

KIERUNEK: ELEKTRONIKA

PRACA DYPLOMOWA
INŻYNIERSKA

Stereofoniczny wzmacniacz mocy audio
z interfejsem Bluetooth

Stereo audio power amplifier with Bluetooth interface

AUTOR:

Damian Jarczok

PROMOTOR:

Dr inż. Piotr Pruchnicki

Składam serdeczne wyrazy podziękowania

Panu dr inż. Piotrowi Pruchnickiemu

za pomoc oraz poświęcony czas.

Za wsparcie finansowe do realizacji projektu

dziękuję mojemu dziadkowi Zbigniewowi.

Spis treści

1	Wprowadzenie	3
1.1	Motywy podjęcia tematu projektu	3
1.2	Wprowadzenie do wzmacniaczy mocy audio.....	5
1.3	Wzmacniacze mocy audio klasy D.....	6
1.4	Rola i zastosowanie interfejsu Bluetooth w urządzeniach audio.....	7
2	Opis układu wzmacniacza mocy audio	8
2.1	Ogólna architektura.....	8
2.2	Regulacja barwy	10
2.3	Filtr dolnoprzepustowy kanału niskotonowego	14
2.4	Stopień mocy	17
2.5	Moduł Bluetooth	20
2.6	Układ zasilania.....	21
3	Projekt płytki drukowanej oraz urządzenia.....	22
3.1	Projekt PCB	22
3.2	Dobór komponentów elektronicznych.....	23
3.3	Montaż urządzenia	27
4	Pomiary i analiza parametrów wzmacniacza	29
4.1	Parametry wzmacniacza	29
4.1.1	Tony niskie i wysokie w pozycji neutralnej.....	31
4.1.2	Tony niskie i wysokie w pozycji minimalnej	32
4.1.3	Tony niskie i wysokie w pozycji maksymalnej	34
4.1.4	Kanał niskotonowy, maksymalna regulacja barwy, $R_L = 2 \Omega$	36
4.1.5	Kanał niskotonowy, maksymalna regulacja barwy, $R_L = 4 \Omega$	38
4.2	Analiza obiektywnych parametrów jakości dźwięku	40

4.3	Ocena działania	41
5	Podsumowanie	43
5.1	Wnioski	43
5.2	Perspektywy rozwoju projektu.....	44
5.3	Uwagi końcowe.....	46
6	Dodatki	47
6.1	Kompletny schemat elektroniczny i projekt PCB	47
6.2	Spis rysunków	51
6.3	Spis źródeł literaturowych.....	53

1 Wprowadzenie

1.1 Motywy podjęcia tematu projektu

W branży urządzeń elektroakustycznych stale wyznaczone są nowe trendy i standardy odpowiadające potrzebom rynkowym, które są nie tylko wyraźnie widoczne, lecz wręcz zaskakujące w swojej intensywności. Proces ten postępuje niezwykle dynamicznie zwłaszcza na rynku urządzeń powszechnego użytku, gdzie rozwiązania, które jeszcze stosunkowo niedawno były uznawane za te z najwyższej półki szybko mogą stać się przestarzałe lub mało użyteczne. Koniecznością zatem jest nieustanne i sprawne dopasowywanie się do nowych trendów i oczekiwań konsumentów. Szczególnie w okresie od drugiej połowy XX wieku, kiedy technologia zaczęła znacząco szybować w górę możemy obserwować tendencję do znaczącej miniaturyzacji urządzeń elektronicznych – w tym również elektroakustycznych. Komputery stacjonarne, kompaktowe laptopy czy telefony komórkowe posiadające ogromną moc obliczeniową oraz dostęp do Internetu skutecznie wyparły z rynku powszechnego użytku wiele urządzeń i przedmiotów, które znajdowały się jeszcze stosunkowo niedawno w praktycznie każdym domu, np. kalkulator, radio czy aparat fotograficzny. Rozwiązania te pomimo generalnego braku parametrów odpowiadających poziomem jakości sprzętom do zastosowań profesjonalnych zyskały dużą popularność na rynku konsumenckim, gdzie dużo większą wartość przypisuje się designowi, prostocie czy aktualnym trendom. Wszystkie rozważane powyżej kwestie mają bezpośrednie odniesienie do urządzeń z dziedziny audio i są one szczególnie zauważalne na przestrzeni ostatnich lat. Wraz z pojawieniem się smukłych telewizorów, przenośnych głośników czy bezprzewodowych słuchawek znacząco wzrosło zapotrzebowanie na rozwiązania pozwalające dostarczyć dobrej jakości dźwięk przy możliwie małej konsumpcji energetycznej i niewielkim rozmiarom.

W odpowiedzi na powyższe wymagania powstał temat niniejszej pracy, która skupia się na wykonaniu wzmacniacza audio dającego możliwość odsłuchu stereofonicznego w konfiguracji 2.1. Zasadniczą kwestią, którą kierowano się przy jej tworzeniu było dążenie do uzyskania możliwie dużej mocy wyjściowej zachowując dobrą jakość dźwięku i relatywnie mały rozmiar. Ideą przyświecającą w procesie twórczym było zbudowanie urządzenia nadającego się do zastosowania jako wzmacniacz

do zestawu głośnikowego mogącego znaleźć zastosowanie np. jako głośniki komputerowe lub bardzo popularne niegdyś zestawy stereo typu „wieża”. Biorąc pod uwagę docelowe przeznaczenie urządzenia i popularność bezprzewodowych technologii komunikacji zdecydowano wyposażyć je w dwa sposoby łączności z urządzeniami wejściowymi, którymi są złącze jack 3.5 mm oraz moduł Bluetooth pozwalający na strumieniowe przesyłanie muzyki za pomocą urządzeń nieposiadających dedykowanego złącza audio. Przed przystąpieniem do wykonywania projektu przeprowadzono rozeznanie wśród oferowanych na rynku urządzeń o podobnych właściwościach. Obserwacja, która nasunęła się jako pierwsza to skromny wybór wzmacniaczy audio przeznaczonych do systemów głośnikowych w konfiguracji 2.1. Może być to spowodowane czynnikiem takim jak preferowane przez konsumentów systemy stereo 2.0, które przeważają estetyczniejszym wyglądem i prostszą konstrukcją z uwagi na brak dodatkowego głośnika niskotonowego. Dodatkowo, komputerowe zestawy głośnikowe czy cieszące się obecnie dużą popularnością soundbary stworzone z myślą o smukłych telewizorach posiadają głośniki aktywne co pozwala znacząco zaoszczędzić miejsce zachowując przy tym estetyczny i minimalistyczny wygląd. W zastosowaniach powszechnego użytku decyzja o zakupie pasywnego zestawu głośnikowego z dedykowanym wzmacniaczem audio najczęściej jest spotykana w systemach kina domowego, gdzie rolę wzmacniacza mocy pełni amplituner posiadający szeroki wachlarz funkcji odbierania i często wielokanałowego przetwarzania sygnału oraz łączności z innymi urządzeniami.

Rozwiązanie zaproponowane w niniejszej pracy ma docelowo być urządzeniem odpowiadającym na potrzeby posiadaczy niekiedy starszych, jednak wciąż sprawnych zestawów pasywnych, którym zależy przede wszystkim na zasileniu głośników sygnałem o odpowiedniej mocy oraz prostej i nowoczesnej łączności za pomocą wejścia jack 3.5 mm lub Bluetooth. Z uwagi na jego przeznaczenie tj. współpracę z typowymi, jedno lub dwudrożnymi pasywnymi zestawami głośnikowymi, w projekcie przewidziano potrzebę regulacji zarówno barwy dźwięku jak i ustawień głośnika niskotonowego w celu umożliwienia jak najlepszego dopasowania ustawień pod preferencje użytkownika.

1.2 Wprowadzenie do wzmacniaczy mocy audio

Rzeczywistość technologii związanej z zapisywaniem oraz odtwarzaniem dźwięku jest kluczowym elementem zarówno w historii muzyki jak i inżynierii audio. Za pierwsze urządzenie pozwalające na zapis oraz odtworzenie nagranych sygnałów audio uznaje się fonograf Thomasa Edisona skonstruowany w 1877 roku. Po fonografie pojawiły się gramofony, a następnie magnetofony, które zamiast odpowiednio wydrążonej powierzchni z zapisanym sygnałem używały taśmy magnetycznej z odpowiednio namagnesowanymi cząstkami. W odpowiedzi na potrzebę zwiększenia amplitudy sygnału dźwiękowego powstały wzmacniacze audio. Począwszy od metalowych tub, przez zastosowania lamp elektronowych aż po zaawansowane układy cyfrowe, przeszły one długą drogę ewolucji. Od samego początku ich rozwoju przyświecał im zasadniczy cel jakim jest uzyskanie możliwie dużego wzmocnienia przy minimalnym wpływie na oryginalny sygnał dźwiękowy.

Wzmacniacze audio, chociaż w założeniu spełniają tę samą funkcję, można podzielić na różne klasy, z których każda charakteryzuje się swoją specyficzną budową oraz zasadą działania. Najmniej skomplikowane konstrukcje oparte są na pojedynczym elemencie wzmacniającym sygnał takim jak lampa elektronowa czy tranzystor, który przewodzi przez cały cykl trwania sygnału. Układy o takiej konstrukcji określa się mianem klasy A. Taki sposób pracy zapewnia minimalne zniekształcenia, jednakże konsekwencją stałego podłączenia elementu wzmacniającego do zasilania jest mała sprawność energetyczna za sprawą zużywania większości tej energii na produkcję ciepła. W konsekwencji układy te wymagają rozbudowanych systemów chłodzenia oraz zasilania. Aby zniwelować aspekt miernej sprawności energetycznej można zastosować dwie komplementarne jednostki wzmacniające, z których każda jest odpowiedzialna za przetwarzanie połowy sygnału audio – jedna dodatniej oraz druga ujemnej. Taki wzmacniacz pracuje w klasie B. Rozwiązanie to znacząco poprawia sprawność energetyczną względem układów w klasie A. Zasadniczy problem we wzmacniaczach klasy B pojawia się w momencie przejścia sygnału audio pomiędzy wartościami dodatnimi i ujemnymi jego amplitudy. W tej okolicy oba tranzystory są przez krótki czas nieaktywne co tworzy przerwę w przekazaniu sygnału na wyjście wzmacniacza, a tym samym powoduje zniekształcenia, które noszą nazwę zniekształceń skrośnych (crossover distortion). W odpowiedzi na ten problem powstała klasa wzmacniaczy AB, która jest kompromisem

jakości dźwięku i sprawności energetycznej wspomnianych wyżej klas. Za sprawą odpowiedniej polaryzacji baz tranzystorów wyjściowych są one aktywne dłużej co oznacza, że obszary ich pracy na siebie zachodzą. W efekcie, gdy sygnał przechodzi pomiędzy wartościami dodatnimi i ujemnymi jego amplitudy oba tranzystory są w stanie częściowego przewodzenia co eliminuje lub znacząco zmniejsza przerwę w przekazywaniu sygnału, a tym samym redukuje zniekształcenia skrośne [1].

Nie rozwiązuje to jednak kwestii sprawności energetycznej, której teoretyczna wartość może wynosić 78,5%, natomiast w zastosowaniach praktycznych oscyluje w okolicy 60%. Z tego powodu, na podstawie klasy AB powstały jej rozszerzenia takie jak klasa G czy klasa H. W celu zminimalizowania strat energii posłużono się wielopoziomowym zarządzaniem zasilania tranzystorów wyjściowych, których dostarczane napięcie uzależnione jest od sygnału audio, który zostaje do nich doprowadzony. Jest to niezwykle użyteczne rozwiązanie biorąc pod uwagę sposób w jaki w większości praktycznych sytuacji użytkowane są wzmacniacze audio, tj. ich pełna moc rzadko jest w pełni wykorzystywana w sposób ciągły. Dzięki temu rozwiązaniu możliwe jest uzyskanie sprawności nawet 80%. Biorąc również pod uwagę bardzo dobrą jakość dźwięku oferowaną przez klasę G czy H są one obecnie jednymi z najchętniej wykorzystywanych rozwiązań w konstrukcji wzmacniaczy mocy audio.

1.3 Wzmacniacze mocy audio klasy D

Nieco innym podejściem do tematu wzmacniania sygnału audio są wzmacniacze klasy D. Określa się je również mianem wzmacniaczy impulsowych, którą to nazwę zawdzięczają sposobowi w jaki przetwarzają sygnał dźwiękowy podany na ich wejście. Oferują wyjątkową sprawność energetyczną i kompaktowość. Wzmacniacze te pojawiły się w latach 60. XX wieku jako odpowiedź na coraz większe zapotrzebowanie na urządzenia przenośne i ich stopniową miniaturyzację, gdzie długość czasu pracy na baterii stała się istotnym parametrem.

W standardowych wzmacniaczach audio klasy D sygnał dźwiękowy zostaje dostarczony do komparatora. Komparator porównuje następnie sygnał wejściowy z wygenerowanym sygnałem referencyjnym o stałej częstotliwości (o kształcie trójkątnym lub piłokształtnym). W wyniku tego procesu powstaje sygnał PWM (modulacja szerokości impulsów, Pulse Width Modulation), gdzie szerokość każdego impulsu odpowiada różnicy między sygnałem wejściowym a sygnałem referencyjnym

w danym momencie. Tak przekształcony sygnał jest kierowany do stopnia mocy, składającego się z wysokosprawnościowych tranzystorów przełączających. W przeciwieństwie do wcześniej wymienionych rozwiązań, tranzystory we wzmacniaczach klasy D pracują w stanie pełnego włączenia lub wyłączenia, dzięki czemu ciepło generowane w tym procesie jest minimalne. To powoduje, że mogą one osiągać niezwykle wysoką sprawność energetyczną, która nierzadko przekracza 90%. Aby wzmocniony sygnał mógł zostać podany na przetwornik elektroakustyczny musi zostać przekształcony na sygnał analogowy, dlatego na wyjściu wzmacniacza stosowany jest filtr dolnoprzepustowy odfiltrowujący składowe wysokoczęstotliwościowe powstałe w sekcji komparatora. Wczesne wzmacniacze klasy D często generowały znaczne zniekształcenia oraz szумы, głównie z powodu niedoskonałości w procesie modulacji częstotliwościowej i późniejszej filtracji. Drugim zasadniczym czynnikiem powstawania problemów z jakością dźwięku były tranzystory mocy, które ograniczała szybkość przełączania będąca na znacznie niższym poziomie niż współcześnie. Dzięki postępowi w technologii modulacji PWM, projektowaniu filtrów oraz zastosowaniu technik sprzężenia zwrotnego współczesne wzmacniacze przestały znacząco ustępować jakością dźwięku klasie AB. Z powodu znakomitej wydajności energetycznej, kompaktowych rozmiarów oraz małych kosztów produkcji, wzmacniacze klasy D stały się najpopularniejszym obecnie rodzajem wzmacniaczy oferowanych przez producentów sprzętu audio, zwłaszcza na rynku konsumenckim.

1.4 Rola i zastosowanie interfejsu Bluetooth w urządzeniach audio

Kwestia łączności z urządzeniem takim jak wzmacniacz audio do zastosowań domowych jest niezwykle ważna w kontekście wygody i jakości użytkowania. Bezprzewodowe strumieniowanie dźwięku za pośrednictwem standardu Bluetooth jest dzisiaj spotykane w praktycznie każdym urządzeniu przeznaczonym na rynek konsumencki. Standard ten został wynaleziony przez firmę Ericsson w latach 90. XX wieku i został stworzony jako alternatywa dla szeregowego transmitowania danych za pomocą RS-232. Znajduje obecnie zastosowanie jako uniwersalny i prosty sposób przekazywania bezprzewodowo informacji pomiędzy urządzeniami na niewielkie odległości. Każda generacja niosła za sobą dodatkowe usprawnienia takie jak większy zasięg czy możliwość sparowania wielu urządzeń na raz. Najnowszym z nich jest wersja 5.3 oferująca zmniejszony pobór energii oraz usprawnione przysyłanie danych o małej objętości. Bluetooth obsługuje wiele profili,

jednak najważniejszym z nich w kontekście transmitowania sygnału audio jest stosowany obecnie A2DP (Advanced Audio Distribution Profile), który pozwala na strumieniowe przesyłanie dźwięku w stereo. Posiada również możliwość współpracy z wieloma kodekami audio, takimi jak LDAC, AAC czy aptX umożliwiającymi przesyłanie dźwięku przy małym opóźnieniu i lepszej jakości. Umożliwia próbkowanie do 48 kHz oraz przepływność bitową do 345 kb/s. Mniej zaawansowanym profilem, który również służy do przesyłania audio jest HSP (Headset Profile). Obsługuje dźwięk mono o próbkowaniu zaledwie 8 kHz, dlatego wykorzystywany jest powszechnie do urządzeń umożliwiających prowadzenie bezprzewodowych rozmów np. słuchawki lub laptopy [2]. Aspektem, który prawdopodobnie najbardziej przyczynił się do zdominowania rynku urządzeń audio względem innych technologii bezprzewodowych jest jego prostota połączenia i niskie zużycie energii. Analiza rynkowa i obserwowanie postępujących trendów w kontekście urządzeń elektroakustycznych jednoznacznie wskazuje na rosnące preferencje konsumentów w kierunku mobilności i wygody, co świadczy o dużym znaczeniu interfejsu Bluetooth w urządzeniach audio.

2 Opis układu wzmacniacza mocy audio

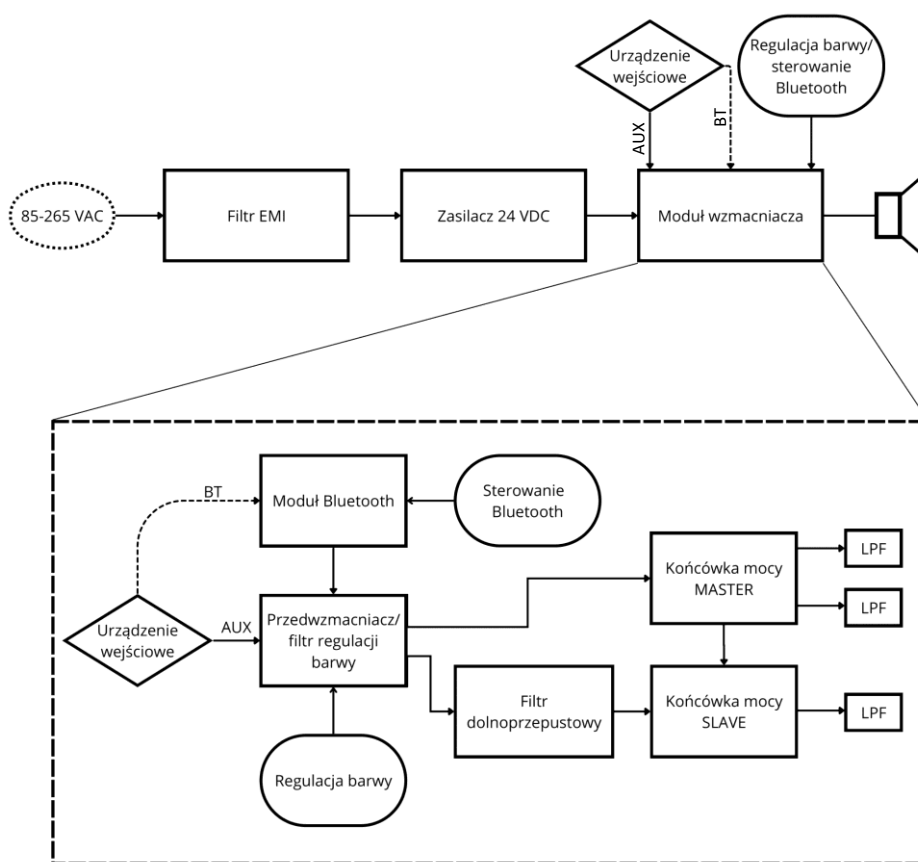
2.1 Ogólna architektura

Niniejszy wzmacniacz mocy audio z interfejsem Bluetooth został zaprojektowany z myślą o dostarczeniu odpowiedniej mocy przy możliwie wysokiej jakości dźwięku dla pasywnych zestawów głośnikowych w konfiguracji 2.1. Urządzenie łączy w sobie sprawdzone rozwiązania techniczne wzmacniaczy audio z nowoczesną łącznością za pośrednictwem Bluetooth do transmitowania muzyki. W ten sposób, zapewniono większą elastyczność i wygodę użytkowania pozwalając na łatwą komunikację z różnorodnymi urządzeniami oraz strumieniowe przesyłanie dźwięku bez konieczności stosowania analogowych połączeń.

Płytką wzmacniacza składa się z kilku segmentów, którymi są: układ regulacji barwy, filtr dolnoprzepustowy oraz końcówki mocy. Kolejność i sposób połączenia pokazano na Rys. 1. Centralnym elementem skonstruowanego wzmacniacza jest zamontowana końcówka mocy producenta Texas Instruments o oznaczeniu

TPA3116D2. Jest ona znana ze swojej wysokiej sprawności, która przy odpowiednich warunkach może wynieść powyżej 90% oraz zdolności dostarczenia dużej mocy przy zachowaniu kompaktowych rozmiarów. Według noty katalogowej jest ona w stanie wygenerować 50 W przy obciążeniu 4 Ω i zasilaniu 21 V, co jest dobrą wartością mocy dla średniej wielkości domowych zestawów głośnikowych. Drugim kluczowym elementem płytki wzmacniacza są zastosowane w sekcji regulacji barwy oraz filtru dolnoprzepustowego dwa poczwórne wzmacniacze operacyjne OPA1604. To wysokiej jakości układy scalone, zaprojektowane z myślą o aplikacjach w urządzeniach elektroakustycznych, które dzięki swoim bardzo dobrym parametrom idealnie nadają się do zastosowania w rzeczonym projekcie.

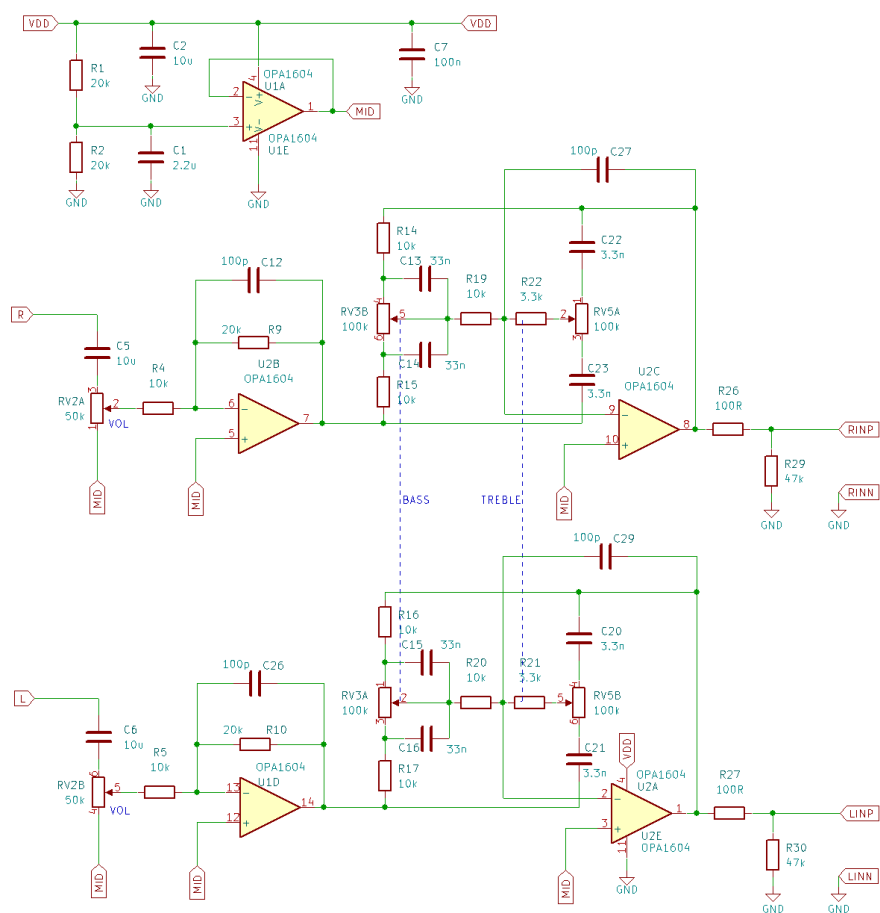
Do zasilania płytki wzmacniacza zastosowano zasilacz stabilizowany o topologii flyback. Dzięki konstrukcji otwartej w formie niezabudowanego układu możliwe jest zastosowanie go jako niewielkie, a zarazem dostatecznie mocne źródło zasilania dla modułu wzmacniacza. Parametry osiągane przez zasilacz pozwalają wykorzystać w pełni możliwości układu TPA3116D2. W celu poprawienia jakości odtwarzanego dźwięku na wejściu układu zastosowano filtr EMI służący do eliminowania zakłóceń sieciowych.



Rys. 1. Schemat blokowy urządzenia

2.2 Regulacja barwy

Sekcja regulacji barwy wzmacniacza odgrywa zasadniczą rolę w dostosowaniu charakterystyki dźwięku do preferencji użytkownika za pomocą dwóch potencjometrów pozwalających zmienić ilość basów i sopranów. Układ opiera się na popularnej topologii aktywnych filtrów Baxandall często stosowanej w podobnych aplikacjach. Architektura ta charakteryzuje się zdolnością do uzyskania płaskiej charakterystyki częstotliwościowej wyjściowego sygnału audio oraz dużą stabilnością dzięki zastosowaniu ujemnego sprzężenia. Każdy z kanałów posiada zrealizowany za pomocą wzmacniacza operacyjnego bufor, który zapewnia izolację od zmian impedancji źródła oraz dodatkowe wzmocnienie sygnału. Zaprojektowany układ posiada wzmocnienie o poziomie bliskim 6 dB przy potencjometrach ustawionych w pozycji neutralnej. Zdecydowano się zastosować aktywny filtr z uwagi na uzyskanie potencjalnie niższego poziomu THD (Total Harmonic Distortion) ze względu na lepsze dostosowanie przenoszonego pasma przez elementy umieszczone w pętli sprzężenia zwrotnego.



Rys. 2. Schemat elektroniczny sekcji regulacji barwy wzmacniacza z wykorzystaniem aktywnego filtra Baxandall

Sygnal audio po przejściu przez bufor wejściowy zostaje skierowany na filtr RC. Zależność opisująca rezystancję oraz pojemność kondensatorów, dzięki której wyznaczono pasmo przepustowe częstotliwości określona jest wzorem:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (1)$$

gdzie:

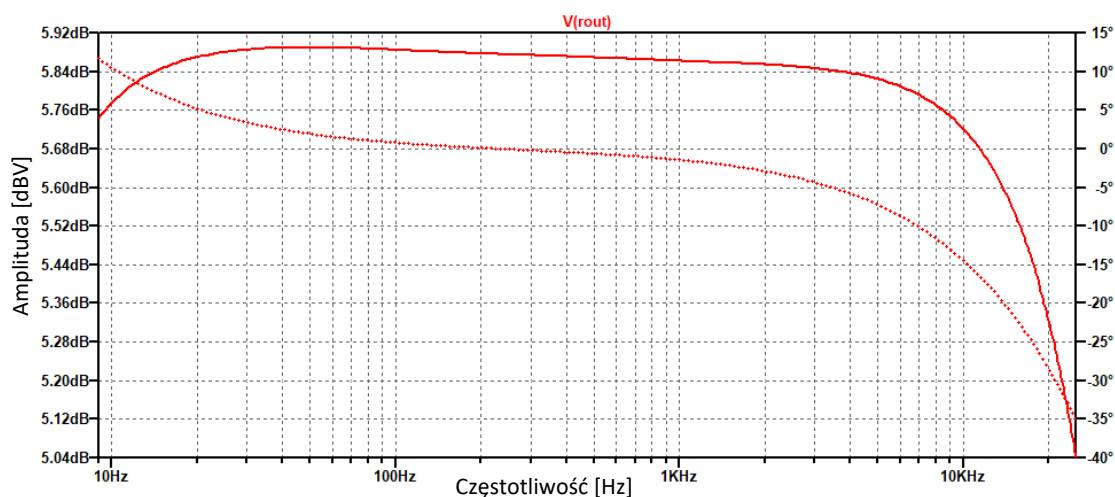
f_c – częstotliwość graniczna

R – rezystancja

C – pojemność

Z powyższego równania wynika, że pasmo przepustowe filtra wykazuje zależność odwrotnie proporcjonalną zarówno od rezystancji jak i pojemności. Oznacza to, że za pomocą zmiany wartości rezystorów C_{13} , C_{14} i C_{22} , C_{23} dla kanału prawego oraz C_{15} , C_{16} i C_{20} , C_{21} dla kanału lewego możliwa jest modulacja docelowej odpowiedzi częstotliwościowej filtra. Aby zapobiec powstawaniu asymetryczności względem możliwie stłumionych oraz uwydatnionych częstotliwości tzn. różnicy w amplitudzie przenoszonego pasma, gdy potencjometr będzie maksymalnie wychylony w jedną ze stron, wartości kondensatorów powinny być dobrane parami o jednakowych wartościach, co wynika ze sposobu filtracji sygnału przez układ. Do projektu stopnia regulacji barwy posłużono się zaleceniami opisanymi w dokumencie [3]. Zdecydowano zastąpić zaproponowane w niej układy TLC074 wzmacniaczami operacyjnymi OPA1604, będącymi układami stworzonymi z myślą o zastosowaniach audio cechujące się znakomitymi parametrami. Symulacja układu w programie LTSpice wykazała pierwotnie znaczny spadek amplitudy sygnału poniżej 80 Hz. Spowodowane było to zbyt małymi wartościami pojemności kondensatorów C_5 i C_6 , których zwiększenie do 10 μF przyniosło zamierzony efekt w postaci podniesienia charakterystyki amplitudowej w zakresie małych częstotliwości. Układ pierwotnie posiadał defekt w postaci wzbudzenia się spowodowanego oscylacjami na dużych częstotliwościach ze względu na zbyt duży poziom sygnału występujący w sprzężeniu zwrotnym. Aby zapobiec temu zjawisku zdecydowano się użyć dodatkowych

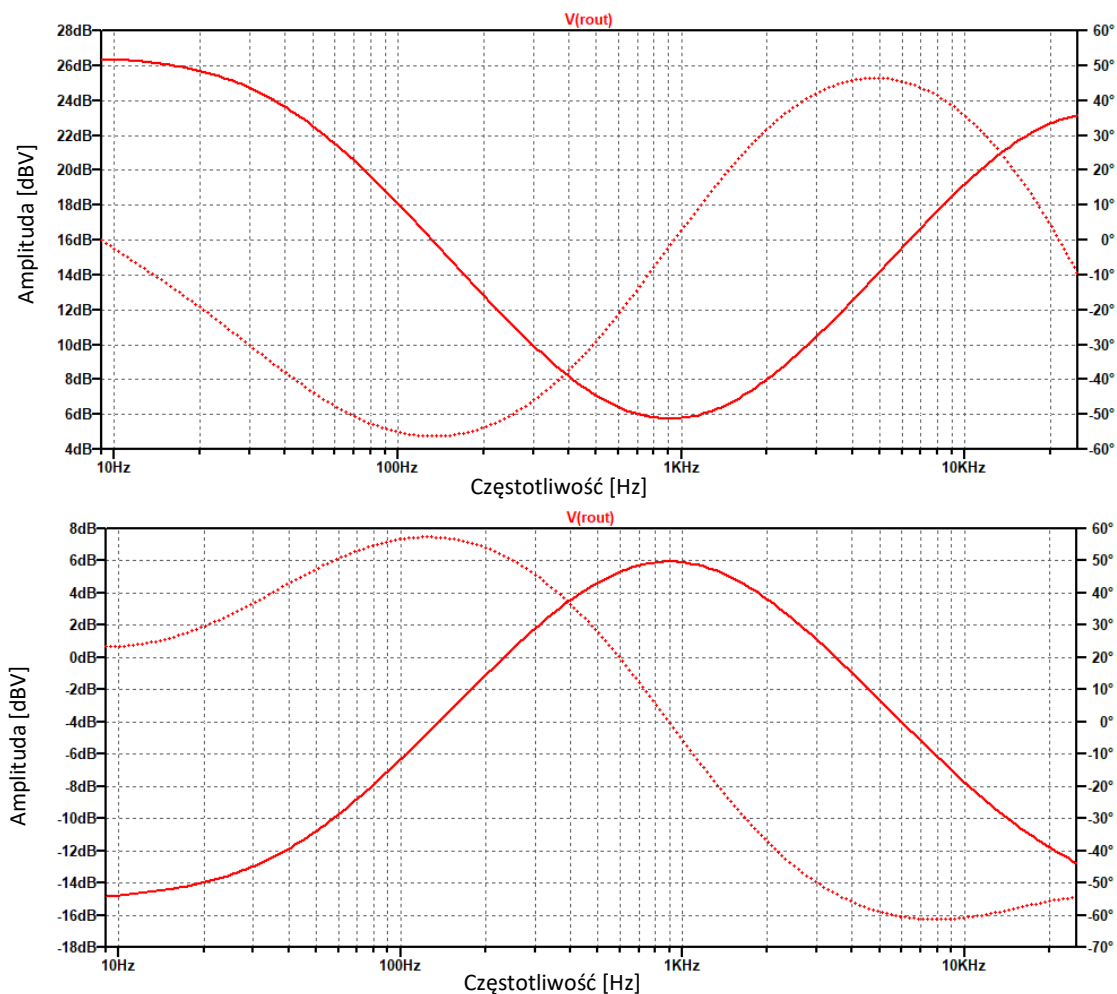
kondensatorów o arbitralnie dobranej wartości 100 pF dołączonych szeregowo pomiędzy wyjściem, a wejściem odwracającym wzmacniacza operacyjnego w pętli sprzężenia zwrotnego. Spowodowało to ograniczenie pasma przenoszenia wzmacniacza od góry i tym samym zredukowało ilość słyszalnych szumów. Należy zaznaczyć, że wyniki symulacji komputerowych przedstawione w niniejszej pracy bazują na ideowych komponentach elektronicznych, których charakterystyka różni się od zastosowanych w rzeczywistym projekcie.



Rys. 3. Wykres Bodego filtra regulacji barwy (potencjometri w pozycji neutralnej).

Symulacja programu LTSpice

Użyta topologia filtra korekcji barwy zapewnia płaską charakterystykę wzmocnienia sygnału audio, której maksymalne odchylenie względem założonych 6 dB w zakresie 20 Hz – 20 kHz wynosi zaledwie 0.5 dB. Jest to pożądane zachowanie pozwalające na możliwie wierną transmisję sygnału dźwiękowego bez wzmocnienia lub słumienia jego poszczególnych składowych. Należy zwrócić uwagę, że spadek poziomu występuje w najwyższej części przebiegu, która wykracza poza spektrum dźwięków słyszalnych. Charakterystyka fazowa wykresu Bodego wykazuje całkowite przesunięcie fazowe rzędu 35°. Najbardziej dynamiczne zmiany przypadają na około 20 Hz i 7 kHz, co pokrywa się z dynamiką przebiegu charakterystyki amplitudowej. Nadmierne przesunięcie fazowe może wpłynąć na percepcję dźwięku, jednakże wartość uzyskana w symulacji nie wydaje się posiadać negatywnego wpływu.

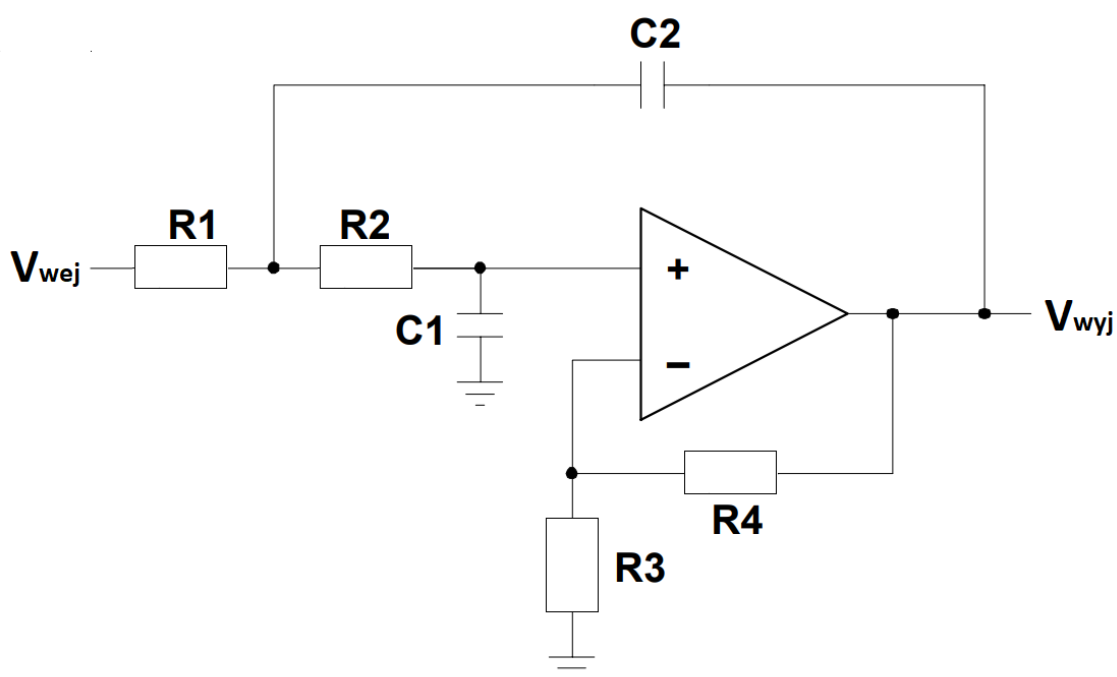


Rys. 4. Wykresy Bodego filtru regulacji barwy z korekcją maksymalnie podwyższoną (u góry) i stłumioną. Symulacja programu LTSpice

Charakterystyki amplitudowo-fazowe z korekcją barwy ukazują dużą symetryczność przebiegu. Zarówno w przypadku maksymalnego uniesienia i stłumienia sygnału ich szczyty oraz doliny znajdują się w jednakowych odstępach od siebie na osi częstotliwości, jednakże wykazują różne współczynniki zmiany amplitudy. W przypadku maksymalnego tłumienia zarówno dla małych jak i dużych częstotliwości sygnału zaobserwować można zmniejszoną dynamikę przebiegu o około 10 dB, co wiąże się również z jej mniejszym nachyleniem charakterystyki. Szczyt (oraz dolina) przebiegu znajduje się w okolicy częstotliwości 1 kHz i odpowiada pasmu średnich częstotliwości, które są najlepiej słyszalne przez ludzkie ucho, co w połączeniu ze zbliżoną do siebie dobrocią obu zastosowanych filtrów sprawia, że korekcja barwy odbywa się w przewidywalny i intuicyjny dla użytkownika sposób.

2.3 Filtr dolnoprzepustowy kanału niskotonowego

Wzmacniacz został wyposażony w dodatkowy kanał wyjściowy umożliwiający podłączenie głośnika niskotonowego, co oznacza konieczność uprzedniego przefiltrowania sygnału w celu wydobywania z niego jedynie określonego zakresu małych częstotliwości. W większości dwudrożnych systemów audio stereo dolna granica pasma przenoszenia głośnika niskotonowego osiąga wartość zbliżoną do 60 Hz, dlatego częstotliwość odcięcia zdecydowano się przyjąć jako 100 Hz. Do zrealizowania filtra zastosowano architekturę Sallen-Key, która jest powszechnie wykorzystywana w aplikacjach audio ze względu na jej stabilność operacyjną, prostotę i wielofunkcyjność. Filtry Sallen-Key składają się z układu dwóch rezystorów oraz dwóch kondensatorów podłączonych do nieodwracającego wejścia wzmacniacza operacyjnego, których konfiguracja oraz dobrane wartości wpływają na przepuszczane pasmo częstotliwości. Dodatkowo, filtry te mogą zostać połączone kaskadowo regulując tym samym wartość nachylenia pasma przepustowego, które w przypadku pojedynczego filtra wynosi 40 dB/dec.



Rys. 5. Schemat pojedynczego filtra dolnoprzepustowego Sallen-Key

Układowi przedstawionemu powyżej odpowiada funkcja transmitancji, która opisana jest wzorem [4, p. 4]:

$$H(s) = \frac{K}{s^2(R_1R_2C_1C_2 + s(R_1C_1 + R_2C_1 + R_1C_2(1 - K)) + 1)} \quad (2)$$

gdzie:

$$s = j2\pi f$$

$$K = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

oraz:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \quad (3)$$

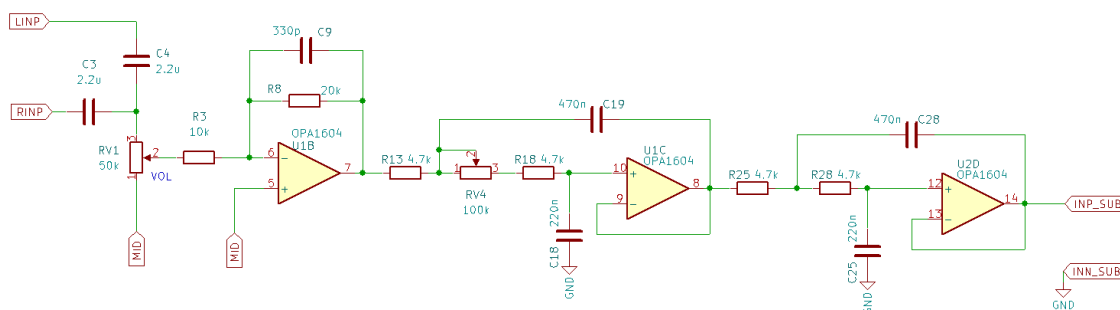
$$Q = \frac{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}{R_1C_1 + R_2C_1 + R_1C_2(1 - K)} \quad (4)$$

Projekt filtru zawartego w konstrukcji wzmacniacza rozpoczął się od zdeterminowania pożądanego wzmocnienia. Ponieważ sygnał wejściowy jest bezpośrednio uzależniony od parametrów sekcji regulacji barwy, która posiada domyślnie wzmocniony sygnał audio o 6 dB oraz zważając na fakt, że regulacja tonów niskich będzie miała bezpośredni wpływ na sygnał podawany na filtr, wzmocnienie K zostało przyjęte jako równe 1 (usunięcie rezystora R_3 i zastąpienie rezystora R_4 zworką). Dzięki temu rozwiązaniu ryzyko możliwych niestabilności filtru zostało zminimalizowane, a sama aplikacja w projekcie mniej skomplikowana. W celu dodatkowego uproszczenia układu, ustanowiono wartości rezystorów jako równe, tj. $R_1=R_2=R$. Dzięki temu dobroć filtru została uzależniona jedynie od pojemności kondensatorów C_1 i C_2 , co jest korzystne z uwagi na węższy wybór wartości kondensatorów względem rezystorów. Ogólną zasadą dopasowania odpowiedniej wartości kondensatora jest zwrócenie uwagi na to, aby jego pojemność jednocześnie nie była zbyt mała ani zbyt duża. Zbyt mała pojemność kondensatorów C_1 i C_2 może być zbyt zbliżona do występujących w pozostałych częściach obwodu pojemności pasożytniczych mogą w ten sposób niepożądanie wpłynąć na pracę wzmacniacza operacyjnego. Aby założona uprzednio częstotliwość graniczna f_c była stała, wartość rezystancji powinna zmieniać się w sposób odwrotnie proporcjonalny do pojemności co

wyrażone jest przez równanie (1). Oznacza to, że w przypadku doboru kondensatorów o zbyt małych pojemnościach, dobrana rezystancja będzie musiała zmaleć, co w skrajnych przypadkach skutkować będzie większym zapotrzebowaniem prądowym układu, nadmiernym obciążeniem wzmacniacza operacyjnego czy produkcją szumu termicznego. Przy projektowaniu filtra, dobrano arbitralnie pojemność kondensatora C_1 jako 220 nF, a następnie C_2 jako 470 nF. Dobór większej pojemności w pętli sprzężenia zwrotnego uzasadniony jest zamiarem uzyskania wzmocnionej odpowiedzi układu na częstotliwości bliskie f_c . Posiadając wszystkie potrzebne wartości komponentów oraz zależności między nimi dobrano wartość rezystancji jako $R = 4.7 \text{ k}\Omega$. Rezystancja wyrażona w $\text{k}\Omega$ jest odpowiednim rzędem wielkości, ponieważ przy większych wartościach mogłaby ona osiągać wielkości zbliżone do impedancji wejściowej wzmacniacza operacyjnego, co skutkowałoby potencjalnymi nieprawidłowościami w działaniu. Posługując się równaniem (3) i (4) oraz podstawiając wybrane parametry otrzymano:

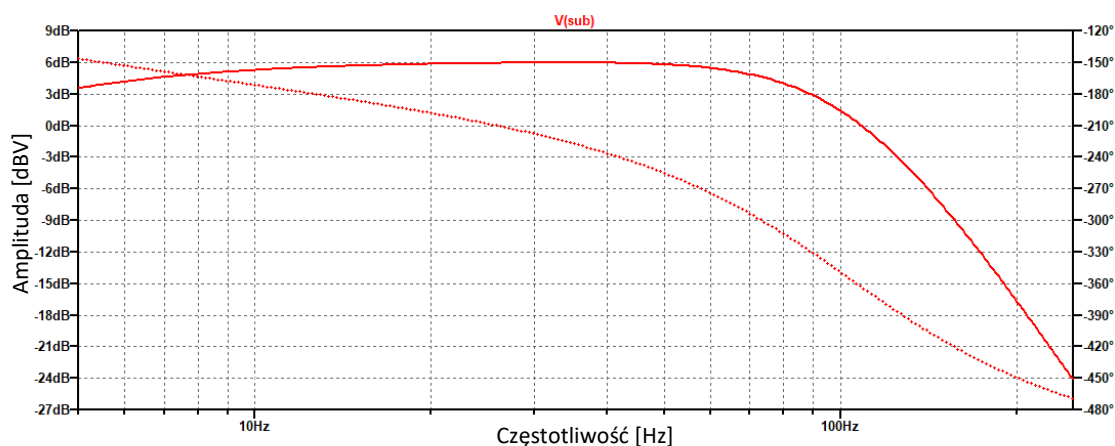
$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{RC_1C_2}} \approx 105 \text{ Hz}$$

Jednym z przewodnich motywów projektu jest możliwie uniwersalne zastosowanie wzmacniacza audio. Z tego powodu, filtr został przystosowany do dynamicznej zmiany częstotliwości odcięcia na potrzeby użytkownika. Została ona zrealizowana za pomocą dodatkowego potencjometru przyłączonego do wejścia nieodwracającego pierwszego segmentu układu. Za jego pomocą możliwa jest zmiana przebiegu sygnału w układzie, a tym samym dostosowanie odpowiedniej wartości f_c w zależności od preferencji użytkownika oraz podłączonego zestawu głośnikowego.



Rys. 6. Schemat elektroniczny sekcji filtra dolnoprzepustowego typu Sallen-Key 4-rzędu z buforem wejściowym

Wdrożony projekt składa się z dwóch filtrów Sallen-Key połączonych kaskadowo, z których każdy posiada jednakowe wzmocnienie K , dobroć Q oraz pasmo przepustowe. Wykonany w programie LTSpice model wykazał uzyskanie zamierzonego kształtu pasma przepustowego z częstotliwością odcięcia przy 90 Hz.



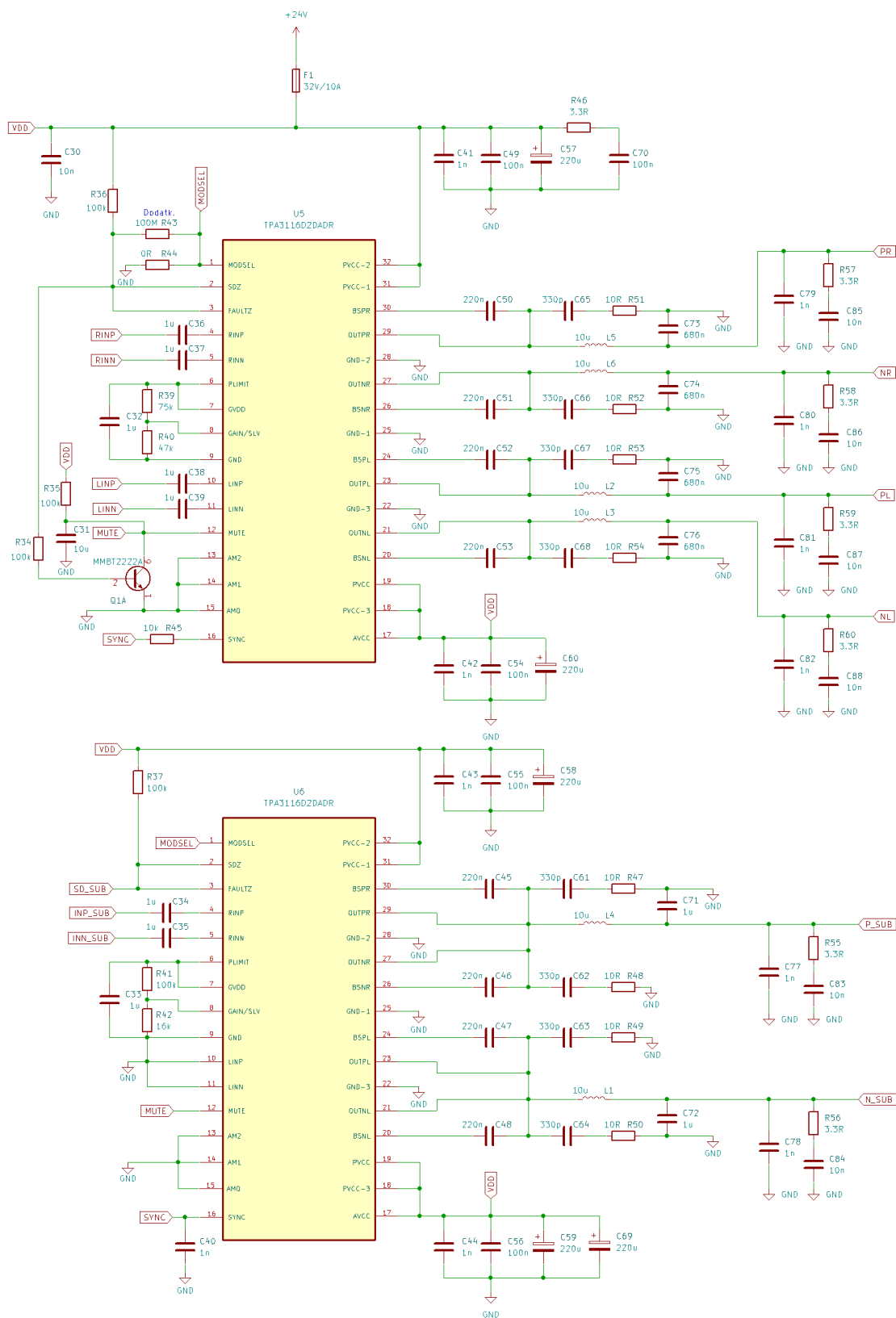
Rys. 7. Wykres Bodego filtru Sallen-Key o $f_c = 90$ Hz przy regulacji barwy w pozycji neutralnej. Symulacja programu LTSpice

Pasma przepustowe jest najczęściej definiowane jako zakres obejmujący te wartości sygnału, których amplituda nie przekracza 3 dB spadku względem jego najwyższego punktu w danym zakresie. Analizując wykres charakterystyki amplitudowej widać, że obszar po lewej stronie f_c jest płaski i równomierny co jest zaletą ze względu na wierne odwzorowywanie sygnału wejściowego. Dolna wartość f_c przypada na częstotliwość 5 Hz, która pomimo znajdowania się poniżej progu słyszenia, może wpłynąć korzystnie na fizyczne wrażenie odsłuchowe i zapewnić pełniejsze brzmienie.

2.4 Stopień mocy

Końcówka mocy TPA3116D2 pracuje w trybie pełno mostkowym BTL (Bridge-Tied Load) co jest typowym rozwiązaniem dla wzmacniaczy tej klasy. W projekcie zastosowano dwa takie same układy, z czego jeden odpowiedzialny jest za wzmocnienie sygnału podawanego na kanał lewy i prawy, natomiast drugi pracujący w trybie PBTL (Parallel Bridge-Tied Load) wzmacnia sygnał doprowadzany do głośnika niskotonowego. Końcówka mocy pozwala dobrać wzmocnienie sygnału podawanego na jej wejście. Zrealizowane jest to za pomocą dwóch rezystorów tworzących dzielnik napięcia, które dołączone są do pinu GAIN/SLV. Za pomocą tego samego pinu zrealizowane jest

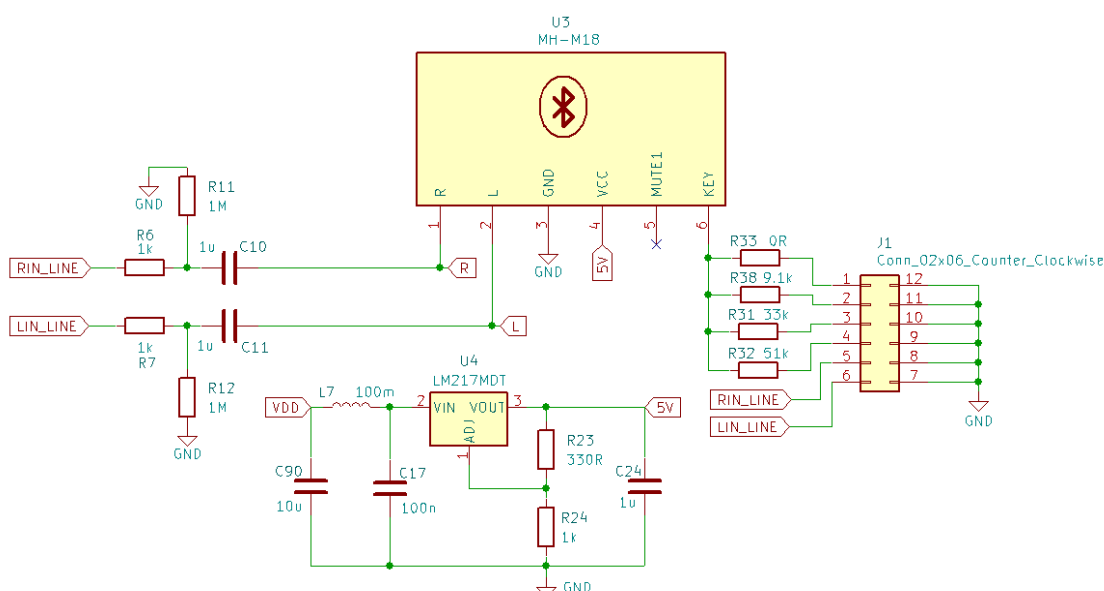
przydzielenie trybu pracy MASTER lub SLAVE dla wybranej konfiguracji połączeniowej wielu końcówek mocy. Są one zsynchronizowane za pomocą pinu SYNC, który w trybie MASTER jest wyjściem sygnału, natomiast w trybie SLAVE staje się wejściem. W układzie znajduje się również system detekcji błędów, który pozwala na uzyskanie informacji zwrotnej od układu, gdy na wejściu zostanie wykryta kondycja kwalifikująca się do wygenerowania błędu. Informacje zwrotne odnoszące się do wykrytych błędów są przekazywane pinem FAULTZ, który znajduje się w stanie wysokim, natomiast jest zwierany do masy w momencie wykrycia błędu. Praktycznym rozwiązaniem, które zostało zaimplementowane w omawianym projekcie jest wysterowanie za pomocą pinu FAULTZ wejścia MUTE, co pozwala na aktywację lub dezaktywację sygnału podawanego na głośniki. Oznacza to, że gdy wykryty zostanie błąd w działaniu systemu podczas użytkowania wzmacniacza, dźwięk automatycznie przestanie być odtwarzany co w prosty sposób da znać użytkownikowi o pojawieniu się nieprawidłowości. Połączenie zrealizowano za pomocą tranzystora bipolarnego N-P-N działającego jako przełącznik. Dodatkową funkcją układów z rodziny TPA31xxD2 jest możliwość eliminacji zakłóceń związanych z falami radiowymi AM. Za pomocą konkretnej konfiguracji pinów AM0, AM1 i AM2 możliwe jest dobranie kompatybilnej z danym regionem parametrów generowanych wewnętrznie sygnałów co przyczynia się do zminimalizowania powstawania zniekształceń. Schemat połączeniowy sekcji mocy został zaczerpnięty z noty katalogowej producenta i zmodyfikowany według jego zaleceń na podstawie dobranych wartości peryferyjnych komponentów elektronicznych [5].



Rys. 8. Schemat elektroniczny sekcji mocy oraz LPF wykorzystujacy uk lad TPA3116D2

2.5 Moduł Bluetooth

Aby sprostać wymaganiom projektowym postawionym w rozdziale 1.5, wzmacniacz został wyposażony w możliwość połączenia za pomocą interfejsu Bluetooth w wersji 4.2. Zostało to zaimplementowane za pomocą wykorzystania modułu o nazwie handlowej MH-M18. Jest to moduł specjalnie przystosowany do zastosowań audio posiadający profil A2DP pozwalający na przesyłanie strumieniowe dźwięku, który obsługuje takie rozszerzenia jak WAV, MP3, WMA, FLAC czy APE [6]. Zasilany jest z linii 5 V, która została uzyskana jest za pomocą stabilizatora napięcia LM217 podłączonego bezpośrednio do V_{DD} . W celu minimalizacji niepożądanych zakłóceń na wejściu stabilizatora zastosowano prosty filtr LC według zaleceń producenta układu modułu Bluetooth. Wykorzystano również funkcjonalność modułu, którą jest pin służący do podłączenia przycisków umożliwiających nawigowanie po odtwarzanych utworach (pauza/odtwórz, do przodu/do tyłu/, włącz/wyłącz). Zarówno obsługa interfejsu Bluetooth, jak i możliwość podłączenia urządzenia poprzez wejście liniowe za pośrednictwem gniazda jack 3.5 mm została zrealizowana poprzez 12-pinowe gniazdo, do którego podłączono taśmę łączącą płytkę wzmacniacza z frontową częścią obudowy dającą możliwość prostej obsługi przez użytkownika. Po uruchomieniu urządzenia transmisja Bluetooth jest aktywowana automatycznie jako domyślne wejście audio, które można zmienić na AUX wyłączając moduł przyciskiem.



Rys. 9. Schemat elektroniczny sekcji modułu Bluetooth

2.6 Układ zasilania

Punktem odniesienia dla doboru odpowiedniego zasilania był układ końcówki mocy. Producent TPA3116D2 przedstawia w notcie katalogowej charakterystyki układu dla napięć 12 i 24 V, z czego 26 V określone jest jako maksymalne. Zbyt duże napięcie zasilania mogłoby skutkować nadmiernym przegrzewaniem się układu i potencjalnymi uszkodzeniami. Z tego powodu zdecydowano się wykorzystać napięcie 24 V, aby zachować bezpieczny limit, a jednocześnie uzyskać możliwie dużą moc wyjściową. W celu oszacowania zapotrzebowania prądowego obu układów końcówki mocy posłużono się informacją z noty katalogowej mówiącą o uzyskiwaniu przez układ mocy wyjściowej równej $P_{ukł.} = 2 \cdot 50 W = 100 W$ przy obciążeniu 4Ω oraz $>90\%$ sprawności. Podstawiając dane do wzorów otrzymano:

$$P_{wej.} = \frac{2 \cdot P_{poj.ukł.}}{\eta_{wzm.}} \quad (5)$$

$$I_{całk.} = \frac{P_{wej.}}{V_{DD}} = \frac{\frac{2 \cdot P_{poj.ukł.}}{\eta_{wzm.}}}{V_{DD}} = \frac{\frac{2 \cdot 100 W}{0.9}}{24 V} \approx 9.26 A \quad (6)$$

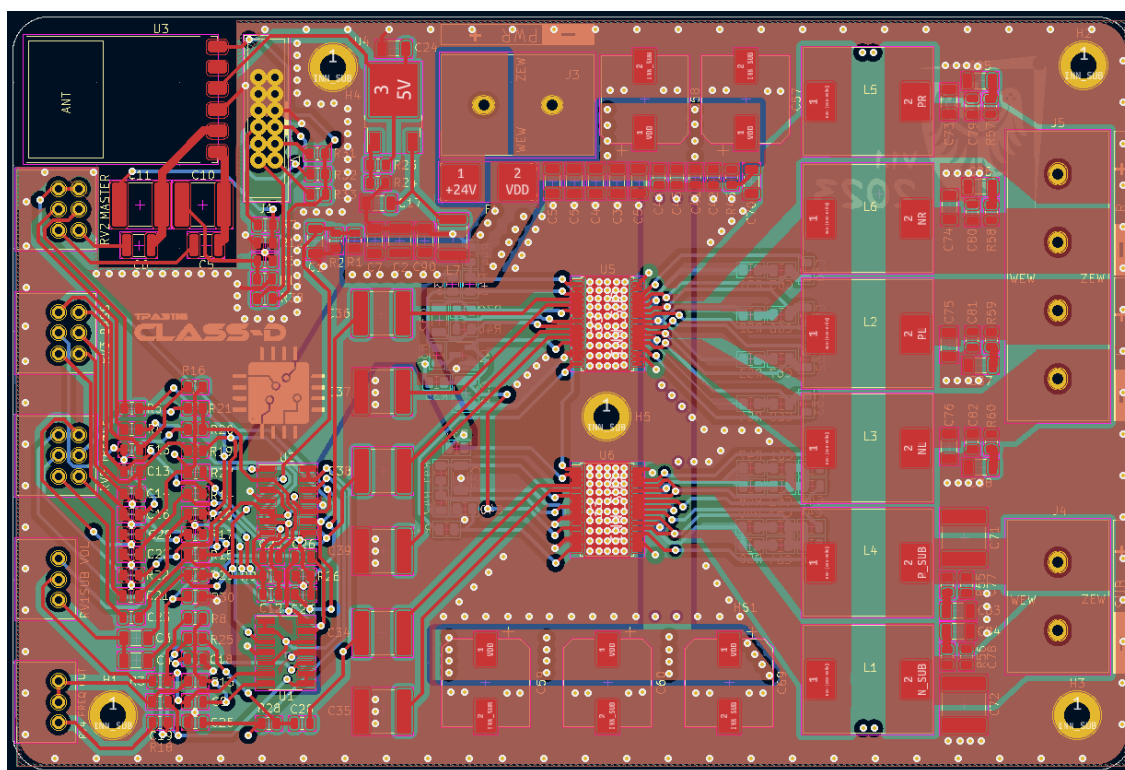
$$P_{zas.} = V_{DD} \cdot I_{całk.} = 222.24 W \quad (7)$$

Na podstawie powyższych obliczeń, zdecydowano się zastosować zasilacz impulsowy zbudowany w topologii flyback o napięciu wyjściowym 24 VDC oraz wydajności prądowej 9.4 A. Taka konstrukcja w połączeniu z otwartą budową pozwala uzyskać sprawność energetyczną w wysokości 94%. Zasilacz posiada również szereg zabezpieczeń tj.: przeciwprzeciążeniowe OPP, przeciwprzepięciowe OVP i przeciwzwarceniowe SCP oraz obsługujący zakres napięć zasilania 85 – 264 VAC 50-60 Hz. Cechuje się kompaktowymi rozmiarami i niską masą przy jednocześnie niewielkich kosztach zakupu, co jest kluczową zaletą. Może natomiast powodować niepożądane interferencje pojawiające się np. w wyniku przełączania tranzystorów wyjściowych. Aby zminimalizować niechciane zakłócenia, w konstrukcji zastosowano również filtr EMI (Electromagnetic Interference), wykorzystujący do tego celu elementy LC o dużych wartościach.

3 Projekt płytki drukowanej oraz urządzenia

3.1 Projekt PCB

Aby zapewnić możliwie wierne odwzorowanie sygnału dźwiękowego dostarczanego do wzmacniacza bez wprowadzania niepożądanych zniekształceń i interferencji, projekt płytki drukowanej był kluczowym aspektem niniejszej pracy. Do stworzenia obwodu PCB wykorzystano oprogramowanie KiCad 6. Spośród popularnych programów wyróżnia się przede wszystkim intuicyjnym interfejsem pozwalającym na sprawne stworzenie projektu oraz obszerną biblioteką potrzebnych symboli i footprintów komponentów elektronicznych. Zdecydowano się zastosować płytkę 4-warstwową. Użyte warstwy miedzi obejmują: 1. – górną warstwę sygnałową, 2. – warstwę masy (GND), 3. – warstwę zasilającą (V_{DD}), 4. – dolną warstwę sygnałową. Dzięki takiemu rozwiązaniu projektowemu, zostało znacząco ograniczone ryzyko wprowadzenia zakłóceń pomiędzy trasami zasilającymi, a sygnałowymi oraz poprawiła się dystrybucja ciepła względem płytki o konstrukcji dwuwarstwowej.



Rys. 10. Projekt obwodu PCB modułu wzmacniacza audio

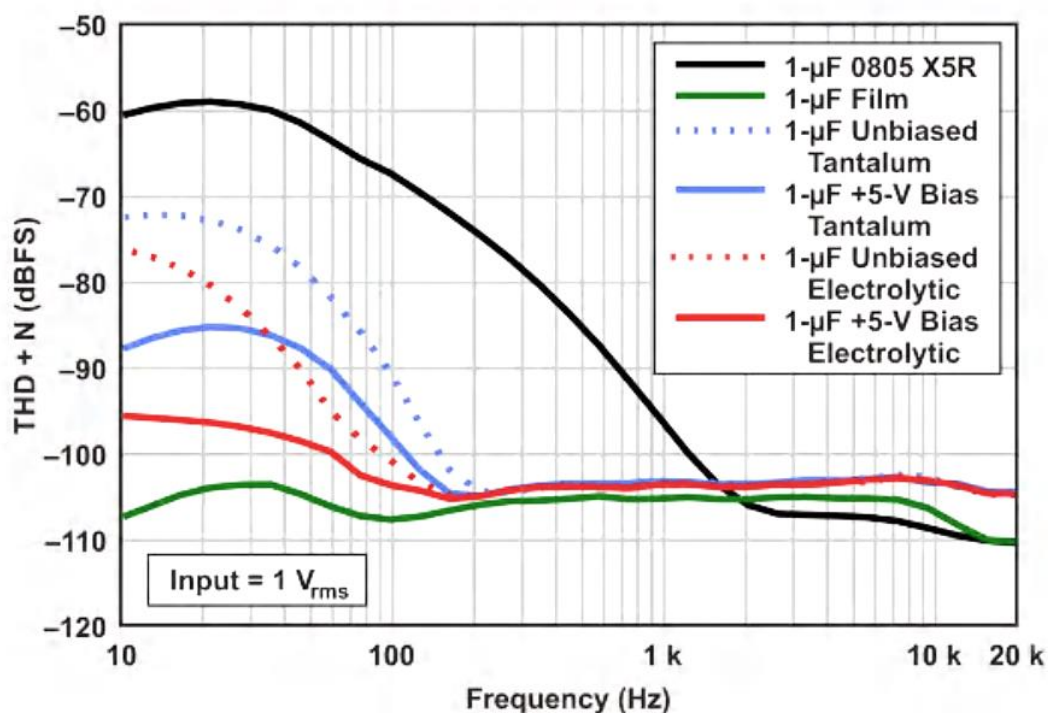
Tworzenie płytki rozpoczęto od rozmieszczenia footprintów poszczególnych komponentów w odpowiednie miejsca. Sekcje, gdzie przepływają większe prądy rozdzielono pomiędzy tymi z mniejszymi. Starano się, aby zachować przy tym możliwie małe długości ścieżek ograniczając tym samym możliwość indukowania zakłóceń i ogólny logiczny porządek całego układu. Grubość ścieżek łączących pady lutownicze została ściśle uzależniona od płynącego przez nie prądu i zmian temperatury [7, p. 5]. Kondensatory odsprzęgające zostały umieszczone możliwie blisko układów, a odprowadzenia sygnału zostały dodatkowo wsparte przelotkami znajdującymi się również w możliwie małej odległości od padów zapewniając im bezpośrednią drogę do warstwy masy. Wszystkie obszary niebędące gęsto wypełnionymi przez komponenty elektroniczne zostały wypełnione dodatkowymi polami masowymi. Wyjątkiem jest obszar montażu modułu Bluetooth, gdzie takie rozwiązanie mogłoby skutkować pogorszeniem jego parametrów. Został on dodatkowo oddzielony rzędem przelotek mających na celu służyć za dodatkową ochronę przez niepożądanymi zakłóceniami przedostającymi się z pól masowych. Ponieważ układy końcówek mocy wymagają zastosowania radiatora część komponentów została przeniesiona na dolną warstwę sygnałową zapobiegając zmianom parametrów elektrycznych komponentów takich jak wrażliwe na zmianę temperatury kondensatory. Zastosowano w sumie 5 otworów montażowych połączonych z masą umożliwiającą stabilne umiejscowienie płytki w obudowie.

3.2 Dobór komponentów elektronicznych

Branża audio jest jedną z dziedzin elektroniki, w której wybór odpowiedniej klasy podzespołów ma bezpośredni wpływ na ostateczną jakość produktu, ponieważ końcowym odbiorcą sygnału dźwiękowego jest czułe na nieprawidłowości ludzkie ucho. Z tego powodu, elementy specjalnie dostosowane do tych potrzeb takie jak potencjometry czy kondensatory mające za zadanie posiadać zarówno wybitne parametry elektryczne jak i jakość wykonania mogą często osiągać duże gabaryty i bardzo wysokie ceny. W kontekście założeń niniejszego projektu jest to znacząca przeszkoda, ze względu na potrzebę zastosowania w nim możliwie dużo komponentów montowanych powierzchniowo o niedużych rozmiarach. Wybór odpowiednich podzespołów obejmował dwa kluczowe rodzaje elementów: wzmacniacze operacyjne i kondensatory. Te pierwsze, niezbędne do projektu regulacji barwy i filtra dolnoprzepustowego dostarczającego sygnał na kanał głośnika niskotonowego, są aktywnymi

półprzewodnikowymi komponentami, którymi podstawowym zadaniem jest wzmacnianie sygnału dostarczonego na ich wejście. Oznacza to, że generowane szумы również mogą zostać wzmocnione co dodatkowo spotęguje spadek jakości dźwięku. Kolejnym parametrem, który należy wziąć pod uwagę w doborze wzmacniacza operacyjnego jest jego tzw. szybkość narastania (slew rate) wyrażona najczęściej w jednostce woltów na sekundę ($\frac{V}{s}$). Determinuje ona szybkość z jaką układ jest w stanie zareagować i wzmocnić sygnał podany na jego wejście co bezpośrednio przekłada się na jego zdolność do odwzorowania oryginalnego przebiegu. Powinno zwrócić się również uwagę na generowane zniekształcenia harmoniczne (THD), rodzaj i wartość napięcia zasilania oraz jeżeli aplikacja tego wymaga zużywaną przez układ wartość prądu spoczynkowego. W konstrukcji zastosowano układy OPA1604, z których każdy posiada cztery osobne wzmacniacze operacyjne. Cechują się znakomitymi parametrami takimi jak szybkością narastania $20 \frac{V}{\mu s}$, szumem o gęstości $2.5 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ w paśmie oktawowym 1 kHz czy THD o wartości 0.00003% przy 1 kHz [8].

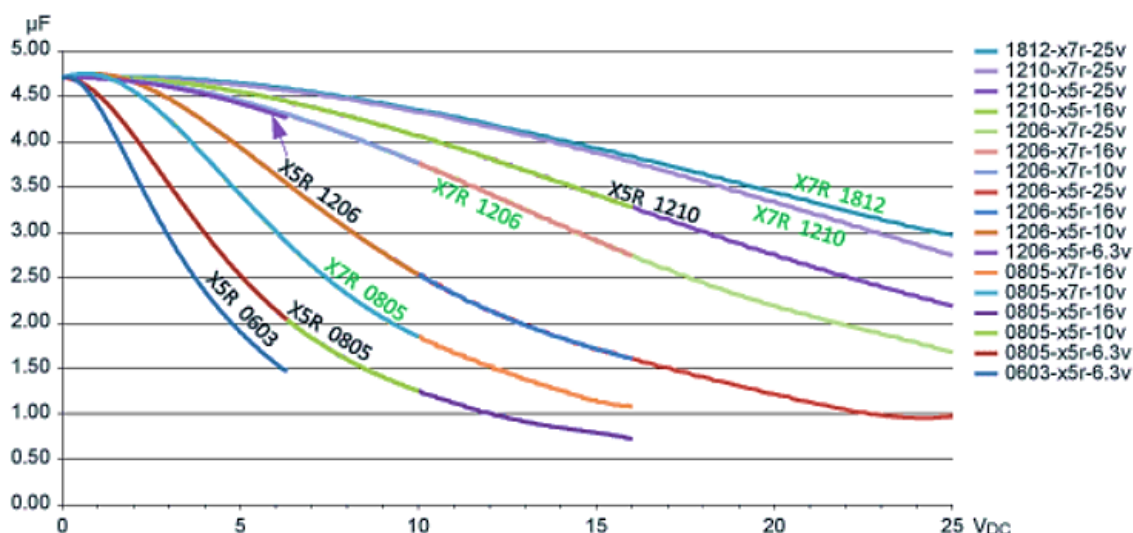
Drugim kluczowym czynnikiem definiującym jakość projektu są zastosowane w nim kondensatory. Są to prawdopodobnie najbardziej zróżnicowane pod względem dostępnych rodzajów i parametrów pasywne komponenty elektroniczne. Zasadniczy podział pod względem roli jaką ma pełnić kondensator to zastosowanie go w układzie odsprężającym lub sprzęgającym. Odsprężające kondensatory są najczęściej stosowane na liniach zasilających, a ich zadaniem jest odfiltrowywanie do masy niepożądanych sygnałów, które mogłyby powodować szумы, nieprawidłowe działanie układów, czy w skrajnych przypadkach nawet ich uszkodzenie. Częstą praktyką jest stosowanie w tym celu kondensatorów elektrolitycznych, które są dostępne w znacznie większych pojemnościach, co przyczynia się do efektywniejszego filtrowania dużych pulsacji oraz sygnałów o mniejszych częstotliwościach. Kondensatory sprzęgające służą natomiast do przenoszenia sygnału zmiennego w dalsze części układu, przez co kluczowym parametrem w tym zastosowaniu są wprowadzane przez nie zniekształcenia. Czynniki takie jak temperatura, materiał czy napięcie mogą znacząco wpływać na parametry kondensatora, dlatego bardzo istotny jest ich świadomy dobór do konkretnej aplikacji. Poniżej przedstawiono porównanie wprowadzanych zniekształceń przez różne typy kondensatorów dla sygnału sinusoidalnego o amplitudzie $1 V_{RMS}$:



Rys. 11. Porównanie wartości generowanych zniekształceń kondensatorów od jego materiału [9, p. 4]

Analizując powyższy wykres z łatwością można dostrzec, że ceramiczny kondensator SMD X5R wprowadzał największe zniekształcenia sygnału w szerokim paśmie małych oraz średnich częstotliwości. Najmniejszymi zniekształceniami natomiast, oscylującymi w okolicy -105 dB (zaledwie 4.36 μ V w odniesieniu do sygnału wejściowego), wyróżniał się kondensator foliowy, którego charakterystyka była również najbardziej płaska i stabilna. Na podstawie analizy porównawczej [9] stwierdzono, że kondensatory z folią polifenylosulfidową (PPS) ze względu na wprowadzanie minimalnych zniekształceń, znakomitą stabilność temperaturową i tolerancję na obciążenie DC, są najodpowiedniejszym wyborem do omawianego zastosowania. Warto jednak zauważyć, że z szeregiem zalet wiążą się również czynniki takie jak wyższa cena czy mniejsza dostępność.

Drugim istotnym czynnikiem mogącym znacznie zmienić znamionową wartość pojemności kondensatora jest jego napięcie pracy, co szczególnie zauważalne jest przy kondensatorach ceramicznych MLCC. Zależność ta dla kondensatorów o różnych obudowach i typach dielektryków została przedstawiona na wykresie.

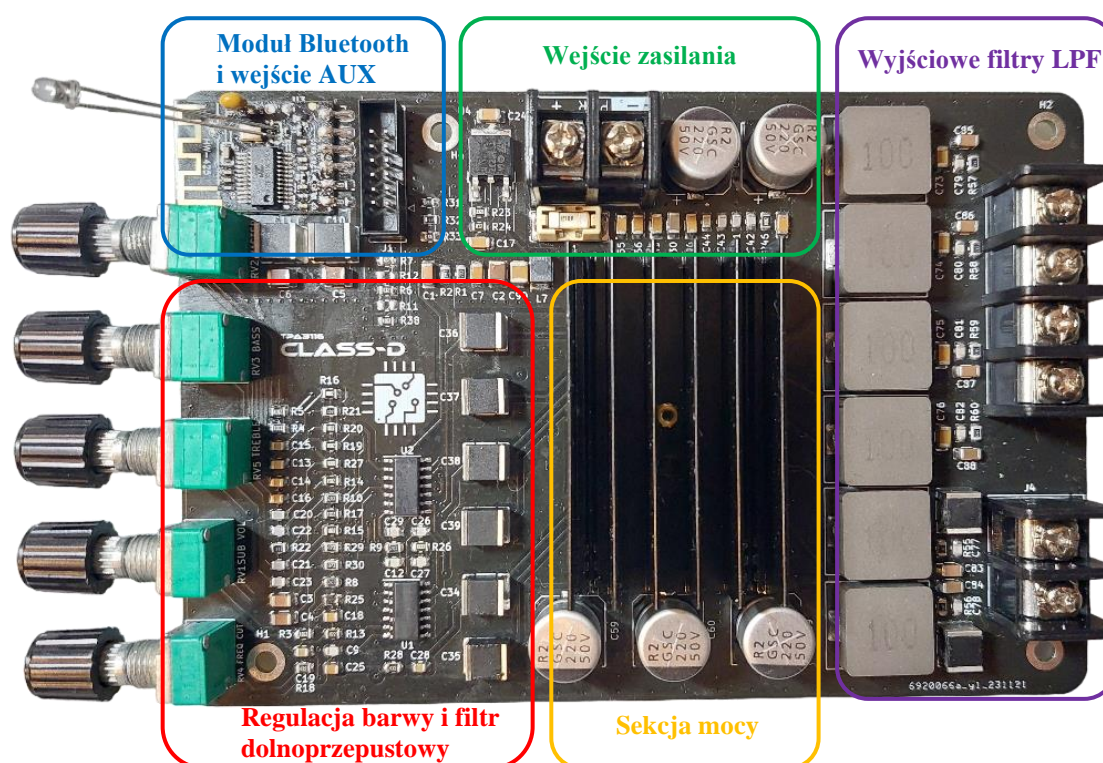


Rys. 12. Zmiana pojemności w stosunku do operacyjnego napięcia stałego dla wybranych kondensatorów MLCC o pojemności 4,7 μF [10, p. 3]

Szczególnie dla kondensatorów o mniejszych obudowach, napięcie operacyjne ma znaczący wpływ na redukcję ich pojemności. Obudowy 0603 czy 0805 wykazały niemalże podwójny spadek swojej pierwotnej pojemności przy wartości napięcia równego zaledwie połowie napięcia znamionowego. Ostatecznie, wybór konkretnych typów i parametrów kondensatorów do projektu zależał przede wszystkim od ich dostępności. Jako punkt odniesienia przyjęto użycie komponentów SMD o rozmiarze 0805 z uwagi na szeroką gamę wartości i brak problematyczności przy lutowaniu ręcznym. Do odprężania sygnałów, gdzie często należało zastosować duże pojemności użyto w większości kondensatorów elektrolitycznych, natomiast w strategicznych punktach bezpośredniego kontaktu sygnału audio z komponentem – foliowych. Zwracano szczególną uwagę na wybranie komponentu o możliwie małej rezystancji szeregowej i tolerancji, materiale dielektryka X7R lub lepszym oraz jak największej wartości znamionowego napięcia pracy. Zastosowano rezystory o tolerancji rzędu 1% i obudowie w rozmiarze 0805. Dławiki składające się na wyjściowe filtry LC wedle zaleceń producenta powinny być przystosowane do prądu o wartości przynajmniej 5.8 A [11, p. 9] o możliwie małej rezystancji szeregowej (DCR). Ponieważ układ pracuje w konfiguracji BTL, dobroć Q zbliżona do wartości $\frac{1}{\sqrt{2}}$ (≈ 0.707) pozwoliła na uzyskanie odpowiednio zbalansowanego wzmocnienia w okolicy częstotliwości odcięcia. Parametry radiatora dopasowano na podstawie informacji zawartych w nocie katalogowej płytki ewaluacyjnej do układu TPA3116D2 [12].

3.3 Montaż urządzenia

Płytką drukowaną o wymiarach 135.1 mm × 90.9 mm została wykonana na standardowym laminacie FR-4 z 1 oz warstwami miedzi i mieszczą się na niej 173 komponenty. Ich układ został maksymalnie zoptymalizowany w celu uzyskania możliwie małych zakłóceń. Po zlutowaniu układu dokładnie zbadano występowanie ewentualnych defektów w postaci zimnych lutów, zabrudzeń, zwarców czy urwanych padów lutowniczych. Starano się zachować odpowiednią estetykę i przejrzystość układu.



Rys. 13. Widok kompletnej płytki wzmacniacza mocy audio

Elementem konstrukcyjnym urządzenia jest stalowa obudowa uniwersalna z wydzieloną podstawką do montażu modułów. Została ona odpowiednio zmodyfikowana na potrzeby montażu elementów peryferyjnych do obsługi wzmacniacza i urządzeń zewnętrznych. Wszystkie podzespoły połączono elektrycznie jak przedstawiono na Rys. 1, a następnie umieszczono w obudowie.



Rys. 14. Widok urządzenia od frontu



Rys. 15. Widok urządzenia od tyłu

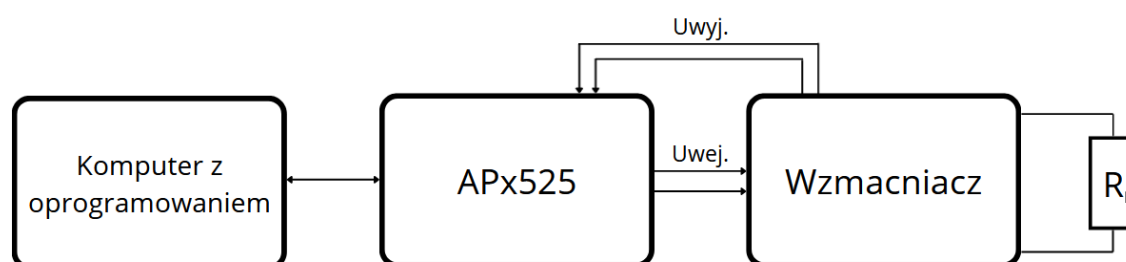
Całkowite wymiary urządzenia, razem ze złączami głośnikowymi, wynoszą $100\text{ mm} \times 154\text{ mm} \times 65\text{ mm}$. Na panelu frontowym znajduje się 5 potencjometrów służących do regulacji ustawień wzmacniacza, 4 przyciski i dioda LED służące do obsługi interfejsu Bluetooth oraz wejście liniowe jack 3.5 mm. Funkcje potencjometrów (od lewej): głośność ogólna, regulacja barwy (basy, soprały), głośność głośnika

niskotonowego, częstotliwość odcięcia głośnika niskotonowego. Funkcje przycisków interfejsu Bluetooth obejmują (od lewej): pauza/odtwórz, utwórz do tyłu, utwórz do przodu, włącz/wyłącz Bluetooth. Na panelu znajduje się również dioda LED pokazująca status połączenia. Jeżeli dioda miga oznacza to, że Bluetooth jest aktywny i czeka na połączenie z urządzeniem, natomiast jeżeli świeci światłem stałym urządzenie zewnętrzne zostało sparowane ze wzmacniaczem i układ jest gotowy do pracy. Na tylnym panelu znajduje się gniazdo zasilania wraz z włącznikiem i terminal głośnikowy, z czego skrajnie po lewej znajduje się wyjście do podłączenia głośnika niskotonowego, natomiast pozostałe obsługują prawy oraz lewy kanał zestawu głośnikowego.

4 Pomiary i analiza parametrów wzmacniacza

4.1 Parametry wzmacniacza

Do przeprowadzenia pomiarów wykorzystano analizator audio Audio Precision APx525. Jest to zaawansowane urządzenie, pozwalające na szczegółową analizę różnorodnych aspektów działania wzmacniacza. Pomiary zostały przeprowadzone w oparciu o normę PN-EN IEC 60268-3. Zmierzono najbardziej kluczowe właściwości wzmacniacza, tj. maksymalna moc wyjściowa, pasmo przenoszenia, zniekształcenia harmoniczne oraz stosunek sygnału do szumu. Parametry wzmacniacza określono dla różnych nastaw regulacji barwy.



Rys. 16. Sposób podłączenia urządzeń pomiarowych

Przeprowadzono pomiary dla potencjometrów w pozycji możliwie niższej, neutralnej oraz możliwie zwiększonej. Sygnałem użytym do pomiaru mocy kanału stereo była sinusoida o częstotliwości 1 kHz i amplitudzie o napięciu dobranym adekwatnie do

konkretnej nastawy regulacji barwy tak, aby uzyskać znamionowe warunki pracy wzmacniacza. Pozostałe pomiary przedstawione w pracy zostały przeprowadzone dla warunków normalnych [13]. Gałka regulacji głośności w trakcie trwania pomiarów znajdowała się na stałym, maksymalnym poziomie. Pomiary przeprowadzono dla zalecanych w nocie katalogowej TPA3116D2 wartości rezystancji obciążenia tj. $4\ \Omega$ dla wyjścia stereo oraz $4\ \Omega$ i $2\ \Omega$ dla wyjścia głośnika niskotonowego. W celu wyznaczenia mocy wyjściowej wykorzystano zależność:

$$P_{RMS} = \frac{U_{RMS}^2}{R_L} \quad (8)$$

gdzie:

U_{RMS} – wartość napięcia RMS na zaciskach wyjściowych

R_L – rezystancja obciążenia na zaciskach

Aby wyznaczyć stosunek sygnału do szumu skorzystano z równania:

$$SNR = 20 \log \frac{U_S}{U_N} \quad (9)$$

gdzie:

U_S – wartość napięcia RMS sygnału użytecznego na zaciskach wyjściowych

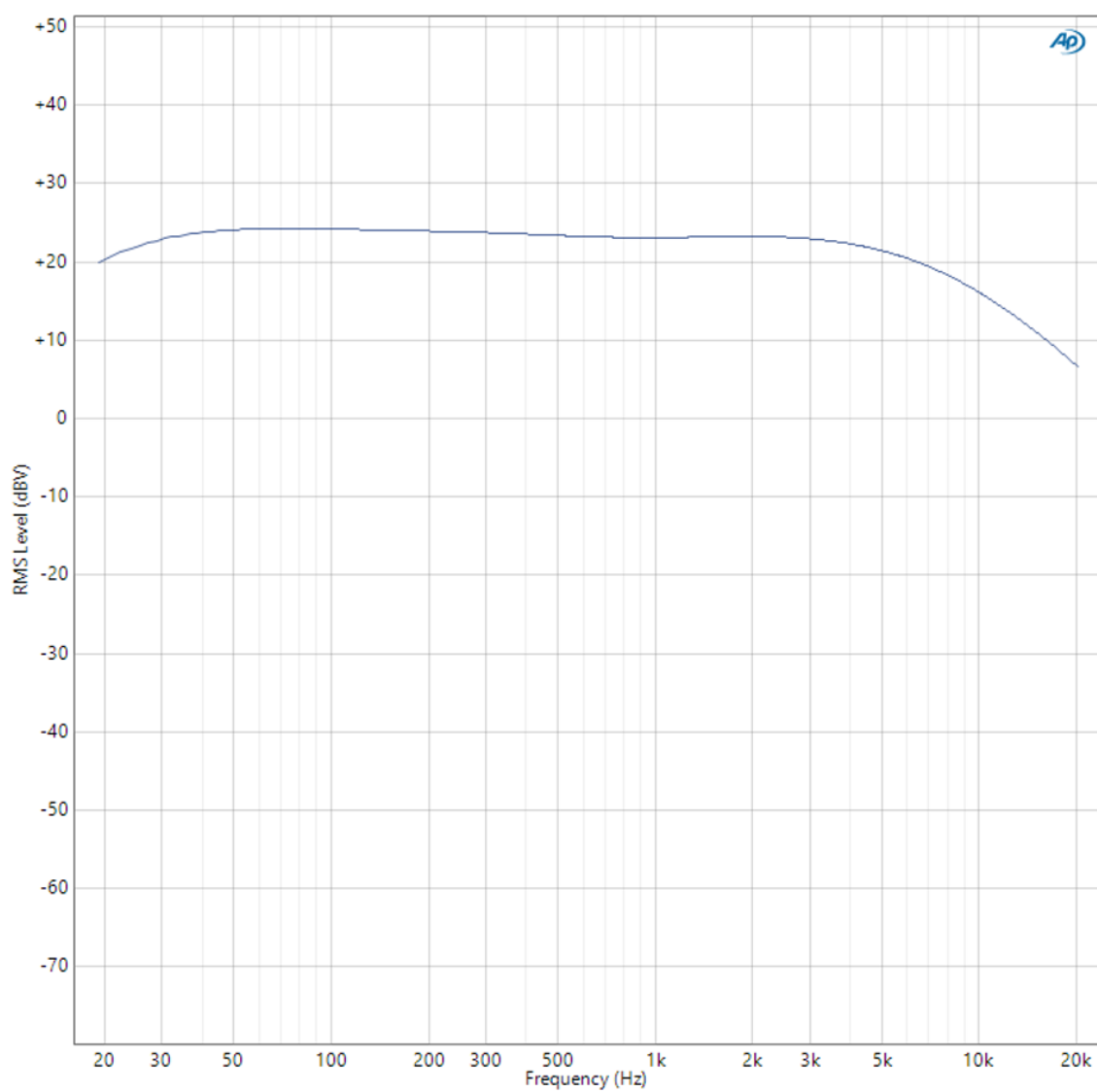
U_N – wartość napięcia RMS szumów (bez sygnału wejściowego)

Ponieważ w projekcie wzmacniacza nie przewidziano bezpośredniego wejścia sygnału do końcówki mocy (direct in) za pomocą ustawienia potencjometrów w pozycji neutralnej możliwe było uzyskanie parametrów najlepiej oddających znamionowy charakter pracy TPA3116D2. Z tego powodu, konfiguracja ta została użyta następnie jako punkt odniesienia przy porównywaniu wyników.

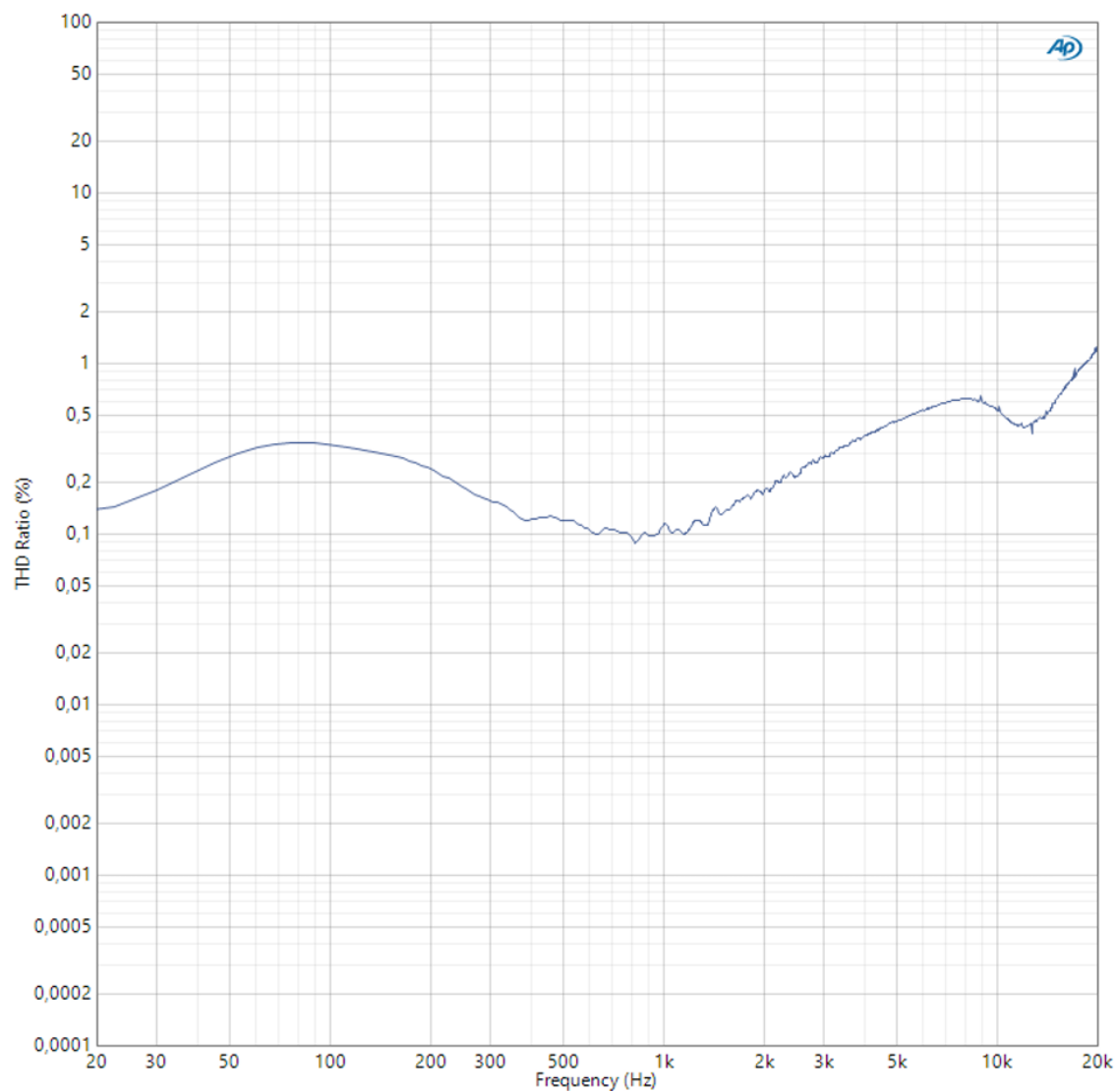
4.1.1 Tony niskie i wysokie w pozycji neutralnej

$$P_{RMS} = \frac{15.19 V^2}{4 \Omega} \approx 57.68 W$$

$$SNR = 20 \log \frac{15.19 V}{8.09 mV} \approx 65.47 dB$$



Rys. 17. Pasmo przenoszenia wzmacniacza z tonami niskimi i wysokimi w pozycji neutralnej w warunkach normalnych

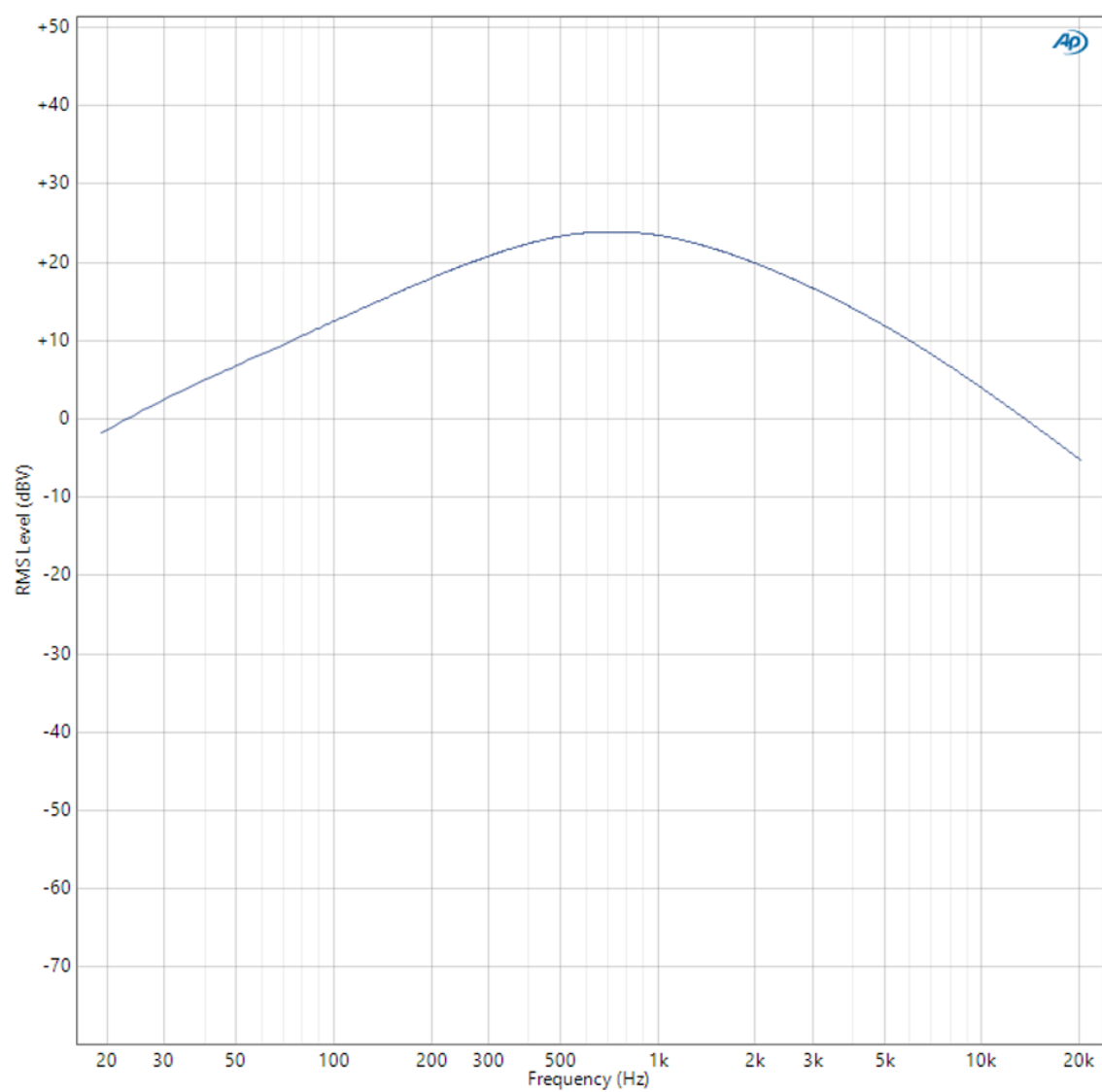


Rys. 18. Udział zniekształceń harmoniczných z tonami niskimi i wysokimi w pozycji neutralnej w warunkach normalnych

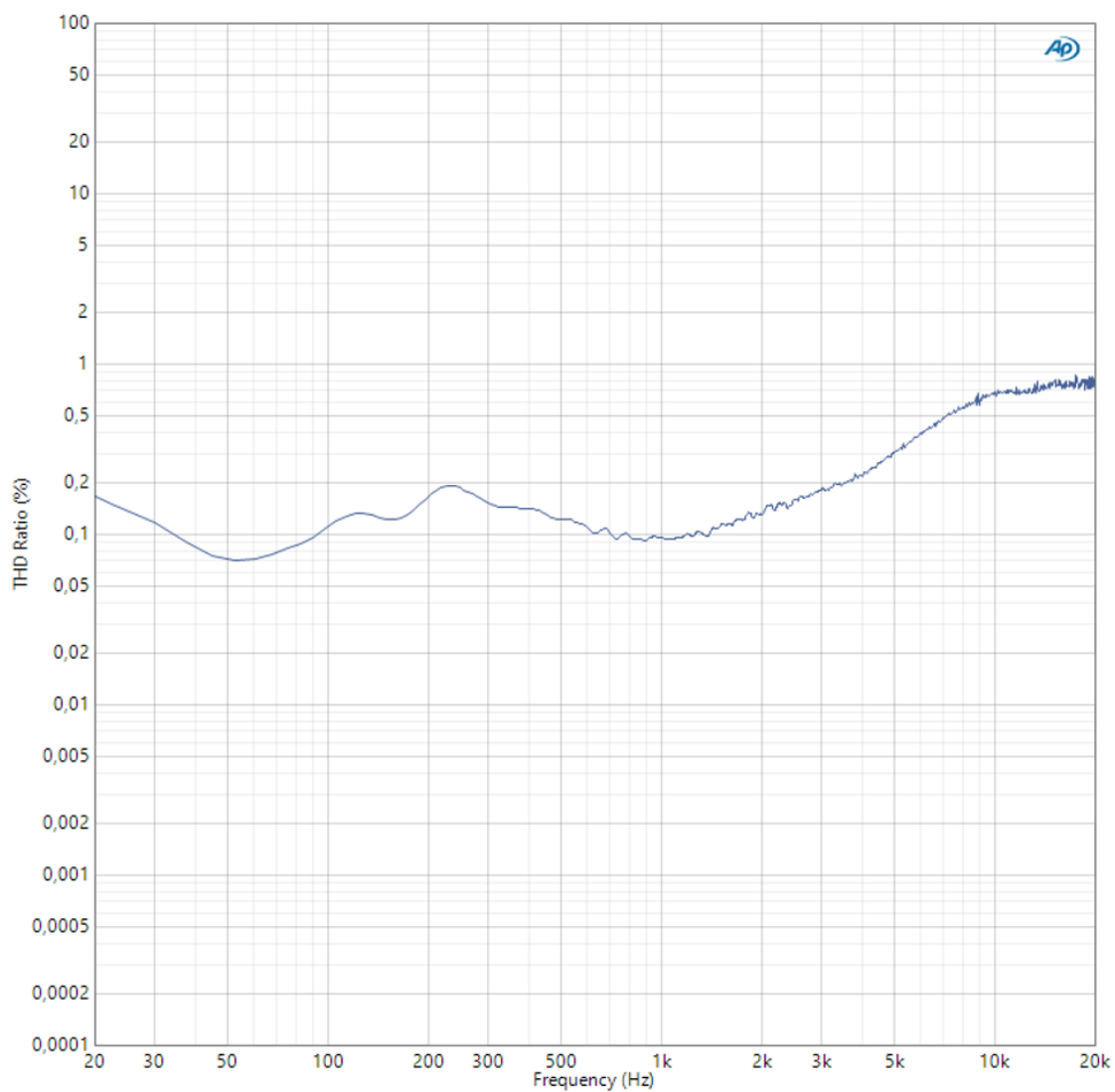
4.1.2 Tony niskie i wysokie w pozycji minimalnej

$$P_{RMS} = \frac{15.25 V^2}{4 \Omega} \approx 58.14 W$$

$$SNR = 20 \log \frac{15.25 V}{8.09 mV} \approx 65.51 dB$$



Rys. 19. Pasmo przenoszenia wzmacniacza z tonami niskimi i wysokimi w pozycji minimalnej w warunkach normalnych

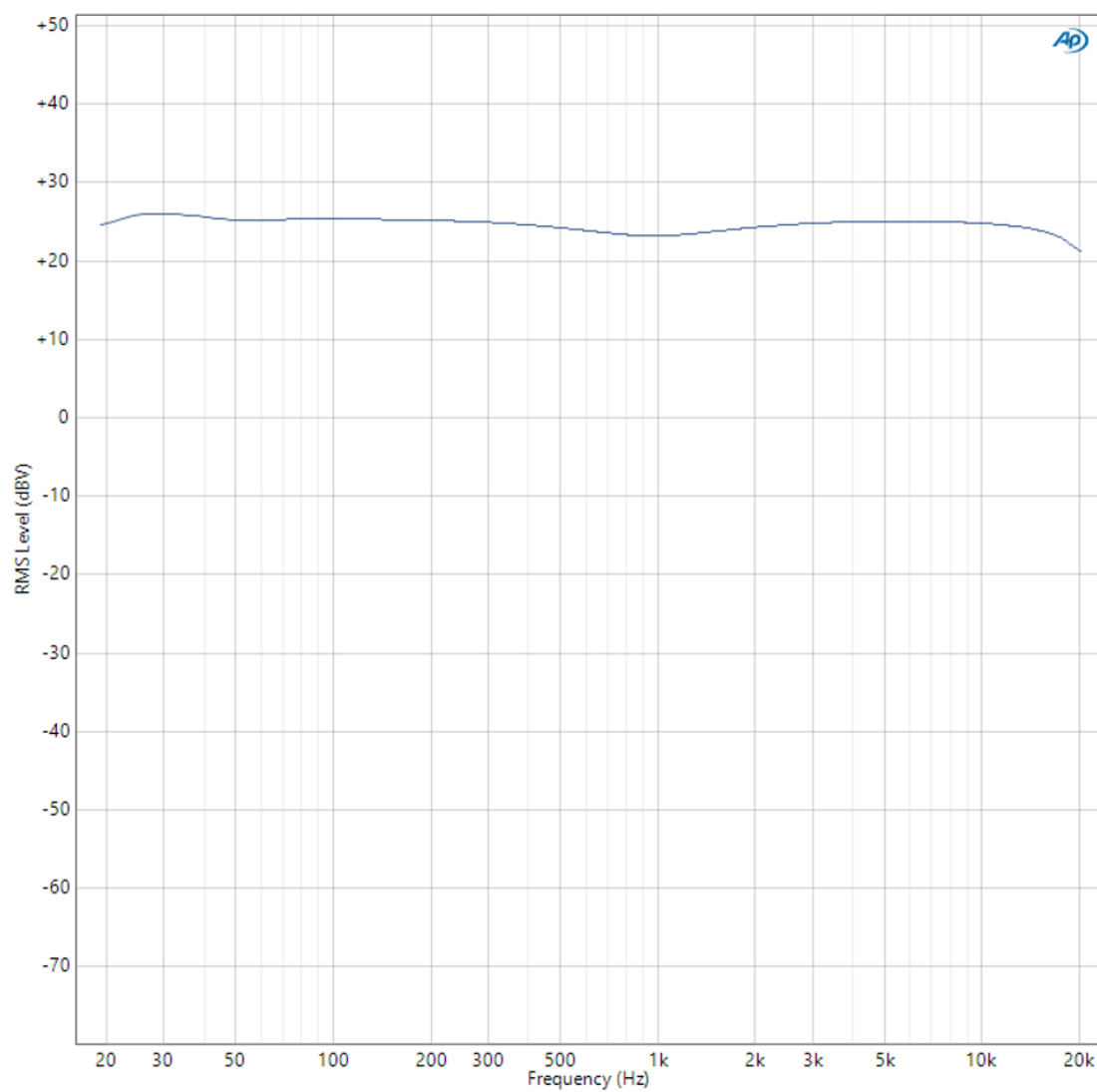


Rys. 20. Udział zniekształceń harmoniczych z tonami niskimi i wysokimi w pozycji minimalnej w warunkach normalnych

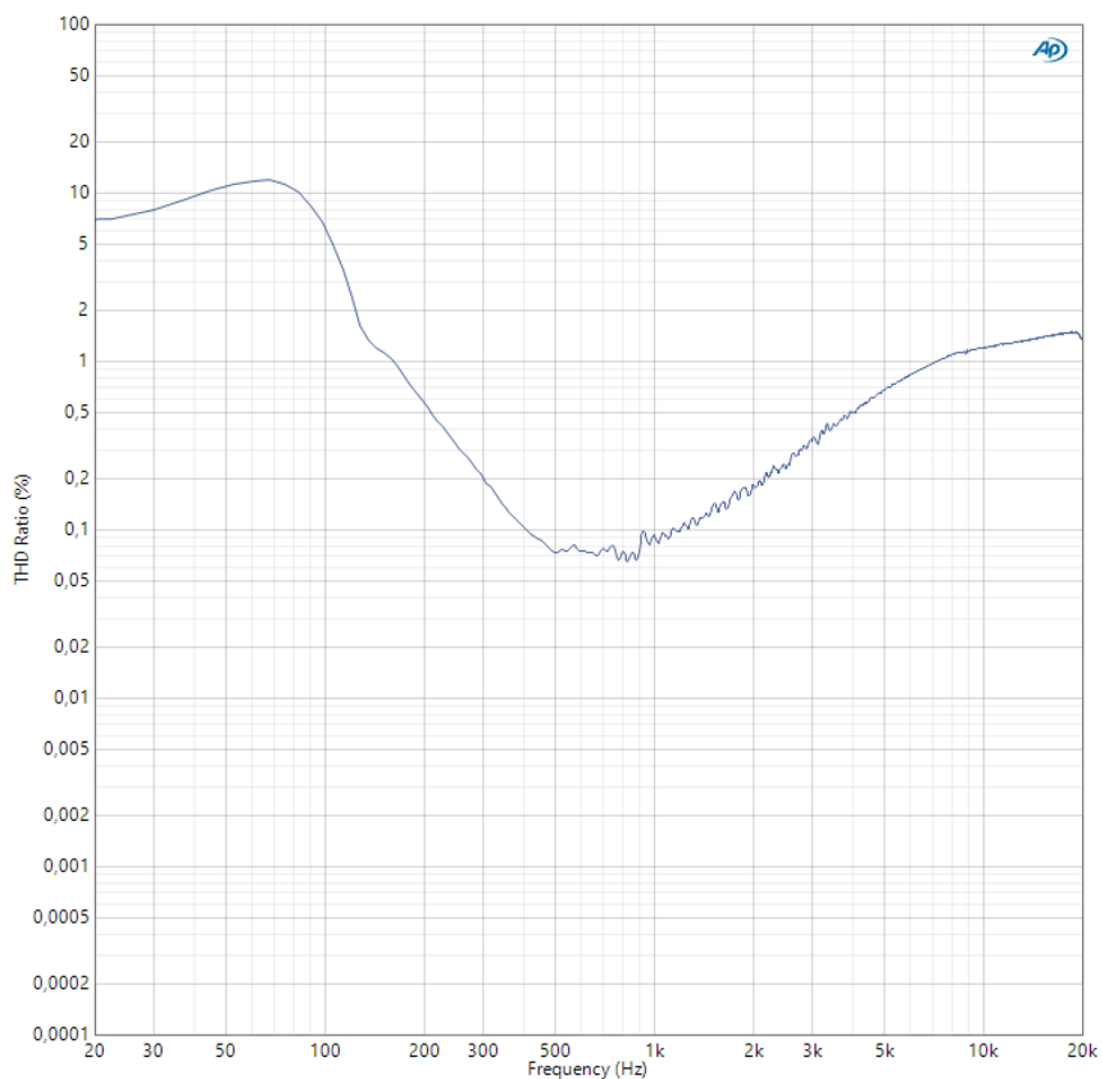
4.1.3 Tony niskie i wysokie w pozycji maksymalnej

$$P_{RMS} = \frac{15.23 V^2}{4 \Omega} \approx 57.99 W$$

$$SNR = 20 \log \frac{15.25 V}{8.09 mV} \approx 60.98 dB$$



Rys. 21. Pasmo przenoszenia wzmacniacza z tonami niskimi i wysokimi w pozycji maksymalnej w warunkach normalnych

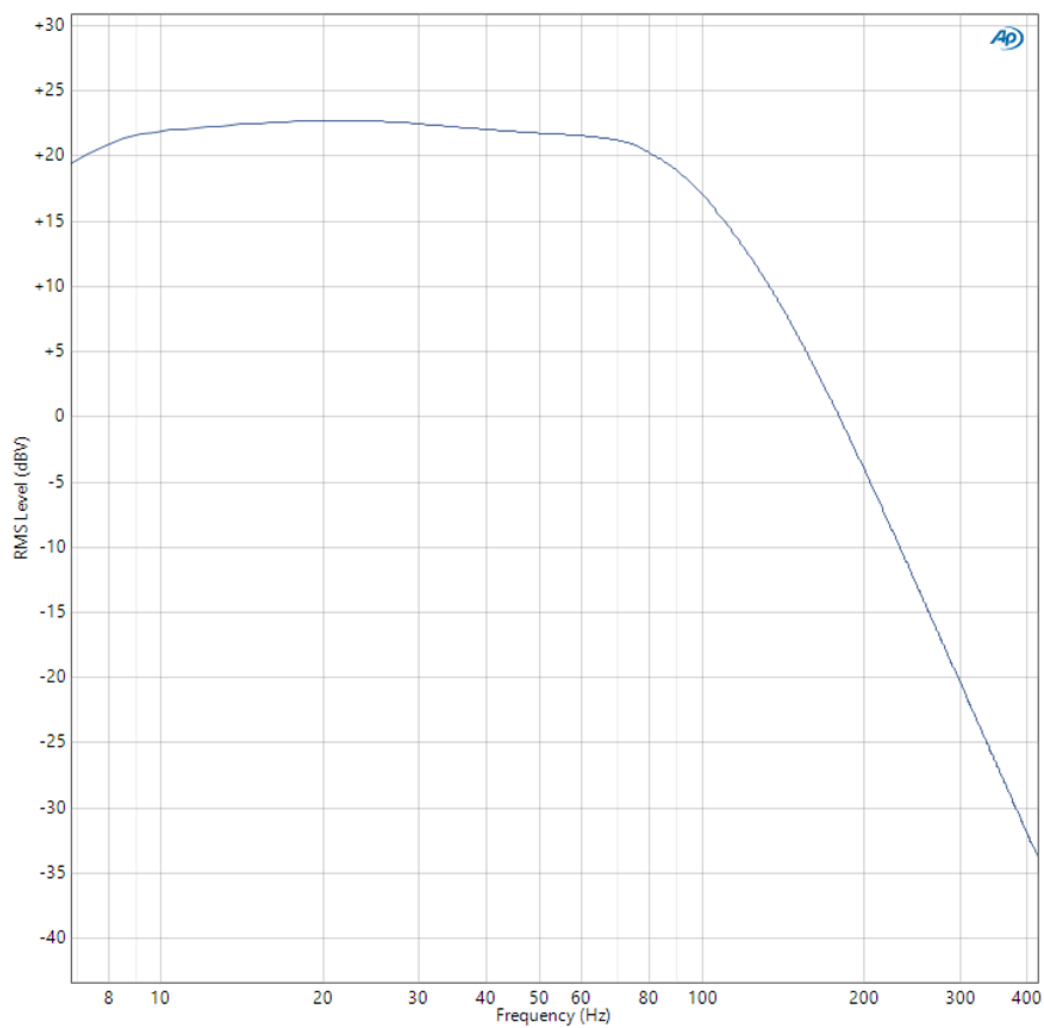


Rys. 22. Udział zniekształceń harmoniczych z tonami niskimi i wysokimi w pozycji maksymalnej w warunkach normalnych

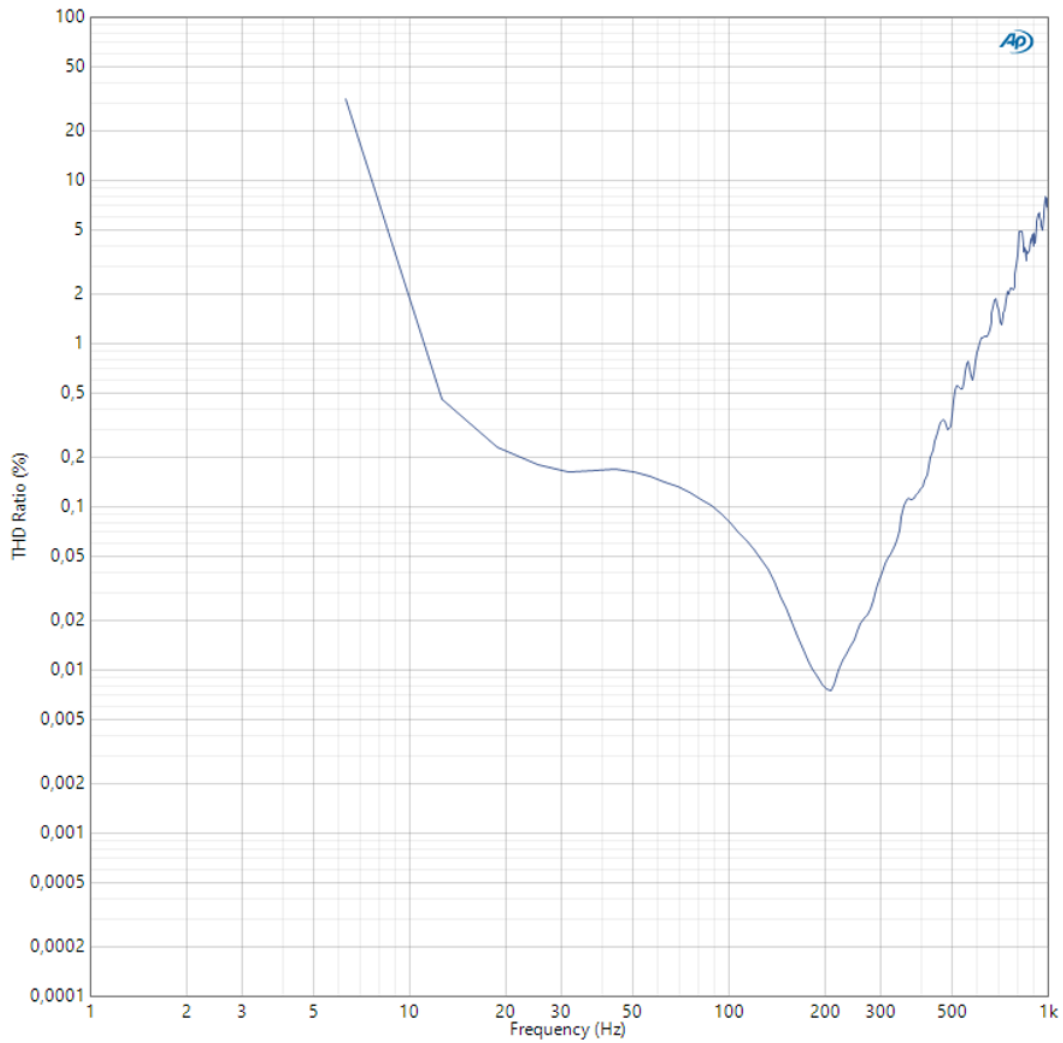
4.1.4 Kanał niskotonowy, maksymalna regulacja barwy, $R_L = 2 \Omega$

$$P_{RMS} = \frac{7.86 V^2}{2 \Omega} \approx 30.89 W$$

$$SNR = 20 \log \frac{7.86 V}{3.56 mV} \approx 66.88 dB$$



Rys. 23. Pasmo przenoszenia kanału niskotonowego z regulacją barwy w pozycji maksymalnej w warunkach normalnych przy obciążeniu 2Ω

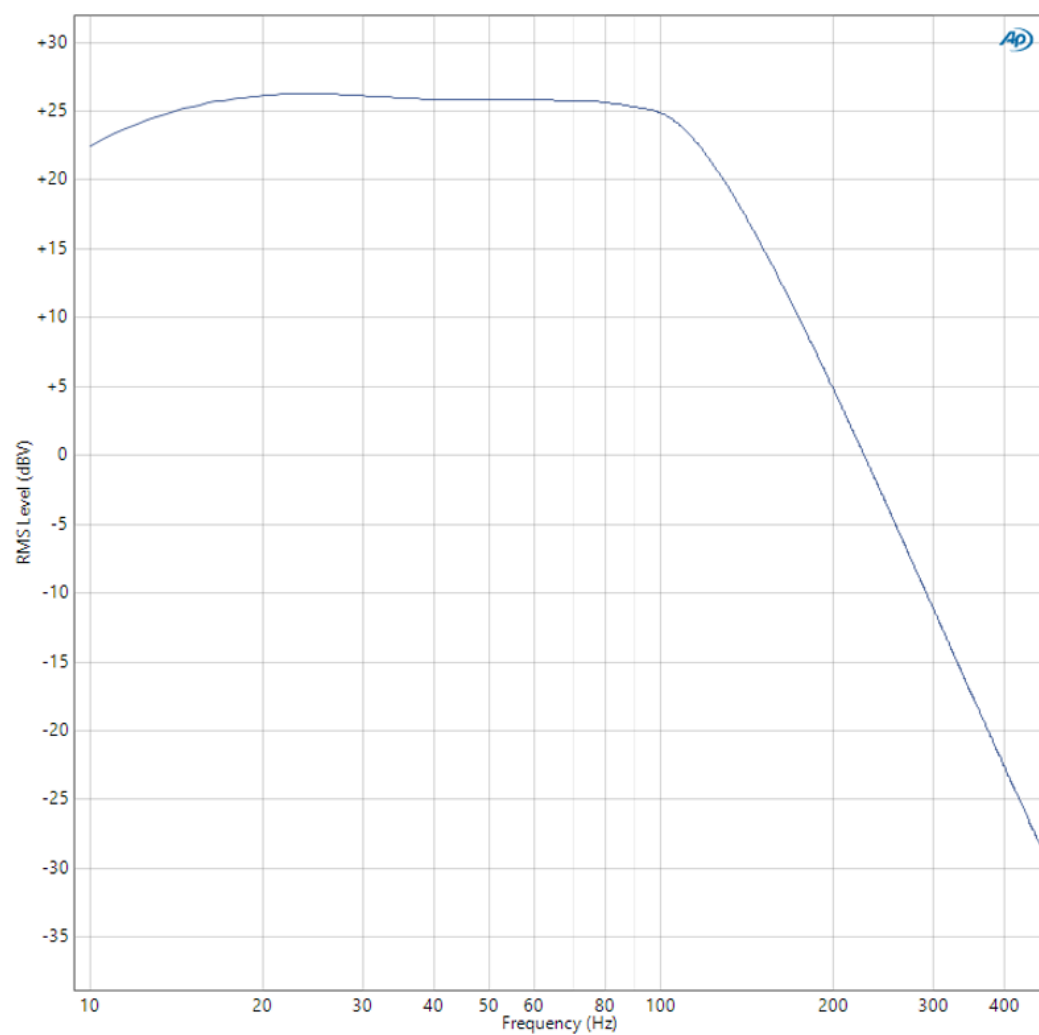


Rys. 24. Udział zniekształceń harmoniczných z regulacją barwy w pozycji maksymalnej w warunkach normalnych przy obciążeniu $2\ \Omega$

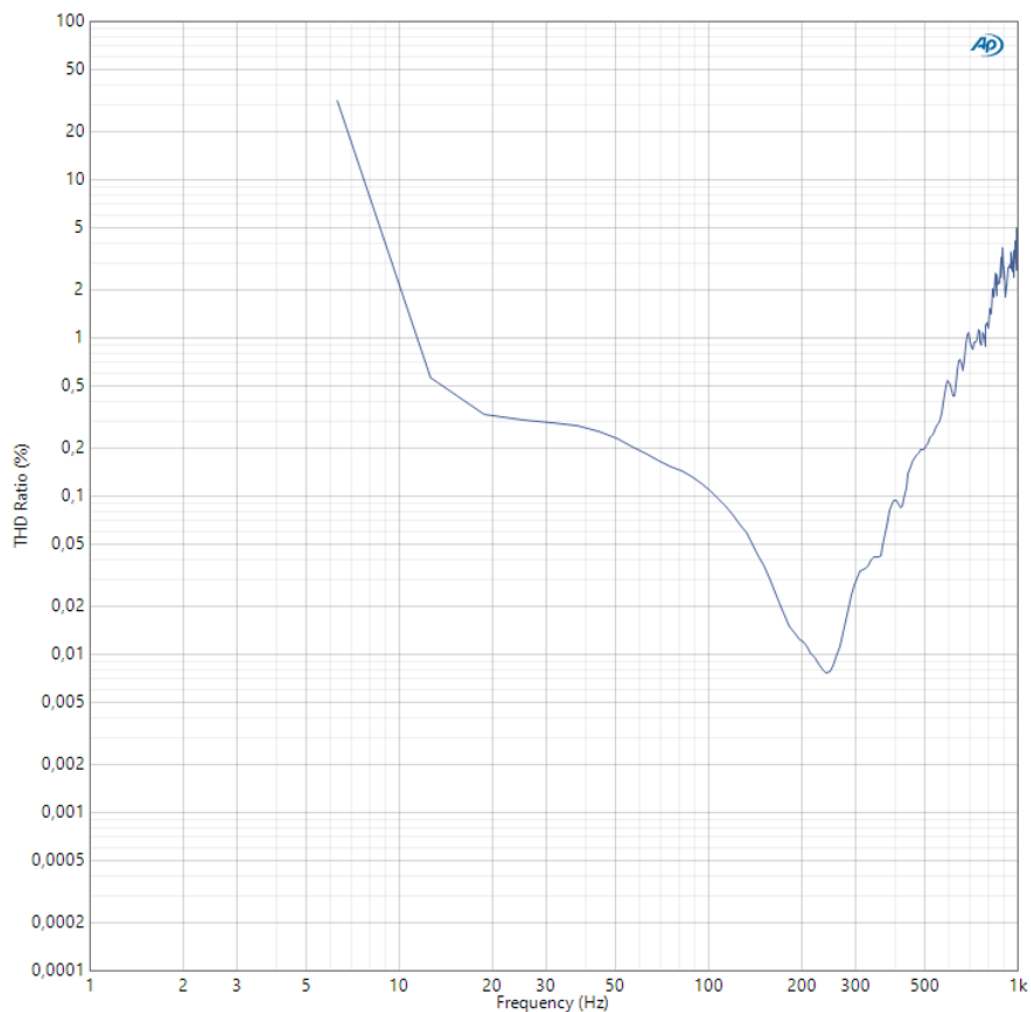
4.1.5 Kanał niskotonowy, maksymalna regulacja barwy, $R_L = 4\ \Omega$

$$P_{RMS} = \frac{14.93\ V^2}{4\ \Omega} \approx 55.73\ W$$

$$SNR = 20 \log \frac{14.93\ V}{3.56\ mV} \approx 72.45\ dB$$



Rys. 25. Pasmo przenoszenia kanału niskotonowego z regulacją barwy w pozycji maksymalnej w warunkach normalnych przy obciążeniu 4Ω



Rys. 26. Udział zniekształceń harmoniczných z regulacją barwy w pozycji maksymalnej w warunkach normalnych przy obciążeniu 4 Ω

4.2 Analiza obiektywných parametrów jakości dźwięku

Ocena parametrów akustycznych wykonanego wzmacniacza jest jednym z najbardziej kluczowych aspektów pracy. W niniejszym rozdziale omówiono zarówno zbadane uprzednio obiektywnie jak i subiektywne parametry służące do analizy jakości dźwięku.

Uzyskany dla ustawień neutralnych oraz minimalnych potencjometrów stosunek sygnału do szumu wyniósł wartość około 65.5 dB, natomiast przy ustawieniach maksymalnych spadł do wartości około 61 dB. Wszystkie te wartości wskazują na stosunkowo wysoki poziom szumu zawartego w reprodukowanym przez wzmacniacz dźwięku i mogą mieć wpływ na percepcję jego czystości i szczegółowości szczególnie

w cichych partiach muzycznych, gdzie będzie to bardziej zauważalne. Dostępne na rynku konsumenckim urządzenia z reguły charakteryzują się SNR na poziomie zbliżonym do 90 dB. Wyższej klasy urządzenia hi-fi nierzadko posiadają ten parametr na poziomie nawet powyżej 100 dB.

Zmierzone zniekształcenia harmoniczne w dużej mierze zależały od pozycji w jakiej były ustawione potencjometry. Zgodnie z oczekiwaniami, poziom THD był średnio na najniższym poziomie przy ustawieniu w pozycji minimalnej, wyższym w pozycji neutralnej oraz najwyższy w pozycji maksymalnej. Charakterystyka przebiegu zawartości harmonicznych pokrywała się z Rys. 4. przedstawiającym charakterystykę przenoszenia układu regulacji barwy. Dla neutralnej pozycji potencjometrów poziom THD oscyluje w okolicy 0.2% co jest w pełni akceptowalnym wynikiem dla urządzenia tej kategorii.

Jednym z ważniejszych parametrów wzmacniaczy audio jest pasmo przenoszenia, które w omawianym przypadku przy odpowiedniej nastawie regulacji barwy pokrywa pełne spektrum słyszalne ($20\text{ Hz} - 20\text{ kHz}$) $\pm 1\text{ dB}$. Charakterystyka amplitudowa kanału niskotonowego prezentuje szersze pasmo przenoszenia przy obciążeniu wynoszącym $4\ \Omega$, które można oszacować na zakres $15 - 115\text{ Hz}$. Jednocześnie, będący się w tym zakresie częstotliwości poziom THD nie przekracza 0.5%, co mieści się w granicach akceptacji.

4.3 Ocena działania

Analizując pomiary kanału niskotonowego można zauważyć uzyskanie nieoczekiwanej małej mocy wyjściowej, ponieważ przy obciążeniu $4\ \Omega$ wyniosła ona 55.73 W, natomiast przy $2\ \Omega$ obciążenia zaledwie 30.89 W, pomimo pracy układu końcówki mocy w trybie PBTL. Uzyskanie takiego wyniku jest możliwe z kilku przyczyn. Pierwszą z nich jest fakt, że w tym trybie pracy przy źródle zasilania o wartości 24 VDC oraz THD nieprzekraczającym 1% przy $3\ \Omega$ obciążenia najwyższa osiągalna moc układu oscyluje w okolicach 85 W [3, p. 12]. Oznacza to, że układ zaimplementowany w projekcie przy takiej konfiguracji będzie w stanie uzyskać jedynie zbliżony do tej wartości parametr. TPA3116D2 zawiera zintegrowane obwody ochronne, w tym ochronę przed przeciążeniem, przegrzaniem czy zbyt wysokim napięciem, a także detekcję prądu stałego. Jeśli przy dokonywaniu pomiarów którakolwiek z tych funkcji była aktywna, mogło to ograniczyć moc wyjściową, aby zapobiec uszkodzeniu układu.

Jest to prawdopodobne, ponieważ przy pewnych wyższych wartościach amplitudy aparatura APx525 miała problem z dostosowaniem zakresu co było słyszalne poprzez przekaźniki działające w jej wnętrzu oraz widoczne w oprogramowaniu do analizy danych, ponieważ wyświetlające się wartości były bardzo niestabilne i przyczyniło się to do trudności w ich jednoznacznej interpretacji. Odnosząc się do zmierzonych parametrów kanału stereo w pierwszej kolejności należy zauważyć osiągnięcie mocy wyjściowej wyższej niż maksymalna przewidziana przez producenta wynoszącą 57,68 W dla pozycji neutralnej potencjometrów. Należy jednak zwrócić uwagę na poziom wzmocnienia końcówki mocy, który w projekcie został ustawiony na 36 dB, co jest wartością o 10 dB większą niż podana w nocie katalogowej, dla której przeprowadzone były pomiary.

Przeprowadzono subiektywną ocenę jakości dźwięku z wykorzystaniem zestawu głośnikowego stereo Aiwa SX-NAV85 oraz głośnika niskotonowego Hertz S300. Odsłuchy przeprowadzono na kilkunastu utworach z gatunku muzyki popularnej oraz klasycznej modyfikując ustawienia regulacji barwy oraz głośnika niskotonowego. Zauważono, że pozycja potencjometru głośności na poziomie około $\frac{1}{3}$ maksymalnej wartości wpływa na minimalizację szumów słyszanych z głośników. Niższe ustawienie wprowadzało więcej przydźwięku sieciowego, natomiast wyższe szумы o składowych wysokoczęstotliwościowych. Kolejnym wnioskiem jest ogólnie rozumiana lepsza jakość dźwięku przy korzystaniu z wejścia AUX w porównaniu do połączenia za pomocą interfejsu Bluetooth. Dźwięk strumieniowany przez moduł Bluetooth zdaje się przytłumiony i mocno skompresowany, a dodatkowo pojawiają się tą drogą większe szумы niż w przypadku wejścia AUX. Słyszalne są niepożądane dźwięki generowane w jego wnętrzu transmitowane następnie na wyjście. Pomimo stosunkowo dużego zmierzonego SNR, wzmacniacz oferuje satysfakcjonujący odsłuch muzyki popularnej, co świadczy o jego zdolności do reprodukcji dźwięku o szerokim spektrum. Niemniej jednak, w przypadku utworów o większej dynamice, wzmacniacz wydaje się mieć pewne ograniczenia. Dynamika i subtelne niuanse muzyki poważnej wymagają od urządzenia audio wyższego poziomu precyzji oraz zdolności do oddania szerokiego zakresu tonalnego niż prezentowane przez testowany wzmacniacz. Na szczególną uwagę zasługują kanał głośnika niskotonowego, ponieważ pozwala na uzyskanie głębokiego i czystego basu.

Podsumowując, wyniki przeprowadzonych analiz skonstruowanego urządzenia wykazały, że posiada ono wystarczającą moc do zasilenia typowego pasywnego zestawu głośnikowego w konfiguracji 2.1 do zastosowań domowych. Dźwięk jest czysty, a zniekształcenia harmoniczne utrzymują się na niskim poziomie. Najbardziej zauważalną wadą wzmacniacza jest jego niski stosunek sygnału do szumu, który objawia się słyszalnymi zakłóceniami podczas najcichszych partii utworów muzycznych oraz w przerwach pomiędzy nimi, gdy na wejście nie jest podawany żaden sygnał dźwiękowy. Zastosowany układ regulacji barwy cechuje się dużą dokładnością w umożliwieniu dobrania pożądanej konfiguracji oraz pozwala na szeroki zakres ustawień. Sygnał wyjściowy charakteryzuje się zwiększonym akcentem na niskie tony, zachowując jednocześnie wyraziste i klarowne brzmienie. Ponadto, na pozytywny odbiór urządzenia wpływ ma również jego wygodna obsługa, duża stabilność temperaturowa oraz kompaktowe rozmiary przyczyniające się do wartości użytkowej.

5 Podsumowanie

5.1 Wnioski

W ramach zrealizowanego projektu, przeprowadzono szereg pomiarów i analiz służących do weryfikacji rzeczywistych parametrów wzmacniacza audio. Uzyskane wyniki wskazują, że urządzenie spełnia większość założeń projektowych, jednakże ujawnia pewne obszary wymagające poprawy. Kluczowym założeniem projektowym było połączenie wysokiej mocy i jakości dźwięku przy jednoczesnym zachowaniu prostej łączności z urządzeniem i jego kompaktowymi rozmiarami co zostało spełnione. Moc uzyskana na wyjściu stereo jest w pełni satysfakcjonująca, natomiast pomiary kanału niskotonowego, prawdopodobnie spowodowane ograniczeniami systemu zabezpieczeń końcówki mocy, wykazały poziom mniejszy niż oczekiwany. Należy mieć jednak na uwadze, że przyczyna mogła leżeć po stronie zbyt małej impedancji obciążenia użytej do pomiarów. Pasma przenoszenia urządzenia jest wystarczająco szerokie i przy odpowiednim ustawieniu regulacji barwy pokrywa pełne pasmo słyszalne. Dodatkowe basy może uzupełnić kanał niskotonowy zapewniający pasmo o zakresie 15 – 115 Hz przy obciążeniu 4 Ω . Zmierzone poziomy zniekształceń

harmonicznych są akceptowalne dla urządzenia tej klasy, jednakże wskazują na dużą zależność od ustawień potencjometrów tonów niskich i wysokich. Najbardziej wpływającym na odbiór reprodukowanego dźwięku elementem jest niski SNR, który osiąga wartość zbliżoną do 65 dB. Przy małych poziomach głośności słyszalny jest przydźwięk sieciowy, który negatywnie wpływa na wrażenia odsłuchowe. Analiza jakości interfejsu Bluetooth wykazała, że choć funkcjonalność ta dodaje znaczną wartość użytkową, jakość dźwięku przy tej metodzie jest niższa, niż w przypadku tradycyjnego wejścia AUX. Wynika to z ograniczeń samego modułu w zakresie przetwarzania sygnału audio. Zauważono, że dźwięk zdaje się być przytłumiony i skompresowany, negatywnie wpływa na ogólną percepcję jego jakości. Wzmacniacz wykazuje się wysoką stabilność termiczną zarówno w obrębie układu zasilania jak i końcówki mocy dzięki zastosowaniu odpowiednio dużego radiatora w układzie końcówki mocy oraz pasywnej wentylacji obudowy.

Podsumowując, wykonany projekt spełnia założenia projektowe oferując kompaktowe rozmiary, zamierzoną funkcjonalność oraz poprawną jakość dźwięku. Jednocześnie, identyfikacja obszarów wymagających udoskonalenia, jak niski SNR i obecne ograniczenia modułu Bluetooth podkreśla potrzebę dalszego dopracowania i udoskonalenia urządzenia.

5.2 Perspektywy rozwoju projektu

W kontekście dynamicznie rozwijającej się technologii audio, projekt ten otwiera wiele możliwości dalszych innowacji. Pierwszorzędnym aspektem, który w znaczącym stopniu wpłynąłby na polepszenie parametrów akustycznych wzmacniacza byłaby implementacja wyższej jakości interfejsu Bluetooth. Ten sposób połączenia z urządzeniem jest w obecnych czasach bardzo często wykorzystywany i nie powinien znacząco odstawać jakościowo od połączenia analogowego. Wskazany byłoby również zastosowanie nowszej technologii Bluetooth, na przykład wersji 5.0 lub wyższej, która pozwoliłaby na większą odległość przesyłania muzyki czy podłączenie wielu urządzeń jednocześnie. Aby otworzyć wzmacniacz audio na jeszcze szerszy zakres możliwości wskazane byłoby dodanie obsługi przez Wi-Fi oraz wsparcie dla strumieniowania muzyki za pośrednictwem technologii bezprzewodowych znanych producentów takich jak AirPlay czy Spotify Connect.

Kolejnym ważnym aspektem byłoby polepszenie samych parametrów technicznych, zwłaszcza tych wpływających na odbiór jakości dźwięku. Należałoby rozważyć zoptymalizowanie projektu PCB płytki wzmacniacza w celu wyeliminowania powstawania pętli mas wprowadzających niepożądane zakłócenia skutkujące niskim poziomem sygnału do szumu. Jak ustalono w poprzednich rozdziałach, aby osiągnąć satysfakcjonującą jakość wartość ta powinna wynosić przynajmniej 90 dB. Pomimo uzyskania niewielkiego udziału zniekształceń harmonicznym w sygnale wyjściowym, aby dostosować się do obecnych standardów branżowych warto byłoby również pochylić się nad tym zagadnieniem. Biorąc pod uwagę małe możliwości dostrojenia układu końcówki mocy, ponieważ jest on zintegrowanym układem scalonym dającym możliwość modyfikacji jedynie za pomocą niewielkiej liczby komponentów peryferyjnych, warto byłoby rozważyć zastosowanie alternatywnego rozwiązania, które pozwoliłoby osiągnąć lepsze parametry.

Znaczącym usprawnieniem w kontekście funkcjonalności i obsługi urządzenia, byłaby jego integracja z mikrokontrolerem pozwalającym na wprowadzenie szeregu nowych możliwości do projektu, co wprowadziłoby urządzenie na znacznie wyższy poziom technologiczny. Mikrokontroler umożliwiałby precyzyjne monitorowanie poszczególnych sekcji urządzenia, co znacząco rozbudowałoby diagnostykę w poszukiwaniu występujących błędów oraz dynamiczne dostosowanie parametrów wzmacniacza do warunków pracy. Za jego pomocą możliwe byłoby stworzenie bardziej zaawansowanego i interaktywnego interfejsu użytkownika. Mógłby pozwalać on na wyświetlanie poziomu głośności, statusu urządzenia czy informacji o wybranym źródle dźwięku. To usprawnienie wprowadziłoby również możliwość dodania dedykowanej aplikacji mobilnej, za pomocą, której użytkownik mógłby zmieniać ustawienia wzmacniacza, czy zapisywać stworzone przez siebie profile barwy dźwięku.

Istnieje praktycznie nieskończona ilość dodatkowych funkcji czy usprawnień, która mogłaby zostać wprowadzona do projektu. To jak daleko projekt może posunąć granice funkcjonalności i innowacji zależy od docelowych potrzeb użytkownika urządzenia. Kluczowym w tej sytuacji jest natomiast określenie docelowego przeznaczenia urządzenia, jego parametrów akustycznych i fizycznych oraz środków jakie miałyby zostać przeznaczone do jego konstrukcji.

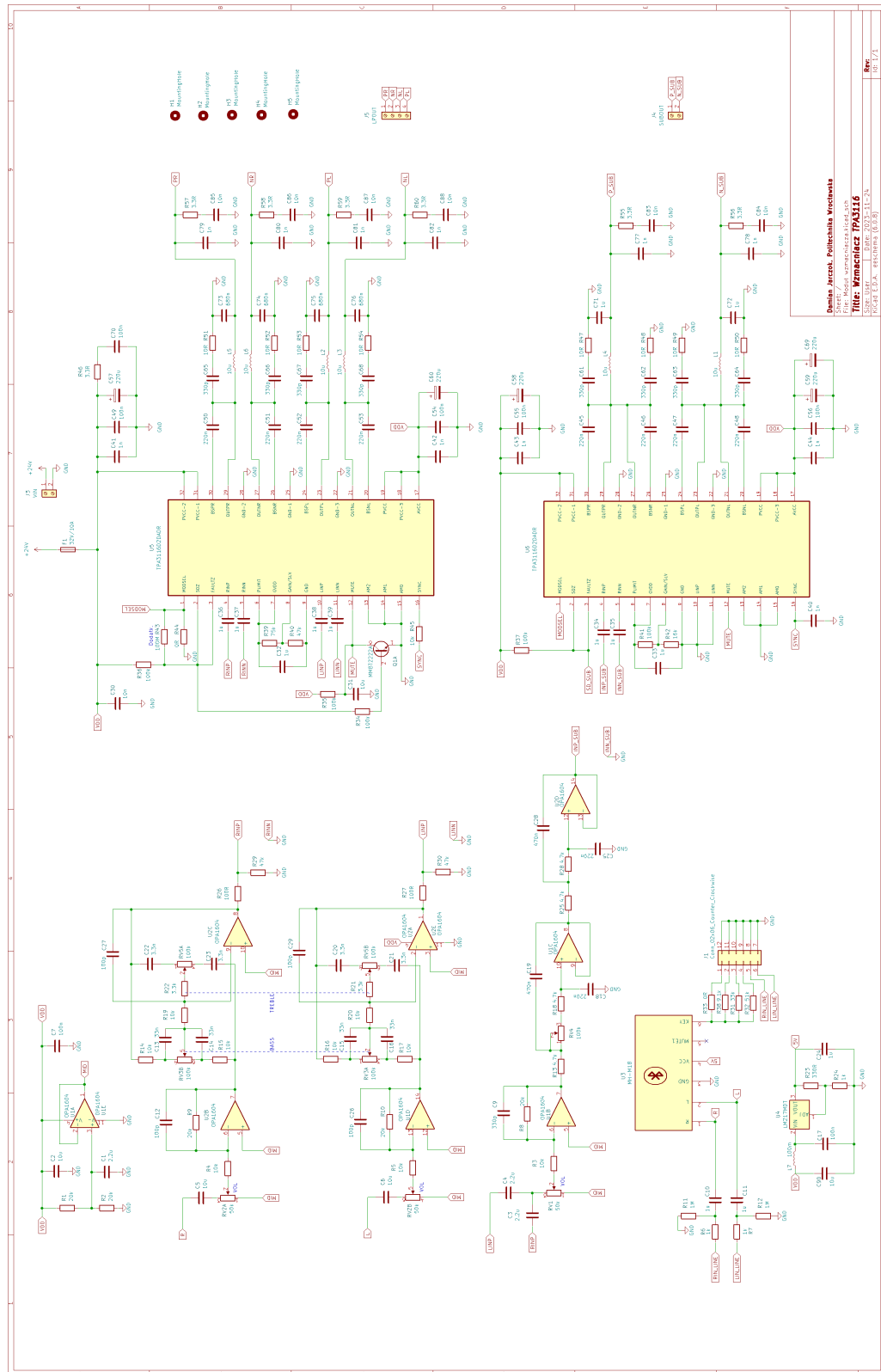
5.3 Uwagi końcowe

W powyższej pracy zostało przedstawione kompleksowe podejście do tematu zaprojektowania oraz późniejszej analizy wzmacniacza mocy audio pracującego w klasie D. Dokładne opracowanie teoretyczne, a następnie praktyczne wykonanie projektu pozwoliły na uzyskanie satysfakcjonujących wyników, które potwierdzają znaczną część przyjętych założeń. Projekt przeszedł długą drogę od idei, poprzez schemat elektroniczny aż po funkcjonalne urządzenie. Wymagał on wprowadzenia licznych poprawek, które obejmowały zarówno etap projektowy jak i wykonawczy. Projekt ten otwiera także nowe możliwości do dalszych badań i jego rozwoju. Kierunki, które mogą obejmować przyszłe prace to m.in.: optymalizacja komponentów wzmacniacza w celu poprawy wydajności i jakości dźwięku, stworzenie i zbadanie systemu łączącego analogowe oraz cyfrowe technologie wzmacniacza audio, projekt zaawansowanego i intuicyjnego interfejsu użytkownika do obsługi urządzenia czy badanie nowych metod przetwarzania sygnału dla poprawy jakości i charakterystyki dźwięku.

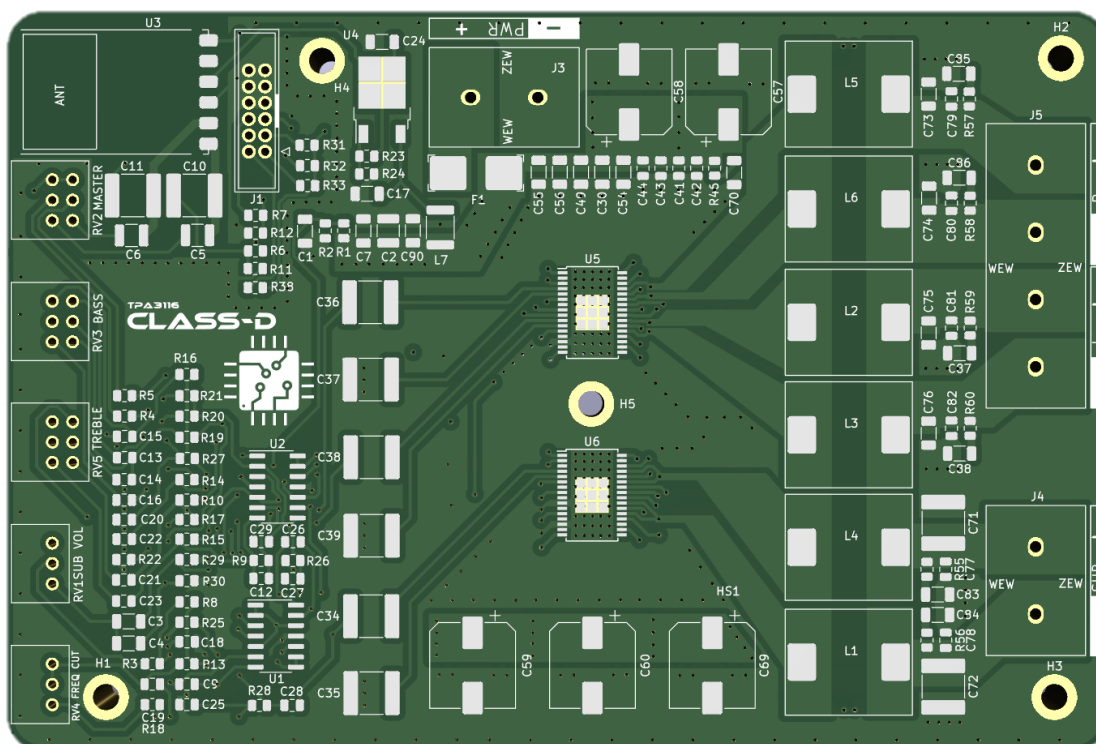
Praca włożona w tworzenie powyższego urządzenia pozwoliła w znaczącym stopniu zgłębić temat wzmacniaczy mocy audio klasy D, co nie tylko przyczyniło się do poszerzenia wiedzy w zakresie elektroniki, ale także akustyki. Konfrontacja z rzeczywistymi wyzwaniami technicznymi i ich przezwyciężenie stanowiły nieocenione doświadczenie. Zrealizowanie niniejszej pracy było nie tylko spełnieniem celów akademickich, ale przede wszystkim znaczącym krokiem naprzód w rozwoju osobistym oraz przygotowaniem do dalszych badań i projektów z dziedziny audio i elektroniki.

6 Dodatki

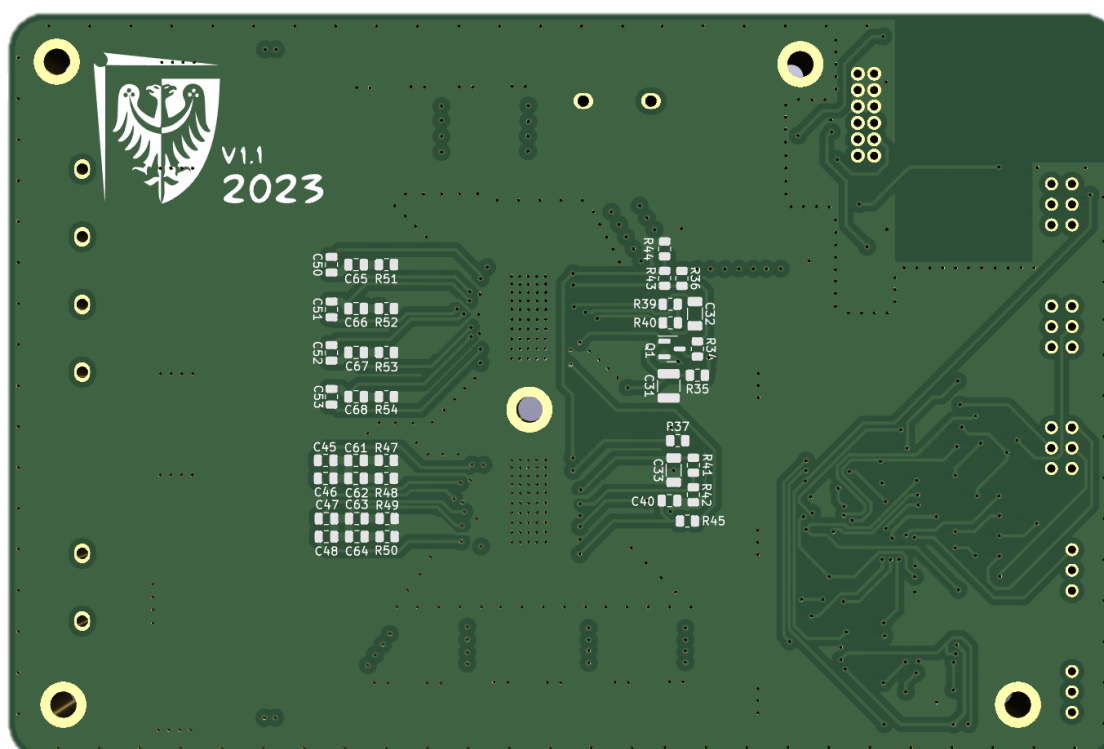
6.1 Kompletny schemat elektroniczny i projekt PCB



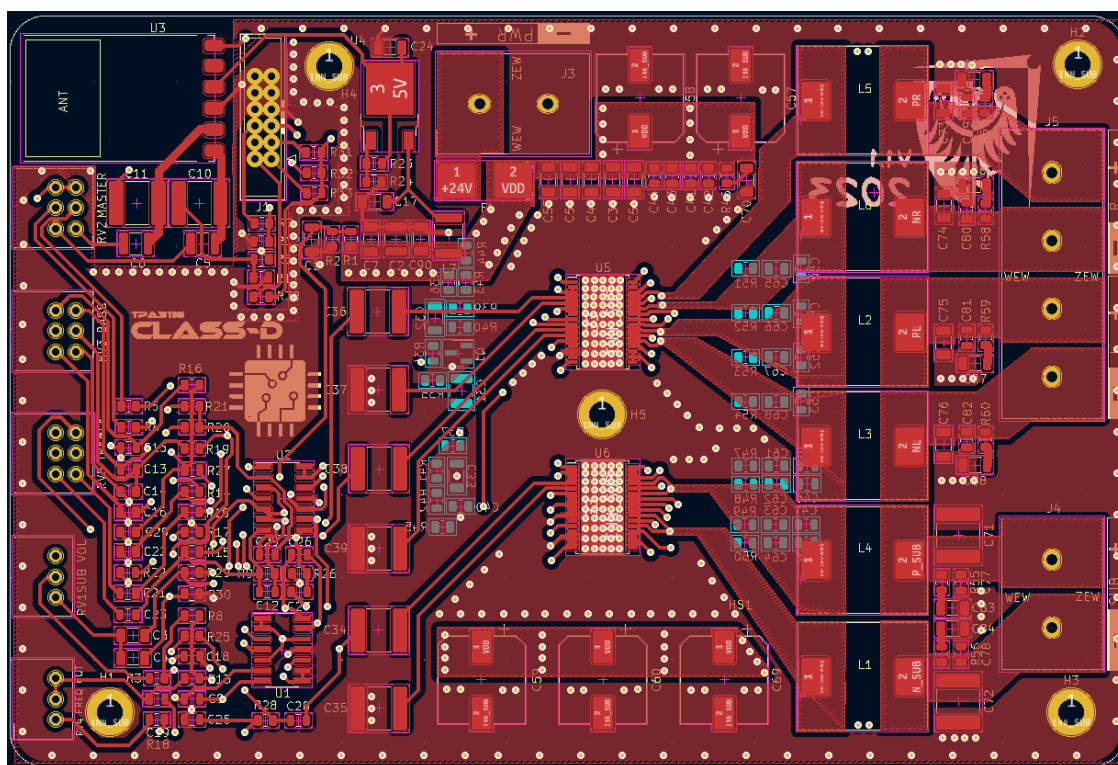
Rys. 27. Kompletny schemat elektroniczny układu wzmacniacza mocy audio



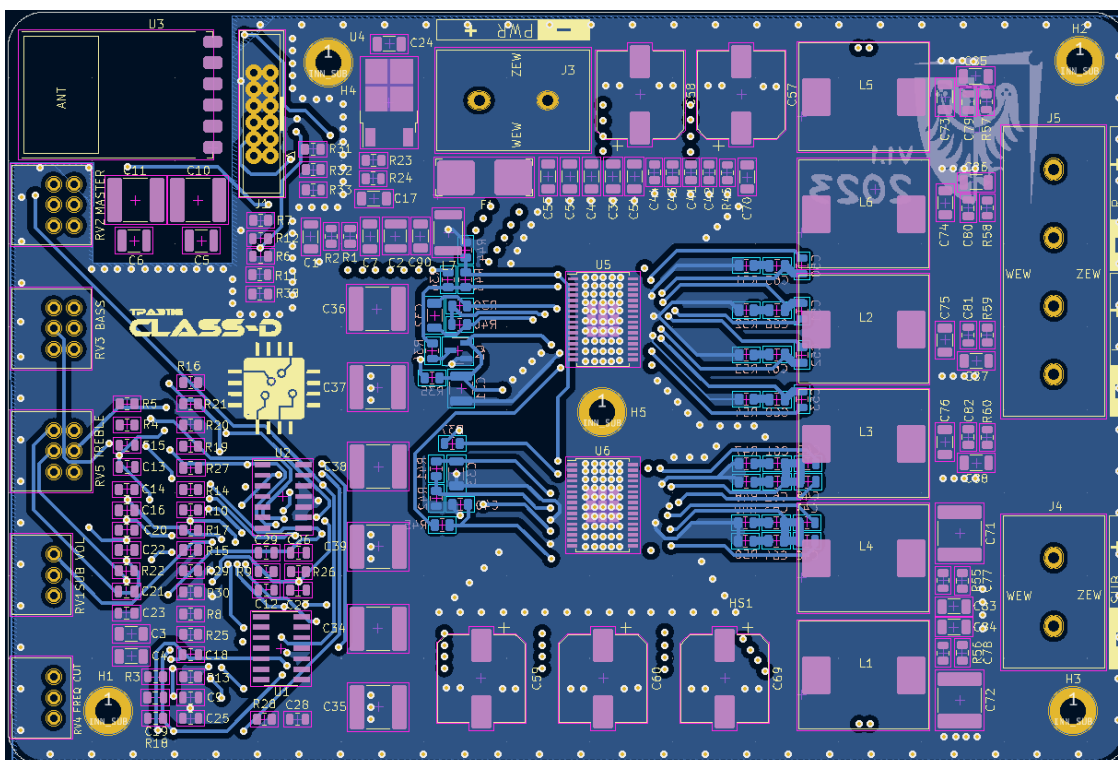
Rys. 28. Widok modelu płytki drukowanej od przodu



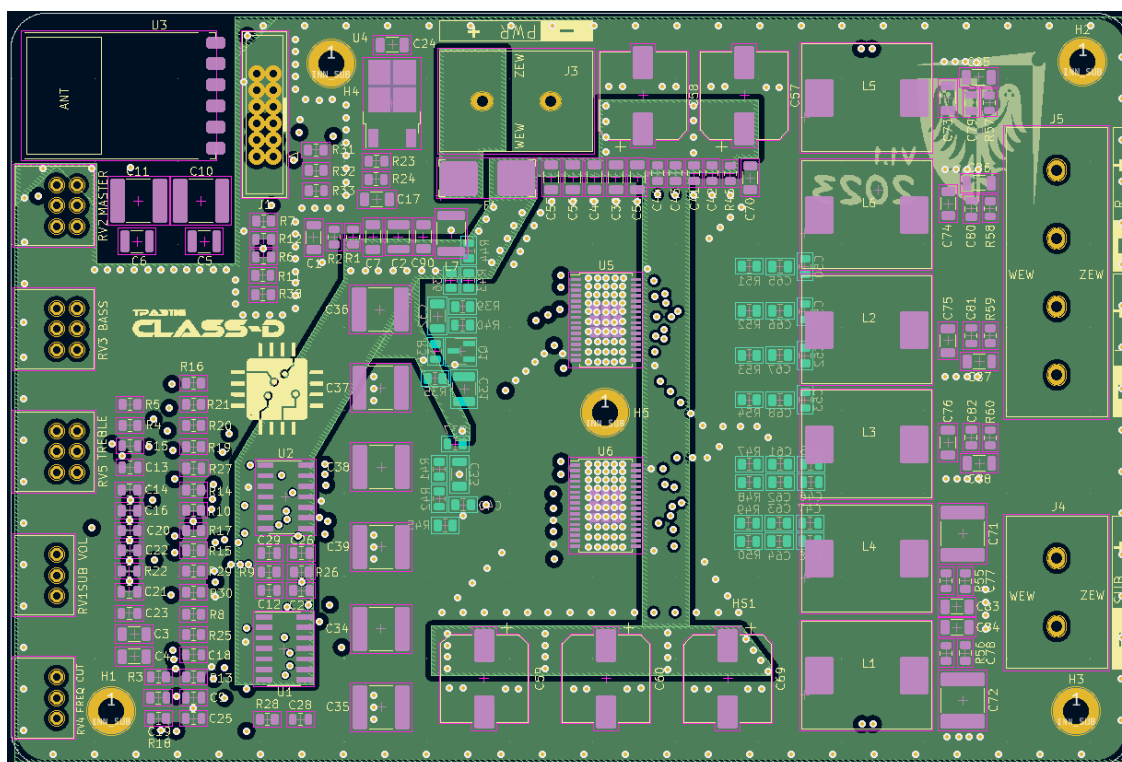
Rys. 29. Widok modelu płytki drukowanej od tyłu



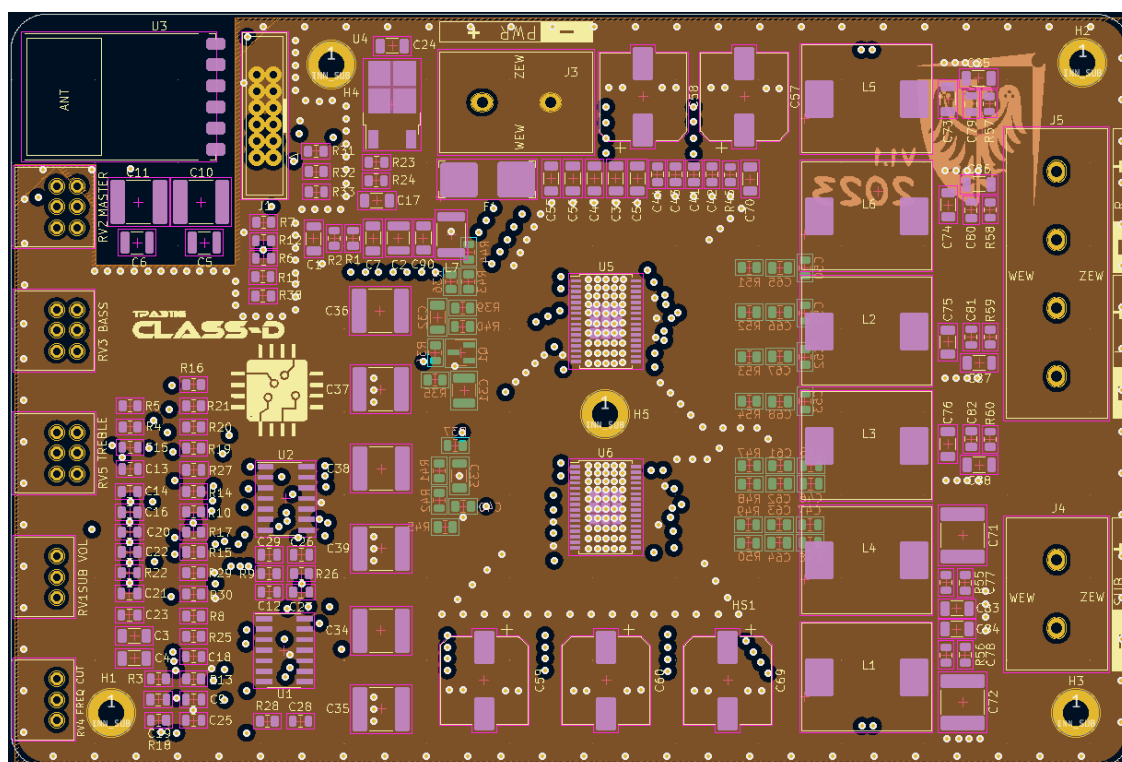
Rys. 30. Widok górnej warstwy płytki drukowanej



Rys. 31. Widok dolnej warstwy płytki drukowanej



Rys. 32. Widok warstwy zasilania płytki drukowanej



Rys. 33. Widok warstwy masy płytki drukowanej

6.2 Spis rysunków

Rys. 1. Schemat blokowy urządzenia	9
Rys. 2. Schemat elektroniczny sekcji regulacji barwy wzmacniacza z wykorzystaniem aktywnego filtra Baxandall	10
Rys. 3. Wykres Bodego filtra regulacji barwy (potencjometry w pozycji neutralnej). Symulacja programu LTSpice	12
Rys. 4. Wykresy Bodego filtra regulacji barwy z korekcją maksymalnie podwyższoną (u góry) i stłumioną. Symulacja programu LTSpice	13
Rys. 5. Schemat pojedynczego filtra dolnoprzepustowego Sallen-Key	14
Rys. 6. Schemat elektroniczny sekcji filtra dolnoprzepustowego typu Sallen-Key 4-rzędu z buforem wejściowym.....	16
Rys. 7. Wykres Bodego filtra Sallen-Key o $f_c = 90$ Hz przy regulacji barwy w pozycji neutralnej. Symulacja programu LTSpice	17
Rys. 8. Schemat elektroniczny sekcji mocy oraz LPF wykorzystujący układ TPA3116D2	19
Rys. 9. Schemat elektroniczny sekcji modułu Bluetooth	20
Rys. 10. Projekt obwodu PCB modułu wzmacniacza audio	22
Rys. 11. Porównanie wartości generowanych zniekształceń kondensatorów od jego materiału [9, p. 4].....	25
Rys. 12. Zmiana pojemności w stosunku do operacyjnego napięcia stałego dla wybranych kondensatorów MLCC o pojemności $4,7 \mu\text{F}$ [10, p. 3]	26
Rys. 13. Widok kompletnej płytki wzmacniacza mocy audio.....	27
Rys. 14. Widok urządzenia od frontu	28
Rys. 15. Widok urządzenia od tyłu.....	28
Rys. 16. Sposób podłączenia urządzeń pomiarowych.....	29
Rys. 17. Pasma przenoszenia wzmacniacza z tonami niskimi i wysokimi w pozycji neutralnej w warunkach normalnych	31

Rys. 18. Udział zniekształceń harmoniczných z tonami niskimi i wysokimi w pozycji neutralnej w warunkach normalnych	32
Rys. 19. Pasmo przenoszenia wzmacniacza z tonami niskimi i wysokimi w pozycji minimalnej w warunkach normalnych	33
Rys. 20. Udział zniekształceń harmoniczných z tonami niskimi i wysokimi w pozycji minimalnej w warunkach normalnych	34
Rys. 21. Pasmo przenoszenia wzmacniacza z tonami niskimi i wysokimi w pozycji maksymalnej w warunkach normalnych	35
Rys. 22. Udział zniekształceń harmoniczných z tonami niskimi i wysokimi w pozycji maksymalnej w warunkach normalnych	36
Rys. 23. Pasmo przenoszenia kanału niskotonowego z regulacją barwy w pozycji maksymalnej w warunkach normalnych przy obciążeniu 2 Ω	37
Rys. 24. Udział zniekształceń harmoniczných z regulacją barwy w pozycji maksymalnej w warunkach normalnych przy obciążeniu 2 Ω	38
Rys. 25. Pasmo przenoszenia kanału niskotonowego z regulacją barwy w pozycji maksymalnej w warunkach normalnych przy obciążeniu 4 Ω	39
Rys. 26. Udział zniekształceń harmoniczných z regulacją barwy w pozycji maksymalnej w warunkach normalnych przy obciążeniu 4 Ω	40
Rys. 27. Kompletny schemat elektroniczny układu wzmacniacza mocy audio	47
Rys. 28. Widok modelu płytki drukowanej od przodu	48
Rys. 29. Widok modelu płytki drukowanej od tyłu	48
Rys. 30. Widok górnej warstwy płytki drukowanej.....	49
Rys. 31. Widok dolnej warstwy płytki drukowanej.....	49
Rys. 32. Widok warstwy zasilania płytki drukowanej.....	50
Rys. 33. Widok warstwy masy płytki drukowanej	50

6.3 Spis źródeł literaturowych

- [1] R. Nicoletti, "How to Select the Best Audio Amplifier for Your Design," 2013.
- [2] Blue Giga "Developing Bluetooth® Audio Devices," 2014.
- [3] D. Harris, "Application Report Audio Tone Control Using The TLC074 Operational Amplifier," 2000.
- [4] Texas instruments, "Analysis of the Sallen-Key Architecture Mixed Signal Products Application Report SLOA024B," 1999.
- [5] Texas Instruments, "Datasheet TPA3116D2," 2017. [Online]. Available: www.ti.com
- [6] Sunrom, "BLUETOOTH AUDIO TRANSFER MODULE M18/M28/M38." [Online]. Available: <http://www.sunrom.com>
- [7] Bay Area, "Introduction to Printed Circuit Board Design," 2016.
- [8] Texas Instruments, Burr-Brown Audio, "Datasheet OPA1604," 2011. [Online]. Available: www.ti.com
- [9] Z. Kaye, "Selecting Capacitors to Minimize Distortion in Audio Applications," 2020.
- [10] M. Fortunato, "Temperature and Voltage Variation of Ceramic Capacitors, or Why Your 4.7 μ F Capacitor Becomes a 0.33 μ F," 2012.
- [11] Texas Instruments, "User's Guide TPA3116D2EVM Evaluation Module," 2012. [Online]. Available: www.ti.com
- [12] Texas Instruments, "LC Filter Design," 2016.
- [13] Norma PN-EN IEC 60268-3 Urządzenia systemów elektroakustycznych -- Część 3 Wzmacniacze.