



AGH

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W
KRAKOWIE**

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

KATEDRA METROLOGII I ELEKTRONIKI

Praca dyplomowa inżynierska

*Układ do tłumienia zakłóceń z otoczenia
Circuit for surrounding noise cancellation*

Autor:

Kierunek studiów:

Opiekun pracy:

Piotr Ziębiński

Mikroelektronika w Technice i Medycynie

dr hab. inż. Krzysztof Kasiński

Kraków, 2019

Upředzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.): „Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystycznego wykonania albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie.”, a także upředzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.): „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej «sądem koleżeńskim».”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

*Serdecznie dziękuję mojemu promotorowi
za pomoc i podpowiedzi przy tworzeniu
pracy*

Spis treści

1. Wstęp	7
2. Dźwięk	9
2.1. Ogólna charakterystyka fal dźwiękowych.....	9
2.2. Odbiór fal dźwiękowych przez człowieka.....	9
2.3. Fale dźwiękowe jako zagrożenie dla zdrowia człowieka	10
2.3.1. Dźwięki strzałów i wybuchów	12
3. Wykonanie ochronników słuchu	17
3.1. Hardware	18

1. Wstęp

Otoczający nas świat jest pełen dźwięków pochodzących z różnych źródeł. Możemy wyróżnić dźwięki powszechnie uważane za przyjemne dla ucha, jak ćwierkanie ptaków oraz te nieprzyjemne jak dźwięk wiercenia. Narażenie na nadmierny hałas jest w dużej mierze zależne od naszego miejsca pracy. Pracownika biurowego będą irytować samochody słyszane przez uchylone okno, a dla robotnika pracującego przy kładzeniu asfaltu ruchliwa droga to normalny dźwięk otoczenia. Ze względu na charakter pracy, w poziom dźwięku w pomieszczeniach biurowych reguluje polska norma "Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku na stanowisku pracy"[1]. Mimo to obaj pracownicy są równie narażeni na skutki przebywania w ciągłym hałasie.

Wystawienie na zbyt wysoki poziom ciśnienia akustycznego prowadzi do rozdrażnienia, zmęczenia, a w konsekwencji do uszkodzenia słuchu. Z tego powodu tworzone są różne rozwiązania pozwalające polepszyć samopoczucie i chronić słuch.

Fala akustyczna jest falą mechaniczną, dlatego można ją stosunkowo łatwo tłumić bez użycia elektroniki. Takie rozwiązanie ma jednak swoje wady. Słuchawka musi być duża i ciężka, żeby zmieścić jak najwięcej materiału tłumiącego, a sama metoda działa dobrze dla częstotliwości od 20Hz do 800Hz i tłumi do 30dB[2]. Z pomocą przychodzą układy elektroniczne służące do aktywnego tłumienia zakłóceń, czyli nakładania fali przesuniętej w fazie o 180° na oryginalny dźwięk. Te z kolei dzielą się na cyfrowe oraz analogowe. Różnica polega na tym, że pierwsze oprócz innych elementów, jak wzmacniacze, korzystają też z przetworników i algorytmów do przetwarzania sygnałów.

Praktyczne zastosowania różnych technik tłumienia fal akustycznych można wymieniać bez końca. Są to między innymi:

- przydrożne ekrany dźwiękochłonne
- ochronniki słuchu ogólnego zastosowania
- słuchawki multimedialne z ANC (ang. *Active Noise Cancelling* - Aktywne Tłumienie Szumu)
- systemy wyciszania w pojazdach

– strzeleckie ochronniki słuchu

W mojej pracy skupiłem się na tych ostatnich. Postanowiłem zaprojektować, zaprogramować i zbudować słuchawki taktyczne, które w normalnych warunkach przepuszczają dźwięki z zewnątrz i umożliwiają normalny odbiór dźwięków otoczenia, a w razie wystąpienia niebezpiecznie dużych natężeń - wytłumiają aktywnie, chroniąc słuch.

2. Dźwięk

2.1. Ogólna charakterystyka fal dźwiękowych

Dźwięk jest wrażeniem słuchowym, powodowanym przez fale akustyczne. Rozchodzą się one w postaci fal podłużnych, będącymi zaburzeniami ciśnienia i gęstości ośrodka sprężystego[3]. Prędkość dźwięku w powietrzu przy temperaturze 0 stopni celcjusza wynosi 331,3m/s.

Dźwięk można opisać kilkoma podstawowymi parametrami:

- wysokość (częstotliwość fali)
- głośność (amplituda fali)
- barwa (skład widmowy)
- czas trwania

Poziom dźwięku wyrażany jest miarą ciśnienia akustycznego, którego jednostką jest Paskal Pa . Jednak ponieważ ludzkie ucho reaguje na bodźce logarytmicznie, częściej używa się decybeli ($\frac{1}{10}$ bel). Wzór na obliczenie poziomu ciśnienia akustycznego w skali logarytmicznej wygląda następująco[4]:

$$SPL = 20 \log \left(\frac{p}{p_{ref}} \right) \quad (2.1)$$

gdzie:

SPL - poziom ciśnienia akustycznego $[dB]$,

p - ciśnienie akustyczne $[Pa]$,

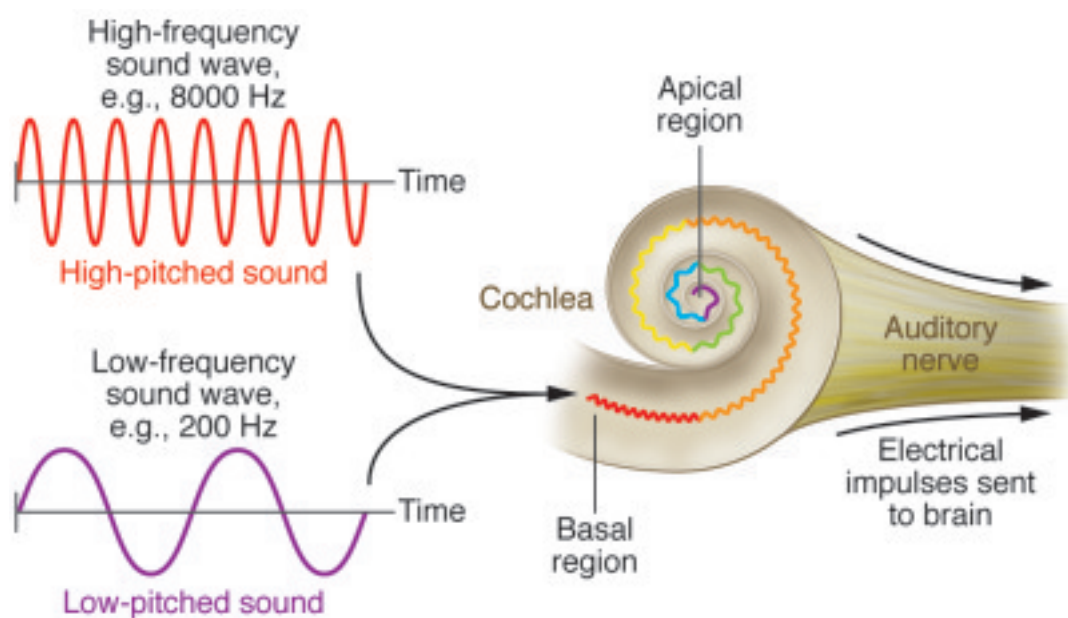
p_{ref} - ciśnienie akustyczne odniesienia, czyli próg słyszalności, wynoszący $2 \cdot 10^{-5} Pa$

TODO niespójność progu słyszalności (tu wychodzi 0dB, w tabelce jest 10dB)

2.2. Odbiór fal dźwiękowych przez człowieka

W ludzkim uchu odbiór dźwięku odbywa się przez zmiany ciśnienia płynu, którym wypełniony jest ślimak (patrz rys. 2.1). Powodują one podrażnianie rzęsek, które z kolei przekazują

impulsy elektrochemiczne do mózgu. Im mniejsza częstotliwość fali, tym dalej dociera i na tej podstawie mózg potrafi rozróżniać częstotliwości. Dla człowieka słyszalne są fale z zakresu ok. 20Hz - 20kHz, choć górna granica maleje z wiekiem przez stopniową degradację najbardziej zewnętrznych rzęsek (a więc odpowiadających za najwyższe częstotliwości).[5] Fale poniżej granicy słyszalności to infradźwięki, powyżej - ultradźwięki, a częstotliwości wyższe, niż 10^{10} kHz to hiperdźwięki.



Rys. 2.1. Odbiór fal dźwiękowych w ślimaku ludzkiego ucha

2.3. Fale dźwiękowe jako zagrożenie dla zdrowia człowieka

Głównym, choć nie jedynym, parametrem dźwięku, który determinuje jego szkodliwość jest amplituda fali, czyli ciśnienie akustyczne. W tabeli 2.1 przedstawiono sytuacje, w których występuje określony poziom natężenia.

Natężenie [dB]	Sytuacja
130	Młot pneumatyczny
120	Klakson z odległości 1m
110	Lotnisko
100	Przejazd pociągu
90	Wnętrze autobusu
80	Zatłoczona ulica
70	Konwersacja
60	Salon z cichą muzyką
50	Biuro
40	Sypialnia
30	Studio nagraniowe
20	Studio radiowe
10	Próg słyszalności

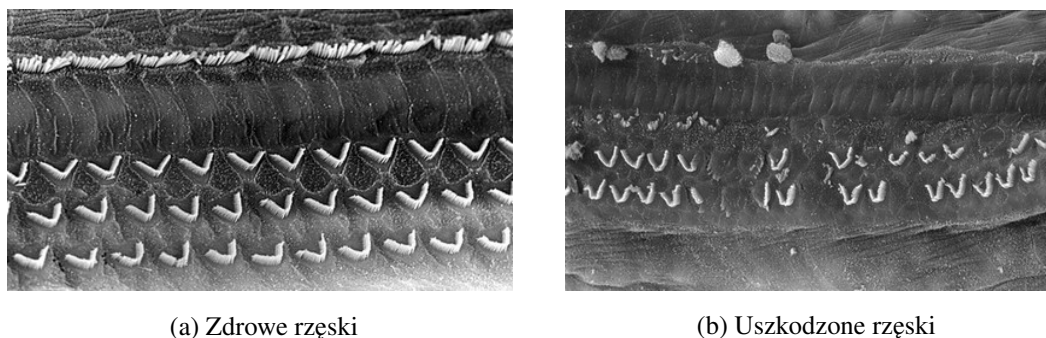
Tabela 2.1. Poziomy natężenia dźwięku[6]

Na szkodliwość dźwięku wpływa również czas jego trwania. Amerykańska agencja federalna NIOSH (ang. *National Institute for Occupational Safety and Health*) zajmuje się badaniem i zapobieganiem chorobom związanym z pracą. Wydała ona dokument[7], w którym przedstawiono bezpieczny czas wystawienia na określone poziomy ciśnienia akustycznego.

Natężenie [dB]	Maks. czas [h]
127	00:00:01
118	00:00:14
109	00:01:53
100	00:15:00
91	02:00:00
82	16:00:00

Tabela 2.2. Maksymalny czas wystawienia na określone poziomy natężenia [6]

Odbiorcze uszkodzenie słuchu przez hałas nazywamy urazem akustycznym. Dzieli się go na ostry oraz przewlekły. Ostry jest powodowany krótkotrwałym oddziaływaniem natężenia powyżej 130dB, a przewlekły długotrwałym wystawieniem na dźwięki powyżej 85dB. W przypadku tego pierwszego uszkodzeniu ulega narządzie Cortiego, będące częścią ślimaka i zawierające komórki rzęsate[8].



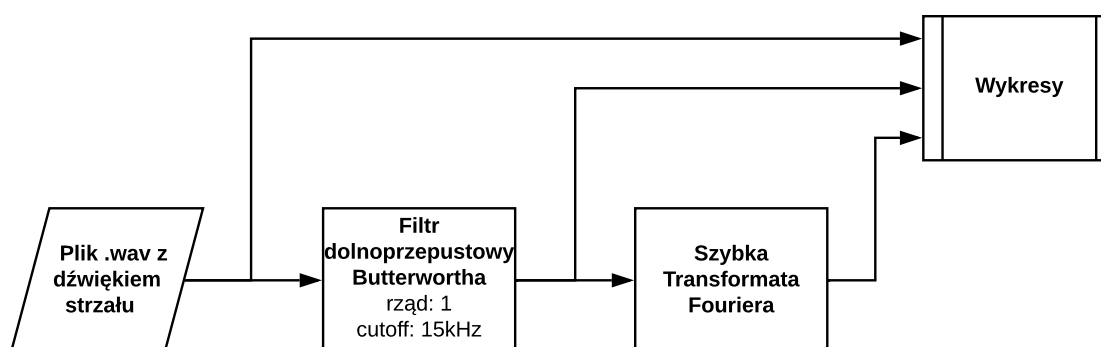
Rys. 2.2. Powierzchnia ślimaka widoczna pod mikroskopem elektronowym[9]

2.3.1. Dźwięki strzałów i wybuchów

W trakcie swoich rozważań poświęciłem szczególną uwagę dźwiękom pochodzącym od broni palnej. To właśnie one miały być głównym źródłem zagrożenia dla słuchu użytkownika. Ich źródłem jest eksplozja prochu strzelniczego, zmagazynowanego w łusce naboju, która nadaje prędkość początkową pociskowi. Ciśnienie akustyczne podczas takiego wybuchu przekracza 140 dB, a więc wystarczy niecała sekunda, aby doprowadzić do uszkodzenia słuchu[2]. Dodatkowo na takie uszkodzenie najbardziej narażone są rzęski odpowiedzialne za częstotliwości między 3 a 6kHz[10].

Aby sprawdzić częstotliwości wystrzałów różnych typów broni, napisałem program w Pythonie do analizy dźwięków z plików .wav. Miał on za zadanie odczytać przebieg sygnału z pliku, odfiltrować częstotliwości powyżej 15kHz i przeprowadzić szybką transformatę Fouriera na odfiltrowanym sygnale. Kod źródłowy dostępny jest na repozytorium pod linkiem https://github.com/Hoplophile/Tactical_Headphones_Sim.git.

Schemat działania programu wygląda następująco:

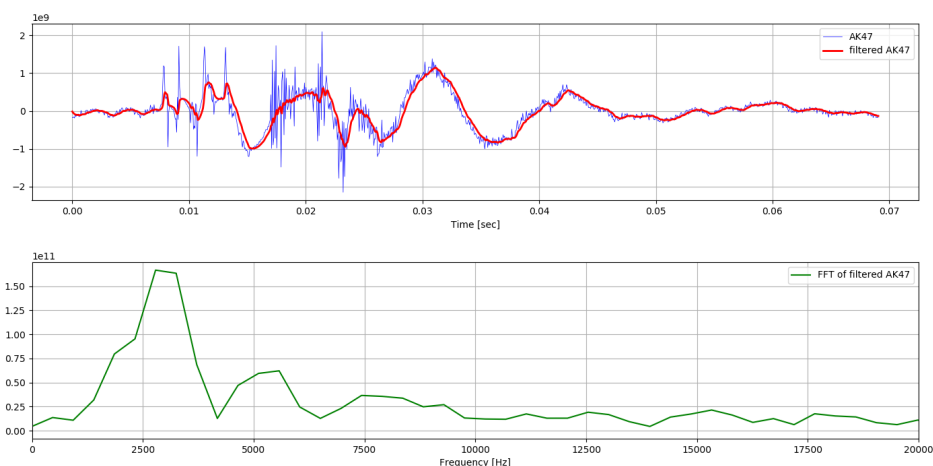


Rys. 2.3. Dataflow programu do analizy FFT

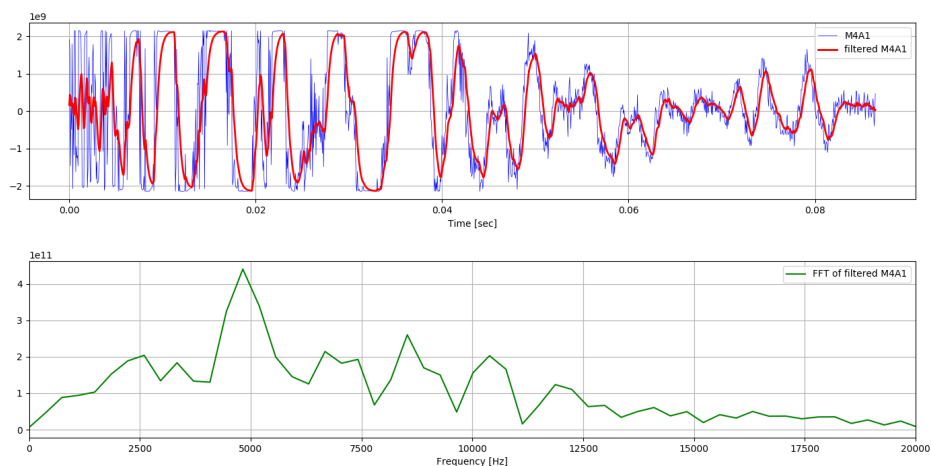
Pliki źródłowe z dźwiękami broni zostały pobrane ze strony <http://soundbible.com/tags-gun.html>. Niestety to powodowało brak pewności, czy dźwięk faktycznie pochodzi od broni podanej w nazwie oraz brak powtarzalności dźwięków, które nagrywane były w innych środowiskach, nieznaney odległości od broni i mikrofonami o różnych parametrach. Było to jednak najlepsze dostępne źródło tego typu nagrań. Wybrałem 4 pliki podpisane następującymi typami broni:

- M4A1 - karabin szturmowy kalibru 5.56mm
- AK-47 - karabin szturmowy kalibru 7.62mm
- Beretta M92 - pistolet kalibru 9mm
- Mossberg 500 - strzelba (kaliber nieznan)

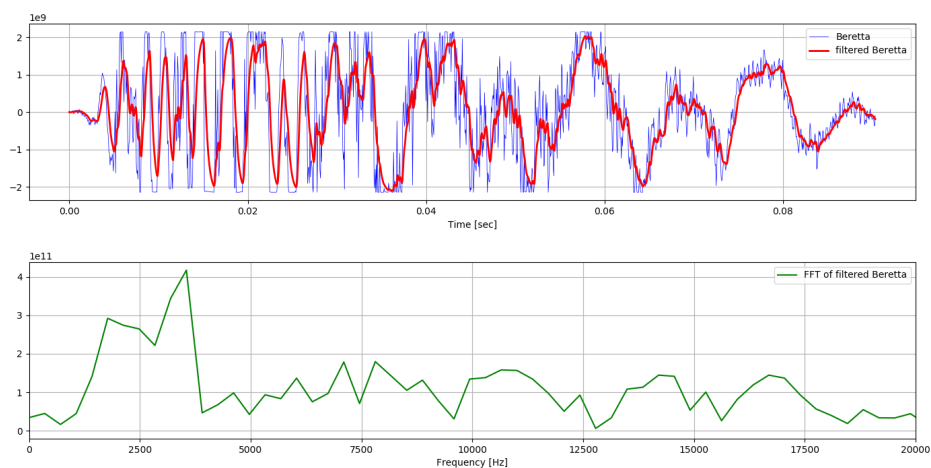
Program zwracał osobne wykresy dla każdego pliku przedstawione poniżej.



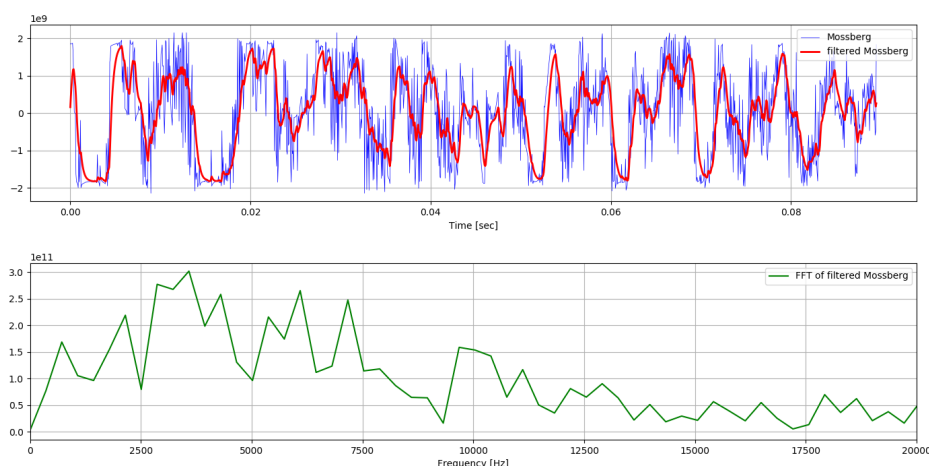
Rys. 2.4. Dźwięk strzału z AK-47 i jego transformata Fouriera



Rys. 2.5. Dźwięk strzału z M4A1 i jego transformata Fouriera



Rys. 2.6. Dźwięk strzału z Beretty i jego transformata Fouriera



Rys. 2.7. Dźwięk strzału z Mossberga 500 i jego transformata Fouriera

Nie potrafiłem doprowadzić do przedstawienia większej liczby punktów na wykresie FFT, jednak z pewną dokładnością można stwierdzić, że dla wszystkich dźwięków największy pik mieści się w zakresie 3-6kHz. Dodatkowo na wykresach przedstawiających oryginalny przebieg sygnału widać, że mikrofony w większości przypadków osiągnęły poziom nasycenia (wyplaszczenia na granicach osi y). To wpływa negatywnie na jakość transformaty i oznacza, że dźwięk osiągnął poziom nasycenia mikrofonu, która przeważnie wynosi między 110 a 130 dB.

Powyższa analiza wskazuje na to, że zarówno częstotliwości, jak i natężenia dźwięków strzałów z broni palnej czyni je szczególnie niebezpiecznymi dla słuchu.

3. Wykonanie ochronników słuchu

Głównym założeniem mojej pracy inżynierskiej było wykonanie strzeleckich ochronników słuchu. Zamyśł był wzorowany na istniejących produktach, choć miał rozszerzać ich funkcjonalność. Słuchawki miały składać się z materiału tłumiącego, elektronicznego układu przetwarzania dźwięku z otoczenia oraz wyjścia do komunikacji radiowej. Elektroniczny układ spełniał główne zadanie w słuchawkach, ponieważ przekazywał dźwięk z otoczenia oraz z radiotelefonu do ucha użytkownika (aby materiał tłumiący nie zakłócał normalnej komunikacji) oraz dokonywał aktywnego wyciszenia dźwięków (podobnie jak w słuchawkach multimedialnych), kiedy natężenie fali akustycznych przekraczało określony poziom.

Słuchawki miały być stworzone od podstaw aż do otrzymania gotowego produktu, co obejmowało:

- dobór parametrów głośników, mikrofonów, baterii i innych elementów
- zaprojektowanie, zamówienie i zlutowanie płytki PCB
- napisanie oprogramowania do mikrokontrolera przetwarzającego sygnały
- zaprojektowanie i wydrukowanie na drukarce 3D obudowy słuchawek
- dobór materiału tłumiącego pasywnie

3.1. Hardware

Największą częścią projektu było wykonanie hardware'u słuchawek. Dobór parametrów elementów akustycznych był szczególnie trudny, biorąc pod uwagę brak doświadczenia w tym obszarze elektroniki. Wszystkie elementy schematu musiały być do siebie dobrane pod kątem minimalizacji szumów i poboru mocy, a zaprojektowana płytką musiała się zmieścić do obudowy słuchawek i pozwolić na wyprowadzenie na zewnątrz mikrofonu, przycisków oraz gniazda ładowania. Dopasowanie PCB i odbudowy zależało głównie od dobrego wymiarowania modelu 3D.

Bibliografia

- [1] *Polska norma PN-N-01307:1994 'Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku na stanowisku pracy'*. 1994.
- [2] *Active Noise Cancellation - Sennheiser NoiseGard™ hybrid technology*. Sennheiser electronic GmbH & Co. KG.
- [3] *Fale akustyczne - Wikipedia*.
https://pl.wikipedia.org/wiki/Fale_akustyczne. 2012 - 2019.
- [4] Ian Drumm. *A guide to decibels and how to use them*.
http://www.acoustics.salford.ac.uk/acoustics_info/decibels/.
- [5] Stanisław Chrzęszcz. *Jak Słyszemy?* (audioton.republika.pl).
<http://web.archive.org/web/20110920161806/http://audioton.republika.pl/ucho.html>. 2002 - 2013.
- [6] Dave Sather. *SOUND PRESSURE LEVEL CHART*.
<https://thewellcommunity.org/podcasts/engineering/sound-pressure-level-chart>. 2012.
- [7] *Occupational Noise Exposure*. U.S. Department of Health i Human Services. 1998.
- [8] dr n. med. Mariola Zagor. *Urazy akustyczne*.
<https://www.mp.pl/pacjent/otolaryngologia/choroby/choroby-uszu/110217,urazy-akustyczne>. 2017.
- [9] Sam Irving Rémy Pujol Jing Wang. *NOISE INDUCED TRAUMA*.
<http://www.cochlea.eu/en/pathology/surdites-neuro-sensorielles/traumatisme-acoustique>. 2018.
- [10] Sérgio Koodi Kinoshita Heraldo Lorena Guida Thiago Hernandez Diniz. *Acoustic and psychoacoustic analysis of the noise produced by the police force firearms*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1808869415308053>.