia akustycznego. Pomiar powtórzono, rejestrując poziom głośnika bez hełmu. Aby ograniczyć wpływ hałasu zewnętrznego, w dniu 13.12.2024 zostały wykonane pomiary w komorze bezechowej. Wszystkie źródła były ustawione centralnie w kierunku mikrofonu pomiarowego, w odległości 1 metra. Do pomiarów wykorzystano miernik poziomu dźwięku SVAN 912E firmy Svantek. Dokładne wyniki przedstawiono w rozdziale 5.

4.5 Wykonanie hełmu z użyciem technologii druku 3D

4.5.1 Wybór materiału i technologii druku

Ostatnim etapem projektu było wykonanie finalnego modelu hełmu. Ze względu na łatwą dostępność i wystarczającą dla projektu dokładność zdecydowano się na wydruk 3D modelu w technologii FDM. Przy wyborze materiału, ABS odrzucono ze względu na większe niż w przypadku alternatyw trudności podczas obróbki. Podjęto decyzję o użyciu PET-G ze względu na jego wyższą niż w przypadku PLA temperaturę zeszklenia, która ułatwia późniejszy proces składania hełmu. Do wydruku wykorzystano dostępny darmowy projekt 3D [9], na którym następnie dokonano potrzebnych modyfikacji, opisanych w następnym podrozdziale. Dostępny model jest pociętą na gotowe do druku części, pomniejszoną o 13% repliką oryginalnego hełmu szturmowca.

4.5.2 Złożenie hełmu

Ze względu na ograniczenia gabarytowe dostępnych drukarek 3D model został połączony w 10 części. Każda część została odpowiednio przygotowana do wydruku w programie PrusaSlicer. Całkowity czas druku wyniósł dla wszystkich części 97,5h (nie wliczając czasu wydruków powtarzanych ze względu na błędy). Najważniejszymi zmianami wprowadzonymi względem oryginalnego modelu były:

- załatanie frontowych otworów na powietrze w celu zmniejszenia poziomu dźwięku bezpośrednio przed użytkownikiem,
- zwiększenie całości modelu o 15% w celu ułatwienia przepływu powietrza oraz zagospodarowanie większej przestrzeni na moduł przetwarzania głosu,
- stworzenie specjalnych płaskich powierzchni umożliwiających montaż komory z głośnikiem oraz mikrofonu.

Ponadto, na otwory na oczy naklejono specjalnie przygotowane soczewki z płyty akrylowej. Zostały one wycięte laserowo według odpowiednio przygotowanego kształtu odpowiadającego kształtowi otworu w hełmie. Materiał soczewki został dobrany specjalnie pod temperaturę zeszklenia PET-G, by w łatwy sposób móc go uformować w pożądany kształt wyłącznie przy użyciu opalarki. Wiedząc, że PET-G ma podobną temperaturę zeszklenia do akrylu (około 90°C), bezpiecznie rozgrzano płytę plexi do temperatury, w której było możliwe jej ukształtowanie bezpośrednio na wydrukowanym modelu, bez wysokiego ryzyka odkształcenia go. Następnie przyklejono w ten sposób uformowane soczewki do wnętrza modelu.

Moduł przetwarzający głos zamontowano w nowej, wydrukowanej wersji modelu hełmu.

5 Weryfikacja i wyniki pomiarów

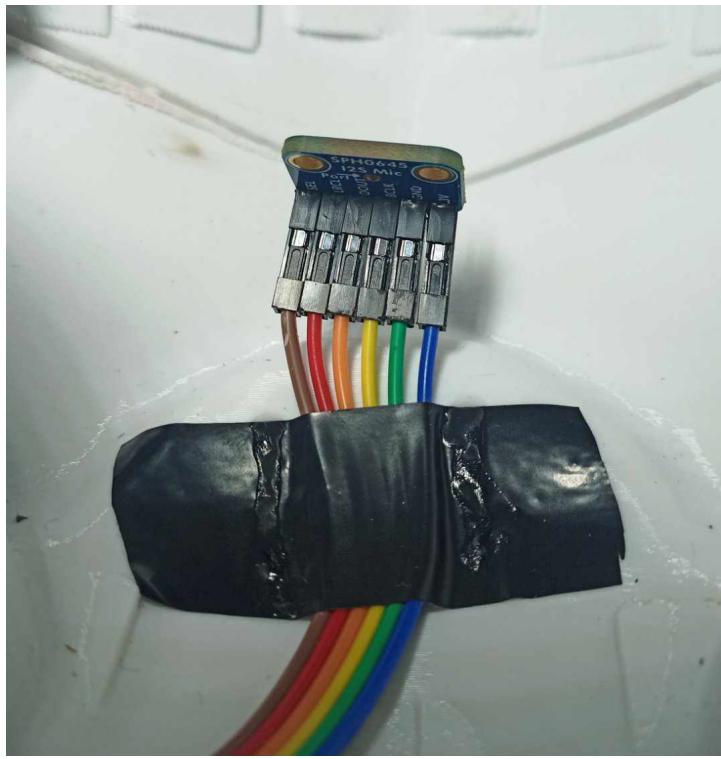
Zaplanowane założenia projektu zostały wykonane w całości oraz wszystkie części planu zakończyły się powodzeniem. Główny cel pracy, czyli stworzenie materialnego, namacalnego modelu hełmu modulującego głos użytkownika, został spełniony.

Na rysunku 11 przedstawiono wydrukowany model frontu hełmu (1). Ponieważ jest to prototyp, nie nałożono końcowej farby oraz nie wykonano ostatecznych szlifów, które wpłynęłyby na jego wygląd. Widać tu również przymocowane soczewki z ciemnego akrylu (2), które upodabniają hełm do oryginału jeszcze bardziej, jednocześnie umożliwiając użytkownikowi obserwację.



Rysunek 11: Wydrukowany model hełmu od frontu

Mikrofon użyty w projekcie pokazano na Rysunku 12. Widnieje on tam już zamontowany w środku hełmu na wysokości ust oraz jest przylutowany do kabli prowadzących do modułu Raspberry Pi.



Rysunek 12: Mikrofon zamontowany wewnętrz hełmu

Następny Rysunek 13 przedstawia półotwartą komorę na głośnik ze środka hełmu. Wewnątrz komory jest również widoczny różowy silikon, tłumiący drgania i usztywniający głośnik.



Rysunek 13: Głośnik i komora (półotwarta) zamontowane wewnętrz hełmu

Rysunek 14 ukazuje zamocowany w środku hełmu moduł Raspberry Pi wraz z obudową z chłodzeniem. Widać tu również czarny kabel podpinający głośnik oraz kolorowe przewody prowadzące do mikrofonu.



Rysunek 14: Mikrokomputer zamontowany wewnętrz hełmu

Poniższe zdjęcie 15 przedstawia dwa akumulatory, zasilające moduł Raspberry Pi. Są one umiejscowione w specjalnej nakładce, opisanej w poprzednim rozdziale. Cały moduł jest zamontowany wewnętrz hełmu.

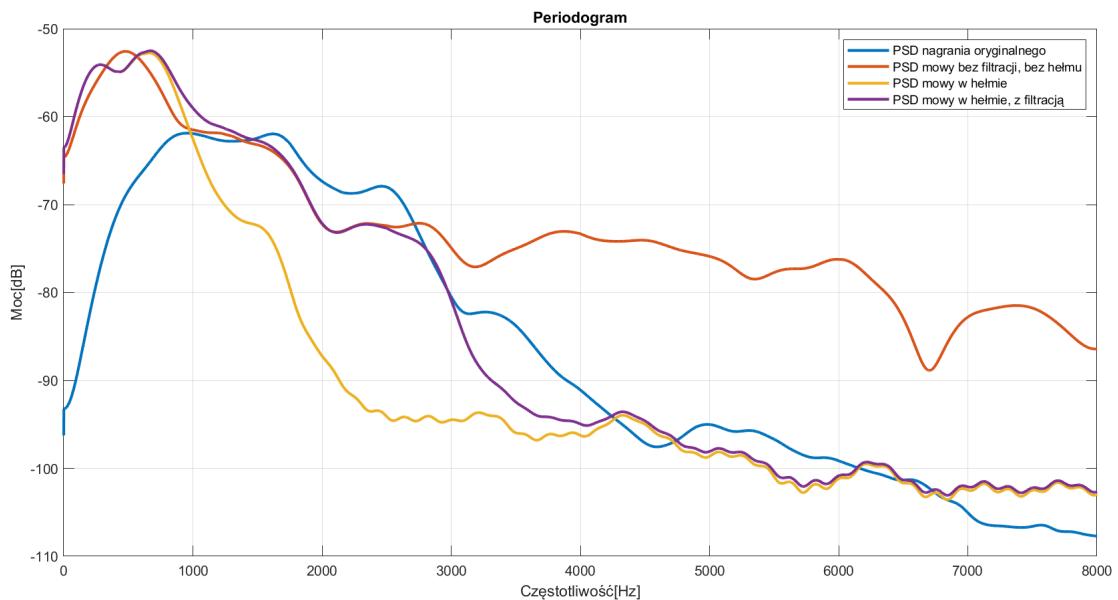


Rysunek 15: Nakładka zasilająca zamontowana wewnętrz hełmu

Model imituje hełm imperialnego szturmowca z serii filmów Gwiezdne Wojny pod względem wizualnym.

5.1 Analiza brzmienia głosu modelu

Znalezienie nagrań oryginalnej mowy szturmowców oraz wykonanie nagrań nieprze- tworzonej mowy człowieka pozwoliło na porównanie ich poprzez wyliczenie ich gęstości widmowych mocy. Umożliwiło to określenie parametrów łańcucha efektów, którego późniejsze zastosowanie w połączeniu z otrzymaną charakterystyką hełmu, jak zostało przedstawione na wykresie przedstawionym na Rysunku 16, upodobniło mowę użytkownika do brzmienia mowy szturmowca. Wartości PSD nagrań oryginalnej mowy oraz nagrań mowy z zastosowaną filtracją są do siebie zbliżone. Dla porównania pokazano również PSD nagrań mowy nieprzefiltrowanej oraz mowy nieprzefiltrowanej z założonym hełmem.



Rysunek 16: Wartości PSD nagrań: oryginalnej mowy szturmowca, przefiltrowanej mowy ludzkiej, nieprzefiltrowanej mowy ludzkiej

Niskie pasma częstotliwościowe pozostały nieprzefiltrowane ze względu na wpływ akustyki modelu hełmu. Aby skutecznie redukować hałas w zakresie niskich częstotliwości, ustroje dźwiękochłonne i izolacyjne muszą charakteryzować się znacznymi rozmiarami oraz dużą masą.[3] Jednak w praktyce często występują ograniczenia dotyczące zarówno ich wymiarów, jak i ciężaru.[4]. W przypadku tego projektu całkowita masa modelu hełmu wynosi 1,6 kg. Dalsze zwiększenie grubości ścianek i ciężaru hełmu nie jest zalecane, ponieważ skutkowałoby nadmiernym obciążeniem użytkownika i pogorszeniem ergonomii użytkowania.

W celu sprawdzenia, czy zastosowane rozwiązania wystarczająco upodobniły mowę użytkownika do mowy szturmowca, przeprowadzono ankietę.

Piętnastu przypadkowym osobom napotkanym w Samorządowym Ośrodku Kultury w Nowej Dębie przedstawiono pierwsze 10s oryginalnego nagrania mowy szturmowca. Sentencje wypowiedziane w nagraniu następnie powtórzono przy włączonej filtracji i założonym hełmie. Ankietowani odpowiedzieli na pytanie:

”Czy według Pana/Pani brzmienie prototypu hełmu przypomina brzmienie głosu szturmowca z uniwersum Gwiezdnych Wojen?”

14 z 15 (93%) ankietowanych wybrało opcję ”TAK”.

1 z 15 (7%) ankietowanych wybrał opcję ”NIE”.

Badanie pokazało, że według subiektywnej opinii większości osób brzmienie prototypu hełmu przypomina głos szturmowca.

Według subiektywnej opinii konstruktora i jednocześnie głównego użytkownika modelu, ostateczna masa prototypu - 1,6kg, nieznacznie zmniejsza jego komfort użytkowania. Efekt brzmieniowy, zdaniem konstruktora, nie jest idealnym odwzorowaniem oryginalnego dźwięku, jednakże uzyskane brzmienie przypomina głos szturmowca, co oznacza, że założenia projektu zostały spełnione.

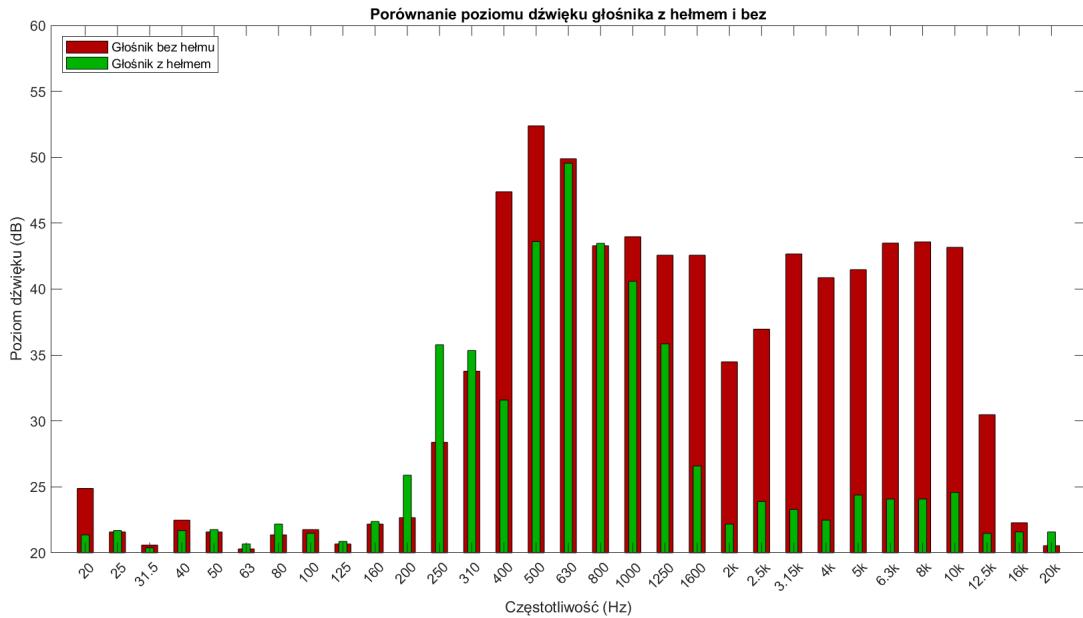
Stworzono tor akustyczny zdolny do realizacji filtracji praktycznie w czasie rzeczywistym. Latencję oszacowano na 50ms, co jest zadowalająco niską wartością. Osiągnięto ją dzięki odpowiednio napisanej i skompilowanej aplikacji implementującej łańcuch efektów oraz jego parametry.

Jak widać na zdjęciu przedstawionym na Rysunku 17, dobranie odpowiednio małych komponentów elektronicznych oraz zwiększenie wymiarów wydruku o 15% umożliwiło zmieszczenie modułu modulującego głos w całości wewnątrz hełmu, zgodnie z postawionymi na początku założeniami.



Rysunek 17: Wnętrze wydrukowanego hełmu

Sygnal audio przechodzący przez złożony tor akustyczny jest słyszalny i zrozumiałą dzięki zwiększeniu grubości ścianek hełmu, jak również poprawie jego szczelności, między innymi poprzez dokładne dopasowanie soczewek do otworów w hełmie. Jak pokazano na wykresie 18 działania podjęte w celu poprawy izolacji znaczaco zmniejszyły poziom dźwięku mowy bezpośredniej dla wysokich częstotliwości.



Rysunek 18: Porównanie poziomów dźwięku pomiarów wykonanych z nałożonym hełmem oraz bez nałożonego hełmu dla poszczególnych częstotliwości

Różnica pomiędzy średnimi wartościami poziomu dźwięku pomiarów bez założonego hełmu i z założonym hełmem odczytana bezpośrednio z miernika SVAN 912E wynosi 5,1dB. Nie jest to wysoka wartość, jednak redukcja dotyczy wysokich częstotliwości, co jest efektem pożądany.

Dalsza analiza wykresu 18 pokazuje, że badany prototyp hełmu zmniejsza poziom dźwięku w częstotliwościach powyżej 1000Hz oraz w paśmie tercjowym 400Hz, zapewniając skutecną redukcję w tych pasmach częstotliwościowych. Zastosowana izolacja nie jest jednak skuteczna dla pasm 800Hz, 630Hz oraz poniżej 310Hz. Wyższy poziom głośności mowy w paśmie od 630Hz do 1000Hz sugeruje wystąpienie zjawiska rezonansu akustycznego. Ze względu na charakterystykę częstotliwościową oryginalnego nagrania mowy szturmowca przedstawioną wcześniej na Rysunku 16, jest to jednak efekt korzystny. Częstotliwości dominujące w mowie szturmowca w dużej mierze pokrywają się z częstotliwościami wzmacnianymi przez model hełmu.

Negatywne dla projektu zjawiska akustyczne m.in. sprzężenie i przesłuch zostały

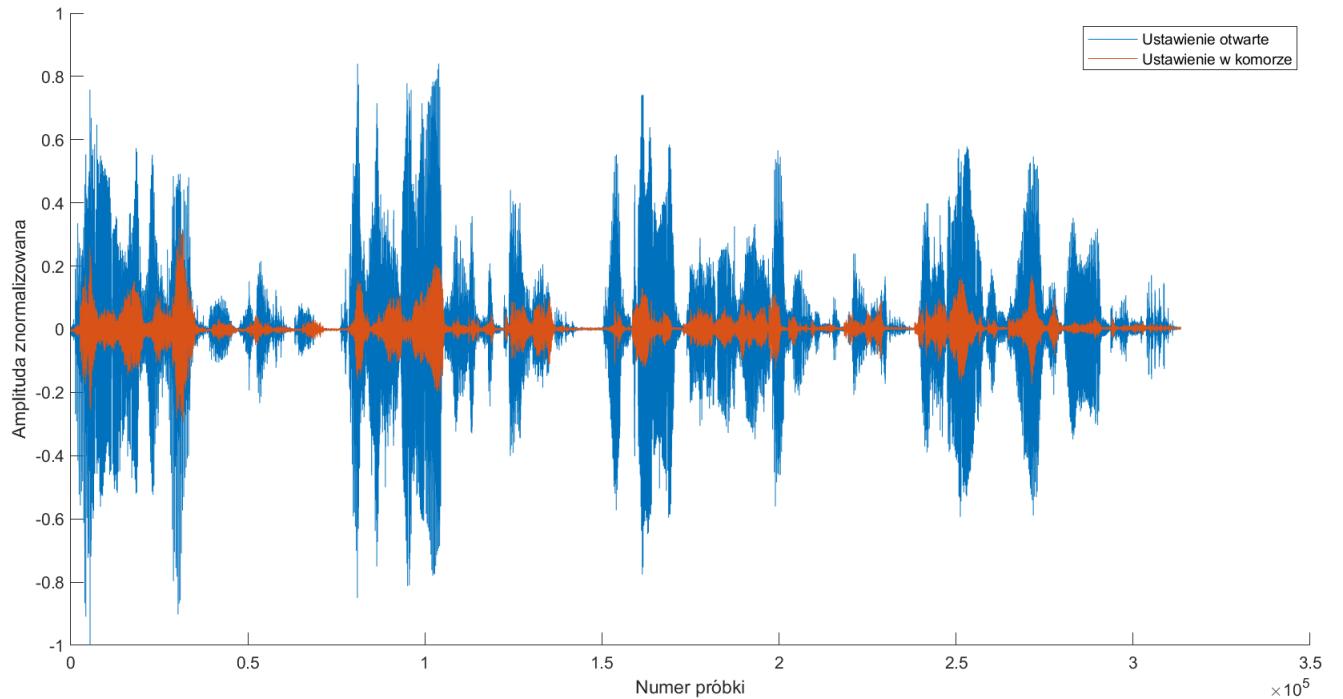
zredukowane do zadowalającego poziomu. Poprzez zastosowanie mikrofonu typu MEMS zamiast taniego, tradycyjnego odpowiednika elektretowego, oraz umieszczenie głośnika w specjalnie zaprojektowanej komorze wygładzającej wypełnionej silikonem, zmniejszono poziom przesłuchu i wyeliminowano zjawisko akustycznego sprzężenia zwrotnego. Jak możemy odczytać z wykresu 19 energia nagrania sygnału, w którym zastosowano komorę izolującą, jest znacznie niższa od energii sygnału, przy nagraniu którego komory nie zastosowano. Odczytany stosunek energii (przedstawionej w postaci kwadratów wartości próbek) nagrania przeprowadzonego bez komory do energii nagrania z komorą wyniósł:

$$\frac{E_{komory}}{E_{otwarте}} \approx 28,7$$

Następnie przeliczono stosunek energii nagrania dźwięku na decyble (dB) dla czytelniejszego odbioru.

$$10 \cdot \log_{10}(28,7) \approx 14.58dB$$

Powtórne uruchomienie całego zestawu potwierdziło ostatecznie wyeliminowanie pętli akustycznego sprzężenia zwrotnego.



Rysunek 19: Wykres znormalizowanych wartości amplitudy w czasie nagrań wykonanych z głośnikiem w komorze oraz bez komory

6 Podsumowanie i wnioski

Podsumowując część badawczo-elektroniczną, korzystając z odpowiednich funkcji i filtrów górnego- i dolnoprzepustowych, wykonano połączenie odpowiednich efektów audio, których zastosowanie upodobnia mowę człowieka do charakterystycznego brzmienia szturmowca z Gwiezdnych Wojen. Dobrym podejściem przy dopasowywaniu charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej okazało się nagranie własnego głosu i dopasowanie parametrów filtracji do oryginału w taki sposób, aby widmowe gęstości mocy były zadowalająco zgodne.

Jednym z wyzwań tego projektu było utrzymanie wszystkich części toru audio wystarczająco małych, by zmieściły się w ograniczonej przestrzeni wnętrza hełmu. Dodatkowo, istotnym aspektem było zapewnienie odpowiedniej jakości dźwięku, mimo ograniczeń wynikających z małych rozmiarów komponentów. W tym celu zastosowano nowoczesne technologie, takie jak miniaturowe układy DSP, które pozwalają na efektywną obróbkę sygnałów audio przy minimalnym zużyciu energii. Dodatkowo, miniaturowe mikrofony typu MEMS doskonale sprawdziły się w tym projekcie, gdyż łączą one dostateczną jakość z niewielkim rozmiarem i niskim kosztem. Dzięki takim rozwiązaniom oraz modyfikacji rozmiaru hełmu uzyskano dobrą jakość dźwięku bez konieczności kompromisów w zakresie przestrzeni i wygody użytkownika hełmu.

Kolejnym rozwiązany problemem w celu spełnienia założeń projektu opisanego w niniejszej pracy było zintegrowanie urządzenia z resztą sprzętu, takim jak mikrofon, głośniki oraz system zasilania. Wymagało to staranności w doborze komponentów, by były ze sobą kompatybilne i nie powodowały zakłóceń w pracy układu. Zadbano o ten aspekt poprzez odpowiednie umiejscowienie mikrofonu w obrębie hełmu, które dobrano eksperymentalnie, tak by maksymalizować jakość rejestrowanej mowy, jednocześnie minimalizując wpływ hałasów z otoczenia, przesłuchów i sprzężeń.

Następnym ważnym aspektem było zapewnienie działania aplikacji w czasie rzeczywistym. Dlatego przy programowaniu skupiono się na ograniczeniu latencji do 50ms. Dokonano tego poprzez wykorzystanie jak najprostszego łańcucha efektów, który dalej spełniał założenie brzmienia przypominającego głos szturmowca.

Budując część mechaniczną hełmu, wzięto pod uwagę liczne założenia, które po-

winna ona spełniać, by finalny prototyp funkcjonował poprawnie. Największym problemem było wystąpienie pętli akustycznego sprzężenia zwrotnego, które całkowicie uniemożliwiło poprawne działanie układu. Zmaksymalizowano odległości pomiędzy źródłem a głośnikiem przy jednoczesnym utrzymaniu naturalnej lokalizacji źródła mowy (front hełmu). Problem rozwiązano poprzez zastosowanie specjalnej komory na głośnik, która skutecznie oddzieliła go od mikrofonu.

Istotnym aspektem było również, aby wysokie częstotliwości mowy bezpośrednio były jak najmniej słyszalne na zewnątrz hełmu. Zastosowane uszczelnienie frontu hełmu wystarczająco dobrze rozwiązało ten problem. Dzięki wybraniu materiału PET-G do wykonania finalnego prototypu udało się ponadto zapewnić jego wytrzymałość i trwałość.

Całe urządzenie jest w pełni funkcjonalne. Wszystkie napotkane w toku prac problemy zostały rozwiązane, bądź zniwelowane do zadowalającego poziomu.

6.1 Dalsze prace

Wykonany projekt odznacza się wieloma możliwościami dalszego rozwoju.

Wykonanie dokładnej analizy obciążenia mikrokomputera Raspberry Pi przez filtrację oraz sprawdzenie wydajności kodu stanowiłyby wartościowy dodatek do pracy. Umożliiłoby to określenie limitu efektów, jakie można by dodać do łańcucha efektów przetwarzanego w Raspberry Pi. Ciekawym zagadnieniem, które mogłoby zostać wtedy zbadane, jest użycie dodatkowych efektów typu przester czy kompresor, które mogłyby jeszcze bardziej poprawić brzmienie modulowanej mowy. Potencjalne zwiększenie wydajności kodu mogłoby również umożliwić użycie jeszcze tańszych podzespołów.

Cennym uzupełnieniem projektu mogłoby być zastosowanie aktywnych metod redukcji poziomu dźwięku. Umożliiłoby to obniżenie poziomu dźwięku w niskich pasmach częstotliwości bez konieczności dalszego zwiększania masy modelu hełmu.

Wykonanie szlifów, poprawienie detali i nałożenie farby poprawiłoby efekt estetyczny projektu, a rozlokowanie wewnątrz hełmu miękkiego materiału zwiększyłoby komfort użytkowania. Wszelkie zmiany struktury hełmu, również uszczelnienie dolnej jego części, zmieniłyby jednak akustykę układu. Po wprowadzeniu jakichkolwiek zmian należy przeprowadzić ponownie pomiary i zbadać ich wpływ na odpowiedź

toru akustycznego. Prototyp wygląda już jak hełm szturmowca, jednak dodanie ostatnich poprawek mogłoby odwzorować oryginał w pełni.

Również w celu pośredniego zagłuszenia mowy użytkownika można rozważyć dodanie kolejnego głośnika. Wymagane byłoby ponowne przetestowanie toru audio pod względem sprzężenia oraz powtórzenie pomiarów. Dodatkowy głośnik mógłby jednak zwiększyć całkowity wyjściowy poziom głośności toru audio.

Literatura

- [1] H.J. Jelinek A.O. Williman. *Special Tutorial: Introduction to LSI Microprocessor Developments*. IEEE, 1976.
- [2] G. Ballou. *Handbook for sound engineers*. Focal Press, Amsterdam, 2008.
- [3] Z. Engel. *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. PWN, Warszawa, 1993.
- [4] L. Morzyński G. Makarewicz, G. Matuszewski. Aktywne metody redukcji hałasu. *Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy*, 2002-2004.
- [5] R. Vick K.-H. Gonschorek. *Electromagnetic Compatibility for Device Design and System Integration*. Springer, Berlin Heidelberg, 2009.
- [6] Raw Material Software Limited. *JUCE*. 17.04.2024.
- [7] J. W. Rinzler. *The Sounds of Star Wars*. Simon Schuster, 2010.
- [8] D. G. Rethwisch W. D. Callister Jr. *Materials Science and Engineering: An Introduction, 10th Edition*. Wiley, 2017.
- [9] YamokoYagami. *Stormtrooper Helmet (wearable)*. www.thingiverse.com, 22.05.2021.
- [10] T. P. Zieliński. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów od teorii do zastosowań*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności Warszawa, 2005.