



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. Założenia projektowe	15
4. Istniejące rozwiązania	17
5. Hardware	19
5.1. Układ elektroniczny	19
5.2. Głośniki	20
5.3. Mikrofony	21
5.4. Mikrokontroler	23
5.5. PCB	23
5.5.1. Main	24
5.5.2. Power	25
5.5.3. Charger	26
5.5.4. Microphone_left i Microphone_right	27
5.5.5. Speakers	29
5.5.6. Connection	29
5.5.7. PCB_left	30
5.5.8. PCB_right	31
6. Software	33
6.1. System słuchawek	34
6.2. Odczyt sygnału z mikrofonu	35
6.3. Wysyłanie sygnału do głośnika	36

1. Wstęp

Otoczający nas świat jest pełen dźwięków pochodzących z różnych źródeł. Możemy wyróżnić dźwięki powszechnie uważane za przyjemne dla ucha oraz te nieprzyjemne, z reguły o dużym natężeniu. Narażenie na nadmierny hałas jest w dużej mierze zależne od naszego miejsca pracy. Pracownika biurowego mogą irytować samochody słyszane przez uchylone okno, a dla osoby pracującej na budowie hałas ciężkich maszyn normalny dźwięk otoczenia. Ze względu na charakter pracy, poziom dźwięku w pomieszczeniach biurowych reguluje polska norma "Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku na stanowisku pracy"[1]. Jednak obaj pracownicy są równie narażeni na skutki przebywania w ciągłym hałasie i potrzebują stosownego zabezpieczenia przed nim.

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 tłumí 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.

Praktyczne zastosowania różnych technik tłumienia fal akustycznych są obecne w wielu dziedzinach. 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 poniższej pracy skupiono się na tych ostatnich. Postanowiono 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.

Pomysł powstał po styczności ze słuchawkami taktycznymi, które tłumiły fale jedynie pasywnie. Postanowiono połączyć aktywne wyciszanie stosowane w słuchawkach multimedialnych z podgłaśnianiem dźwięków pożądanых, czyli np. rozmów.

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 $[dB]$,

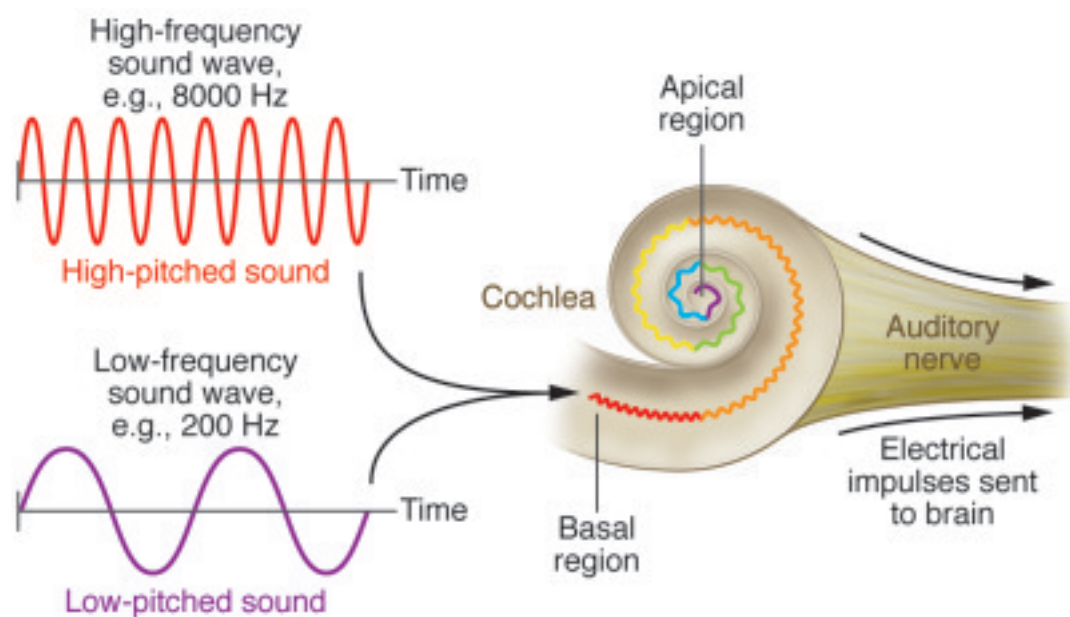
p - ciśnienie akustyczne $[Pa]$,

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

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 ona 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[6]

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

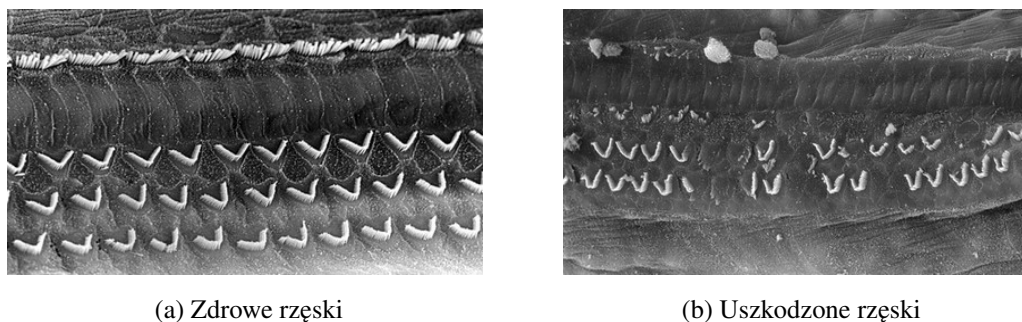
Tabela 2.1. Poziomy natężenia dźwięku[7]

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[8], w którym przedstawiono bezpieczny czas wystawienia na określone poziomy ciśnienia akustycznego[7].

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

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 uszkodzenia ulega narządzie Cortiego, będące częścią ślimaka i zawierające komórki rzęsate[9].



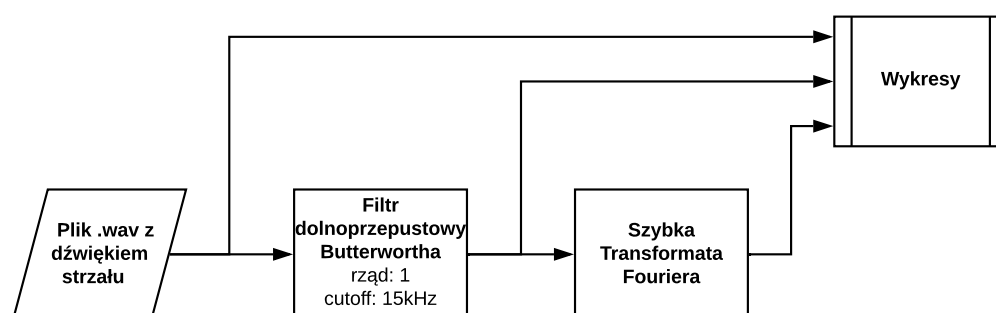
Rys. 2.2. Powierzchnia ślimaka widoczna pod mikroskopem elektronowym[10]

2.3.1. Dźwięki strzałów i wybuchów

W trakcie rozważań szczególną uwagę poświęcono 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 140dB , 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 [11].

Aby sprawdzić częstotliwości wystrzałów różnych typów broni, zaimplementowany został 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:

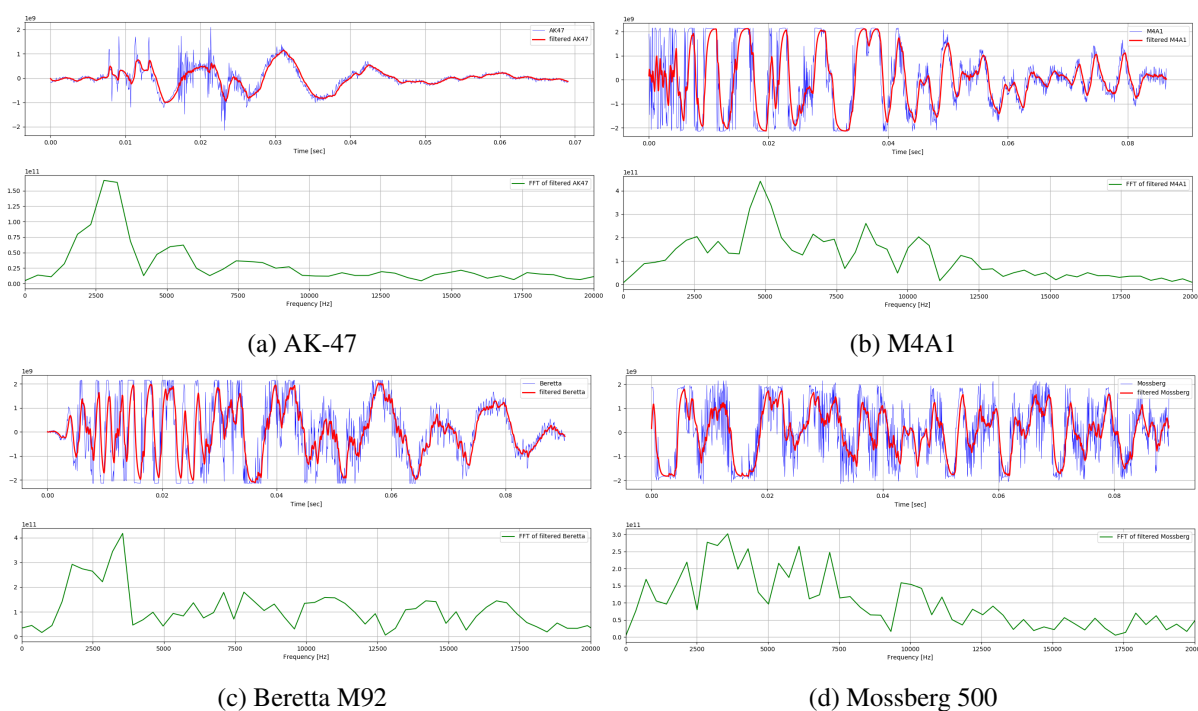


Rys. 2.3. Dataflow programu do analizy FFT

Pliki źródłowe z dźwiękami broni zostały pobrane ze strony <http://soundbible.com/tags-gun.html>. 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. Wybrane zostały 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 nieznany)

Program zwracał osobne wykresy dla każdego pliku źródłowego przedstawione poniżej.



Rys. 2.4. Wykresy z analiz FFT dźwięków strzałów

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

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

3. Założenia projektowe

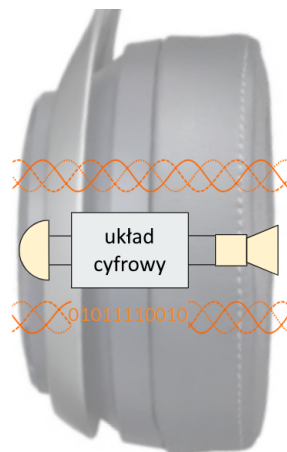
Głównym założeniem tej pracy inżynierskiej było wykonanie strzeleckich ochronników słuchu. Zamyśl był wzorowany na istniejących produktach, choć miał rozszerzać ich funkcjonalność. Słuchawki miały składać się z materiału tłumiącego, elektronicznego układu przetwarzania dźwięku z otoczenia oraz złącza 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

Głównym ograniczeniem dla projektu było przetworzenie sygnału od mikrofonu do głośnika w identycznym czasie, w jakim tę drogę pokona fala dźwiękowa, aby idealnie nałożyć na nią antyfazę. Przy prędkości dźwięku wynoszącej $331,3\text{ m/s}$, pokonanie 1 cm zajmuje fali akustycznej $29,16\mu\text{s}$. Prędkość sygnału elektrycznego jest pomijalna, ponieważ wynosi $1/3$ prędkości światła. Istotna była natomiast szybkość konwersji przetworników, które wprowadzają do układu największe opóźnienia.

Na schemacie 3.1 przedstawiono poglądowo równoległy przepływ sygnału cyfrowego oraz analogowego.



Rys. 3.1. Schemat poglądowy równoległego przepływu dźwięku

4. Istniejące rozwiązania

JAK DZIAŁAJĄ TAKIE SORDINY

5. 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 wybrane 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. To wymagało przemyślanego wymiarowania zarówno modelu, jak i płytki oraz wyprowadzenia w odpowiedni sposób elementów, na przykład stosując kątowe przyciski.

Dla projektu obudowy głównym ograniczeniem było to, aby słuchawki były kompaktowe, czyli lekkie i niskoprofilowe. Ochronniki tego typu są przeznaczone dla myśliwych, strzelców sportowych, ale również dla służb ochrony i wojsk specjalnych. Toteż nie mogą ograniczać ruchów, możliwości przyłożenia głowy do kolby broni i być znaczącym ciężarem podczas użytkowania przez kilka godzin lub dni w terenie.

Ten sam powód determinuje wymóg niskiego poboru prądu przez układ i dużej pojemności akumulatora. Choć w tej pracy został wybrany wbudowany akumulator ładowany przez gniazdo mikro USB, to do zastosowań wojskowych lepsze byłoby zasilanie ze zwykłych, wymiennych baterii, na przykład AAA.

Układy scalone zastosowane w projekcie musiały mieć możliwość zasilania napięciem 3.3V, ponieważ zastosowany został akumulator litowo-jonowy o napięciu znamionowym 3,7V (zakres pracy wynosi od 3,0 do 4,2V).

Dla uproszczenia, podczas wyboru komponentów nie była brana pod uwagę wodo- oraz kurzoodporność i zakres temperatur pracy. Jednak gdyby słuchawki miały wejść na rynek, musiałyby zostać dodatkowo przystosowane do działania w wymagających warunkach terenowych.

5.1. Układ elektroniczny

Przed przystąpieniem do projektowania właściwego układu elektronicznego konieczne było zadecydowanie, czy wykonać go analogowo, czy cyfrowo. Podejście pierwsze oznaczało użycie inwerterów, wzmacniaczy, filtrów, itp. do uzyskania odpowiednich opóźnień i fazy dźwięku.

Jednak pozostawała wciąż kwestia możliwości zamiennego wyciszania i przekazywania dźwięków w zależności od ich amplitudy. Okazało się, że znalezienie materiałów na ten temat jest wyjątkowo trudne, a szukanie błędów na schemacie mogłoby sprawiać dużo więcej problemów, niż w programie na mikrokontroler. Z tego powodu został wybrany układ cyfrowy, który jak się później okazało, powodował wiele problemów z szumami i opóźnieniami sygnału.

Kolejną decyzją do podjęcia było to, czy każda ze słuchawek będzie miała swój własny układ, czy też jedna będzie odpowiedzialna za obliczenia, a druga jedynie skomunikowana z nią. Zostało wybrane podejście drugie, ponieważ pozwalało to zminimalizować koszty oraz lepiej rozłożyć masę. Jedna słuchawka miała zawierać główną płytkę z mikrokontrolerem i przyciskami, a druga jedynie mikrofon oraz układ ładowania i akumulator. Wadą tego rozwiązania była konieczność równoczesnej analizy dźwięków z obu słuchawek, co przekładało się na szybkość działania mikrokontrolera oraz narażone na szumy przewody prowadzące przez pałąk od jednej słuchawki do drugiej.

Poniżej przedstawiono uproszczony schemat układów dla obu słuchawek.

SCHEMAT UKŁADÓW SŁUCHAWEK

5.2. Głośniki

Każda ze słuchawek została wyposażona w głośnik odpowiedzialny zarówno za doprowadzanie do ucha zwykłych dźwięków z zewnątrz, jak i generowanie antyfazy dla dźwięków niebezpiecznych. Wybrany został głośnik *254-PS604-RO* firmy *Kobitone*. Głównym kryterium wyboru była impedancja głośnika, wynosząca 32Ω oraz moc znamionowa na poziomie $200mW$. Te parametry zapewniały dobrą jakość odtwarzanego dźwięku, która była kluczowa, aby uzyskać maksymalne odwzorowanie dźwięków otoczenia. Celem było to, aby użytkownik czuł się w słuchawkach naturalnie. Choć charakterystyka częstotliwościowa głośnika jest zbliżona do liniowej tylko w zakresie od 400 do $7000Hz$, to zawiera się w nim większość słyszanych odbieranych przez człowieka dźwięków.

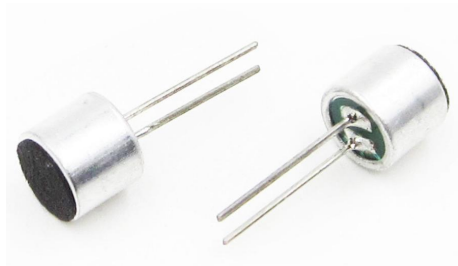
Sterowanie głośnikami zostało przewidziane z wykorzystaniem wbudowanych w mikrokontroler dwóch 12-bitowych przetworników cyfrowo-analogowych w trybie single-ended. Ich wyjścia były dodatkowo wzmacniane przez układy *TPA2005D1DGNR* firmy *Texas Instruments*. Są to wzmacniacze audio klasy D, stworzonej na potrzeby urządzeń przenośnych. Obok innych popularnych klas, jak A, B, AB, czy G, klasa D charakteryzuje się bardzo wysoką wydajnością mocową (nawet powyżej 90%). Wynika ona stąd, że w odróżnieniu od pozostałych, gdzie stosowane są konfiguracje common-emitter lub push-pull, klasa D stosuje całkowite załączanie lub wyłączanie tranzystora wyjściowego i modulację częstotliwości PWM, aby przybliżyć analogowy poziom napięcia[12]. Układ *TPA2005D1* ma według specyfikacji wydajność ok. 85% przy 32Ω głośniku, zasilaniu $3.6V$ i mocy wyjściowej $100mW$.

Dodatkowo układy te mają wbudowany pin shutdown, który został użyty aby wyłączać je w trybie uśpienia słuchawek opisanym szerzej w rozdziale **REF DO ROZDZIAŁU Z SYSTEMEM SŁUCHAWEK**. Dzięki niemu wzmacniacze mogą pobierać zaledwie $0.5A$.

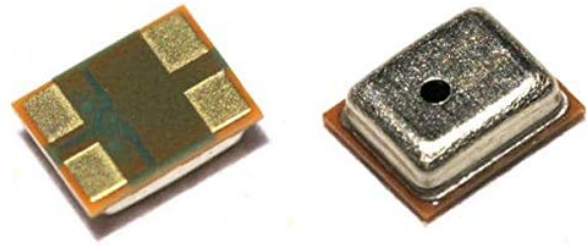
W idealnym przypadku słuchawki powinny zawierać kilka głośników, co umożliwiłoby symulację dźwięku przestrzennego. To jednak zwiększyłoby koszt słuchawek, wymagało zamontowania kilku mikrofonów, utrudniło rozmieszczenie elementów wewnątrz i implementację algorytmu wyciszającego.

5.3. Mikrofony

Wybór mikrofonu był największym problemem ze względu na różne technologie wykonania (elektretowy, MEMS) oraz dużo różnych parametrów. Początkowo miał to być mikrofon elektretowy, jednak okazało się, że są one mało precyzyjne. Konieczne było wybranie technologii MEMS, czyli miniaturowego mikrofonu wbudowanego w chip z otworem do akwizycji fal akustycznych.



(a) Mikrofon elektretowy



(b) Mikrofon MEMS

Rys. 5.1. Mikrofony w różnych technologiach

Do celów projektu wybrany został mikrofon *SPW2430HR5H-B* firmy *Knowles*. Ponieważ jest to urządzenie on-chip, konieczne było dostosowanie projektu tak, aby płytką była maksymalnie blisko zewnętrznej ścianki obudowy. Port do akwizycji znajduje się w górnej części elementu i jest odsunięty o $1mm$ od dolnej części, a więc ok. $1mm$ od powierzchni PCB. Jednym z głównych kryteriów wyboru była czułość. Informuje ona, jaka amplituda sygnału wyjściowego mikrofonu odpowiada danemu poziomowi ciśnienia akustycznego. W specyfikacji podawana jest jako ujemna wartość dBV/Pa mierzona falą akustyczną o częstotliwości $1kHz$ i SPL $94dB$. Jednostka dBV oznacza liczbę decybeli w odniesieniu do $1V$ [13]. Stąd wzór na czułość wygląda następująco:

$$Sensitivity_{dBV} = 20 \cdot \log_{10} \frac{Sensitivity_{mV/Pa}}{Output_{REF}} \quad (5.1)$$

gdzie:

$Sensitivity_{dBV}$ - czułość w dBV/Pa

$Sensitivity_{mV/Pa}$ - czułość w mV/Pa

$Output_{REF}$ - wyjściowe napięcie odniesienia ($1000mV/Pa$)

Powyższy wzór można przekształcić, aby z podanej w nocie katalogowej czułości obliczyć poziom napięcia dla danego SPL.

$$Sensitivity_{mV/Pa} = 1000 \cdot 10^{\frac{Sensitivity_{dBV}}{20}} \quad (5.2)$$

Wybrany mikrofon ma średnią czułość $-42dBV/Pa$, a więc zgodnie ze wzorem 7, $943mV/Pa$. Stąd przy poziomie ciśnienia akustycznego $1Pa$ zmiana sygnału wyjściowego mikrofonu wyniesie $7,943mV$. Według specyfikacji maksymalny poziom SPL to $129dB$, czyli $56,37Pa$. Maksymalną zmianą napięcia wyjściowego mikrofonu powinno być więc $447,75mV$.

Czułość mikrofonu jest zwykle odwrotnie proporcjonalna do jego maksymalnego SPL. Dlatego w projekcie słuchawek strzeleckich, które są przeznaczone do nasłuchiwania zarówno skrajnie cichych, jak i skrajnie głośnych dźwięków, zastosowanie jednego mikrofonu wymaga kompromisu między oboma parametrami.

Rozwiązaniami w tej sytuacji byłoby zastosowanie dwóch mikrofonów o różnych czułościach lub dodanie wzmacniacza sterowanego przez oprogramowanie. Pierwsze z nich gwarantuje dobrą akwizycję wszystkich poziomów dźwięków, jednak jest wyzwaniem pod względem konstrukcyjnym, wymaga użycia większej liczby przetworników analogowo-cyfrowych i sprawnego przełączania przetwarzania przez oprogramowanie. Drugie zaś bazowałoby na mikrofonie o małej czułości i przy małych natężeniach dźwięku zwiększaniu jego amplitudy wyjściowej przez wzmacniacz sterowany potencjometrem cyfrowym. To rozwiązanie wydaje się być lepsze, choć również wymaga zaprogramowania portów mikrokontrolera tak, aby dostosowały wzmocnienie.

W tym konkretnym przypadku problemem jest konieczność przetwarzania dźwięków o amplitudach przekraczających $140dB$ **REFERENCJA** Znalezienie mikrofonu z takim wysokim progiem jest bardzo trudne, dlatego prawdopodobnie konieczne by było mechaniczne wyciszenie dźwięków docierających do mikrofonu, aby obniżyć odbierany poziom ciśnienia akustycznego.

Słuchawki zostały dodatkowo zaprojektowane tak, aby była możliwość podłączenia ich do radiotelefonu. Do tego celu został wybrany jeszcze jeden mikrofon montowany w elastycznej rurce przed ustami użytkownika i umożliwiający rozmowę z użyciem komunikacji radiowej. W tym przypadku jest to mikrofon elektretowy *CMEJ-4622-25-L082*, ponieważ jego montaż nie wymaga padów lutowniczych. Nie było konieczne wybieranie mikrofonu o dobrym SNR,

ponieważ komunikacja radiowa i tak wprowadza duże szумы. Czułość mikrofonu powinna być natomiast stosunkowo mała, ponieważ odległość od źródła dźwięku jest niewielka.

5.4. Mikrokontroler

Jako jednostkę obliczeniową, wybrano mikrokontroler firmy *STMicroelectronics*: *STM32L476RG*.

Jego rdzeniem jest 32-bitowy *Cortex-M4* z możliwością zastosowania bibliotek DSP (ang. *Digital Signal Processing* - Cyfrowe Przetwarzanie Sygnałów). Z kolei *L* jest niskoprądową alternatywą dla serii *F*. Głównie tych dwóch powodów został wybrany do tych słuchawek.

Maksymalna częstotliwość zegara procesora wynosi 80MHz . Mikrokontroler posiada 3 12-bitowe przetworniki analogowo-cyfrowe, czyli akurat tyle, aby próbkować dwa mikrofony i sygnał z radiotelefonu. Do tego 2 12-bitowe przetworniki cyfrowo-analogowe - po jednym na głośnik[14].

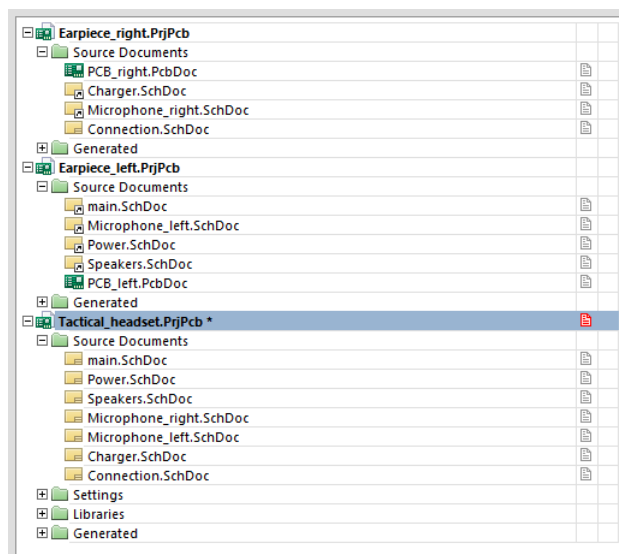
Na potrzeby prototypowania wykorzystano płytkę *Nucleo-64*, która zawiera programator *ST-LINK*, diodę oraz przycisk użytkownika, przycisk resetu i jest kompatybilna z nakładkami na popularną platformę *Arduino Uno*. Miała ona zostać również użyta do zaprogramowania mikrokontrolera na docelowej płytce PCB.

5.5. PCB

Projekt płytki PCB został wykonany w programie *Altium Designer 6.1* na licencji AGH udostępnionej przez Promotora. Postępy były archiwizowane z użyciem systemu kontroli wersji *git*. Repozytorium z projektem: https://gitlab.com/Hoplophile/tactical_headphones.git.

Zastosowano globalne etykiety połączeń i podział na pliki dla lepszej przejrzystości. Do wyglądu schematów wykorzystany został szablon stworzony w ramach zajęć *Podstawy projektowania obwodów z wykorzystaniem oprogramowania CAD/CAM*.

Ponieważ użyta wersja *Altiuma* nie posiada jeszcze opcji projektu wielolayoutowego, konieczne było stworzenie dwóch podprojektów. Zostały do nich dodane odpowiednie pliki z głównego projektu. Strukturę plików przedstawiono na obrazku 5.2.



Rys. 5.2. Struktura plików w projektach PCB

Poniżej opisano poszczególne schematy oraz layouts składające się na projekt słuchawek.

5.5.1. Main

Plik main.sch zawiera ogólne elementy schematu, czyli: mikrokontroler, przyciski użytkownika oraz konektory do programowania, komunikacji między lewą i prawą słuchawką, mikrofonu komunikacyjnego i komunikacji radiowej.

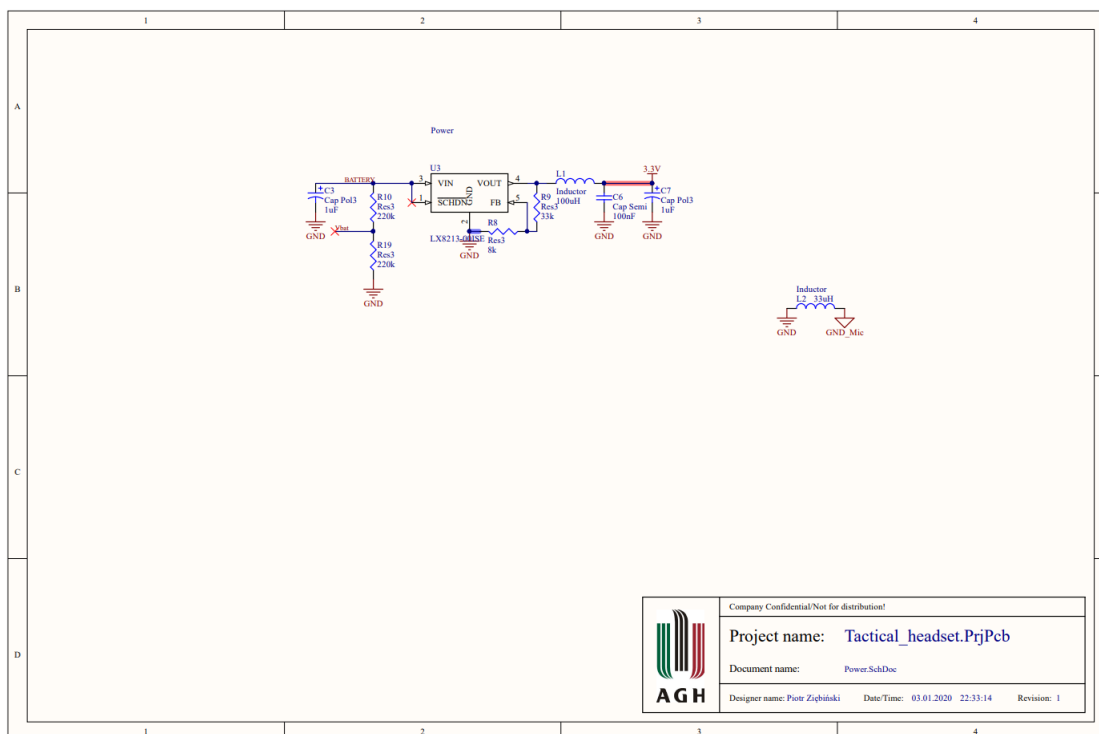
Przewidziano 3 przyciski dla użytkownika (plus/góra, minus/dół, główny). Zostały podłączone do portów GPIO mikrokontrolera oraz do zasilania przez rezystory pull-up o wartościach 4, 7kΩ. Wciśnięcie przycisku jest równoważne ze zwarciem danego portu do masy.

Podobnie pin **NRST** jest podłączony do zasilania przez rezystor pull-up. W pierwszych wersjach schematu był tam również podłączony przycisk **TACT**, jednak usunięto go, aby zaoszczędzić miejsce. Reset jest możliwy poprzez zwarcie pinu resetu na konektorze **SWD**.

Złącze do programowania jest zaprojektowane tak, aby można było flashować i debugować mikrokontroler przez złącze **ST-LINK** obecne na przykład na platformie Nucleo, na której wykonywany był prototyp.

Konektor do komunikacji radiowej ma 3 piny. Pierwszy jest połączeniem do masy. Drugi przekazuje sygnał z radiotelefonu do przetwornika analogowo-cyfrowego mikrokontrolera. Trzeci jest pinem wyjściowym mikrofonu komunikacyjnego, przy którym zastosowano równolegle rezystor, ograniczający prąd zasilania mikrofonu oraz szeregowo kondensator blokujący napięcie stałe.

Do pinu V_{REF} mikrokontrolera dodano dodatkowo dwa kondensatory: **C1** i **C4**. Zastosowano je później, po pierwszych próbach odczytu sygnału z mikrofonu przez wbudowany ADC, ponieważ okazało się, że jest on obciążony dużym szumem.

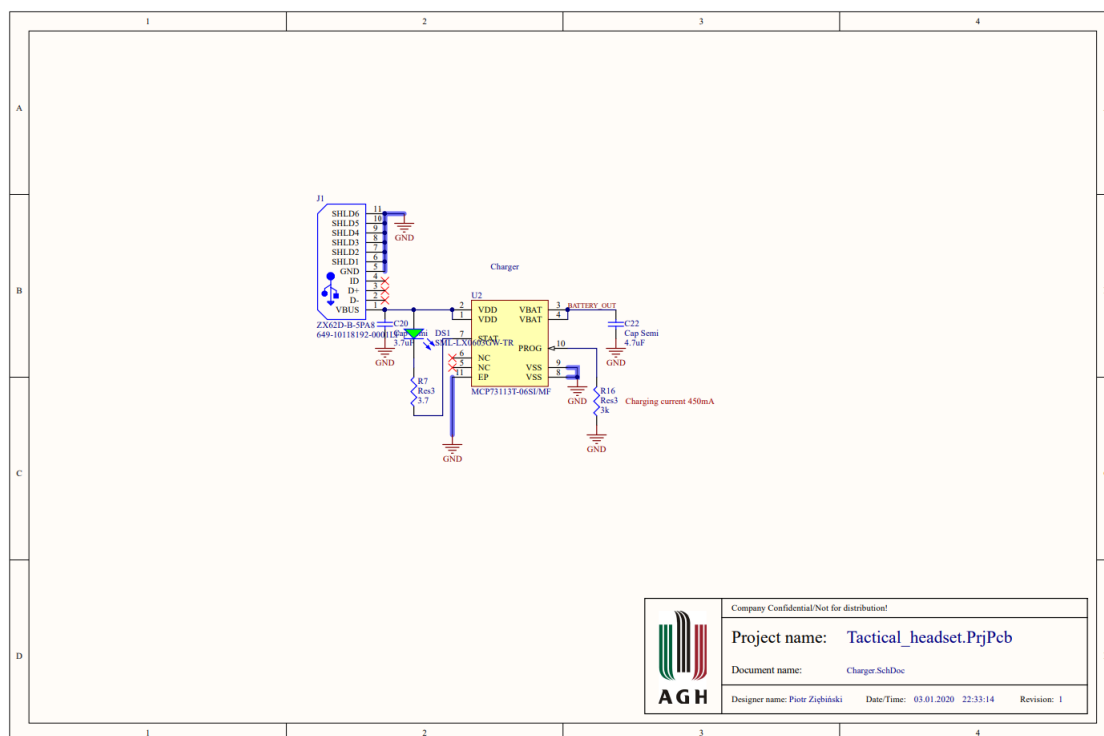


Rys. 5.4. Schemat Power

5.5.3. Charger

Układ ładujący do akumulatora został przeniesiony na osobny schemat, kiedy zdecydowano o jego umieszczeniu na drugiej płytce. Wejściem jest złącze żeńskie micro USB B, przez które dostarczane jest napięcie $5V$, natomiast wyjście jest bezpośrednio połączone z portem akumulatora. Wykorzystano również możliwość wskazywania statusu ładowania, dodając diodę LED według specyfikacji. Rezystor **R16** służy do ustawiania prądu ładowania, wybrana wartość jest równoważna z $450mA$, co jest bliskie maksymalnemu prądowi ładowania wybranego akumulatora, wynoszącemu **PRĄD ŁADOWANIA**.

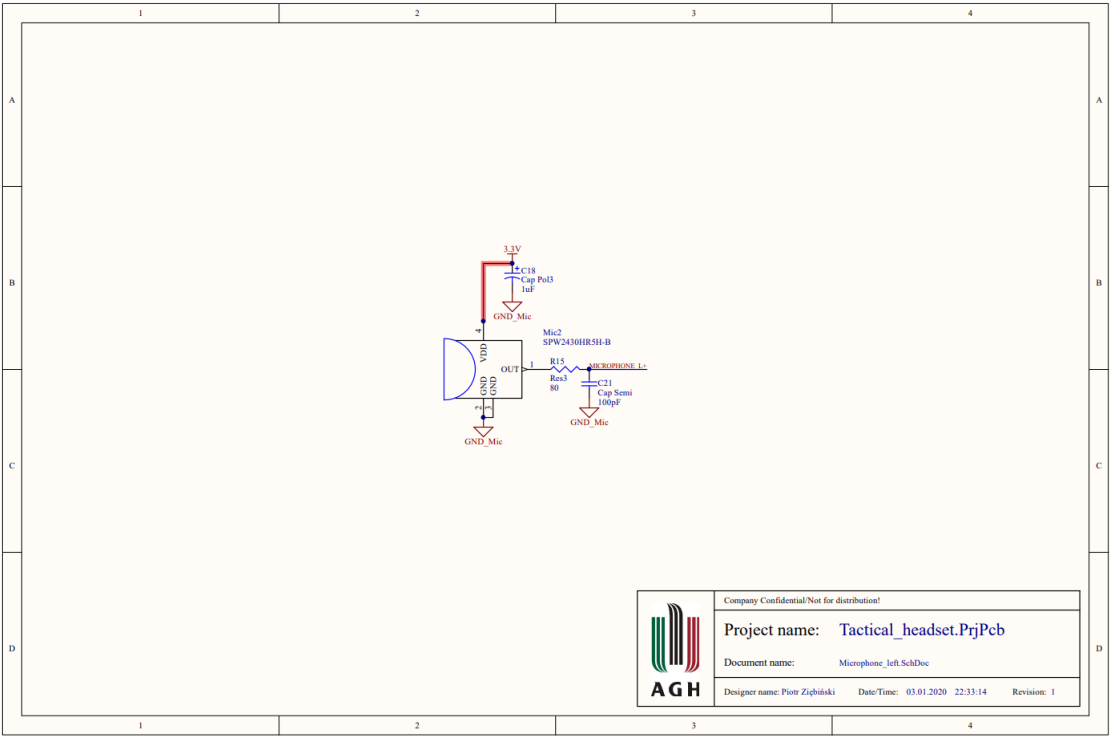
Zgodnie z zalecaną aplikacją w nocie katalogowej, dodano kondensatory na wejściu i wyjściu układu.



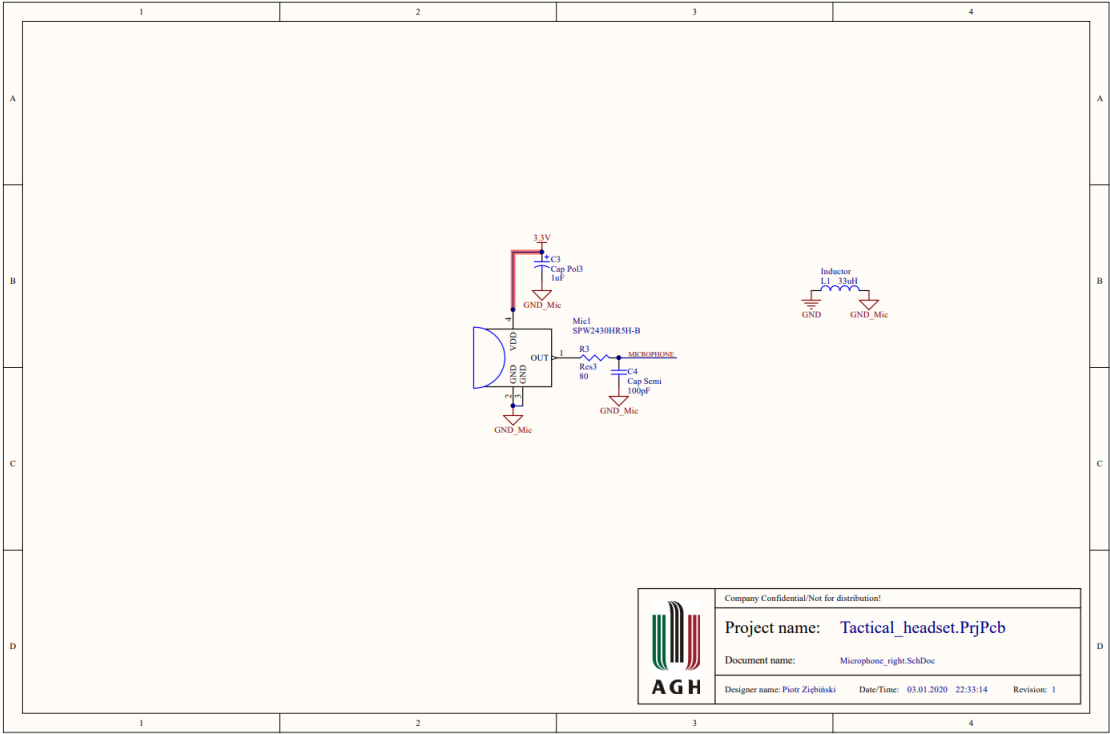
5.5.4. Microphone_left i Microphone_right

Oba pliki zawierają bliźniacze schematy z symbolami mikrofonów *SPW2430*. Oprócz nich wstawione zostały kondensatory filtrujące na zasilaniu oraz filtry dolnoprzepustowe RC na wyjściach. Podobnie jak w poprzednim przypadku - pierwotnie jeden schemat został później podzielony na dwa, ponieważ drugi mikrofon znajduje się na drugiej płytce PCB i musi być zamontowany powierzchniowo.

W projekcie zastosowano dwie rozdzielne masy. Na potrzeby filtracji szumów rozważane były różne konfiguracje i ostatecznie zdecydowano o utworzeniu osobnej masy dla mikrofonów, połączonej na obu płytkach indukcyjnością z głównym GND.



Rys. 5.6. Schemat *Microphone_left*



Rys. 5.7. Schemat *Microphone_right*

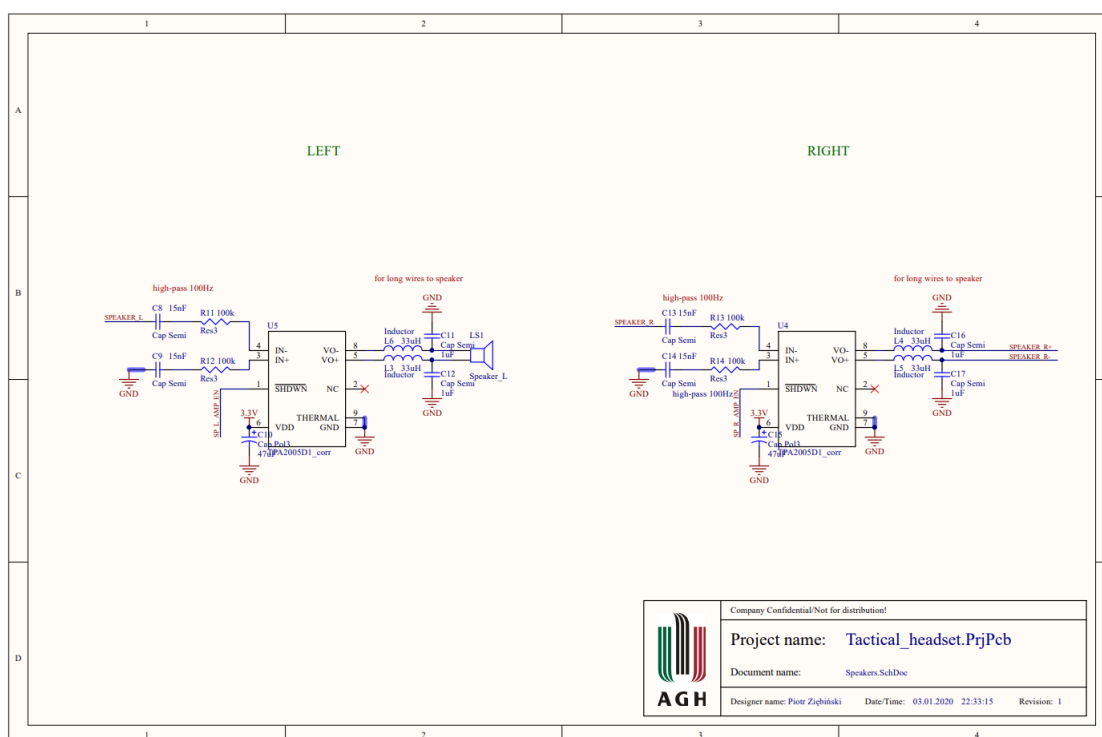
5.5.5. Speakers

W przypadku głośników schemat jest wspólny, ponieważ oba wzmacniacze zostały umieszczone na głównym PCB.

Na wyjściach zastosowano filtry LC z częstotliwością graniczną 27kHz sugerowane w specyfikacji, aby obniżyć szumy EMI. Zasilania również zostały odfiltrowane kondensatorami **C10** oraz **C15**.

Na wejściach różnicowych stworzono filtry górnoprzepustowe na 100Hz .

Piny **SHUTDOWN** zostały podłączone do mikrokontrolera w celu wyłączania wzmacniaczy w trybie uśpienia systemu. Pobierają wtedy maksymalnie $2\mu\text{A}$.

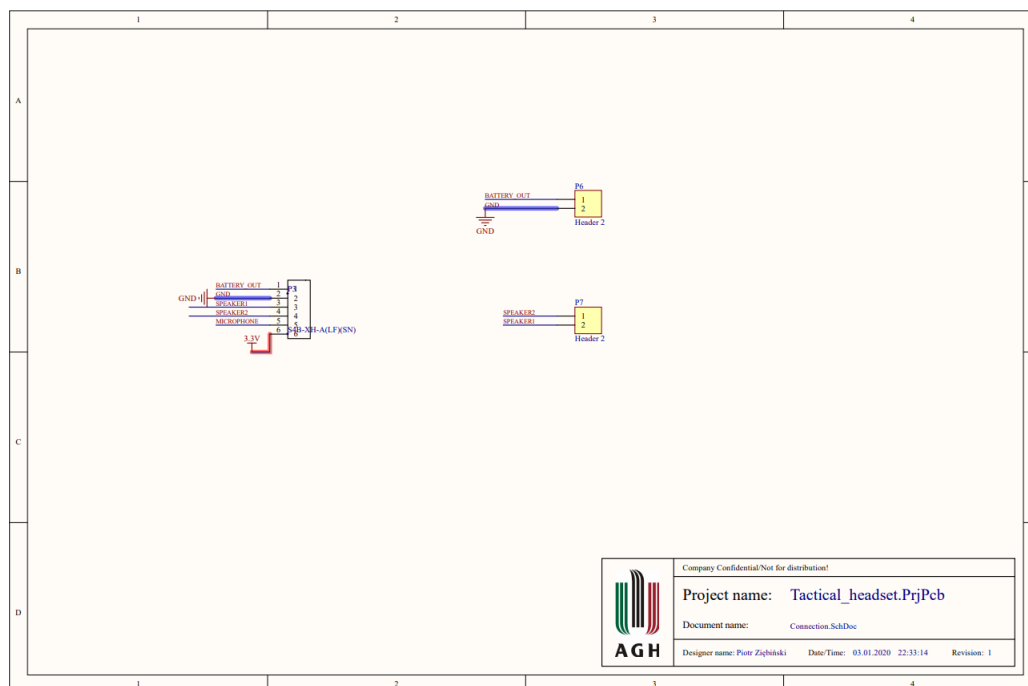


Rys. 5.8. Schemat *Speakers*

5.5.6. Connection

Schemat stworzony na potrzeby drugiej płytki. Znajdują się na nim: konektor komunikacyjny do głównego PCB, wyjścia do głośnika oraz baterii.

Komunikacja między płytkami odbywa się 6 przewodami: masa, zasilanie $3,3\text{V}$, napięcie baterii, dwa sygnały do głośnika i sygnał mikrofonu.

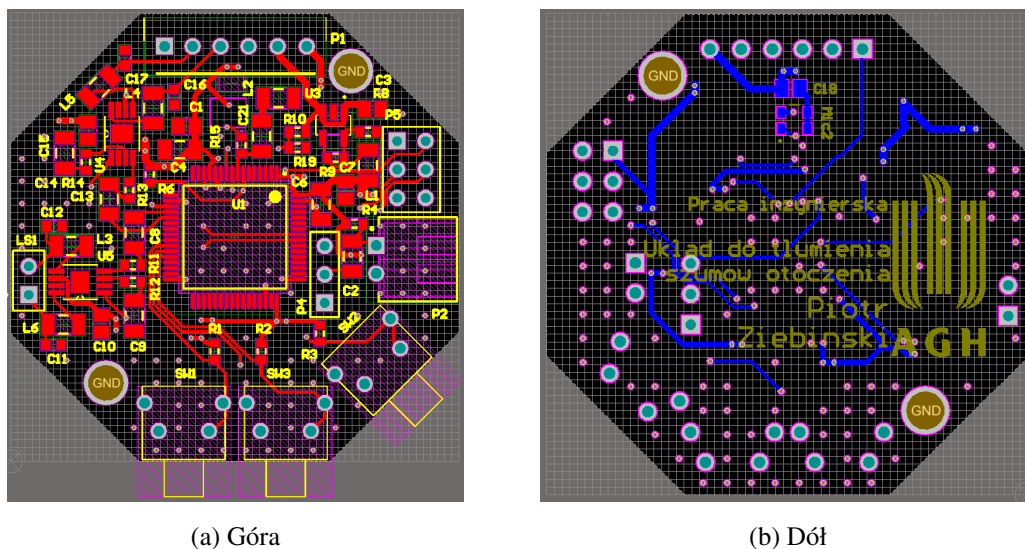
Rys. 5.9. Schemat *Connection*

5.5.7. PCB_left

Jest to główna płytką, na której znajduje się mikrokontroler odpowiedzialny za obliczenia i przetwarzanie sygnałów. Oprócz tego umieszczono na niej przede wszystkim: przyciski, konektor do programowania, do podłączenia radiotelefonu i mikrofonu komunikacyjnego, dwa otwory montażowe wzmacniacze do głośników oraz mikrofon. Ma ona kształt ośmiokąta foremnego o całkowitej szerokości i wysokości 40mm . Zastosowanie niewielkich wymiarów pozwoliło na łatwe umieszczenie płytki w obudowie i pozostawienie miejsca na materiał wyciszający.

Prawie wszystkie elementy, oprócz mikrofonu i filtrującego jego zasilanie kondensatora, zostały umieszczone na górnej warstwie. Te dwa elementy znajdują się na dole, ponieważ port mikrofonu musiał być skierowany na zewnątrz obudowy i być maksymalnie blisko niej. Do rezystorów zastosowano obudowy 0603, a do kondensatorów i cewek 1206. Utworzone zostały masy **GND** oraz **GND_Mic** na dolnej i górnej warstwie. Związano z nimi także siatkę przelotek łączących obie warstwy ze sobą. Płytką posiada dwa otwory montażowe o średnicach $3,2\text{mm}$.

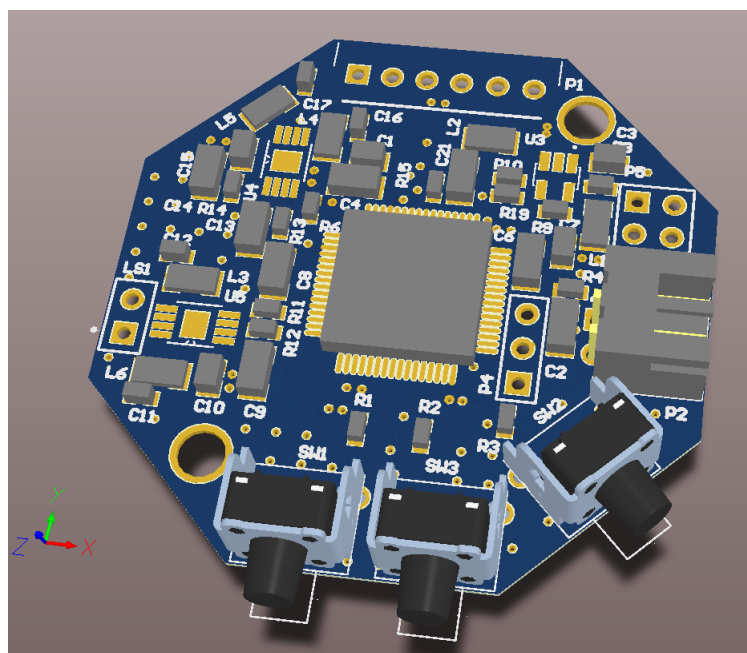
Do mikrofonu komunikacyjnego i połączenia między płytkami zastosowano konektory *JST-XH*. Wyjście głośnika i piny do radiotelefonu przewidziano jako otwory, do których zostaną przylutowane odpowiednie przewody. Natomiast konektor **SWD** ma służyć jako punkty stykowe do kabla programatora.



(a) Góra

(b) Dół

Rys. 5.10. Layout lewej płytki PCB



Rys. 5.11. Wygląd płytki z góry w trybie podglądu 3D

5.5.8. PCB_right

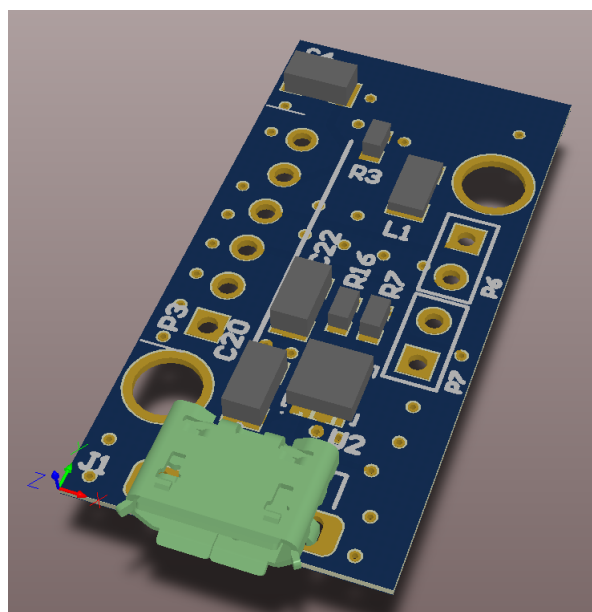
Płytką prawa ma znacznie bardziej ograniczoną funkcjonalność. Z tego powodu jej kształt został ograniczony do prostokąta o wymiarach $15 \times 30 \text{ mm}$.

Podobnie jak w lewej, tylko mikrofon i kondensator na jego zasilaniu, znajdują się na dolnej warstwie. Płytkę zawiera oprócz tego konektor do połączenia do drugiej płytki, wyjścia głośnika

i baterii oraz układ ładujący z konektorem mikro USB typu B. Również zastosowano tutaj otwory montażowe oraz po dwie masy na warstwę i dla każdej sieć przelotek.



Rys. 5.12. Layout prawej płytki PCB

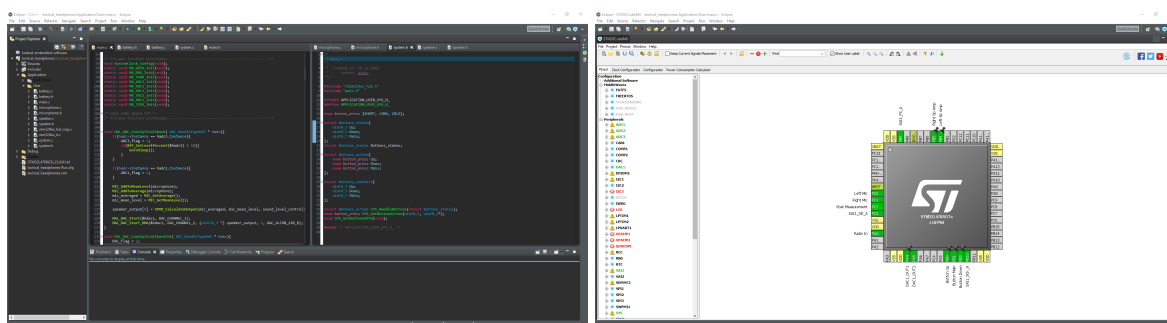


Rys. 5.13. Wygląd prawej płytki z góry w trybie podglądu 3D

6. Software

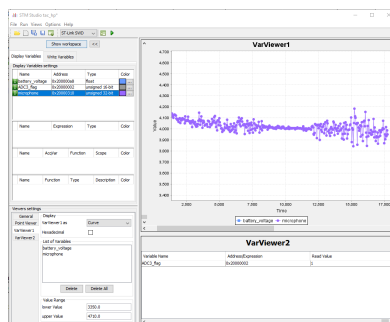
Oprogramowanie słuchawek zostało napisane w języku C z wykorzystaniem bibliotek HAL, które zawierają dużo gotowych funkcji, na przykład do uruchomienia timera lub do odczytu wartości z przetwornika. Użyto narzędzia *System Workbench for STM32*, które jest zbudowane na popularnym IDE *Eclipse*. Kod do konfiguracji i inicjalizacji peryferiów został wygenerowany z użyciem *CubeMX*. Dodatkowo jako program pomocniczy zainstalowano *STMStudio*, które korzysta z *ST LINKa* do odczytu przez USB wartości adresów w pamięci procesora (zmiennych) i wyświetla je w formie wykresu lub tabeli.

Tak jak przy pozostałych elementach projektu, wykorzystano repozytorium do zapisywania postępów: https://github.com/Hoplophile/TacticalHeadphones_SW.git



(a) System Workbench for STM32

(b) CubeMX



(c) STMStudio

Rys. 6.1. Narzędzia użyte do rozwoju oprogramowania

Kod był pisany tak, aby rozdzielić program na funkcje wykonujące niewielkie fragmenty. Przewidziano także elastyczną możliwość modyfikacji lub dodawania funkcjonalności, na przykład implementując do V_{BAT} 3 funkcje, odczytujące: wartość surową oraz bazujące na niej wartości w Voltach i procentach. W obecnej wersji użyta została ta ostatnia.

Dla lepszej nawigacji, zastosowano konwencję nazewnictwa funkcji - <NAZWA_ZWIĄZANA_Z_NAZWA_PLIKU>_<funkcjonalnośćFunkcji>. Na przykład funkcja dodająca wartość do średniego poziomu sygnału mikrofonu zawarta w pliku *microphone.c* została nazwana *MIC_AddToMeanLevel*.

Każda funkcja ma przed definicją krótki opis funkcjonalności oraz przyjmowanych i zwracanych wartości.

Do większości zadań użyto przerw, aby zmaksymalizować wydajność obliczeniową i nie blokować procesów.

6.1. System słuchawek

Funkcje związane ze sterowaniem słuchawkami znajdują się w pliku *system.c*. Zaimplementowano funkcje do odczytu krótkich ($< 300ms$) i długich ($> 3s$) przyciśnień wszystkich 3 przycisków dostępnych dla użytkownika. Stany zapisywane są do struktury z 3 polami typu *enum*, przyjmującymi wartości *IDLE*, *LONG*, *SHORT*. Sprawdzanie jest wyzwalane przez timer co $30ms$. Mimo, że w obecnej wersji wykorzystywane są tylko krótkie przyciśnięcia przycisków **plus** i **minus** do podgląsiania i przyciszania dźwięku w trybie **NORMAL** oraz przytrzymanie głównego do usypiania/wybudzania systemu, to w myśl elastyczności modyfikacji, stan wszystkich przycisków jest monitorowany w ten sam sposób.

Działanie słuchawek opiera się na przełączaniu między trzema stanami:

- **NORMAL** - słuchawki mają bezpośrednio przekazywać dźwięk z zewnątrz i są nastawione na jakość sygnału. Jest to domyślny tryb, do którego system przechodzi po wybudzeniu przez użytkownika przytrzymaniem głównego przycisku.
- **CANCELLING** - próbki odbierane przez mikrofon muszą zostać jak najszybciej dodane do kolejki, skąd ze ściśle określonym opóźnieniem (równym czasowi przelotu fali akustycznej) zostają wypuszczone do głośnika. Warunkiem przejścia do tego trybu jest zmierzenie w stanie **NORMAL** amplitudy wykraczającej poza określony próg. System wraca do **NORMAL**, jeśli amplituda ponownie spadnie poniżej progu.
- **SLEEP** - tryb oszczędzania baterii, w którym wyłączone są przerwy od wszystkich przetworników oraz za pomocą pinów GPIO wzmacniacze głośników. Przejście do tego stanu może być wywołane przez zanotowanie poziomu baterii poniżej 3,12V (10%) lub przez przytrzymanie głównego przycisku przez 3s.

Odczyt poziomu naładowania akumulatora został wydzielony do pliku *battery.c*. Tak jak zostało to opisane na początku tego rozdziału, V_{BAT} można pobrać w trzech różnych formach. Odczyt jest wykonywany na zakończenie konwersji, tak samo jak w przypadku mikrofonu 6.2, lecz wykorzystano dodatkowo *clock prescaler* o wartości 256 (największej możliwej). Sprawdzanie napięcia na baterii nie wymaga dużej częstotliwości, a jej zmniejszenie umożliwia pozostałym funkcjonalnościom nieprzerwane działanie.

6.2. Odczyt sygnału z mikrofonu

Pierwsze kroki z oprogramowaniem słuchawek polegały na inicjalizacji peryferiów potrzebnych do odczytu analogowego wyjścia mikrofonu. Od początku wybrano odczyt ADC z użyciem DMA (ang. *Direct Memory Access* - Bezpośredni Dostęp do Pamięci). Jest to podejście, w którym przetwornik, za pomocą kontrolera DMA, ma bezpośredni dostęp do pamięci RAM. Dzięki temu główny procesor zostaje odciążony od przesyłania danych i może w tym czasie wykonywać inne operacje. Odczyt z przetworników wykonywano w ciele funkcji *HAL_ADC_ConvCpltCallback*, która jest wywoływana automatycznie po zakończonej konwersji ADC w trybie przerwań.

Użyto zegara HSI (ang. *High Speed Internal* - Wysokiej Prędkości Wewnętrzny [zegar]) do wyzwalania przetwornika. Jego podstawowa częstotliwość wynosi $16MHz$. Z wykorzystaniem wbudowanego PLLa zwiększono prędkość do $80MHz$ i użyto jako źródło dla całego mikrokontrolera razem z peryferiami. W trakcie rozwoju oprogramowania okazało się, że odczyt jest bardzo zaszumiony, dlatego zrezygnowano z użycia PLLa, który był potencjalnym źródłem szumu. Podstawowa częstotliwość HSI była jednak za mała, więc zmieniono źródło na MSI (ang. *Multi Speed Internal* - Wielo-Prędkościowy Wewnętrzny [zegar]), którego częstotliwość podstawowa wynosi $48MHz$ i taka została ostatecznie użyta w całym systemie.

Kolejnym zabiegiem mającym polepszyć jakość odczytywanego sygnału było zatrzymywanie przetwarzania ADC w trakcie pracy DAC i odwrotnie. Negatywnym skutkiem było spowolnienie systemu, jednak wysoka jakość jest potrzebna głównie w trybie przekazywania dźwięków z otoczenia do użytkownika. Gdyby więc okazało się, że system nie nadąża z nakładaniem antyfazy w celu wyciszania - na potrzeby zwiększonej szybkości, a kosztem jakości, system mógłby przejść w tryb jednoczesnego przetwarzania ADC i DAC.

Funkcje związane z odczytem i bezpośrednim przetwarzaniem danych z mikrofonów znajdują się w pliku *microphone.c*.

OPISAĆ MIKROFON CYFROWY, USREDNIANIE I FIR

6.3. Wysyłanie sygnału do głośnika

Do sterowania głośnikami wykorzystano wbudowane przetworniki DAC i tak jak przy mikrofonach - użyto DMA oraz wywołania funkcji *HAL_DAC_ConvCpltCallback*.

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] Corinne Williams. „Hearing restoration: Graeme Clark, Ingeborg Hochmair, and Blake Wilson receive the 2013 Lasker DeBakey Clinical Medical Research Award”. W: *The Journal of Clinical Investigation* 123.10 (2013). DOI: <https://www.jci.org/articles/view/72707/pdf>.
- [7] Dave Sather. *SOUND PRESSURE LEVEL CHART*.
<https://thewellcommunity.org/podcasts/engineering/sound-pressure-level-chart>. 2012.
- [8] *Occupational Noise Exposure*. U.S. Department of Health i Human Services. 1998.
- [9] dr n. med. Mariola Zagor. *Urazy akustyczne*.
<https://www.mp.pl/pacjent/otolaryngologia/choroby/choroby-uszu/110217,urazy-akustyczne>. 2017.
- [10] Sam Irving Rémy Pujol Jing Wang. *NOISE INDUCED TRAUMA*.
<http://www.cochlea.eu/en/pathology/surdites-neuro-sensorielles/traumatisme-acoustique>. 2018.

-
- [11] Sérgio Koodi Kinoshita Heraldo Lorena Guida Thiago Hernandes Diniz. *Acoustic and psychoacoustic analysis of the noise produced by the police force firearms*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1808869415308053>.
- [12] Robert Nicoletti. *Types of audio amplifiers*.
<https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/5/5590.html>. Maxim Integrated, 2013.
- [13] Jarad Lewis. *Understanding Microphone Sensitivity*.
<https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/understanding-microphone-sensitivity.html>.
- [14] *STM32L476xx Datasheet*. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l476je.pdf>. STMicroelectronics.