



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

AUDIO ZESILOVAČ S FUNKCÍ SÍŤOVÉHO PŘEHRÁVÁNÍ A EKVALIZACE

AUDIO AMPLIFIER WITH NETWORK STREAMING AND SOUND EQUALIZATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matej Liska

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Štůsek

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Bc. Matej Liska

ID: 203739

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Audio zesilovač s funkcí síťového přehrávání a ekvalizace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem této diplomové práce je vytvoření audio zesilovače se stereo linkovým výstupem a jedním výstupem pro hloubkotónový reproduktor. Kromě klasického linkového vstupu bude zesilovač disponovat také Wi-Fi a Bluetooth rozhraním pro příjem streamovaného obsahu. Hlasitost zařízení bude možné ovládat skrze potenciometry umístěné přímo na těle zařízení ale také vzdáleně skrze navrženou aplikaci. Vytvořené zařízení bude dále poskytovat možnost pokročilé ekvalizace pro každý kanál v rámci jednoduchého uživatelského rozhraní dostupného skrze dedikovanou aplikaci či webový prohlížeč. V rámci diplomové práce vyberte vhodnou platformu pro implementaci síťového streamování, proveďte návrh desky plošných spojů (DPS) a zařízení realizujte formou funkčního prototypu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MONK, Simon. Raspberry Pi cookbook: Software and Hardware Problems & Solutions. 3rd. Sebastopol: O'Reilly, 2019. ISBN 9781492043225.

[2] SELF, Douglas. Audio power amplifier design handbook. 4th ed. Oxford: Newnes, 2006. ISBN 978-0-7506-8072-1.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 24.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Martin Štůsek

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práca zahŕňa teoretické podklady pre návrh a realizáciu prototypu zariadenia zvukového zosilňovača s možnosťou digitálneho aj analógového vstupného obsahu. Približuje vlastnosti D/A prevodníka, analógovej filtrácie, ovládania hlasitosti a amplifikácie. Mimo iné popisuje reguláciu napájacích napätí pre jednotlivé aktívne časti zariadenia a približuje softvérovú zvukovú platformu pre získavanie a spracovanie zvukových dát, vrátane ekvalizácie. Práca obsahuje celkový schematický návrh, vytvorené osadenie jednotlivých súčiastok vrátane ich zoznamu a zhodnotenie dosiahnutých výsledkov, vrátane nameraných hodnôt a grafov.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

D/A prevodník, zvukový zosilňovač, zvuková filtrácia, ovládanie hlasitosti, Raspberry Pi

ABSTRACT

Diploma thesis contains the theory for the design and realization of a prototype audio amplifier device with the possibilities of digital or analog input content. It approach the features of D/A converter, analog filtering, volume control and amplification. Besides others, it describes the regulation of supply power voltages for individual active parts of device and approaches the software audio platform for acquisition and processing of audio data, including equalization. The thesis contains an general schematic design, created placement of individual components on board, including their table of descriptions and evaluation of the achieved results, including measured values and graphs.

KEYWORDS

D/A converter, audio amplifier, audio filtering, volume control, Raspberry Pi

LISKA, Matej. *Audio zesilovač s funkcí síťového přehrávání a ekvalizace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022. Diplomová práca. Vedúci práce: Ing. Martin Štůsek.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Bc. Matej Liska
VUT ID autora: 203739
Typ práce: Diplomová práca
Akademický rok: 2021/22
Téma záverečnej práce: Audio zesilovač s funkcí síťového přehrávání a ekvalizace

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce Ing. Martinovi Štůskovi, Ph.D. et Ph.D., za pedagogickú a odbornú pomoc, trpezlivosť, návrhy a konzultáciu pri tvorbe práce. Ďalej Ďakujem vedeckým pracovníkom Ing. Pavlovi Maškovi, Ph.D. a Ing. Kryštofovi Zemanovi, Ph.D., za poskytnutie priestoru a technických potrieb, a Ing. Pavlovi Hanákovi, Ph.D., za konzultáciu pri návrhu a tvorbe zariadenia.

Obsah

Úvod	11
1 Spracovanie zvukových signálov	12
1.1 Problematika audio zosilňovačov	12
1.1.1 Zosilňovač	12
1.1.2 Základné vlastnosti audio zosilňovača	13
1.1.3 Triedy zosilňovačov	16
1.2 Číslicovo analógové prevodníky	19
1.2.1 Princíp funkčnosti D/A prevodníka	20
1.2.2 Nelinearita D/A prevodníka a skreslenie malých signálov	21
1.2.3 Aktívny rekonštrukčný filter	22
1.3 Analógová filtrácia	24
1.3.1 Deskriptívna terminológia typov filtrov	24
1.3.2 Aproximačné funkcie filtrov	26
1.3.3 Realizácia analógovej filtrácie	26
1.4 Ovládanie hladiny hlasitosti	29
1.4.1 Spínaná rebríková sieť odporov	29
2 Správa napájania a riadenia	31
2.1 Meniče napätia	31
2.1.1 AC/DC meniče	31
2.1.2 DC/DC meniče	32
2.2 Jednodoskový počítač a jeho využitie	33
2.2.1 GPIO rozhrania	34
3 Návrh a realizácia prototypu	36
3.1 Návrh dosky plošných spojov	37
3.1.1 Zapojenie číslicovo-analógového prevodníka	37
3.1.2 Návrh filtra dolnej priepusti	39
3.1.3 Zapojenie ovládania hlasitosti	41
3.1.4 Výber koncového zosilňovača	42
3.1.5 Návrh zdrojov pre napájacie napätia	44
3.2 Riadiaca platforma prototypu	47
3.2.1 Raspberry Pi Zero 2 W	48
3.2.2 Implementácia platformy Volumio	49
3.2.3 Rotačný enkodér	54
3.2.4 Implementácia ovládania hlasitosti	55

4 Zhodnotenie a výsledky merania	58
4.1 Výsledky merania regulácie hlasitosti	59
4.2 Výsledky merania filtrácie	60
5 Záver	61
Literatúra	62
A Schéma celkového zapojenia DPS	65
B Vytvorený návrh dosky plošného spoja	66
B.1 Doska plošného spoja - Top	66
B.2 Doska plošného spoja - Bottom	66
C Grafická vizualizácia DPS	67
D Zoznam použitých súčiastok	68

Zoznam obrázkov

1.1	Frekvenčný rozsah audio zosilňovača.	14
1.2	Frekvenčný odozva váhovania typu A.	15
1.3	Pracovné triedy zosilňovačov.	17
1.4	Priebehy signálov komparátora v zosilňovači triedy D.	18
1.5	Bloková schéma zapojenia zosilňovača v triede D.	19
1.6	DAC a odporová sieť	20
1.7	Nelinearita DAC pre malé signály.	21
1.8	Chyba pri prevode malých signálov so znamienkom.	22
1.9	Priebehy D/A prevodníka a výstupu dolnopriepustného filtra.	23
1.10	Obrazy spektra D/A prevodníka.	24
1.11	Modulové kmitočtové charakteristiky ideálnych filtrov.	25
1.12	Normalizovaná charakteristika dolnej priepuste.	26
1.13	RL a RC integračný článok filtra typu dolná priepust.	27
1.14	Aktívny filter tretieho rádu dolnej priepuste.	28
1.15	Spínaná rebríková sieť odporov.	30
1.16	Prúdovo riadená sieť odporov.	30
2.1	AC/DC menič Greinacher.	32
2.2	DC/DC spínaný regulátor.	32
2.3	Prenos rozhrania I^2S .	34
2.4	Linka komunikácie SPI.	35
3.1	Blokový diagram zariadenia zosilňovača riadeného RPi.	36
3.2	Schéma zapojenia DA prevodníka PCM1791A.	38
3.3	Schéma zapojenia rekonštrukčného filtra.	39
3.4	Amplitúdovo-frekvenčná charakteristika LP filtra.	40
3.5	Schéma zapojenia LC filtra 3. rádu.	40
3.6	Schéma zapojenia regulátora hlasitosti PGA4311.	41
3.7	Schéma zapojenia vstupnej časti zosilňovača.	42
3.8	Schéma zapojenia napájania zosilňovača.	43
3.9	Schéma zapojenia výstupnej časti zosilňovača.	44
3.10	Schéma zapojenia DC/DC regulátora LM2576.	45
3.11	Schéma zapojenia DC/DC regulátora NCV8535.	45
3.12	Schéma zapojenia DC/DC invertora LM2662.	46
3.13	Schéma zapojenia DC/DC regulátora BA50DD0T.	46
3.14	Hlavný napájací zdroj.	47
3.15	Konektorové prepojenie zariadení s GPIO.	48
3.16	GUI hlavnej obrazovky webovej platformy Volumio.	50
3.17	Povolenie vzdialeného prístupu.	51

3.18 Generovanie signálov pomocou rotačného enkodéra.	54
4.1 Závislosť výstupného napätia od vstupnej numerickej hodnoty.	59
4.2 Napätová závislosť dolno-priepustnej filtrácie na frekvencii.	60

Zoznam výpisov

3.1	Inštalácia ekvalizéru FusionDSP na platformu Volumio.	51
3.2	Volumio plugin – funkcia zabezpečujúca získanie hodnoty z GUI. . . .	52
3.3	Volumio plugin – funkcia riadiaca kontrolér hlasitosti perifériou SPI. .	53
3.4	Pridanie periférie a knižníc pre použitie periférie SPI.	55
3.5	Ovládanie periférie SPI pomocou rotačného enkodéra.	55
3.6	Automatické spustenie kódu pomocou crone skriptu.	57

Úvod

Cielom diplomovej práce je vytvoriť prototyp zariadenia audio zosilňovača s funkciou sieťového prehrávania, ovládania hlasitosti a ekvalizácie. Práca podrobne popisuje návrh dosky plošného spoja, vrátane výberu vhodných komponentov pre jeho realizáciu, podľa parametrov, ktoré boli určené zadaním a vedúcim tejto práce. Diplomová práca taktiež navrhuje a realizuje implementáciu sieťového streamovania pre prehrávanie hudby použitím bezdrôtových technológií a rieši ovládanie hlasitosti z harddisku hardvéru aj softvéru.

V prvej časti práce je poskytnutý teoretický základ z oblasti spracovania zvukových signálov v digitálnej a analógovej podobe. Práca približuje problematiku zvukových zosilňovačov, ich rozdelenie do tried, z ktorých viac špecifikuje funkčnosť zosilňovača v triede D. Text popisuje princípy číslicovo analógových prevodníkov, kde sa zaoberá riešením problematiky kvalitného prevodu vrátane rekonštrukčnej filtrácie. Teoreticky je predstavená zvuková analógová filtrácia pre získanie signálu hlboko tónového reproduktora a priblížená teória možnosti ovládania zvukovej hladiny pomocou digitálneho kontroléra hlasitosti.

Druhá časť práce je zameraná na problematiku regulácie zdrojov napájania pre jednotlivé komponenty, ktoré sú súčasťou dosky plošného spoja prototypu a celkového zariadenia. Text popisuje teoretický podklad z oblasti spínaných zdrojov napájania, ktoré boli využité pri návrhu a realizácii prototypu. Táto časť práce taktiež ponúka teoretický podklad k jednodoskovým počítačom vrátane ich histórie, možnosti bezdrôtového pripojenia a popisu digitálnych komunikačných periférií.

Kapitola 3 vychádza z teoretických podkladov popísaných v prvej a druhej časti práce a ako prvé zobrazuje blokový diagram celkového návrhu zariadenia prototypu, kde uvádza komunikáciu medzi jednotlivými blokmi a ich funkcie. Následne práca popisuje jednotlivé časti dosky plošného spoja, vrátane schematického zapojenia, poskytuje zoznam konkrétnych súčiastok pre realizovanie digitálne analógového prevodu a analógovej filtrácie pre hlboko tónový reproduktor, poskytuje zapojenie ovládania hlasitosti a zobrazuje schematický návrh koncového zosilňovača, vrátane potrebných regulácií napájania všetkých komponentov dosky plošného spoja a celkového zariadenia. Táto časť práce taktiež popisuje riadiacu jednotku zariadenia, jej konektorové prepojenie a popis streamovacej softvérovej zvukovej platformy, ktorá realizuje distribúciu dát a prípadnú ekvalizáciu. Následne sú zobrazené kódové riešenia ovládania hlasitosti webovou platformou alebo rotačným enkodérom.

Kapitola 4 popisuje výsledné oživovanie prototypu a sprístupňuje dosiahnuté výsledky funkčných častí zariadenia vrátane grafov, hodnôt a ich zhodnotenia. Prílohy práce obsahujú schému zapojenia plošného spoja, osadenie jednotlivých súčiastok, 3D grafickú vizualizáciu zariadenia a zoznam všetkých použitých súčiastok.

1 Spracovanie zvukových signálov

Prvá časť práce je zameraná na teoretický základ problematiky spracovania zvukových signálov a ich distribúcie. V prvej sekcii [1.1](#) sú priblížené základné vlastnosti audio zosilňovačov a ich rozdelenie, ďalej sa práca zaoberá prevodom digitálnych zvukových signálov na analógové v sekcii [1.2](#) teoretické poznatky z procesu filtrácie v analógovej oblasti sú popísané v sekcii [1.3](#) a sekcia [1.4](#) približuje teoretické podklady z problematiky ovládania hladiny hlasitosti.

1.1 Problematika audio zosilňovačov

Nasledujúca časť práce je zameraná na riešenie problematiky zosilňovačov určených pre zosilnenie zvukových signálov nazývaných tiež ako audio zosilňovače. Sekcia [1.1.1](#) skúma základný princíp funkčnosti a vývoj zosilňovačov, v časti [1.1.2](#) sa práca venuje popisu ich základných vlastností, a v sekcii [1.1.3](#) približuje ich rozdelenie do viacerých tried, vrátane podrobnejšieho popisu princípu funkčnosti audio zosilňovača v triede typu D.

1.1.1 Zosilňovač

Výkonový audio zosilňovač je možné chápať ako viacstupňový zosilňovač (viacej zosilňovacích stupňov radených za seba) s vysokým výstupným ziskom, ktorý sa považuje za jeden celok [\[1\]](#).

Hlavnou úlohou výkonového zosilňovača určeného pre zvukové signály je amplifikácia, čiže zosilnenie vstupného signálu na požadovanú úroveň výstupného signálu bez značnej deštrukcie, zmeny či posunu jeho vstupných vlastností.

Pre jednotlivé stupne je možné použiť takmer akýkoľvek aktívny zosilňovač. Zosilňovače bývajú vyrobené z vákuových elektrónok alebo diskretných bipolárnych tranzistorov. Pokrok vo výrobe polovodičov nakoniec umožnil miniaturizáciu požadovaných súčiastok na jeden kremíkový čip (odtiaľ pochádza výraz integrovaný obvod) [\[1\]](#).

Prvý stupeň je zvyčajne diferenciálny zosilňovač, ktorý je možné vyrobiť buď bipolárnymi alebo unipolárnymi – field-effect tranzistormi (FET). Nasledujúce stupne vytvárajú veľké napätové zosilnenie. Koncovým stupňom býva väčšinou takzvaný sledovač napätia. Výsledný zosilňovač má zvyčajne vysokú vstupnú impedanciu, nízku výstupnú impedanciu a viacnásobné napätové zisky [\[1\]](#).

1.1.2 Základné vlastnosti audio zosilňovača

Nasledujúca časť práce približuje požiadavky pre návrh výkonového zosilňovača určeného pre audio zariadenia. Jedná sa o krátky súhrn základných vlastností, ktorý je pri jeho návrhu či výbere potrebné brať do úvahy, a na ktoré odkazujeme pri jeho samotnom návrhu či výbere. Medzi hlavné vlastnosti patrí najmä bezpečnosť a spoľahlivosť výrobku, dôležité parametre ako výstupný výkon, frekvenčný rozsah, hlukové respektíve šumové vlastnosti, skreslenie, či tlmiaci faktor sú priblížené nižšie v práci.

Výstupný výkon

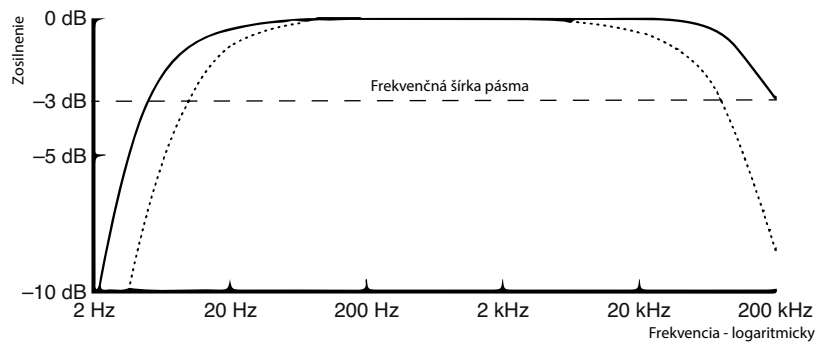
Pri určovaní výstupného výkonu zosilňovača je potrebné pamätať, že jeho elektrický výkon sa musí zvýšiť o značný násobok, aby bol zosilňovač akusticky hlasnejší. Akustickú silu ako takú nevnímame – neexistuje spôsob, akým by sme mohli integrovať energiu uvoľnenú v miestnosti. Jednoduchšie je možno povedať, že vnímame akustický tlak. Je všeobecne známe, že výkon v jednotkách Watt (W) je štvornásobkom na dvojnásobok hladiny akustického tlaku v jednotkách decibel (dB SPL). Zároveň to nie je to isté ako zdvojnásobenie subjektívnej hlasitosti, ktorá sa meria v jednotkách Son a nie v decibeloch nad prahovou hodnotou [2]. Maximálny výstupný výkon sa najčastejšie uvádza pre reproduktorovú záťaž $8\ \Omega$ alebo pre záťaž $4\ \Omega$ vo výkonových jednotkách Watt (W), kedy je vykonaná práca o veľkosti jedného joulu za jednotku času – sekundu [1].

Ako príklad možno uviesť, že výkonová amplifikácia výstupného signálu zosilňovača z hodnoty 25 W na 30 W neposkytne jeho výrazné počuteľné zvýšenie úrovne. V prípade domácich hi-fi zosilňovačov sa výstupný výkon pohybuje v rozmedzí od 20 W do 150 W na reproduktorovej záťaži $8\ \Omega$. Veľké ozvučovací jednotky známe pod názvom Public Array sa pohybujú zvyčajne od výstupného výkonu 50 W [3].

Frekvenčný rozsah

Frekvenčný rozsah výkonového zosilňovača musí presahovať celé zvukové ľudsky počuteľné pásmo zvyčajne určené od 20 Hz do 20 kHz v rámci primeranej tolerancie. Moderné zosilňovače zvyčajne ďaleko presahujú tento rozsah, pričom ich frekvenčná odozva býva od 5 Hz do 200 kHz. Špecifikáciu šírky pásma systému resp. frekvenčného rozsahu určujeme miestami, kde výkon zosilňovača klesne o 3 dB od nominálnej referenčnej hodnoty 0 dB [1].

Frekvenčná odozva pre audio zosilňovač by sa mala nachádzať vo vnútri plnej krivky na obrázku [1.1], ako príklad frekvenčného rozsahu audio zosilňovača je znázornená prerušovaná krivka na obrázku [1.1]. Tento zosilňovač má frekvenčný rozsah



Obr. 1.1: Frekvenčný rozsah audio zosilňovača [1].

pri poklese o 3 dB na šírke frekvenčného pásma od 10 Hz do 80 kHz. Zároveň má jeho odozva pokles o 1 dB pri 20 Hz a 0,5 dB pri 20 kHz [1].

Šum

Dôležitý faktor pre koncové výkonové stupne zosilňovača je, aby produkovali nízky šum, pretože táto nežiadúca časť signálu, ktorý vydávajú, je vždy prítomná, nezávisle od nastavenia ovládania hlasitosti alebo úrovne posluchu [1]. Tejto nežiaducej zložky signálu by malo byť čo najmenej bez ohrozenia ostatných parametrov prenášaného audio signálu. Hluková hladina výkonového zosilňovača nie je irelevantná [4], najmä v domácom prostredí.

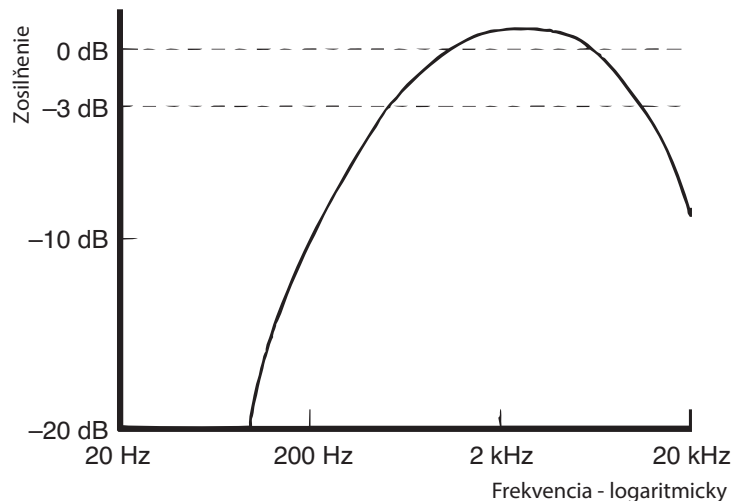
Špecifikáciu šumu môžeme deliť na neváhovaný alebo váhovaný. Neváhovaný šum pre zosilňovač zvuku bude zvyčajne špecifikovaný v celej šírke pásma od 20 Hz do 20 kHz (alebo viac). Zatiaľ čo váhované špecifikácie šumu zohľadňujú citlivosť ucha na hluk v rôznych častiach frekvenčného spektra [1].

Pojem váhovanie možno chápať ako špecifickú amplitúdovo-frekvenčnú charakteristiku, ktorá je navrhnutá tak, aby umožňovala subjektívne platné meranie hluku. Pomocou kmitočtových váhových filtrov zdôrazňuje časti spektra, ktoré sú najdôležitejšie.

Najbežnejšie používané je váhovanie typu A [1], ktoré v snahe zohľadniť relatívnu hlasitosť vnímanú ľudským ušom filtruje menej citlivé nízke zvukové frekvencie. Váhovanie typu A je zobrazené na obrázku 1.2.

Skreslenie

Ak sa tvar vlny výstupného signálu zosilňovača vo všeobecnosti líši od tvaru vlny vstupného signálu, výstup sa považuje za skreslený. Najmä, ak jedno frekvenčný vstup do zosilňovača vedie k výstupu zloženému zo vstupnej frekvencie a iných



Obr. 1.2: Frekvenčný odozva váhovania typu A [1].

frekvencií, zosilňovač skresľuje signál. Vytváranie dodatočných frekvencií je zvyčajne výsledkom nelineárneho skreslenia [5].

Najbežnejšou špecifikáciou skreslenia je celkové harmonické skreslenie nazývané ako Total Harmonic Distortion (THD). Zvyčajne sa špecifikuje na jednej frekvencii alebo v rozsahu viacerých frekvencií. Typicky bude špecifikované pri danej výkonovej úrovni, pričom zosilňovač bude zapojený na špecifickú impedanciu záťaže [1].

Digitálne audio teraz bežne poskytuje signál s menej ako 0,002 % THD.

Tlmiaci faktor

Zosilňovače zvuku, až na niekoľko veľmi špeciálnych výnimiek, sa približujú k dokonalým zdrojom napätia, a teda ašpirujú na nulovú výstupnú impedanciu v celom audio pásme. Výsledkom je, že výstup zosilňovača nie je ovplyvnený zaťažením, takže premenlivá impedancia reproduktorov závislá na frekvencii neposkytuje rovnako premenlivú odozvu. Aj keď je skutočná nulová impedancia nemožná, je možné ju veľmi blízko aproximovať [6].

Faktor tlmenia, resp. Damping Factor (DF) je definovaný ako pomer záťažovej impedancie R_{load} k výstupnému odporu zosilňovača R_{out} .

$$DF = \frac{R_{load}}{R_{out}} \quad (1.1)$$

Ako príklad možno uviesť zosilňovač s výstupnou impedanciou $0,2 \Omega$, ktorý bude mať pri reproduktore s impedanciou 8Ω faktor tlmenia s hodnotou 40. Väčšina vákuových elektrónkových zosilňovačov má DF menší ako 20, zatiaľ čo polovodičové zosilňovače majú DF väčší ako 100 [1].

1.1.3 Triedy zosilňovačov

Trieda zosilňovača definuje alebo pracovnú charakteristiku koncového stupňa výkonového zosilňovača alebo základný princíp činnosti celého zosilňovača [11]. Existuje mnoho tried audio zosilňovačov označovaných ako: A, B, AB, C, D, E a F. Tieto triedy možno jednoducho rozdeliť podľa ich princípu funkčnosti do dvoch rôznych skupín, lineárnych alebo spínacích [7].

Triedy A, B, AB a C sú pracujúce v lineárnom režime, pri ktorých výstup je úmerný ich vstupu [7]. Trieda lineárneho zosilňovača je určená polohou pracovného bodu na prevodovej charakteristike. Po dlhú dobu boli jedinými triedami zosilňovačov relevantnými pre vysokokvalitný zvuk trieda A a trieda AB z dôvodu ich lineárneho zosilnenia [3].

Medzi spínané zosilňovače možno radiť triedy D, E a F. Spínané zosilňovače majú vyššiu účinnosť, ktorá by teoreticky mala byť 100 %. Je to preto, že dochádza k malým alebo žiadnym stratám energie pri premene na teplo [7].

Koncový stupeň výkonového zosilňovača má významný vplyv na jeho výkon a náklady. Tento stupeň musí tiež pracovať pri vysokých úrovniach výkonu, často pri zvýšených teplotách. V skutočnosti často existuje kompromis medzi tvorbou tepla a kvalitou zvuku [1].

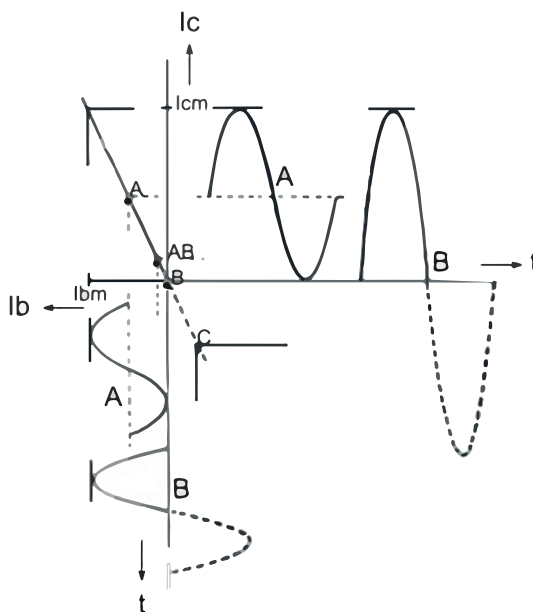
V nasledovnej časti práce budú predstavené základné triedy zosilňovačov A, B, AB a D, vysvetlené princípy funkčnosti koncových stupňov zosilňovačov v jednotlivých triedach, porovnanie medzi triedami ich výhody a nevýhody použitia a podrobnejšie vysvetlená funkčnosť zosilňovača v triede typu D, ktorý bude použitý aj v návrhu dosky plošného spoja (DPS), ktorá je jeden z výstupov tejto práce.

Trieda A

Výstupné tranzistory vo výkonovom zosilňovači triedy A zostávajú v otvorenom stave počas celého cyklu audio signálu, pričom vždy prispievajú transkondukciou k signálovej ceste výstupného stupňa. Uhol prenosu pre triedu A je teda 360° (znamená celý cyklus) [1]. Znázornené na obrázku 1.3.

V zosilňovači triedy A prúdi prúd nepretržite vo všetkých výstupných zariadeniach, čo umožňuje vyhnúť sa nelinearite pri ich spínaní, čím ale zároveň dochádza k strate výstupného výkonu zosilňovača [3].

Pracovný bod je položený v strede lineárnej časti prevodovej charakteristiky. V dôsledku tejto nepretržitej straty vo výkonovej triede A, zosilňovače vytvárajú obrovské množstvo tepla, ktoré pridáva k ich veľmi nízkej účinnosti okolo 30%, čo ich robí nepraktickými pre vysokovýkonné zosilňovače [5].



Obr. 1.3: Pracovné triedy zosilňovačov [9].

Trieda B

Zosilňovače triedy B sú široko používané z dôvodu nízkych požiadaviek na jednosmerný prúd v pohotovostnom režime, na rozdiel od zosilňovačov triedy A, ktoré vyžadujú pracovný bod charakterizovaný veľkým kolektorovým prúdom. Uhol prenosu pre triedu B je 180° (polovica cyklu). Znázornené na obrázku 1.3. Zníženie požiadavky na pohotovostný alebo jednosmerný prúd v prevádzke triedy B sa dosiahne predpätím každého z dvoch tranzistorov pri vypnutí. To zase znižuje stratový výkon kludového kolektora v tranzistoroch [1].

Pretože prevádzka výkonového zosilňovača triedy B má tranzistory pracujúce len v jednej polovici periódy vstupného signálu, sú potrebné dva tranzistory v usporiadaní push-pull, aby sa pridali dve polovice cyklu na rekonštrukciu celej zosilnenej sínusoidy. Nevýhodou používania prevádzky triedy B je v podstate nelineárna povaha charakteristiky. To vedie k skresleniu v blízkosti nulových prechodov výstupného prúdu i_O [5].

Výsledkom je, že obe polovice výstupného tvaru vlny sa menia z nuly na dvojnásobok pokojového prúdu, čím sa znižuje rozptyl. To má za následok takmer zdvojnásobenie účinnosti zosilňovača na približne 50 % [5].

Trieda AB

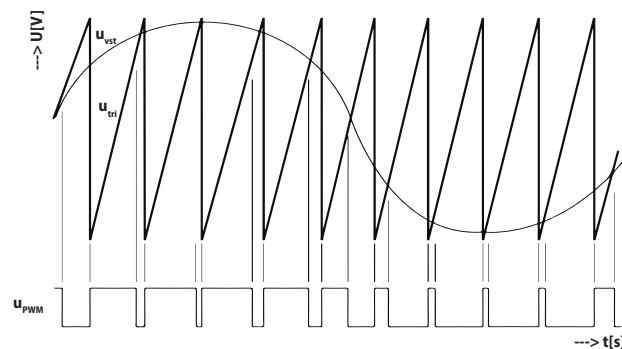
Táto trieda v skutočnosti vznikla kombináciou tried A a B. V sekcii 1.3.2 bolo spomenuté, že výkonové zosilňovače triedy B majú maximálnu účinnosť približne

50 %. Nevýhodou bola potrebná spätná väzba, aby sa eliminovala charakteristika nelineárneho prenosu spôsobená skreslením pri prechodoch. Alternatívnou metódou spätnej väzby na zníženie alebo takmer elimináciu prechodového skreslenia je predpätie každého tranzistora v konfigurácii push-pull tak, aby boli sotva na začiatku aktívnej oblasti. Táto trieda zosilňovača sa nazýva výkonový zosilňovač/výstupný stupeň triedy AB, pretože sú tranzistory vždy predpäté ako pri prevádzke v triede A, ale sú predpäté na zlomok špičkového zafazovacieho prúdu ako pri prevádzke v triede B [5].

To znamená, že tranzistor bude v pracovnom stave viac ako polovicu cyklu tvaru vlny, ale menej ako celý cyklus, pričom uhol prenosu bude medzi 180° až 360° respektíve medzi 50 % až 100 % vstupného signálu v závislosti od množstva dodaného vstupného signálu [3].

Trieda D

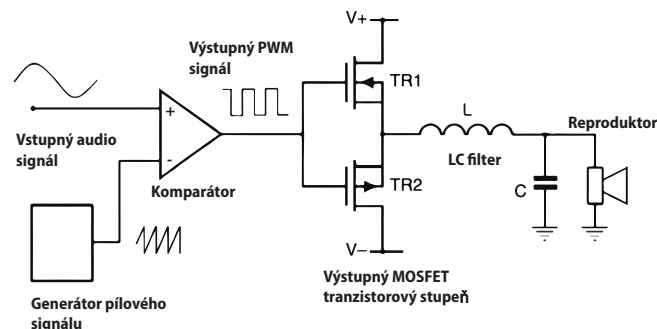
Zosilňovače pracujúce v triede D sa radikálne líšia od známejších tried A, B alebo AB. V triede D nie sú žiadne výstupné zariadenia pracujúce v lineárnej časti charakteristiky. Namiesto toho sa výsledné zosilnenie realizuje takzvaným spínaním vstupu na ultrazvukovej frekvencii. Klasickou metódou generovania výstupného signálu je použitím diferenciálneho komparátora, kedy jeden vstup je realizovaný prichádzajúcim audio signálom a druhý vstup pílovitým priebehom pri požadovanej spínacej frekvencii. Tento celkový proces generuje výstupný signál v závislosti od oboch vstupných signálov v tvare obdĺžnikového výstupného signálu tvoreného pulznou šírkovou moduláciou známou pod pojmom Pulse Width Modulation (PWM) [3]. Vstupný audio signál je označený ako u_{vst} pílovitý signál je označený u_{tri} a výstupný signál tvorený PWM je označený u_{PWM} . Priebehy jednotlivých signálov je možno vidieť na obrázku [1.4].



Obr. 1.4: Priebehy vstupných a výstupných signálov komparátora v triede D [3].

Tento výstupný PWM signál sa privádza na vstup komplementárneho výstupného stupňa polom riadených metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) tranzistorov TR1 a TR2 so spoločným zdrojom a je spínaný a zosilnený. Aby bolo možné extrahovať zosilnený zvukový signál z tvaru vlny PWM, výstup zosilňovača triedy D sa privádza do dolnopriepustného filtra. Dolnopriepustný filter pozostávajúci z cievky L a kondenzátora C prepustí do reproduktora strednú hodnotu, ktorá je nulová a funguje ako pasívny integrátor (za predpokladu, že medzná frekvencia filtra je aspoň o jeden rád nižšia, ako spínacia frekvencia koncového stupňa). Okrem toho dolnopriepustný filter zabraňuje rozptýleniu vysokofrekvenčnej spínacej energie v odporovej záťaži. Predpokladajme, že filtrované výstupné napätie a prúd zostanú konštantné počas jednej periódy spínania. Tento predpoklad je pomerne presný, pretože frekvencia spínania je oveľa vyššia ako najvyššia vstupná audio frekvencia. Potom možno vzťah medzi celou dĺžkou cyklu a výsledným filtrovaným výstupným napätím odvodiť pomocou jednoduchej časovej analýzy napätia a prúdu induktora [8].

Vysvetlená bloková schéma zapojenia zosilňovača v triede D vrátane signálových tokov je zobrazená na obrázku 1.5.



Obr. 1.5: Bloková schéma zapojenia zosilňovača v triede D [3].

1.2 Číslicovo analógové prevodníky

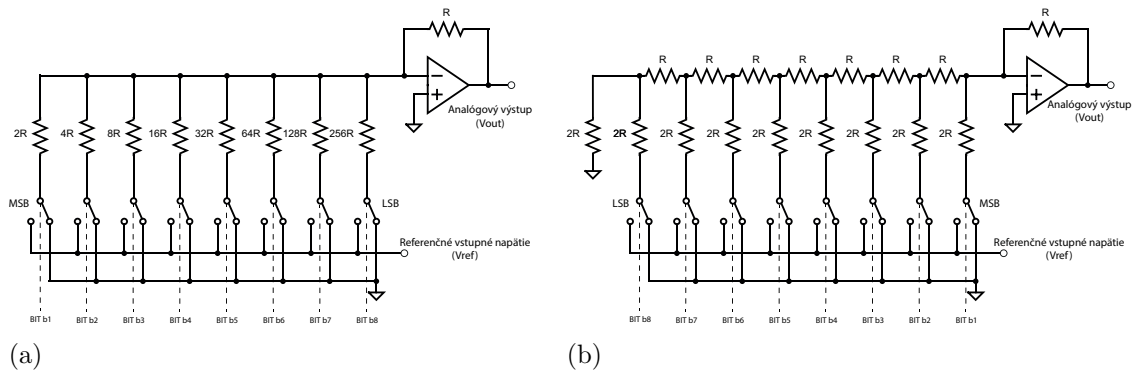
Nasledujúca časť práce sa venuje problematike prevodu medzi číslicovou, resp. digitálnou a analógovou doménou signálov v spojitosti so zvukovým spracovaním. V sekcii 1.2.1 sú popísané základné princípy funkčnosti digitálne-analógového (D/A) prevodu, a je priblížený najpoužívanejší spôsob prevodu pomocou váhovaných odporov a R-2R siete odporov, práca poukazuje na chyby pri prevode ako sú nelinearita a skreslenie – sekcia 1.2.2, a v poslednej časti 1.2.3 zobrazuje použitie filtrácie po aplikácii prevodu D/A prevodníka.

1.2.1 Princíp funkčnosti D/A prevodníka

Konverzia postupnosti diskretných čísiel na spojitú funkciu v časovej oblasti (napätie, prúd) sa nazýva ako digitálno-analógová konverzia (D/A konverzia) [10].

Digitálno-analógová konverzia (skrátene D/A, D-A alebo D-to-A konverzia) sa často vyžaduje v digitálnom systéme používanom pre funkčnosť externých analógových súčastí. D/A prevodník (alebo DAC) poskytuje riadené analógové výstupné napätie alebo v určitých špecializovaných aplikáciách riadený analógový výstupný prúd alebo iný parameter obvodu, ktorého hodnota zodpovedá vstupnému digitálnemu slovu [12].

Digitálno-analógové prevody sa najčastejšie vykonávajú dvomi spôsobmi a to pomocou takzvanej váhovanej siete rezistorov znázornenej na obrázku 1.6 a) alebo R-2R siete rezistorov znázornenej na obrázku 1.6 b) pripojených na vstup do sčítacieho zosilňovača. Napätie na výstupe závisí od napätia aplikovaného na vstupe.



Obr. 1.6: DAC a odporová sieť a) váhované odpory, b) R-2R [11].

DAC pomocou váhovanej siete rezistorov

Väčšina D/A prevodníkov založená na váženej presnej odporovej sieti je realizovaná pomocou štandardných hodnôt odporu, z ktorých každý môže byť v zapnutom alebo vypnutom stave podľa toho, aké bity sú nastavené na vstupnom binárnom slove. V známej „binárne váženej“ odporovej sieti znázornenej na obrázku 1.6 a) majú odpory hodnoty $2R$, $4R$, $8R$ atď., resp. sú v násobkoch mocniny 2 a každý odpor je zapojený do obvodu ako vlastný pridružený bit. Keď sa vstupný bit priradený k akémukoľvek odporu rovná 0, tento odpor sa nezapne do obvodu, ale namiesto toho sa nahradí skratom s nulovým odporom. Na vytvorenie analógového výstupného napätia je potrebné iba pripojiť určitý štandardný, ale konštantný prúd cez sieť s váhovými odpormi a napätie, ktoré poklesne v celej sieti odporov, je rovné požadovanému analógovému výstupnému napätiu [12].

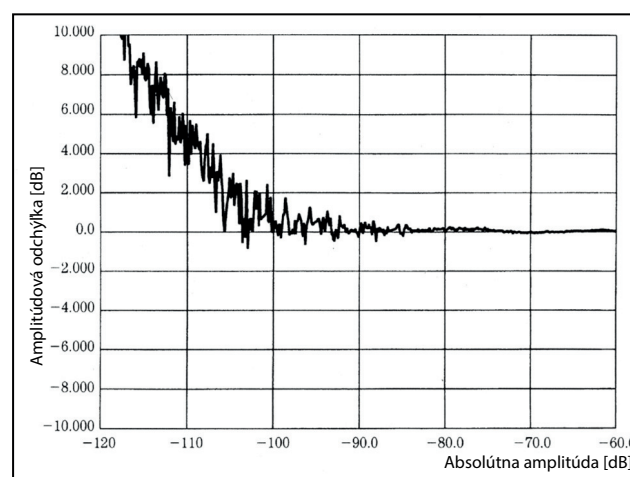
Táto binárne váhovaná odporová sieť trpí nevýhodou, že odpor s najväčšou váhou v sieti musí byť vyrobený s takou presnosťou (toleranciou), že pravdepodobná chyba v jeho hodnote je značne menšia ako hodnota odporu s najmenšou váhou v sieti, ak má byť prevod presný okolo hodnôt, pri ktorých sa zapína a vypína najvýznamnejší odpor [12]. V praxi je prevedenie DA prevodníka pomocou siete váhovaných odporov menej používané, a je nahradzané použitím siete R-2R odporov, ktoré sú realizačne menej komplikované [11].

DA prevodník pomocou R-2R siete rezistorov

Princíp funkčnosti DA prevodníka obsahujúceho sieť R-2R odporov, ktorá je znázornená na obrázku 1.6 b) možno popísať nasledovne: číslicový signál je v paralelnom formáte privádzaný na spínače a jednotlivé spínače predstavujú jeho reprezentáciu v hodnotách 0 (uzemnenie) a 1 (pripojenie na referenčné napätie). Pokiaľ je spínač na hodnote 1, výstupný prúd je delený 2:1 a to toľkokrát, koľkými uzlami odporovej siete prejde. Vstupná impedancia zosilňovača je veľmi malá a výstupné napätie potom zodpovedá súčtu jednotlivých príspevkov násobenému odporom R v spätnej väzbe [11].

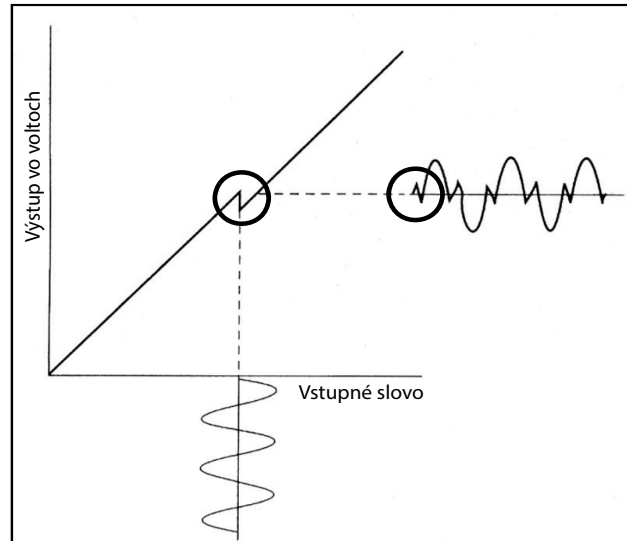
1.2.2 Nelinearita D/A prevodníka a skreslenie malých signálov

DA prevodník by mal mať väčší dynamický rozsah ako samotný spracovávaný signál, pretože presnosť konverzie závisí od linearity prevodníka. Relatívna chyba prevodu stúpa so znižujúcou sa úrovňou výstupného signálu [11]. Popisovaný vznikajúci problém sa v praxi nazýva ako nelinearita DA prevodníka pri nízko-úrovňových signáloch a je znázornená na obrázku 1.7.



Obr. 1.7: Nelinearita DAC pre malé signály [11].

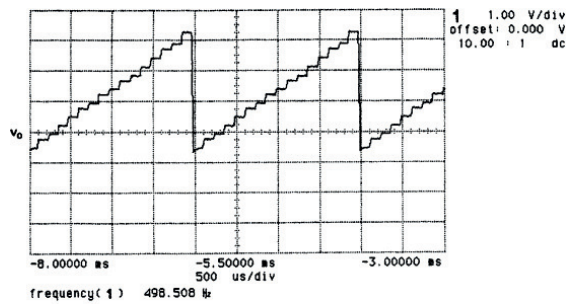
Chyba pri prechode nulou nazývaná ako zero-cross distortion vzniká pri malých hodnotách napätia u prevodníkov, ktoré rešpektujú znamienko pomocou MSB bitu (bit číslo 1). Ten potom prepína všetkých členov odporovej siete a vplyvom rôznej doby prepnutia dôjde k skresleniu označovanému ako *glitch* [11]. Toto skreslenie je znázornené na obrázku [1.8].



Obr. 1.8: Chyba pri prevode malých signálov so znamienkom [11].

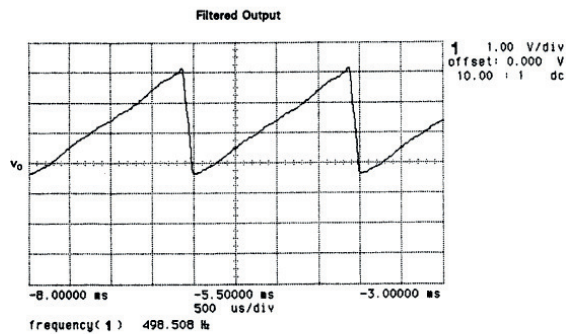
1.2.3 Aktívny rekonštrukčný filter

Priebeh obvodu D/A prevodníka typu R-2R, ktorý je znázornený na obrázku [1.6] b), odhaľuje priebeh zobrazený na obrázku [1.9] a). Hoci je linearita určite menšia ako optimálna, jasne ilustruje príslušné princípy a bola by primeraná pre mnohé D/A aplikácie. Linearita by sa mohla výrazne zlepšiť použitím presnejších odporov alebo riadením digitálnych vstupov cez analógové spínače. Obrázok zobrazuje skutočný výstup prevodníka so 16 rôznymi výstupnými úrovňami v tvare vlny, ktoré sú ľahko viditeľné. Obrázok [1.9] b) zobrazuje rovnaký základný obvod potom, čo výstup prešiel cez dolnopriepustný filter [13].



1 350.0 mV

(a)



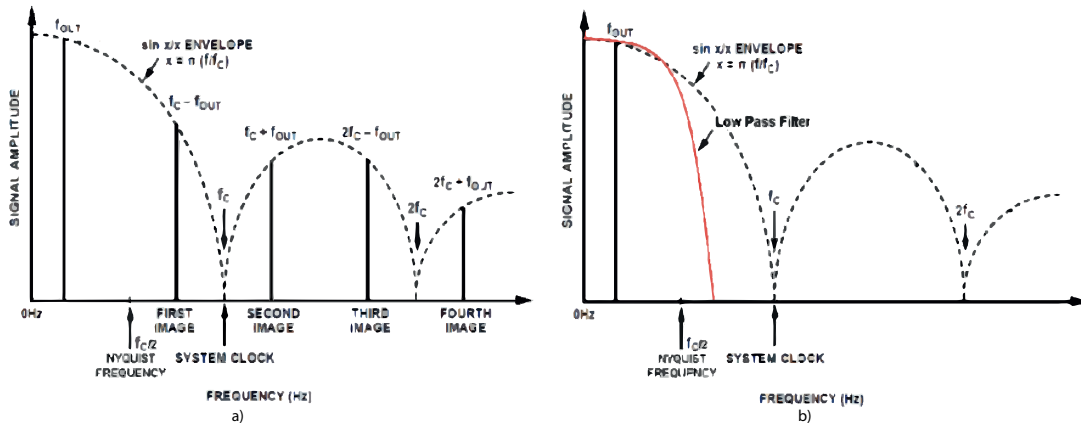
1 350.0 mV

(b)

Obr. 1.9: Priebehy a) 16bitového D/A prevodníka, b) výstupu dolnopriepustného filtra [13].

Pretože je D/A prevodník diskretný systém (systém pracujúci s diskretnými signálmi), dochádza vplyvom jeho činnosti k tzv. periodizácii výstupného spektra a vo výstupnom spektre D/A prevodníka sa tak objavujú periodicky sa opakujúce obrazy základného kmitočtu. Navyše sú tieto obrazy základného kmitočtu symetrické a zrkadlené cez polovicu vzorkovacieho kmitočtu (Nyquistov kmitočet). Tieto odzrkadlené a periodicky sa opakujúce zložky spektra sú však vo výstupnom spektre nežiaduce a je nutné ich vhodným spôsobom potlačiť a odfiltrovať. Tento problém rieši práve použitie výstupného aktívneho rekonštrukčného filtra, ktorý pre kmitočty nad polovicou vzorkovacej kmitočtu predstavuje filter typu dolná priepusť, čím dochádza k výraznému potlačeniu týchto nežiaducich vyšších harmonických vo výstupnom spektre D/A prevodníka. Ideálny rekonštrukčný filter by mal prenášať kmitočty presne do polovice vzorkovacej kmitočtu a potom by s obrovskou strmou svojej amplitúdovo frekvenčnej charakteristiky dokonale potlačil všetky vyššie harmonické nad polovicou vzorkovacieho kmitočtu. Avšak ideálny filter nie je možné realizovať a tak reálny filter má obmedzenú strmosť svojej amplitúdovej frekvenčnej charakteristiky a je nutné tak počítať s prienikom zrkadlových kmitočtov v nepriepustnom pásme [15].

Princíp činnosti dolnopriepustného filtra je zobrazený na obrázku 1.10 a), a na obrázku 1.10 b) možno vidieť zrkadlenie harmonických zložiek [15].



Obr. 1.10: Obrazy spektra D/A prevodníka a) spektrum signálu rekonštrukčného filtra, b) zrkadlenie harmonických zložiek [15].

1.3 Analógová filtrácia

Sekcia 1.3 popisuje základné koncepty problematiky analógovej filtrácie. Približuje terminológiu základných typov filtrácie - sekcia 1.3.1, zobrazuje aproximácie funkcií analógových filtrov - sekcia 1.3.2, a venuje sa pasívnemu a aktívnemu návrhu filtrovaných výstupov - sekcia 1.3.3.

Zvukové signály je možné spracovávať rôznymi typmi procesov, medzi jeden z najpoužívanejších, ktorý bol využitý aj v konkrétnej práci, je proces filtrácie. Jedná sa o základné použitie procesu pri úprave zvukového signálu, kedy vzniká výrazná statická alebo dynamická modifikácia pôvodného signálu.

Pod pojmom filter v jednoduchosti chápeme systém, ktorý selektívne mení žiadaným spôsobom vlastnosti zvukového signálu ako je jeho tvar, amplitúdovo-frekvenčná alebo fázovo-frekvenčná charakteristika. Základným využitím filtrácie je predovšetkým zvyšovanie kvality signálu (napríklad redukovaním šumu), pre extrakciu informácií zo signálu alebo jeho samotné oddelenie [16].

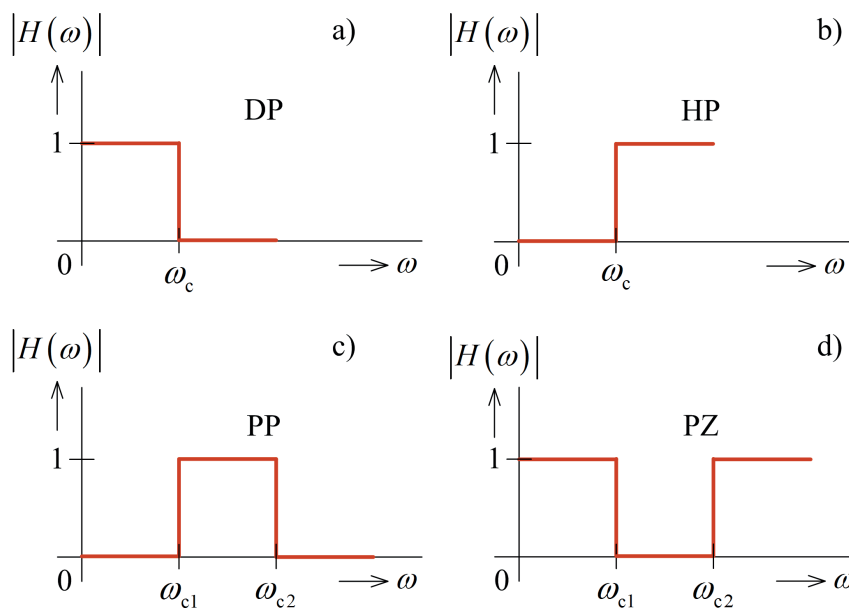
1.3.1 Deskriptívna terminológia typov filtrov

Frekvenčný selektívny filter je predstaviteľom lineárneho neparаметrického systému, ktorý určitú časť frekvenčného pásma prepúšťa a zvyšnú časť frekvenčného pásma

potláča. Modulové frekvenčné charakteristiky ideálnych frekvenčných filtrov sú zobrazené na obrázku [1.11]. Fázové frekvenčné charakteristiky ideálnych frekvenčných filtrov majú nulovú hodnotu [17].

Klasifikácia filtrov je závislá od ich funkčnosti, konkrétne na frekvenčných rozmedziach nazývaných ako priepustné pásmo a pásmo zádrže. Kombináciami týchto pásiem je možno docieľiť spolu štyroch základných najviac používaných typov filtrov zobrazených na obrázku [1.11] a definovaných nasledovne [18].

- **Dolná priepusť** (Lowpass), charakterizovaná priepustnou oblasťou po frekvenciu ω_c známou ako medzný kmitočet (Obr. [1.11] a)).
- **Horná priepusť** (Highpass), je komplementom k dolnej priepusti a pásmo zádrže je charakterizované po frekvenciu ω_c , odkiaľ začína pásmo priepusti (Obr. [1.11] b)).
- **Pásmová priepusť** (Bandpass), je typom filtra, v ktorom sa priepustné pásmo nachádza medzi frekvenciami ω_{c1} a ω_{c2} , všetky ostatné frekvencie sa nachádzajú v pásme zádrže (Obr. [1.11] c)).
- **Pásmová zádrž** (Bandstop), je komplementom pásmovej priepusti, v ktorej sa pásmo zádrže nachádza medzi frekvenciami ω_{c1} a ω_{c2} , všetky ostatné frekvencie sú prepustené. Tento filter sa taktiež nazýva ako *notch*. (Obr. [1.11] d)).

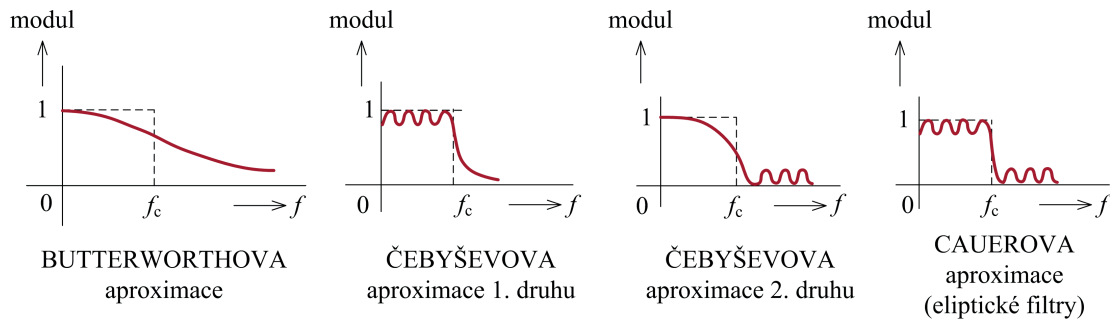


Obr. 1.11: Modulové kmitočtové charakteristiky ideálnych filtrov:

a) dolná priepusť (DP), b) horná priepusť (HP), c) pásmová priepusť (PP), d) pásmová zádrž (PZ) [17].

1.3.2 Aproximačné funkcie filtrov

V rámci frekvenčne selektívnych analógových filtrov možno filtre ďalej kategorizovať podľa špecifickej metódy návrhu a spôsobu ich implementácie. Špecifické metódy navrhovania, ktoré boli vyvinuté, zahŕňajú aproximácie nazývané ako Butterworth, Chebyshev typ I, Chebyshev typ II a Cauer (alebo eliptická), znázornené na obrázku 1.12. Každá z týchto metód má svoje výhody aj nevýhody [19].



Obr. 1.12: Aproximácia modulovej frekvenčnej charakteristiky normalizovanej dolnej priepuste [17].

Najčastejšie špecifikovanou charakterizáciou výkonu filtra je frekvenčná odozva. Po zadaní špecifikácie frekvenčnej odozvy sa musí vybrať dizajn filtra, ktorý spĺňa tieto požiadavky. Toto je dosiahnuté transformáciou požadovanej odozvy na normalizovanú dolnopriepustnú špecifikáciu s limitom 1 rad/s. Táto normalizovaná odozva sa porovnáva s krivkami normalizovaných dolnopriepustných filtrov, ktoré majú tiež medznú hodnotu 1 rad/s. Po určení uspokojivého dolnopriepustného filtra z kriviek sa tabuľkové normalizované hodnoty prvkov zvoleného filtra transformujú alebo denormalizujú na konečný návrh. Moderná teória sietí nám poskytla mnoho rôznych tvarov amplitúdy v závislosti na frekvencii, ktoré boli analyticky odvodené umiestnením rôznych obmedzení na prenosové funkcie znázornené na obrázku 1.12 [20].

1.3.3 Realizácia analógovej filtrácie

Všeobecný filter pozostávajúci z induktorov, kondenzátorov, rezistorov a prípadne aktívnych prvkov, ako sú operačné zosilňovače a tranzistory riešime pri realizácii pomocou techník obvodovej analýzy. Frekvenčnú odozvu zovšeobecného filtra možno vyjadriť ako pomer dvoch polynómov v rovine s , kde $s = j\omega$ (pričom $j = \sqrt{-1}$, a $\omega = 2\pi f$ je frekvencia v radiánoch za sekundu) a označuje sa ako prenosová funkcia.

Táto spojitosť sa dá matematicky vyjadriť rovnicou [1.2](#) [\[20\]](#).

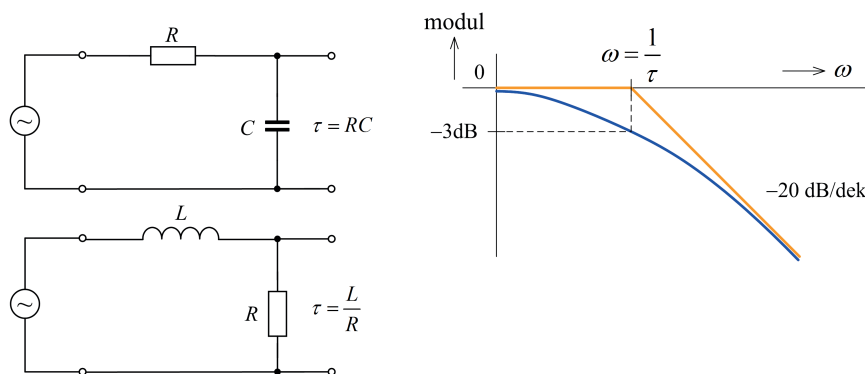
$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (1.2)$$

Korene menovateľa polynómu $X(s)$ sa nazývajú póly a korene polynómu čitateľa $Y(s)$ sa označujú ako nuly [\[20\]](#). Najbežnejšia základná charakteristika, ktorú metóda návrhu analógového filtra spĺňa, je špecifikovaná veľkosť odozvy. Preto klasické filtre ignorujú fázové charakteristiky počas fázy návrhu, a ich počiatočný bod je špecifikovaný ako $|H(j\omega)|^2$. Dôvodom pre začatie s frekvenčnou odozvou umocnenú na druhú je to, že dostávame jej reálnu časť hodnoty. Z dôvodu nepárnej fázovej symetrie sa fázové uhly vyrušia, čo zjednodušuje proces navrhovania. Pre príklad pól (nula) p_i (z_i) funkcie $H(s)$, je symetrický k pólu (nule) $-p_i$ ($-z_i$) funkcie $H(-s)$. Pretože póly a nuly $H(s)$ sú symetrické okolo reálnej osi (komplexne združené póly a nuly), $|H(j\omega)|^2$ má póly a nuly, ktoré sú symetrické okolo reálnej osi aj imaginárnej osi. Toto je známe ako kvadrálna symetria. Pre stabilitu nesmú žiadne póly dopadať na os $j\omega$, avšak neexistuje žiadne obmedzenie týkajúce sa núl [\[19\]](#).

Výsledkom tejto kvadratickej aproximácie návrhu je filter ktorý musí spĺňať nasledujúce požiadavky:

- funkciou je polynóm delený polynómom s reálnymi koeficientami,
- v týchto polynómoch sú len párne mocniny ω ,
- rád čitateľa nie je vyšší ako rád menovateľa,
- menovateľ nemá žiadne reálne korene, a ak má čitateľ reálne korene, vyskytujú sa v párnom poradí [\[19\]](#).

Ideálne frekvenčné filtre nemožno fyzikálne realizovať, pretože to sú nekauzálne systémy. Predstavitelia najjednoduchších kauzálnych pasívnych systémov, ktoré je možné realizovať, sú napr. RC a RL články [\[17\]](#).



Obr. 1.13: RL a RC integračný článok filtru typu dolná priepusť [\[17\]](#).

Pasívna analógová filtrácia

Pasívne analógové filtre sú známe tým, že v implementácii filtra nie sú žiadne aktívne prvky, ale zvyčajne je implementácia obmedzená na použitie kombinácií z pasívnych prvkov ako sú odpor R , cievka L a kondenzátor C [19].

Pri hľadaní aproximačnej funkcie, ktorá nám splní zadané požiadavky v časovej alebo frekvenčnej oblasti (môžu byť zadané požiadavky pre obe oblasti súčasne) môžeme napr. využiť kmitočtovú charakteristiku zobrazenú na obrázku 1.13 integračného RC článku definovanej funkciou:

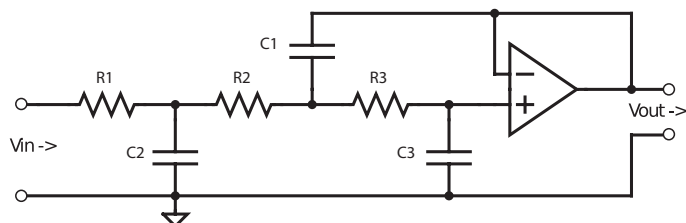
$$H(\omega) = \frac{a_0}{b_0 + j\omega b_1}, \text{ kde } a_0 = 1, b_0 = 1, b_1 = \tau \text{ [17]}. \quad (1.3)$$

Následne vypočítame podľa zvolenej frekvencie ω časovú konštantu $\tau = RC$.

Aktívna analógová filtrácia

Analógové filtre môžu byť tiež označované ako aktívne, čo naznačuje, že implementácia obsahuje aktívne prvky, ako sú operačné zosilňovače, prípadne iné aktívne prvky, ako sú tranzistory. Hlavnou výhodou aktívnych filtrov operačných zosilňovačov v dôsledku veľmi nízkej výstupnej impedancie operačných zosilňovačov a tiež veľmi vysokého zisku v otvorenej slučke a vysokej vstupnej impedancie je, že stupne operačného zosilňovača majú inherentné vyrovnávanie, čo znamená, že prenosová funkcia celku niekoľkých stupňov operačného zosilňovača je výsledkom prenosových funkcií jednotlivých stupňov, pričom sa ignorujú zafažujúce účinky nasledujúcich stupňov. To značne zjednodušuje teoretickú implementáciu. To znamená, že napríklad filter operačného zosilňovača šiesteho rádu, kde rád filtra určuje, s akou vernosťou (presnosťou) sú modelované prenosové charakteristiky filtra, možno implementovať kaskádovaním troch stupňov operačného zosilňovača druhého rádu, kde každý stupeň druhého rádu je implementovaný nezávisle od ostatných dvoch stupňov. Pasívne analógové filtre nemajú toto zjednodušenie a celá prenosová funkcia musí byť implementovaná ako jeden neoddeliteľný celok [19].

Aktívny filter tretieho rádu dolnej priepuste je znázornený na obrázku 1.14.



Obr. 1.14: Aktívny filter tretieho rádu dolnej priepuste [20].

Systém znázornený na obrázku 1.14, filtra dolnej priepusti tretieho rádu možno popísať prenosovou funkciou 1.4

$$H(s) = \frac{1}{s^3A + s^2B + sC + 1} \quad (1.4)$$

a kde sú koeficienty určené rovnicami 1.5

$$A = C_1C_2C_3, B = 2C_3(C_1 + C_2), C = C_2 + 3C_3. \quad (1.5)$$

Po výbere aproximačnej funkcie filtra, ako príklad Butterworthovej prenosovej funkcie tretieho rádu popísanej výrazom 1.6 vpravo, a dáme ho do rovnosti s výrazom 1.4, dostávame celkovú rovnicu 1.6 [20].

$$H(s) = \frac{1}{s^3A + s^2B + sC + 1} = \frac{1}{s^3 + 2s^2 + 2s + 1}, \quad (1.6)$$

kde koeficienty $A = 1$, B a $C = 2$ vyriešime v rovnosti s koeficientami v rovniciach 1.5 [20].

1.4 Ovládanie hladiny hlasitosti

V tejto časti práce budú predstavené možnosti ovládania hlasitosti analógových zvukových signálov. Sekcia popisuje teoretický podklad a základný princíp zmeny hladiny zvukového signálu, ktorý je možno ovládať.

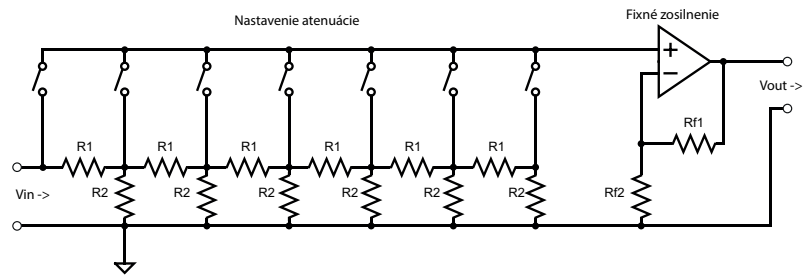
Medzi často užívané zapojenia pre ovládanie zmeny napätia sa v minulosti používali unipolárne tranzistorové členy v zosilňovačoch s nastaviteľným ziskom. Regulácia bola realizovaná pomocou potenciometrov – preladovateľných odporov v spätnej väzbe. Ich použitím sa ale zároveň vytvoril problém vzniku nelinearity, zapojenej priamo do signálovej cesty. Tieto zapojenia vytvárajúce nelinearitu signál poškodzovali pridávaním harmonických či intermodulačných skreslení na ich výstup [21].

Obvody pre ovládanie zmeny napätia a tým hladiny hlasitosti analógového zvukového signálu, ktoré by nevytvárali nelinearity, musia predovšetkým zabezpečiť signálovú cestu výhradne cez lineárne elektronické prvky.

1.4.1 Spínaná rebríková sieť odporov

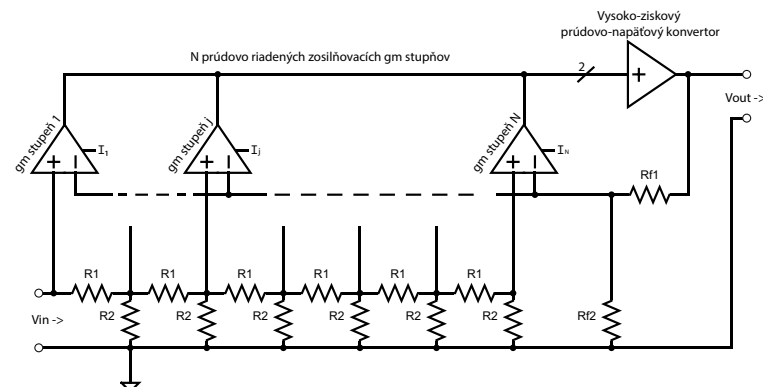
Jedným zo spôsobov, akým možno lineárne meniť atenuáciu, čiže zníženie hladiny napätia, je využitie rekurzívnej rebríkovej siete odporov, ktorú možno ovládať pomocou spínacích prvkov. Spínaním jednotlivých častí obvodu rebríkovej siete sú vkladane do signálovej cesty rezistory s rovnakými hodnotami, čím je vytvorený pokles napäťovej úrovne signálu. Ako spínacie súčiastky bývajú použité metal-oxide-semiconductor (MOS) tranzistory, pripojené do R-2R rebríkovej binárne

váhovanej siete odporov. Za túto sieť odporov sa začleňuje operačný zosilňovač v neinvertujúcom zapojení s fixne nastaveným zosilňovacím ziskom [21]. Keďže sa tranzistory – spínacie prvky nenachádzajú v signálovej ceste, je výstup atenuovaného signálu bez známk nelinearity. Dôležitý je taktiež poznatok, že toto zapojenie automaticky vedie k zákonu o zosilnení na decibelovej osi (exponenciálny priebeh), ktorý vzniká priamo z rekurzívnej povahy zapojenia rebríkovej siete [21], a je znázornená na obrázku 1.15



Obr. 1.15: Spínaná rebríková sieť odporov [21].

Obvodové riešenie možno rozšíriť tak, aby poskytovalo nepretržitú kontrolu o zosilnenom zisku. Rozdelením fixného zosilňovacieho stupňa, ktorý je znázornený na obrázku 1.15 vytvárame N zosilňovacích (g_m) stupňov. Ak je riadiaci prúd I_j všetkých g_m stupňov jeden jednoduchý prúd I *diskrétne* spínaný ($j=1$ až po $j=N$), nastáva rovnaká situácia, ako v prípade zapojenia na obrázku 1.15. Avšak ak je možno prúd I_j riadiť *jemnejšie* od jedného g_m stupňa k nasledujúcemu, a transkonduktancia je menená s prúdom I , vznikne efekt interpolácie útlmu medzi odbočkami. Zjednodušené zapojenie je zobrazené na obrázku 1.16. Zapojenie operačných zosilňovačov je realizovateľné pomocou bipolárnych prúdov riadených tranzistorov [21].



Obr. 1.16: Prúdovo riadená sieť odporov [21].

2 Správa napájania a riadenia

Druhá časť práce sa spočiatku venuje poznatkom z oblasti zdrojov napájania, popisuje základné funkčné bloky meničov, regulátorov napätia, podrobnejšie v časti [2.1](#). Mimo iné popisuje a vyberá hlavnú riadiacu jednotku zariadenia, kde konkrétne volí riadenie pomocou jednodoskových počítačov, vrátane teoretického popisu ich vstupno-výstupných periférií, konkrétnejšie v časti [2.2](#).

2.1 Meniče napätia

Nasledujúca časť práce je zameraná na stručný prehľad z oblasti napájania striedavých a jednosmerných obvodov. Sekcia [2.1.1](#) približuje najjednoduchšie princípy meničov striedavých zdrojov napájania na jednosmerné a zobrazuje primitívny Greinacherov menič. Ďalej práca v sekcii [2.1.2](#) poukazuje na teoretický základ z oblasti spínaných regulátorov a vysvetľuje ich princíp funkčnosti a dôvody použitia.

V posledných rokoch zohrávajú meniče napájajúcej energie dôležitú úlohu v technológii výkonovej elektroniky pre rôzne aplikácie. Invertory zdroja napätia a prúdu sú dobre známe ako konvenčné topológie na konverziu zdroja jednosmerného prúdu (DC) na zdroj striedavého prúdu (AC) a naopak [\[22\]](#).

Funkciou modulu konvertora AC/DC alebo DC/DC je splniť jednu alebo viacero z nasledujúcich požiadaviek:

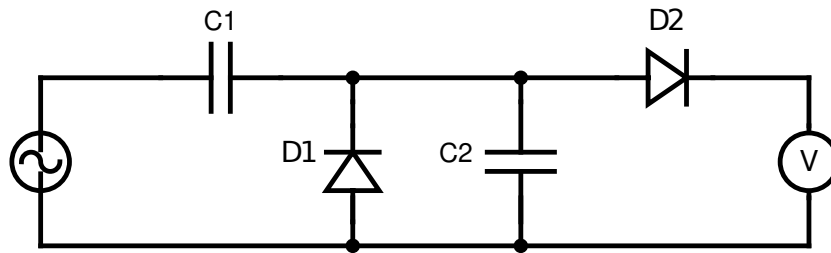
- prispôbenie sekundárnej záťaže primárnemu zdroju napájania,
- zabezpečiť izoláciu medzi primárnym a sekundárnym okruhom,
- poskytnúť ochranu proti účinkom porúch, skratu alebo prehriatia,
- zjednodušiť súlad s legislatívou v oblasti bezpečnosti, výkonu alebo elektromagnetickej kompatibility (EMC) [\[23\]](#).

2.1.1 AC/DC meniče

Najčastejším príkladom napájania elektronických komponentov pre každodenné použitie v domácnosti býva napájanie z elektrickej siete, ktorá disponuje striedavým napätím. Pre správnu funkcionálnu je potrebné častokrát vlastnosti napájania elektrickej siete meniť na napríklad jednosmerné napájanie.

Najjednoduchšou štruktúrou meniča, ktorý využíva diódy ako spínače a kondenzátory, je tzv. zdvojovač napätia Greinacher, ktorý je znázornený na obrázku [2.1](#). Tento obvod je napájaný pomocou striedavého AC napätia a pracuje v dvoch stavoch. V prvom z nich je kondenzátor nabitý na špičkovú hodnotu zdrojového napätia. V druhom z nich je predtým nabitý kondenzátor umiestnený v sérii so

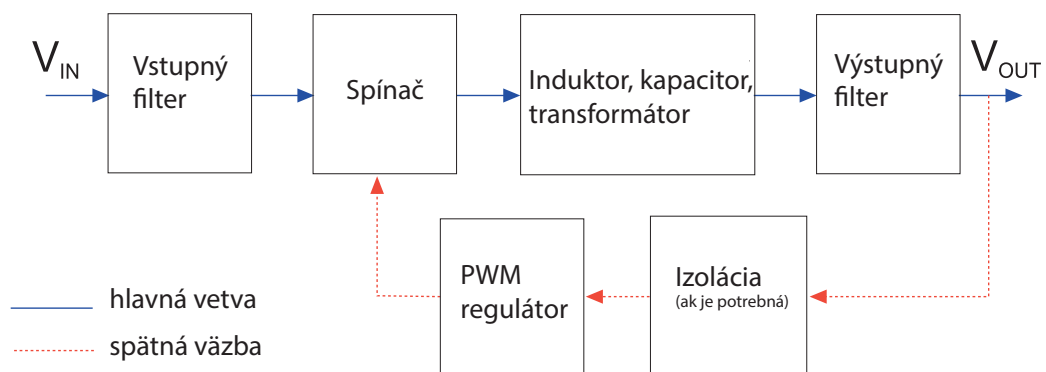
zdrojom a napája záťaž. Táto kombinácia generuje napätie, ktoré sa ideálne rovná dvojnásobku vstupného napätia [24].



Obr. 2.1: AC/DC menič Greinacher [24].

2.1.2 DC/DC meniče

Moderné DC/DC meniče by mali byť navrhnuté tak, aby poskytovali efektívnu konverziu energie, kontrolované, bezpečné a dobre regulované jednosmerné napájanie pre rôzne elektronické prístroje, zariadenia a systémy. V dnešnej dobe DC/DC meniče postupne vyčleňujú lineárne regulátory a nahrádzajú ich tzv. pokrokovejšími spínanými regulátormi. Na rozdiel od lineárnych regulátorov, ktoré premieňajú prebytočnú energiu na teplo, aby obmedzili výstupné napätie, spínané regulátory využívajú vlastnosti indukčných a kapacitných komponentov na ukladanie energie a prenos energie v diskretných energetických paketoch. Pakety energie sú uložené buď v magnetickom poli induktora alebo v elektrickom poli kondenzátora. Spínaný radič zaisťuje, že v každom pakete sa prenáša iba energia skutočne potrebná pre záťaž, takže táto topológia je veľmi efektívna. Obrázok 2.2 znázorňuje zjednodušenú štruktúru spínaného regulátora [23].



Obr. 2.2: DC/DC spínaný regulátor [23].

Na prenos energie zo vstupu na výstup v regulovateľných množstvách je potrebná zložitejšia regulačná technika ako v prípade lineárneho regulátora. Najbežnejším typom ovládania je pomocou PWM. U mnohých spínacích regulátorov je regulované výstupné napätie priamo úmerné pracovnému cyklu PWM. Riadiaca slučka využíva pracovný cyklus „hlavnej vetvy“ na ovládanie výkonového spínacieho prvku. Regulácia pomocou PWM je oveľa efektívnejšia ako lineárna regulácia, pretože k hlavným stratám dochádza iba pri každej zmene stavu spínača a nie nepretržite [23].

2.2 Jednodoskový počítač a jeho využitie

Pod pojmom Single Board Computers (SBC) možno označiť jedinú dosku počítača s procesorom, pamäťou a vstupno-výstupnými konektormi (I/O), ktoré jej umožňujú fungovať ako počítač. Zatiaľ čo SBC možno použiť na takmer akýkoľvek účel, mnohé boli pôvodne navrhnuté na konkrétny účel alebo aplikáciu. Dokonalým príkladom toho je Raspberry Pi, ktoré bolo vyvinuté ako vzdelávací nástroj na podporu a posilnenie programovacích zručností študentov [25].

Raspberry Pi (RPi) je cenovo dostupný počítač veľkosti kreditnej karty vyvinutý nadáciou Raspberry Pi Foundation. Raspberry Pi je možné využiť ako náhradu za lacnejšiu verziu počítača, ktorého výkonne grafické prostredie (GUI) z neho robí praktické multimedialne centrum. Jeho skutočná hodnota však pochádza z jeho flexibility. Piny General Purpose Input/Output (GPIO) umožňujú použitie Raspberry Pi pre širokú škálu aplikácií [26].

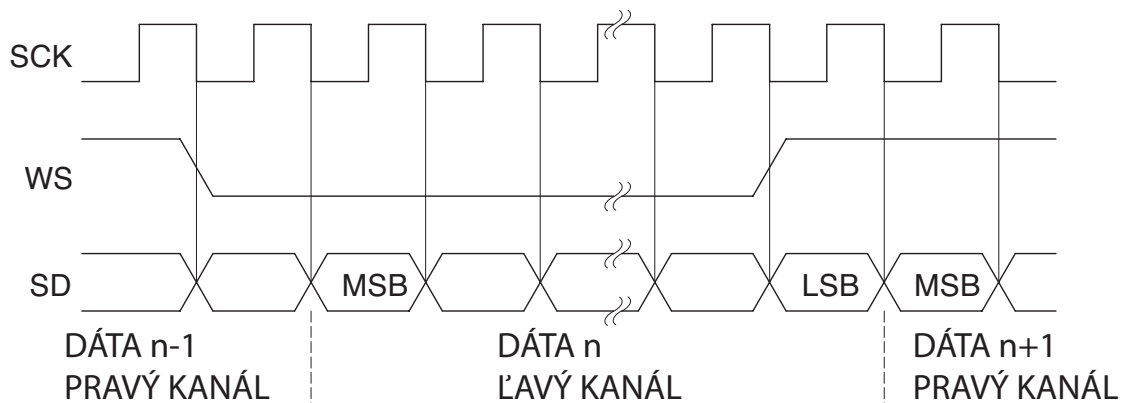
V novších a lepších konfiguráciách zariadenia Raspberry Pi disponujú pomocou svojich modulov pre bezdrôtové pripojenia technologickými možnosťami ako sú Bluetooth alebo WiFi, pre konfiguráciu samotného SBC, či prístup k dátam na internete alebo iných zariadeniach.

2.2.1 GPIO rozhrania

Jedným z hlavných využití Raspberry Pi je možnosť prepojenia a konfigurácie, ktorá je ponúkaná pomocou rozhrania GPIO. Rozhranie GPIO ponúka prístup k sériovým dátam, hodinovým dátam, rozhraniu Inter-IC Sound (I^2S), sériovému periférnemu rozhraniu (SPI), pulznej šírkovej modulácii (PWM), rozhraniam universal asynchronous receiver-transmitter (UART) a Inter-Integrated Circuit (I^2C), a všeobecnej I/O signalizácii [27].

Periféria I2S pre digitálne zvukové signály

I^2S je štandardné rozhranie sériovej zbernice používané na vzájomné prepojenie digitálnych audio zariadení. Zbernica realizuje spracovanie zvukových dát, zatiaľ čo ostatné signály, napr. ovládanie, sa prenášajú oddelene. Aby sa minimalizoval počet požadovaných pinov a aby bolo zapojenie jednoduché, používa sa 3-linková sériová zbernica pozostávajúca z linky pre dva časovo multiplexované dátové kanály (SD), linky pre výber slova (WS) a hodinovej linky (SCK). Zbernica je znázornená na obrázku 2.3. Sériové dáta sú prenášané v dvojkovom doplnku, pričom ako prvý je najvýznamnejší Most Significant Bit (MSB). MSB sa vysiela ako prvý, pretože vysielač a prijímač môžu mať rôzne dĺžky slova. Nie je potrebné, aby vysielač vedel, koľko bitov prijímač zvládne, ani prijímač nemusí vedieť, koľko bitov sa prenáša [28].

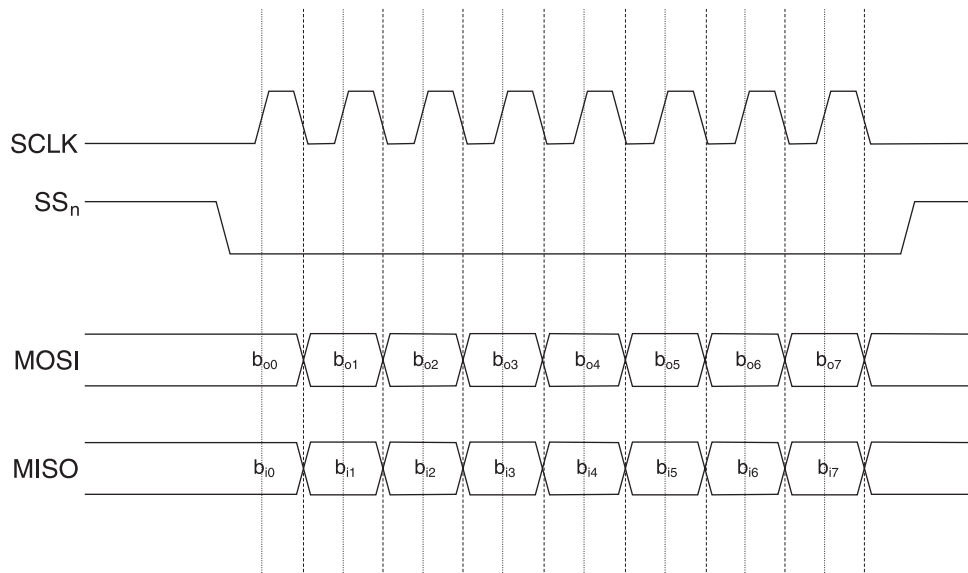


Obr. 2.3: Prenos rozhrania I^2S [28].

Periféria SPI pre riadiace signály

SPI je vysokorýchlostná, plne duplexná, synchronná komunikačná zbernica, ktorá je zostavená z dvoch blokov, hlavného - SPI master a podriadeného - SPI slave. Zbernica máva zvyčajne jedno hlavné zariadenie, ale môže disponovať viacerými podriadenými zariadeniami. Na úsporu portov na čipe a miesta na rozloženie na doske plošného spoja, jej výstupy zaberajú iba štyri porty: master out slave in (MOSI), master in slave out (MISO), časová linka (SCK) a slave select (SS) [29], ktorých prenos je zobrazený na obrázku 2.4

Keď si hlavný blok želá poslať dáta podriadenému zariadeniu a/alebo si od neho vyžiadať informácie, vyberie podriadeného zvolením zodpovedajúcej linky SS na nízku úroveň signálu a aktivuje hodinový signál na hodinovej frekvencii použiteľnej nadriadeným a podriadeným zariadením. Hlavný blok master generuje informácie na linke MOSI, zatiaľ čo vzorkuje linku MISO, a podriadený blok slave generuje informácie na linke MISO, pričom vzorkuje linku MOSI [29].



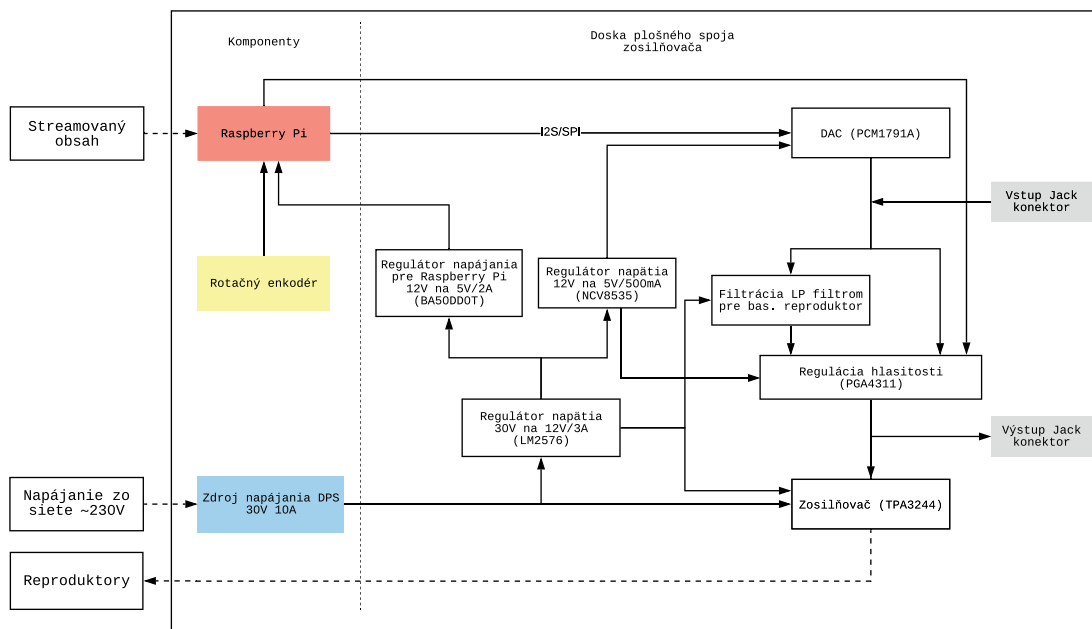
Obr. 2.4: Linka komunikácie SPI [29].

3 Návrh a realizácia prototypu

Kapitola 3 vychádza z vyššie popisovaných teoretických podkladov a prakticky aplikuje poznatky z oblasti spracovania zvukových signálov, správy napájacích napätí a informácií týkajúcich sa jednodoskových počítačov. Výsledný prototyp zariadenia je zostavený z dvoch hlavných hardvérových celkov a dvoch vedľajších hardvérových častí.

Hlavné hardvérové celky prípravku predstavuje navrhnutá doska plošného spoja, obsahujúca celú logiku spracovania signálovej cesty, vrátane prevodu signálu z digitálnej do analógovej oblasti, filtrácie, ovládania hlasitosti a výslednej amplifikácie, ktorej časti sú podrobnejšie popísané v kapitole 3.1. Na doske plošného spoja sa mimo iné nachádzajú aj napäťové regulátory pre napájanie jednotlivých obvodov, vrátane napájania druhej hlavnej časti hardvérového celku pre riadenie dosky plošného spoja – jednodoskového počítača Raspberry Pi, ktorého prepojenie je popísané v časti 3.2. Tieto dva hlavné hardvérové celky sú prepojené pomocou viacerých signálových zberníc pre prenos informácií, napájanie a riadenie.

Medzi vedľajšie hardvérové komponenty je zaradený rotačný enkodér – sekcia 3.2.3, ktorý zabezpečuje možnosť fyzického ovládania výstupnej hlasitosti pomocou riadiacej jednotky Raspberry Pi a hlavný napájací zdroj celého prípravku pre napájanie z elektrickej siete pripojený k doske plošného spoja, ktorého výber je popísaný v časti 3.1.5. Výsledný navrhnutý prototyp vrátane prepojení je znázornený na blokovom diagrame a popísaný nižšie v texte práce.



Obr. 3.1: Blokový diagram zosilňovača riadeného RPi [30].

Blokový diagram znázorňuje zjednodušený model komponentov prototypu zosilňovača riadeného pomocou Raspberry Pi, taktiež zobrazuje hlavné bloky dosky plošného spoja vrátane všetkých vzájomných prepojení. Vstupný signál je možno vkladať cez jednodoskový počítač Raspberry Pi v podobe streamovaného obsahu alebo pripojenia cez 3,5 mm jack konektor. Raspberry Pi disponuje modulom pre získanie streamovaného audio obsahu cez WiFi alebo Bluetooth, ktorý je možno v digitálnej podobe na SBC ekvalizovať a pripojiť do DA prevodníka. Následne je signál filtrovaný pre nízkofrekvenčný reproduktor, napäťovo regulovaný a každá jeho časť nezávisle zosilnená. Výsledný signál, napojený na výstupné konektory je možné získať vo forme pre pasívne reproduktory alebo taktiež v linkovej úrovni prostredníctvom 3,5 mm jack konektory.

3.1 Návrh dosky plošných spojov

V tejto časti práce bude priblížený postup pri realizácii dosky plošných spojov. Práca sa venuje hardvérovým súčiastkam nachádzajúcim sa na doske plošných spojov, ktoré podrobnejšie popisuje, vyberá jednotlivé komponenty v závislosti od ich vlastností, zobrazuje ich schematické zapojenia vrátane potrebných kalkulácií a vysvetľuje ich funkčnosť.

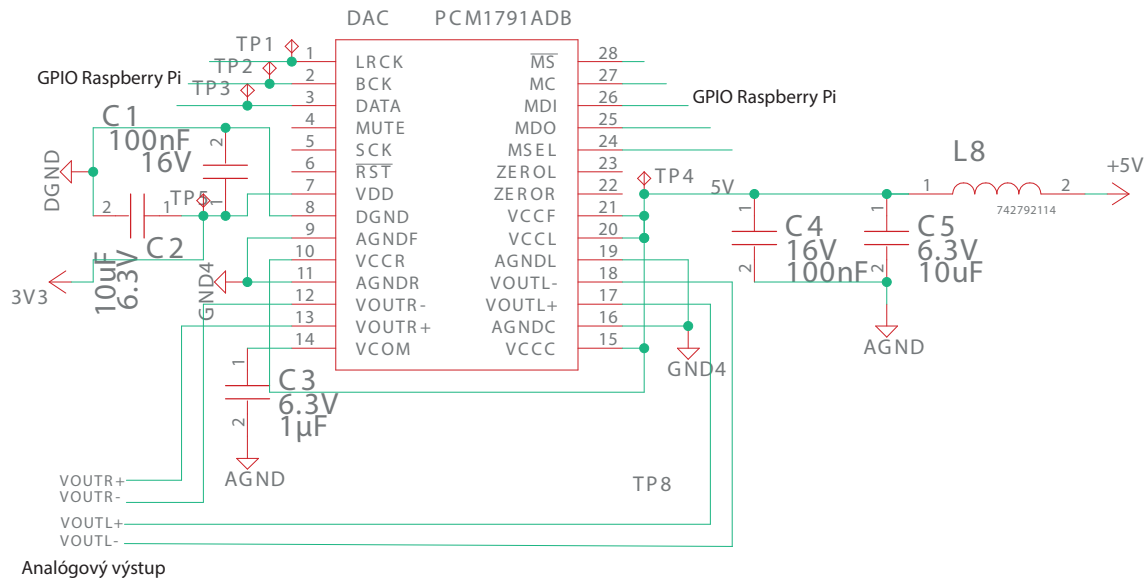
3.1.1 Zapojenie číslicovo-analógového prevodníka

Prvou časťou riešenia návrhu schémy dosky plošného spoja bol výber a samotné zapojenie DA prevodníka, ktorý bol zvolený pre splnenie zadania. DA prevodník by mal disponovať základnou bitovou hĺbkou prenosu 24 bit, minimálnym vzorkovacím kmitočtom 192 kHz a možnosťou prepojenia so SBC digitálnou zvukovou sériovou linkou I^2S . Taktiež musí disponovať nízkou nelinearitou, skreslením a THD podrobnejšie popísaným v sekcii [1.2](#). Výhodou by mala byť možnosť nastavenia samotného DA prevodníka použitím jednej zo sériových liniek, ktorými disponuje SBC. Pri výbere samotnej súčiastky sme brali v úvahu všetky vyššie spomenuté vlastnosti, jeho výstupné napätie a iné parametre v závislosti na cene a dostupnosti na domácom trhu.

Pre náš účel použitia bol zvolený DA prevodník PCM1791A od výrobcu Texas Instruments. Základnými vlastnosťami je jeho 24bitová hĺbka prenosu, vzorkovacie kmitočty 128, 192, 256, 384, 512, alebo 768 kHz s autokorektom, užívateľskou programovateľnosťou pomocou sériovej linky SPI alebo I^2C , ktorou je možné ovládať digitálnu filtráciu, digitálny útlm, šumové vlastnosti alebo De-emphasis filter. Prevodník PCM1791A ponúka na výber z viacerých digitálnych sériových vstupných liniek pre prevod do analógovej oblasti vrátane I^2S , ktorú podporuje Raspberry Pi a je

dostupný z hľadiska ceny aj trhu. Jeho výstupné napätie nadobúda veľkosti 3,2 V_{p-p} pri výstupnom skreslení vrátane šumu THD+N = 0,001 %. Pre jeho správnu činnosť je potrebné analógové napájacie napätie o veľkosti 12V a analógová zem (AGND). A digitálne napätie o veľkosti 3,3V vrátane digitálnej zeme (DGND) [31], pre ktoré sme využili výstupy GPIO z RPi.

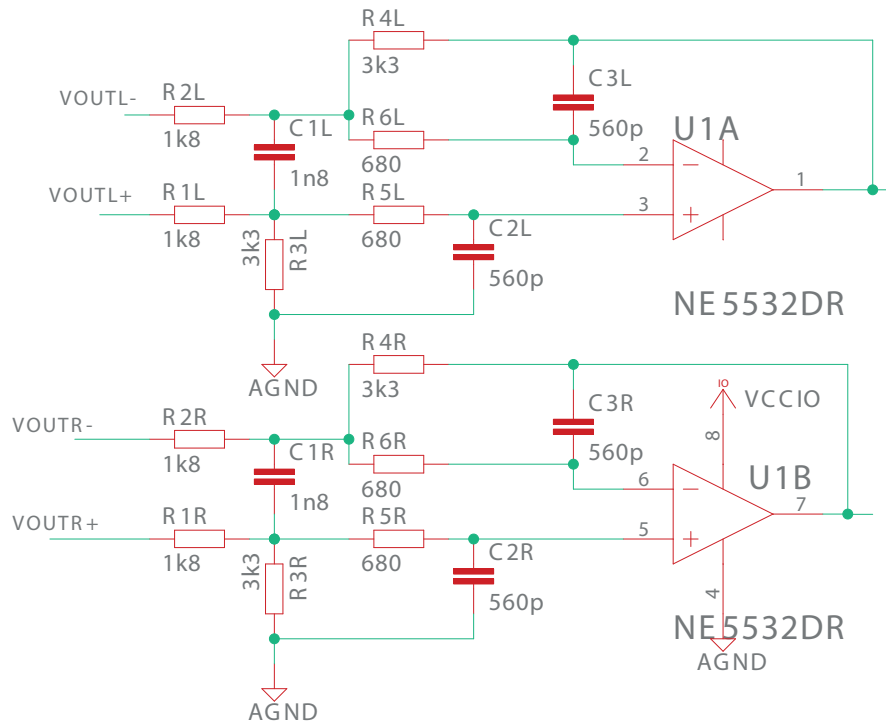
Po preštudovaní katalógového listu prevodníka PCM1791A v závislosti od zapojenia vstupných konektorov a preštudovaní konektorov GPIO nachádzajúcich sa na SBC bolo vytvorené schematické zapojenie znázornené na obrázku 3.2.



Obr. 3.2: Schéma zapojenia DA prevodníka PCM1791A.

Katalógový list zároveň ponúkal riešenie výstupného aktívneho rekonštrukčného filtra znázorneného na obrázku 3.3. Výstupné signály z diferenciálnych balancovaných výstupov pre každý kanál sú použitím symetrických operačných zosilňovačov NE5532, ktoré výrobca odporúča a pasívnych R, C súčiastok filtrované dolnopriepustným filtrom tretieho rádu [31] popísaného v sekcii 1.3.3. Medzná frekvencia f_c a zosilňovací zisk A sú dané externými súčiastkami, ktorých hodnoty sme volili podľa katalógového listu nasledovne:

- $R_1, R_2 = 1,8 \text{ k}\Omega$,
- $R_3, R_4 = 3,3 \text{ k}\Omega$,
- $R_5, R_6 = 680 \Omega$,
- $C_1 = 1800 \text{ pF}$,
- $C_2, C_3 = 560 \text{ pF}$.



Obr. 3.3: Schéma zapojenia rekonštrukčného filtra.

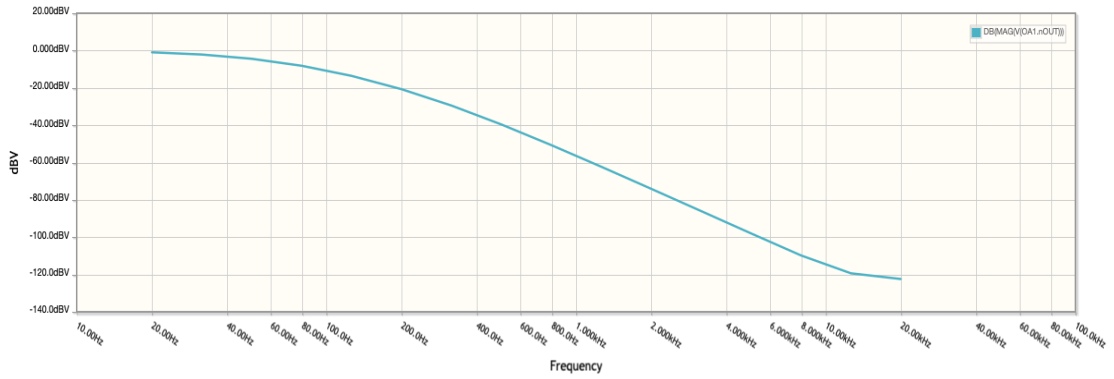
Pre výpočet hodnoty výstupného napätia sme vychádzali zo vzorca v katalógovom liste:

$$V_{out} = 3,2V_{p-p} * \frac{R_f}{R_i} \quad [31]. \quad (3.1)$$

Pričom R_f je rezistor v spätnej väzbe v našom prípade R4 a R_i je vstupný rezistor pri vstupe do operačného zosilňovača v našom prípade rezistory R1, R2. Po výpočte dostávame hodnotu výstupného napätia 5,9 V_{p-p} čo je 2,1 V RMS, medznú frekvenciu $f_c = 77$ kHz a zosilňovací koeficient $A = 1,83$ [31].

3.1.2 Návrh filtra dolnej priepusti

Ďalšou súčasťou práce bol návrh filtra dolnej priepusti (LP) pre basový reproduktor. Jednalo sa o dve signálové operácie a to sčítanie ľavého a pravého kanála do jedného signálu a jeho následnú filtráciu použitím RC aktívnej filtrácie tretieho rádu. Pre obe operácie bol využitý rovnaký typ operačného zosilňovača ako pri rekonštrukčnej filtrácii NE5532. Tretí rád filtra zabezpečil strmšiu prechodovú charakteristiku s poklesom o 18 dB na oktávu znázornenú na frekvenčnej charakteristike obrázku 3.4 simulácie zapojenia.

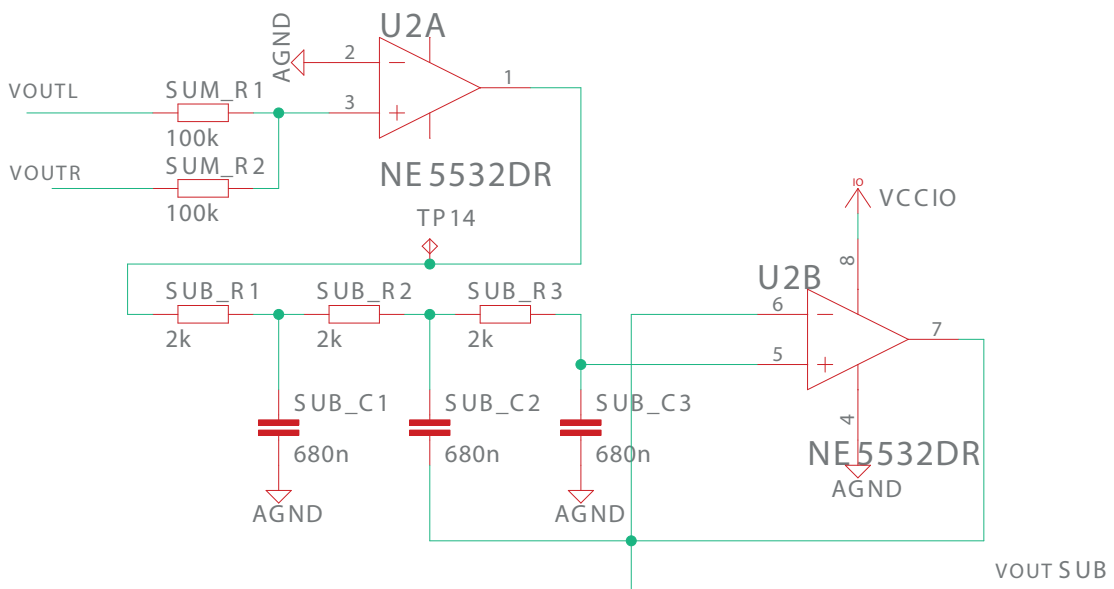


Obr. 3.4: Amplitúdovo-frekvenčná charakteristika LP filtra.

Pri medznom kmitočte f_c s poklesom o 3 dB, boli hodnoty R a C vypočítané vzťahom [3.2](#).

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \quad (3.2)$$

Z čoho sme určili medzný kmitočet f_c na hodnotu približne 120 Hz veľkosťou odporov $SUB_R = 2\text{ k}\Omega$ a kapacitorov $SUB_C = 680\text{ nF}$. Celková schéma zapojenia je znázornená na obrázku [3.5](#).



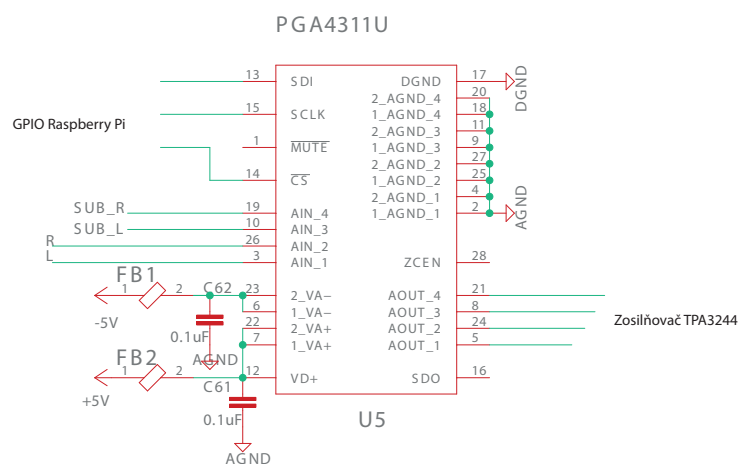
Obr. 3.5: Schéma zapojenia LC filtra 3. rádu.

3.1.3 Zapojenie ovládania hlasitosti

Nasledujúca časť práce je zameraná na výber a zapojenie riadeného ovládania hlasitosti. V rámci semestrálnej práce bol vytvorený návrh riešenia ovládania hlasitosti pomocou dvojice duálnych potenciometrov, pre oddelené regulovanie hlavného stereo signálu a stereo signálu pre bassový reproduktor. Táto regulácia hlasitosti bola v rámci diplomovej práce zmenená o možnosť ovládania aj cez vzdialenú aplikáciu – v softvérovej forme. Návrh zahŕňa výber takzvaného volume kontroléra, pripojiteľného do riadiacej jednotky Raspberry Pi, ktorým je možno digitálne riadiť spolu 4 jednotlivé analógové zvukové signály. Súčiastka musí disponovať základnými vlastnosťami atenuácie, nízkym šumom a skreslením, možnosťou napájania z dosky plošného spoja a taktiež dostupnosťou na domácom trhu.

Dostupné riešenie ponúka výrobca Burr-Brown Products, ktorý spadá pod spoločnosť Texas Instruments v podobe 4-kanálového audio volume kontroléra PGA4311. Súčiastka disponuje možnosťou digitálneho riadenia pomocou 3-vodičovej sériovej linky [33], ktorú možno pripojiť k periférii SPI popísanej v sekcii 2.2.1. PGA4311 ponúka širokú reguláciu hlasitosti pomocou odporového rebríkového zapojenia so zesilňovacími členmi popísaného v sekcii 1.4.1, ktorá nadobúda rozmedzie od +31,5 dB do -95,5 dB s krokom 0,5 dB pre každý kanál individuálne [33]. Taktiež disponuje nízkym skreslením vrátane šumu, kde frekvencii 1 kHz výrobca pripisuje hodnotu $THD+N = 0,0004\%$ [33]. Zariadenie je napájané symetrickým napätím $\pm 5\text{ V}$ a dostupné na domácom trhu. Pre zamedzenie vniknutia vysokofrekvenčných zložiek zo spínaných regulátorov boli pridané pred napájacie vstupy filtračné feritové odrušovacie jadra, označené FB1 a FB2.

Výsledné zapojenie je znázornené na obrázku 3.6.



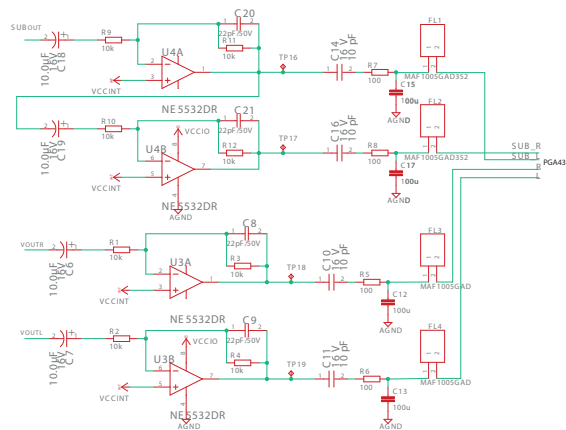
Obr. 3.6: Schéma zapojenia regulátora hlasitosti PGA4311.

3.1.4 Výber koncového zosilňovača

Táto sekcia práce je zameraná na výber zosilňovača, ktorý vychádza z vlastností v zadaní práce. Jednalo sa o zosilňovač určený pre stereo, čiže dva $4\ \Omega$ reproduktory, ktorých výkon mal nadobúdať hodnoty minimálne 30 W, a pre jeden basový $4\ \Omega$ reproduktor s výkonom približne 100 W. Podľa zadania mal byť zvolený zosilňovač pracujúci v triede D, podrobnejšie popísaný v časti [1.1.3](#). Vybraný typ by mal disponovať dostatočným výkonom, prenosom celého audio frekvenčného pásma, nízkym skreslením a šumom.

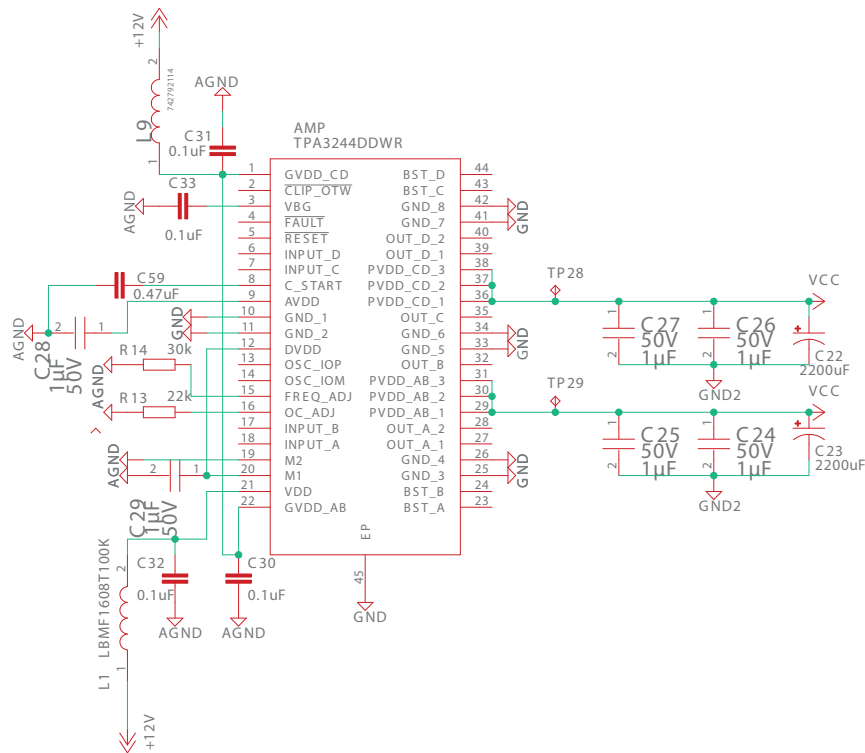
Pre naše použitie bol zvolený zosilňovač TPA3244 od výrobcu Texas Instruments. Jedná sa o zosilňovač pracujúci v triede D, ktorý disponuje základnými možnosťami konfigurácie spolu štyroch vstupných a výstupných zvukových kanálov na rôzne kombinácie vrátane kombinácie 2.1, čo značí dva kanály pre stereo reproduktory v tzv. single-ended (SE) zapojení a ostávajúce dva kanály pre basový reproduktor v zapojení bridge-tied load (BTL) pre jeho vyšší výkon [\[32\]](#). TPA3244 udáva v katalógovom liste použitú technológiu PurePath™ Ultra-HD, pre veľmi nízke skreslenie so šumom, ktoré by malo nadobúdať pri výkone 1 W a záťaži $4\ \Omega$ hodnoty $\text{THD+N} = 0,005\ \%$ [\[32\]](#). Jeho šírka prenosového pásma je uvádzaná do 100 kHz, pre vysokofrekvenčné zložky z High-Definition (HD) zdrojov, a efektivitu až 94 %. Pri návrhu schémy zapojenia sme vychádzali z katalógového listu samotnej súčiastky [\[32\]](#) a taktiež zo zapojenia, ktoré výrobca realizuje na predajnom modeli dosky plošného spoja pod názvom TPA3244EVM.

Prvou časťou bola realizácia zapojenia vstupných signálov pre jednotlivé kanály vrátane predzosilňovačov s využitím operačného zosilňovača NE5532, pre stabilizované vstupné napätie, za ktoré bola pridaná korekcia hlasitosti v podobe regulátora hlasitosti PGA4311 popísaného v časti [3.1.3](#). Zapojenie vstupnej časti je znázornené na obrázku [3.7](#).



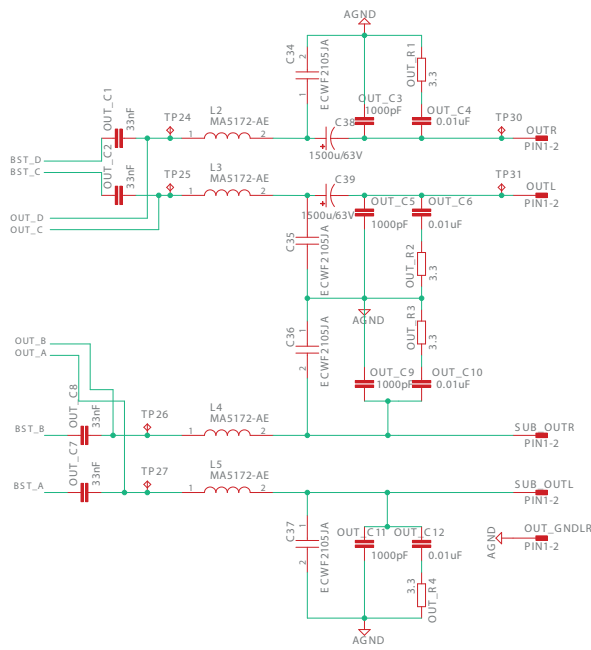
Obr. 3.7: Schéma zapojenia vstupnej časti zosilňovača TPA3244.

V druhej časti sme sa venovali zapojeniam pomocných signálov zosilňovača a napájania. Hlavné napájacie napätie (PVDD/VDD) pre správnu funkčnosť zariadenia nadobúdalo hodnoty 30 V, a pomocné napájanie (GVDD) pre vnútorné obvody bolo realizované napätím 12 V. Voľba konfigurácie do stera s basovým reproduktorom (typ 2.1) bola realizovaná pomocou nastavenia tzv. mode pinov M1 na úroveň 3,3 V (DVDD) a M2 na úroveň 0 V (AGND). Ostatné piny boli zapojené podľa odporúčania výrobcu [32] a signály privedené z regulácie hlasitosti PGA4311 boli vedené cez linkové výstupy použitím jack 3,5 mm konektorov, ktoré sú zobrazené na celkovej schéme zapojenia nachádzajúcej sa v prílohe A. Zapojenie zosilňovača TPA3244 je znázornené na obrázku 3.8.



Obr. 3.8: Schéma zapojenia napájania a pomocných signálov zosilňovača TPA3244.

Poslednou časťou zapojenia boli zosilnené signály z výstupov TPA3244, z ktorých bolo potrebné odfiltrovať vyššie frekvenčné zložky keďže sa jednalo o PWM zosilnenie, viac popísané v sekcii 1.2.3. Táto filtrácia bola realizovaná použitím LC filtrov navrhnutými výrobcou, ktoré boli pre jednotlivé zapojenia popísané v katalógovom liste. Keď je výstup výkonového stupňa nízky, bootstrap kondenzátor (OUT_C1, 2, 7, 8) sa nabíja cez kolíky bootstrapového obvodu (BST). Keď je výstup výkonového stupňa vysoký, potenciál bootstrapového kondenzátora sa zvýši nad výstupný potenciál a tak poskytuje vhodné napájanie pre výstupný mostík [32]. Výsledné zapojenie je znázornené na obrázku 3.9.



Obr. 3.9: Schéma zapojenia výstupnej časti zosilňovača TPA3244.

3.1.5 Návrh zdrojov pre napájacie napätia

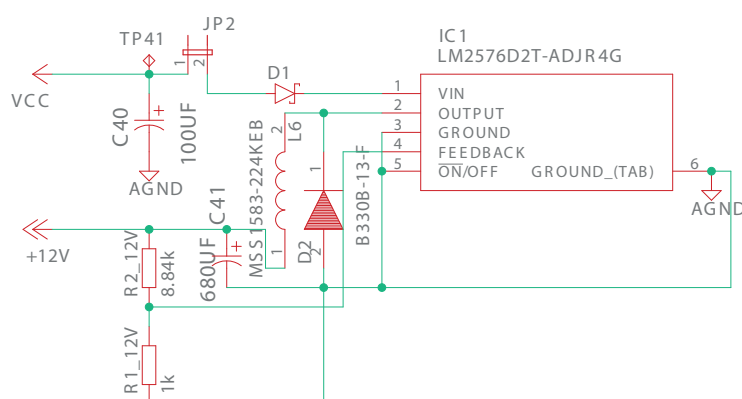
Poslednou súčasťou návrhu dosky plošného spoja bolo riešenie regulácie a stabilizácie viacerých napájacích napätí pre jednotlivé súčiastky a ich funkčnosť. Hlavné napájacie napätie DPS nadobúda hodnoty 30 V a je určené predovšetkým pre napájanie zosilňovača TPA3244. Pre ostatné aktívne prvky, ktoré potrebujú iné hodnoty napájacieho pracovného napätia, ako je hlavné, bolo potrebné realizovať reguláciu. Jednalo sa o napájanie operačných zosilňovačov NE5532, vrátane ich pomocných signálov, napájanie DA prevodníka PCM1791 a regulátora hlasitosti PGA4311, a možnosť napájania SBC Raspberry Pi. Po preriešení všetkých potrebných napätových a výkonových hodnôt bola vytvorená dvojstupňová DC-DC regulácia.

V prvom stupni sme realizovali reguláciu z napájacieho napätia 30 V na 12 V, s výkonom 36 W pomocou spínaného regulátora LM2576 od výrobcu Texas Instruments, ktorého funkčnosť je popísaná v sekcii [2.1.2](#). Pre jeho výstupné napätie 12 V sme vytvorili odporový mostík z jeho spätnej väzby, kde sme zvolili odpor R1_12V na hodnotu 1 k Ω a dopočítali hodnotu R2_12V rovnicou [3.3](#) z katalógového listu [34](#).

$$R2 = R1 * \left(\frac{V_{vyst}}{V_{ref}} - 1 \right), \quad (3.3)$$

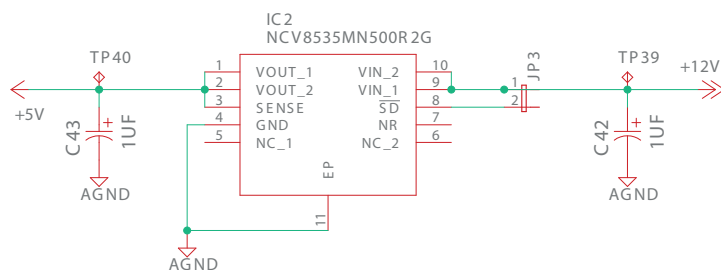
pričom $V_{ref} = 1,23 V$, a $V_{vyst} = 12 V$.

Hodnota odporu bola zaokrúhlená na $R2_{12V} = 8,8 k\Omega$, a bolo potrebné zvolit Schottkyho diódu pre 3 A prúd v závernom smere a induktorovo-kapacitnú filtráciu výstupného spínaného napätia podľa napájacieho napätia a prúdu. Hodnota induktora bola stanovená na $220 \mu H$, a kapacitára na hodnotu $680 \mu F$ podľa návodu v katalógovom liste výrobcu [34]. Celkové výsledné zapojenie je zobrazené na obrázku 3.10.



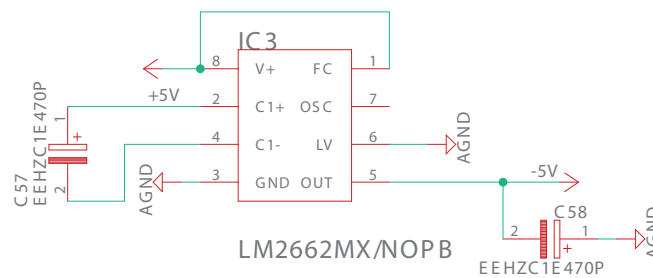
Obr. 3.10: Schéma zapojenia DC/DC regulátora z 30 V na 12 V pomocou LM2576.

V druhom stupni sme regulovali 12 V výstupné napätie z LM2576 na hodnotu 5 V, pre napájanie DA prevodníka PCM1791A a regulátora hlasitosti PGA4311. Táto regulácia bola pomerne jednoduchšia a využili sme regulátor NCV8535 od výrobcu ON Semiconductor v jeho základnej konfigurácii pre 5 V výstupné napätie s typizovaným výstupným prúdom 700 mA [35]. Celkové zapojenie je znázornené na obrázku 3.11.



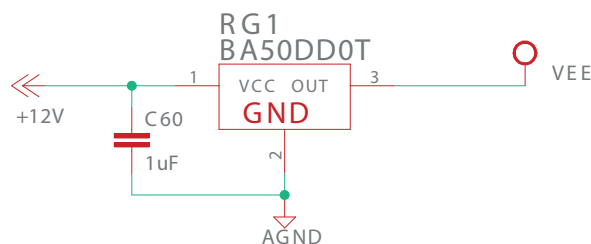
Obr. 3.11: Schéma zapojenia DC/DC regulátora z 12 V na 5 V pomocou NCV8535.

Regulátor hlasitosti PGA4311 zároveň potreboval symetrické napájanie, čiže aj negatívnu úroveň napätia, ktoré bolo realizované spínaným konvertorom LM2662 od firmy Texas Instruments v invertorovom zapojení. Výstupný prúd konvertora podľa výrobcu nadobúda dostatočných 200 mA. Zapojenie využíva dvoch kapacitorov s rovnakými hodnotami $47\ \mu\text{F}$ a nízkou ekvivalentnou sériovou rezistanciou (ESR) do $0,2\ \Omega$ [36]. Taktiež bolo potrebné zmeniť jeho pôvodnú spínicu frekvenciu, ktorá v základnom zapojení nadobúda hodnoty 20 kHz, na vyššiu frekvenciu mimo frekvencií zvukových signálov, aby sa predišlo vzniku rušenia. Túto zmenu sme realizovali podľa katalógového listu pomocou pripojenia pinu FC na napájaciu úroveň signálu (5 V) a spínicia frekvencia bola zvolená na hodnotu 150 kHz [36]. Výsledné zapojenie je znázornené na obrázku 3.12.



Obr. 3.12: Schéma zapojenia DC/DC invertora LM2662.

Poslednou reguláciou bolo vytvorené napájanie pre riadiacu jednotku SBC Raspberry Pi. Táto regulácia bola oddelená od napájania obvodov na doske plošného spoja. Výrobca odporúča napájanie RPi zariadenia 5 V s prúdom 2,5 A, na stránkach je ale pre konkrétny typ Raspberry Pi Zero W 2 spomenutý prúd 1,5 až 2 A. Pre napájanie bol zvolený regulátor BA50DD0T od výrobcu ROHM Semiconductor s fixným výstupným napätím 5 V a maximálnym prúdom 2 A [37], ktorý je dostatočný pre napájanie riadiacej jednotky. Zapojenie je zobrazené na obrázku 3.13.



Obr. 3.13: Schéma zapojenia regulátora BA50DD0T pre napájanie Raspberry Pi.

Celková schéma obsahujúca jednotlivé bloky popísané v tejto aj predošlých častiach práce, vrátane pomocných obvodov sa nachádza v prílohe tejto práce.

Hlavné napájanie

Súčasťou zariadenia bol taktiež výber zdroja celkového napájania. Pri návrhu zariadenia sme realizovali hlavné napájacie napätie o veľkosti 30 V a potrebný prúd určený výkonom zosilovača a minimálnym príkonom pre napájanie Raspberry Pi. Tieto hodnoty bolo potrebné zároveň naddimenzovať, v prípade skokového príkonu pri štarte zariadenia – nabíjanie stabilizačných kondenzátorov. Po myšlienke návrhu vlastného zdroja napájania, ktorý mal realizovať reguláciu zo sieťového striedavého napájania 230 V na potrebné jednosmerné napätie 30 V s prúdom minimálne 10 A, sme dospeli k časovo a cenovo nerealizovateľnému záveru.

Hlavný zdroj sme preto realizovali výberom už hotového zariadenia od firmy Mean Well. Konkrétne sa jednalo o uzatvorený spínaný zdroj s označením RSP-320-27, ktorý disponuje nastaviteľnou úrovňou výstupného napätia v rozmedzí od 26 V do 31,5 V a výstupným prúdom o veľkosti 11,9 A.



Obr. 3.14: Hlavný napájací zdroj.

3.2 Riadiaca platforma prototypu

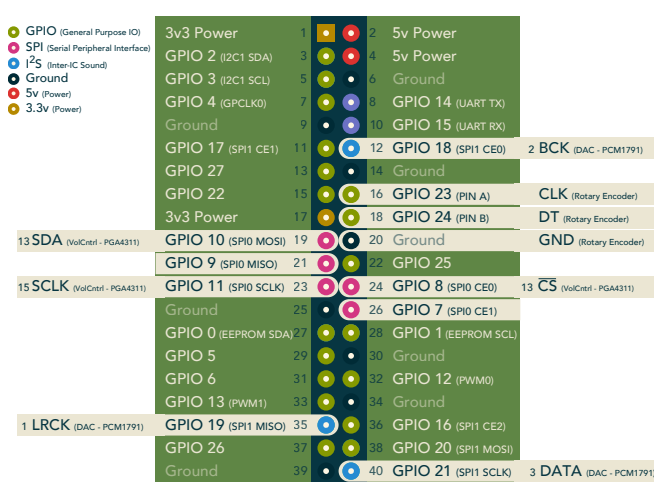
Sekcia [3.2](#) je zameraná na konkrétny výber riadiacej jednotky SBC Raspberry Pi. Vychádzajúc z časti [2.2](#) sekcia popisuje vybraný model riadiacej jednotky a zobrazuje hardvérové prepojenia GPIO konektorov s doskou plošného spoja a s rotačným enkodérom. Sekcia [3.2.2](#) približuje konfiguráciu webovej platformy Volumio vrátane kódových výpisov a sekcia [3.2.3](#) približuje problematiku rotačných enkodérov vrátane kódovej implementácie pre riadenie periférie SPI.

3.2.1 Raspberry Pi Zero 2 W

Ako bolo spomenuté v sekcii [2.2](#), SBC od výrobcu Raspberry Pi ponúka na výber viacero možných konfigurácií odlišujúcich sa vo výkone, perifériách a taktiež cene. Pre naše účely bolo potrebné zvoliť riadiacu jednotku, disponujúcu sériovými komunikačnými linkami SPI a predovšetkým zvukovou perifériou I^2S . Zariadenie musí taktiež obsahovať moduly pre možnosť bezdrôtového pripojenia a konfigurácie.

Raspberry Pi Zero 2 W je momentálne najnovším produktom od Raspberry Pi. Produkt disponuje 4-jadrovým procesorom s frekvenciou 1 GHz a 512 MB operačnej pamäte. Hlavným prínosom a zároveň dôvodom použitia konkrétneho typu SBC sú jeho bezdrôtové periférie 2.4 GHz 802.11 b/g/n WiFi a Bluetooth 4.2, vrátane podpory pre Bluetooth Low Energy (BLE). Na doske s rozmerom 65x30 mm sa okrem konektorov pre USB, HDMI a slotu pre microSD kartu nachádzajú piny GPIO, ktoré sú pre našu prácu prepojitelné s navrhnutým zariadením dosky plošného spoja a rotačného enkodéra.

Výsledné prepojenie GPIO konektorov Raspberry Pi s jednotlivými konektormi na doske plošného spoja a rotačného enkodéra je znázornené na obrázku [3.15](#).



Obr. 3.15: Konektorové prepojenie zariadení s GPIO.

Výber multifunkčnej softvérovej platformy

Po zvolení konkrétneho modelu SBC Raspberry Pi Zero 2 W bolo potrebné aplikovať výber softvérového rozhrania, ktoré muselo zabezpečiť viacero dôležitých funkcií. Pri výbere sme skúmali možnosti vytvorenia vlastného webového rozhrania alebo aplikácie, ktorá by realizovala prehrávanie streamovaného zvukového obsahu, vrátane obsluhy hlasitosti a pokročilej ekvalizácie.

Po inštalácii potrebných balíčkov a knižníc pre získavanie streamovaného obsahu pomocou služieb ako Spotifyd, Raspotify a pod. sme však často nachádzali problém s pokročilou linuxovou zvukovou architektúrou (ALSA), ktorá nespolupracovala s použitými softvérovými službami pre získavanie streamovaného zvukového obsahu. Druhým bodom bolo skúsenie vloženia ekvalizácie, kde sme zvolili použitie ALSA mixer pluginu. Tento spôsob realizácie softvérového rozhrania však nebol stabilný a po stálom zisťovaní chýb pri komunikácii medzi streamovacou službou Spotifyd a ALSA zvukovým rozhraním, ktoré sme prekonfigurovali do podoby výstupu vo forme sériovej periférie I^2S , sme sa rozhodli nájsť vhodnejšie riešenie.

Sústredili sme sa na služby určené predovšetkým pre zvukové sieťové služby, ktoré boli vnútorne stabilne nakonfigurované, ponúkali vlastné webové rozhranie, a realizovali viaceré možnosti získavania streamovaného obsahu (Spotify, Tidal, SoundCloud, WebRadio). Softvérové rozhranie služby taktiež muselo realizovať spomínanú pokročilú ekvalizáciu a možnosti konfigurácie výstupu v podobe sériovej linky pre digitálny vklad zvukových dát do DA prevodníka na doske plošného spoja.

Jednalo sa o platformy ako KODI, Mopidy, OpenELEC, piCorePlayer, MoOde a Volumio. Nie všetky služby ale ponúkali možnosti voľnej neplatenej licencie alebo nedisponovali výstupom vo forme zvukovej sériovej linky I^2S . Vyskúšali sme nakoniec dve serverové softvérové platformy MoOde a Volumio z ktorých stabilnejšie, programátorsky aj užívateľsky výhodnejšie bolo použitie služby Volumio.

3.2.2 Implementácia platformy Volumio

Nasledujúca časť práce je zameraná na základný postup pri implementácii platformy Volumio na SBC Raspberry Pi Zero 2 W. Text v stručnosti popisuje inštaláciu a nastavenie platformy pre použitie zvukového výstupu s DA prevodníkom PCM1791 a dodatočné vloženie pluginov pre pokročilú ekvalizáciu a streamovacie služby.

Volumio

Volumio je voľná a Open Sourceová Linuxová distribúcia navrhnutá výhradne pre získavanie a prehrávanie hudby, ktorú je možno implementovať na rôzne nízko výkonové zariadenia ako je Raspberry Pi a jej ovládanie je realizované pomocou iných zariadení na sieti cez webové rozhranie alebo pomocou mobilnej aplikácie.

Volumio disponuje integráciou zvukových služieb ako Spotify, Tidal Connect, web-Radio, SoundCloud a taktiež ponúka využitie pamäte zariadenia pre vloženie vlastnej knižnice skladieb a albumov. Dôležitou súčasťou je taktiež podpora rozšírení pomocou Plugin systému, ktorý okrem vlastných a verejných pluginov v Github repozitároch distribúcie ponúka možnosť tvorby vlastného pluginu.

Konfigurácia

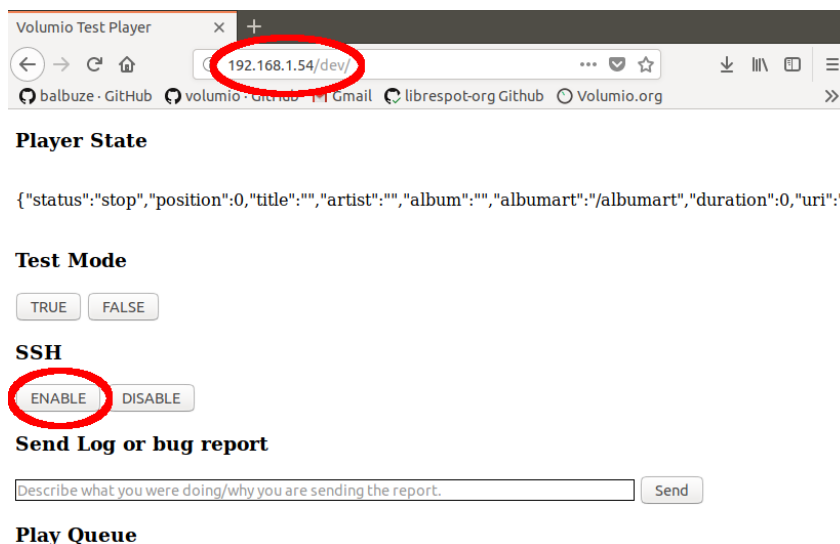
Po stiahnutí konkrétnej boot sekvencie (ver. 3.251) na oficiálnej stránke autora Volumio a inštalácii na Raspberry Pi bolo potrebné platformu pripojiť na lokálnu sieť pre možnosť jej ovládania. Po dokončení základného nastavenia bolo možné pripojenie cez webové rozhranie na lokálnej adrese zariadenia, ktorú možno zistiť na pripojených zariadeniach routra. Grafické užívateľské prostredie (GUI) hlavnej obrazovky je znázornené na obrázku [3.16](#).



Obr. 3.16: GUI hlavnej obrazovky webovej platformy Volumio.

Nastavenie prebiehalo v záložke Settings, v ktorej sme zvolili výstupné zariadenie ako DAC a keďže sa konkrétny model nášho prevodníka v databáze nenachádzal, skúsili sme viacero ponúkaných alternatív, z ktorých sme nakoniec zvolili najpoužívanejší podobný prevodník pod názvom zariadenia Hifiberry DAC. Taktiež sme realizovali nastavenie streamovacích periférií Spotify a SoundCloud v záložke Plugins. V tejto záložke sme skúšali taktiež ponúkané ekvalizéry, avšak ich použitie nebolo na dostatočnej úrovni (nesplňali zadanie práce – ekvalizácia kanálov separátne a nezávisle od seba), napokon sme našli vhodný ekvalizér označený ako *FusionDsp*, ktorý ale bolo potrebné vložiť pomocou príkazového terminálu využitím vzdialeného prístupu priamo do SBC Raspberry Pi.

Pre zapnutie pokročilého nastavenia pomocou vzdialeného prístupu (SSH) do Raspberry Pi cez príkazový terminál bolo potrebné pomocou webového rozhrania na (routerom špecificky danej) URL adrese zariadenia v záložke *dev* povoliť prístup do SSH. Toto povolenie je znázornené na obrázku [3.17](#).



Obr. 3.17: Povolenie vzdialeného prístupu.

Po tomto nastavení (a reštartovaní zariadenia) bolo možné pripojenie pomocou príkazového terminálu, na ktorom sme nainštalovali plugin pomocou príkazov zobrazených na výpise kódu [3.1](#).

Výpis 3.1: Inštalácia ekvalizéru FusionDSP na platformu Volumio.

```
# Získanie inštalačného súboru z Github repozitáru autora.  
$ wget https://github.com/balbuze/volumio-plugins/raw/alsa_modular/plugins/  
  audio_interface/FusionDsp/fusiondsp.zip  
# Vytvorenie zložky, rozbalenie súboru a jeho inštalácia.  
$ mkdir fusion  
$ miniunzip fusiondsp.zip -d ./fusion $ cd fusion  
$ volumio plugin install  
$ cd ..  
# Odstránenie inštalačného súboru.  
$ rm -Rf fusion*
```

Po všetkých konfiguráciách a prihlásení sa do streamovacích služieb pluginov sme vyskúšali ich funkčnosť a nastavenia. Taktiež sme realizovali prípadné nastavenie a softvérovú implementáciu rotačného enkodéra popísanú v kapitole [3.2.4](#).

Plugin pre ovládanie hlasitosti pomocou SPI

Pre funkčnosť sieťového ovládania hlasitosti, ktorá bola realizovaná pomocou kontroléra PGA4311 využitím periférie SPI, bolo potrebné vytvoriť vlastný plugin. Tento plugin umožňoval užívateľom nastaviť hodnotu úrovne hlasitosti a po zmene hodnoty a potvrdení tejto zmeny hodnoty hlasitosti posielal pomocou SPI periférie hodnoty jednotlivéj atenuácie do PGA4311.

Volumio sprístupňuje na oficiálnej webovej stránke podrobný postup pri vytváraní nového pluginu vrátane jeho inštalácie a tvorby grafického prostredia ovládania. Práca popisuje kódové ukážky súboru *index.js*, ktorý zabezpečuje riadenie periférie SPI pomocou užívateľského prostredia. Komunikácia bola realizovaná pomocou knižnice *pi-spi*, ktorá bola využitá programovacím jazykom JavaScript. Po pridaní knižnice do SBC RPi príkazom *npm install pi-spi* sme následne v našom kóde mohli realizovať inicializáciu premenných, ktoré realizujú spojenie pomocou periférie SPI a nastavili prenosovú rýchlosť.

Funkcia, ktorá bola volaná z GUI po potvrdení zmeny hlasitosti bola nazvaná *volumeChanged* a realizovala uloženie hodnoty premennej do databázy *config.json* pod názvom premennej *mg*.

Kódové riešenie je znázornené na výpise [3.2](#).

Výpis 3.2: Volumio plugin – funkcia zabezpečujúca získanie hodnoty z GUI.

```
# Deklarácia a inicializácia premenných pre prenos perifériou SPI.
var SPI = require('pi-spi');
var spi = SPI.initialize("/dev/spidev0.0");
spi.clockSpeed([7629]);
# Funkcia volumeChanged, volaná z GUI pluginu.
SPIvolumecontrol.prototype.volumeChanged = function (data) {
  var self = this;
  var defer = libQ.defer();
  # Uloženie hodnoty premennej mg do konfiguračného súboru config.json.
  self.config.set('mg', data['mg']);
  self.logger.info('Configurations of volume have been set');
  # Volanie funkcie rebuildvolSPI ktorá realizuje prenos.
  self.rebuildvolSPI()
    .then(function (e) {
      // self.commandRouter.pushToastMessage('success', "Bauer Configuration
        updated");
      defer.resolve({});
    })
    .fail(function (e) {
      defer.reject(new Error('error'));
      // self.commandRouter.pushToastMessage('error', "failed to start. Check
        your config !");
    })
  return defer.promise;
};
```

Z funkcie *volumeChanged* bolo po jej volaní aktualizované GUI a realizované volanie funkcie *rebuildvolSPI*, ktorá mala úlohu konverzie textového reťazca s hodnotou zvolenou užívateľom na numerickú hodnotu. Táto hodnota bola po skúške funkčnosti numericky prispôbená, aby bolo možné meniť výslednú hladinu zvukového signálu od minimálnej hodnoty po maximálnu prípustnú v závislosti na vstupe zosilňovača TPA3244. Taktiež bola zavedená korekcia pre nízko-frekvenčný reproduktor, ktorého vstupný signál do kotroléru hlasitosti bol úrovňovo nižší v dôsledku filtrácie. Hodnoty po korekcii boli vložené a odoslané po periférii SPI.

Kódové riešenie je znázornené na výpise [3.3](#).

Výpis 3.3: Volumio plugin – funkcia riadiaca kontrolér hlasitosti perifériou SPI.

```
SPIvolumecontrol.prototype.rebuildvolSPI = function () {
  var self = this;
  var defer = libQ.defer();

  # Prevod textového reťazca do numerickej podoby.
  var outputLR = parseInt(self.config.get('mg'));
  # Korekcie v závislosti od výstupu kontroléra hlasitosti.
  outputLR += 100;
  var outSub = outputLR + 15;

  # Vytvorenie odosielaného reťazca.
  var output = Buffer.from([outSub, outSub, outputLR, outputLR]);

  # Prenos vytvoreného reťazca perifériou SPI.
  spi.transfer(output, output.length, function (e,d) {
    if (e) console.error(e);
    else console.log("Got \""+d.toString()+"\" back.");

    if (output.toString() === d.toString()) {
      self.logger.info(msg);
    } else {
      // NOTE: this will likely happen unless MISO is jumpered to MOSI
      self.logger.info(msg);
      process.exit(-2);
    }
  });
  return defer.promise;
};
```

Tvorba pluginu okrem zobrazených funkcií obnášala vytvorenie grafického prostredia, databázy hodnôt a jazykového prekladu. Tieto časti sa opakujú pri tvorbe každého pluginu a sú popísané na stránke repozitára Volumio.

Korekcie jednotlivých hladín hlasitosti boli realizované na základe výsledkov z merania nachádzajúceho sa v kapitole [4](#). Hladinu hlasitosti bolo taktiež možné meniť aj rotačným enkodérom popísaným v sekcii [3.2.3](#), tieto dve kódové implementácie sa navzájom nerušili, keďže bola vždy vysielaná len hodnota, ktorá sa nachádzala v rozmedzí zmeranej hladiny napätia.

3.2.3 Rotačný enkodér

Sekcia 3.2.3 sa zameriava na vysvetlenie funkcionality a zapojenia rotačného enkodéra, ktorý je použitý ako fyzické ovládanie hlasitosti zariadenia. Sekcia obsahuje základné poznatky z problematiky rotačných enkodérov, ich rozdelenie, zapojenie a finálny softvérový výpis kódu pre priame použitie ako ovládanie zmeny hlasitosti pomocou volume kontroléra PGA4311.

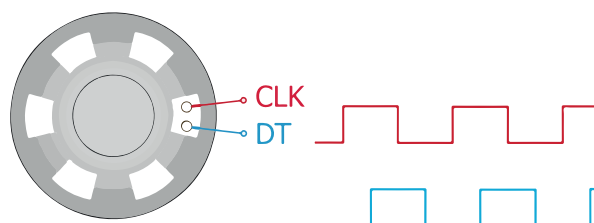
Rotačný enkodér je elektro-mechanické zariadenie slúžiace pre detekciu polohy a rýchlosti pomocou konverzie mechanického rotačného pohybu na elektrický signál vrátane jeho spracovania.

Rotačné enkodéry je možno rozdeliť na dva typy:

- absolútne – snímajú presnú hodnotu polohy z N možných polôh natočenia,
- inkrementálne – snímajú len smer otáčania (hodnota polohy je realizovaná softvérovo).

Pre naše použitie ovládania hlasitosti bol zvolený inkrementálny enkodér, ktorý disponuje tromi prípojnými pinmi pre signálové spracovanie označenými ako A, B a C, na ktorých sa odoberajú signály pre detegovanie polohy nasledovne. Pin C je pripojený na signál uzemnenia GND a ku pravidelne dierovanému rotačnému disku enkodéra. Pin A realizuje generovanie štvorcového časového signálu CLK, ktorý vzniká otáčaním enkodéra, pričom sa dotýka pravidelne dierovaného disku a tým spína vysokú a nízku úroveň signálu. Pin B s označením ako signál DT je mechanicky posunutý oproti signálu CLK o 90°, a pri otáčaní taktiež generuje pravidelný signál na základe plôch dierovaného disku. V závislosti od otáčania a generovaním hodnôt signálov CLK a DT je možné detegovať smer otáčania princípom porovnania stavov signálov. Ak signál CLK pri otáčaní zmení stav (z nízkej úrovne na vysokú alebo naopak) a tento stav nie je rovnaký, ako je stav signálu DT, jedná sa o otáčanie po smere hodinových ručičiek. Ak je ale stav signálu CLK zhodný so stavom signálu DT, jedná sa o otáčanie proti hodinovým ručičkám.

Vizualizácia rotačného enkodéra je znázornená na obrázku 3.18.



Obr. 3.18: Generovanie signálov pomocou rotačného enkodéra.

3.2.4 Implementácia ovládania hlasitosti

Realizácia komunikácie rotačného enkodéra s kontrolérom pre ovládanie hladiny hlasitosti PGA4311 bola tvorená pomocou Raspberry Pi. Vychádzajúc zo sekcie [3.1.3](#), ktorá popisuje kontrolér hlasitosti a ponúka digitálnu 3-vodičovú komunikáciu a sekcie [2.2.1](#), ktorá popisuje 3-vodičovú perifériu pre riadenie – SPI, realizovateľnú pomocou GPIO rozhrania na Raspberry Pi, bolo potrebné prepojiť tieto dve zariadenia hardvérovo, čo realizuje zobrazenie na obrázku [3.15](#), a následne realizovať softvérovú komunikáciu.

Jednalo sa o vytvorenie kódu v programovom jazyku Python, ktorý realizoval snímanie zmeny polohy rotačného enkodéra v závislosti na smere otáčania a paralelne zápis do komunikácie s perifériou SPI pre riadenie ovládania hlasitosti.

Prvým krokom bolo povolenie periférie SPI a pridanie knižníc pre zabezpečenie komunikácie s Raspberry Pi . Príkazy pre povolenie periférie a inštaláciu knižníc sú zobrazené na výpise kódu [3.4](#).

Výpis 3.4: Pridanie periférie a knižníc pre použitie periférie SPI.

```
# Aktualizačné príkazy
$ sudo apt-get update
$ sudo apt-get upgrade

# Pre povolenia SPI je potrebné modifikovať konfiguračný súbor config.txt
$ sudo nano /boot/config.txt

# Do súboru je potrebné pridať príkaz pre povolenie periférie SPI
dtparam=spi=on

# Následné pridanie knižníc
$ sudo apt-get install -y python-dev python3-dev
$ sudo apt-get install -y python-spidev python3-spidev
$ cd ~
$ git clone https://github.com/doceme/py-spidev.git
$ cd py-spidev
$ make
$ sudo make install

# Po inštalácii je potrebný reštart zariadenia
```

Náš kód sme vytvorili a pomenovali pomocou príkazu `sudo nano rotate.py` a keďže bolo potrebné, aby sa automaticky vždy pri zapnutí zariadenia tento kód samostatne uviedol do funkčnosti, pridali sme mu práva a vložili ho do takzvaného cron skriptu, ktorý zabezpečuje pravidelné spustenie programov. Vloženie pravidelne spustiteľného kódu pri boot sekvencii zariadenia do cron skriptu je znázornené na výpise kódu [3.6](#). Pred jeho vloženíím do samo spustiteľného skriptu sme najskôr realizovali jeho funkčnosť, ktorá je znázornená na výpise kódu [3.5](#).

Výpis 3.5: Ovládanie periférie SPI pomocou rotačného enkodéra.

```
# Vloženie potrebných knižníc.
import time
import spidev
import gpiozero
# Deklarácia a inicializácia premenných.
val = 100
min = 100
max = 200
# Konfigurácia GPIO pinov pripojených k enkodéru.
PIN_A = 23
PIN_B = 24
# Vytvorenie komunikácie SPI
spi = spidev.SpiDev()
spi.open(0,0)
spi.max_speed_hz = 7629

class App():
    def __init__(self):
        # Priradenie pinov GPIO.
        self.button_a = gpiozero.Button(PIN_A, pull_up=True)
        self.button_b = gpiozero.Button(PIN_B, pull_up=True)
        self.button_a.when_activated=self.pin_a
    def pin_a(self, b):
        global val
        """
        Toto je volané, ak sa točí enkodérom.
        """
        if not self.button_b.is_pressed:
            print('Up')
            val += 1
            if val >= max:
                val = max
            val2 = val + 15
            spi.xfer([val2, val2, val, val])
            print(val, val2)
        else:
            print('Down')
            val -= 1
            if val <= min:
                val = min
            val2 = val + 15
            spi.xfer([val2, val2, val, val])
            print(val, val2)
    def go(self):
        # Nekonečný cyklus pri otáčaní.
        while(1):
            time.sleep(0.01)

# Spustenie aplikácie.
if __name__ == '__main__':
    app = App()
    app.go()
```

Hodnoty minima a maxima pri točení enkodérom vychádzajú z nameraných hodnôt zobrazených vo výsledkoch merania a sú prispôbené plynulému meneniu hladiny hlasitosti pomocou rotačného enkodéra.

Výpis 3.6: Automatické spustenie kódu pomocou crone skriptu.

```
# Vytvorenie a otvorenie súboru crone skriptu.  
$ crontab -e  
  
# Vloženie cesty na ktorej sa nachádza náš kód vrátane nastavenie jeho spustenia  
  pri zapnutí.  
@reboot python /home/volumio/src/rotate.py &  
  
# Po modifikácii skriptu je potrebné jeho uloženie a reštart zariadenia.
```

Po odskúšaní viacerých prenosových rýchlostí periférie SPI, sme zvolili nakoniec najmenej problematickú o hodnote 7629 Hz, pri rýchlejšej komunikácii prichádzalo k zníženiu reakcie závislosti točenia enkodérom a ovládania hlasitosti. Kód sa spustil pravidelne pri zapnutí zariadenia.

4 Zhodnotenie a výsledky merania

Výsledkom realizácie zosilňovača s funkciou sieťového prehrávania a ekvalizácie bola snaha o vytvorenie zariadenia s viacerými možnosťami využitia v bežných obytných budovách, kanceláriách či prevádzkach. Navrhnutým riešením je zariadenie zložené z dosky plošného spoja, na ktorej sa nachádzajú všetky signálové operácie ako prevod z číslicovej oblasti do digitálnej, filtrácia, korekcie hlasitosti a amplifikácia. Zároveň doska ponúka všetky regulácie napájacích napätí. Druhou časťou pre riešenie riadenia a ovládania zariadenia bol navrhnutý SBC Raspberry Pi, nakonfigurovaný pre prepojenie s doskou plošného spoja a vloženie streamovaného obsahu vrátane ekvalizácie.

Pri realizácii navrhnutého zariadenia sme postupovali najprv oživením napájacej časti dosky plošného spoja, kde sme meraním detegovali správne výstupné napätie navrhnutého spínaného regulátora LM2576 o úrovni 12,2 V. Podobne sme merali výstupné napätie regulátora NCV8535, ktorého úroveň nadobúdala hodnoty približne 6,7 V napriek očakávanému napätiu 5 V. Súčiastka bola taktiež na internetových fórach popisovaná za menej spoľahlivú a rozhodli sme sa ju dočasne nahradiť prístupným regulátorom LM7805. Týmto sme docielili vhodnej napájacej úrovne napätia s hodnotou 5 V. Invertor LM2662 bol taktiež zameraný s výstupnou hodnotou napätia -4,98 V, ktorá bola vyhovujúca pre napájanie kontroléra hlasitosti PGA4311.

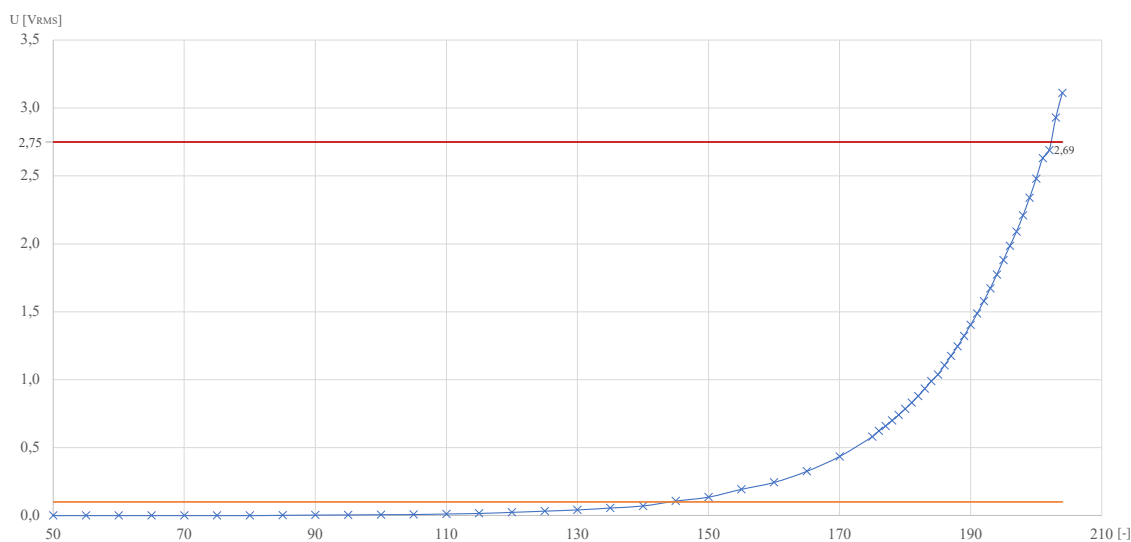
Ďalšou časťou bolo oživenie regulátora hlasitosti PGA4311, ktorý spočiatku nerealizoval svoju funkčnosť, z dôvodu nepripojenému pinu MUTE. Pin bol aktívny pri nulovom napätí a neaktívny pri napájacom napätí (5 V), ktoré sme k nemu priviedli pomocou prepojenia použitím rezistora o hodnote 4 k Ω .

Podobne sme realizovali oživenie DA prevodníka PCM1791, pri ktorom sme taktiež v návrhu zabudli pripojiť v tomto prípade resetovací pin (RST). Pomocou prespájkovania RST pinu sa nám podarilo úspešne uviesť prevodník do funkčnosti.

Nasledovalo oživenie hlavného zosilňovača TPA3244. Zosilňovač sme pripojili na napájacie napätia a pomocou pinu pre detegovanie chýb ako prehriatie a nízku alebo vysokú úroveň vstupných signálov (pin CLIP_OTW) a pinu pre detegovanie iných chýb (pin FAULT) sme sa snažili uviesť zosilňovač do prevádzky. Taktiež sme aj pri návrhu schémy zapojenia zosilňovača zabudli pripojiť resetovací pin (RST), a po jeho pripojení fungovali výstupné časti zosilňovača (piny BSD_X) a taktiež začal fungovať interný regulátor napätí DVDD a AVDD. Zároveň sme narazili na problém jednosmernej DC zložky signálu na vstupoch zosilňovača, táto zložka bola odstránená pridaním DC blokovacích kondenzátorov nielen pred kontrolérom PGA4311, ale aj za jeho signálovú cestu. Pomocou laboratórneho generátora vstupného signálu sme sa snažili uviesť zosilňovač do prevádzky, avšak proces nebol z dôvodu času ukončený.

4.1 Výsledky merania regulácie hlasitosti

Práca napriek tomu ponúka softvérovú implementáciu, ktorá bola odskúšaná jej autorom a na jej základe realizuje výsledky nameraných hodnôt regulácie hlasitosti použitím zariadenia PGA4311, ktorý bol riadený SBC Raspberry Pi pomocou periférie SPI. Na základe tohto merania boli zvolené maximálne a minimálne napätové úrovne ovládaním pomocou rotačného enkodéru alebo webovej platformy Volumio.

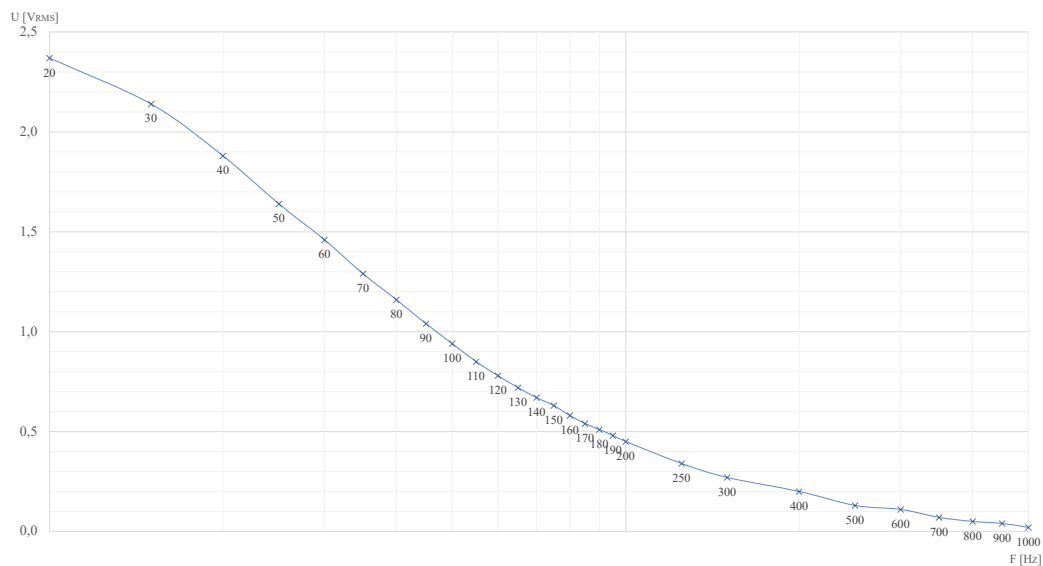


Obr. 4.1: Závislosť výstupného napätia od vstupnej numerickej hodnoty.

Ako minimálna úroveň napätia bola zvolená hodnota 0,007 V, ktorá predstavovala numerickú interpretáciu číslom 100. Maximálna úroveň bola zameraná v závislosti na maximálnom vstupnom napätí zosilňovača čo bolo 3,9 V_{peak}, čiže cca. 2,75 V_{rms}. Táto úroveň sa prekročila numerickou hodnotou 202, ktorá realizovala výstupné napätie o veľkosti 2,69 V_{rms}. Túto hodnotu sme však radšej z bezpečnostných dôvodov znížili na úroveň 2,48 V_{rms} ktorému odpovedala hodnota 200. Meranie bolo realizované pomocou výstupu DA prevodníka pri jeho maximálnom softvérovom nastavení úrovne hlasitosti bez použitia ekvalizácie pomocou ružového šumu. Hodnota tohto vstupného napätia bola cca 1,46 V_{rms}. Meranie bolo zopakované pomocou laboratórneho generátora s nastavením sínusového priebehu o frekvencii 1 kHz s úrovňou výstupného napätia 2,2 V_{pp}, čiže 1,56 V_{rms}, ktorá je bežná pre linkový výstup zariadení s 3,5 mm jack konektorom.

4.2 Výsledky merania filtrácie

Návrhom analógovej filtrácie pre basový reproduktor sme realizovali oddelenie tejto spektrálnej časti signálu pre možnosť digitálnej ekvalizácie a tým doladenie nízko-frekvenčného reproduktora. Tento navrhnutý filter tretieho rádu pri oživení vykazoval veľmi nízke výstupné hladiny napätia z dôvodu vstupných odporov pri sčítacom zosilňovacom zapojení o hodnote $100\text{ k}\Omega$, tieto hodnoty odporov sme znížili na veľkosť $10\text{ k}\Omega$, pri ktorých sme namerali priebeh dolno-priepustného filtra tretieho rádu.



Obr. 4.2: Napätová závislosť dolno-priepustnej filtrácie na frekvencii.

Meranie bolo realizované pomocou laboratórneho generátora s výstupnou úrovňou sínusového signálu o veľkosti $2,48\text{ Vrms}$. Výsledný priebeh splnil očakávania a filter navrhnutý autorom práce bol funkčne zmeraný.

Taktiež boli uskutočnené merania DA prevodníka v závislosti na nastavení ekvalizácie. Pri meraniach prichádzalo k občasným výpadkom komunikácie s platformou Volumio, avšak spojenie bolo odskúšané. Prototyp zariadenia je v rozpracovanom stave, autor práce rieši jeho dokončenie pomocou technickej podpory výrobcov.

5 Záver

Cielom tejto diplomovej práce bolo navrhnuť a vytvoriť prototyp zariadenia zosilňovača s funkciou sieťového prehrávania a ekvalizácie. Jeho prednosťou je bezdrôtová komunikácia pre získavanie zvukového obsahu, možnosť ovládania ekvalizácie a softvérovej aj hardvérovej hlasitosti pomocou softvérovej streamovacej platformy.

Práca predkladá teoretický základ z oblasti spracovania zvukových signálov v analógovej aj číslicovej oblasti, popisuje základné vlastnosti z oblasti zvukových zosilňovačov, digitálne analógových prevodníkov, filtrácie, digitálneho ovládania hladiny hlasitosti, napájacích regulátorov a približuje využitie jednodoskového počítača Raspberry Pi, ako prístupný bod pre bezdrôtový zvukový obsah.

Vychádzajúc z teoretických podkladov práca vytvára blokový diagram vrátane popisu signálového prepojenia jednotlivých blokov, opisuje ich funkčnosť a následne komplexne navrhuje dosku plošného spoja, na ktorej popisuje a schematicky znázorňuje zapojenia jednotlivých častí a použitých súčiastok vrátane potrebných výpočtov. Text taktiež ponúka implementáciu softvérovej platformy pre získavanie streamovaného obsahu vrátane jeho ekvalizácie, kódové riešenia ovládania hladín hlasitosti a prepojenia s doskou plošného spoja.

Výsledkom diplomovej práce je návrh a realizácia prototypu zariadenia audio zosilňovača, ktorý poskytuje vloženie zvukového obsahu v podobe digitálneho signálu cez jednodoskový počítač Raspberry Pi, alebo 3,5mm jack konektor v podobe analógového signálu. Zvukový signál je separátne spracovaný pre hlboko tónový reproduktor a dva reproduktory pre stereo poslech. Práca popisuje ovládanie zvukovej hladiny prostredníctvom webovej platformy alebo rotačným enkodérom. Použitý zosilňovač ponúka výstupy pre dva reproduktory s výkonom 30 W pri záťaži $4\ \Omega$, a separátny výstup pre hlboko tónový reproduktor napájaný symetricky s výkonom 110 W pri záťaži $4\ \Omega$ alebo výkonom 60 W pri záťaži $8\ \Omega$. Práca popisuje softvérovú implementáciu platformy pre zvukové streamovanie vrátane kódových výpisov pre ovládanie hlasitosti a ekvalizáciu.

Autor práce vychádzajúc z uskutočnených meraní a funkčnej softvérovej implementácie jednotlivých kódov berie návrh a realizáciu prvého prototypu zariadenia ako teoretický a praktický príklad tvorby nového zariadenia pre streamovanie hudobného obsahu vrátane filtrácie, regulácie hlasitosti a ekvalizácie. Text zároveň približuje postupy pri návrhu napájacích obvodov a regulácií a ponúka pomerne široký prehľad hudobných streamovacích platforiem, ktoré boli odskúšané. Práca popisuje zhodnotenie dosiahnutých výsledkov, vrátane nameraných hodnôt a grafov.

Prílohy tejto práce obsahujú vytvorenú schému dosky plošného spoja, vrátane osadenia súčiastok na hornej a spodnej strane navrhnutého plošného spoja, 3D grafickú vizualizáciu a súpis všetkých použitých súčiastok na doske plošného spoja.

Literatúra

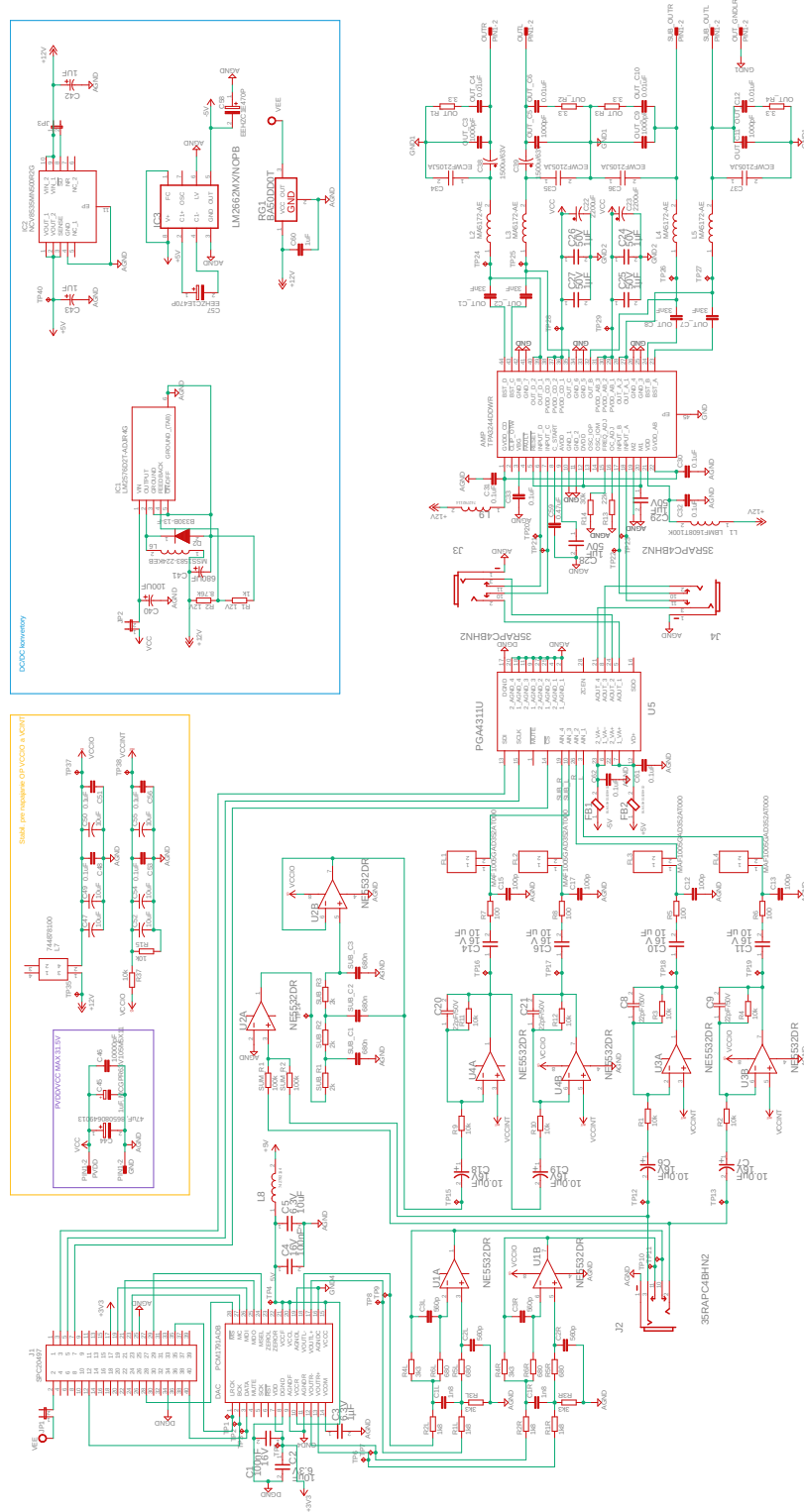
- [1] CORDELL, Bob. *Designing audio power amplifiers*. Second edition. London: Routledge, 2019. ISBN 9781138555440.
- [2] MOORE, Brian C. J. *An Introduction to the Psychology of Hearing*. 2nd Edition. UK: Academic Press, 1982. ISBN 978-0125056229.
- [3] SELF, Douglas. *Audio Power Amplifier Design Handbook*. Fifth Edition. Focal Press, 2009. ISBN 978-0-240-52162-6.
- [4] FIELDER, L. *Dynamic range issues in the Modern Digital Audio Environment*. Journal of the Audio Engineering Society, 1995.
- [5] SCHUBERT, Thomas F. Jr.; KIM, Ernest M. *Fundamentals of Electronics: Book 2 Amplifiers: Analysis and Design*. San Diego: Morgan & Claypool Publishers, 2016. ISBN 9781627055642.
- [6] HAWKSFORD, Malcolm J.; MILLS, P.G.L. *Transconductance Power Amplifier Systems for Current-Driven Loudspeakers*. Journal of the Audio Engineering Society, 1989.
- [7] MALDONADO, Joseph; VEGA, Jeovany. *Senior Project: Class-D Power Amplifier*. Electrical Engineering Department, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2010.
- [8] LEACH, W. Marshall Jr. *Introduction to Electroacoustics and Audio Amplifier Design*. Second Edition. USA: Kendall/Hunt Publishing Co., 2001. ISBN 0-7575-0375-6.
- [9] Pracovné triedy tranzistorov [online]. [cit. 08.11.2021].
Dostupné na:
<<https://ackoo.estranky.cz/clanky/tridy-zesilovacu.html>>
- [10] ZÖLZER, Udo. *Digital audio signals processing*. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-0-470-99785-7.
- [11] KRATOCHVÍL, Tomáš. *Nízkofrekvenční a audio elektronika (BNFE)*. [Prednáška] Brno: FEKT VUT [cit. 08.11.2021].
- [12] HOLDSWORTH, Brian; WOODS, Clive. *Digital Logic Design*. 4th Edition. Great Britain: Newnes, 2002. ISBN 0750645822.
- [13] TERRELL, David L. *Op Amps: Design, Application, and Troubleshooting*. 2nd ed. USA: Elsevier Science, 1996. ISBN 0750697024.

- [14] COMER, Donald T.; COMER, David J. *Encyclopedia of Physical Science and Technology: Analog-Signal Electronic Circuits*. Third Edition. USA: Academic Press, 2003. ISBN 978-0122274107.
- [15] ABRMAN, M. *Nízkofrekvenční D/A převodník pro laboratorní výuku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 90 s., 20 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
- [16] FEACHOR, Emmanuel C.; JERVIS, Barrie W. *Digital signal processing: A practical approach*. 2nd ed. Harlow: Prentice Hall, c2002. ISBN 02-015-9619-9.
- [17] SMĚKAL, Z. *Analýza signálů a soustav – BASS*. Elektronické texty, Brno: FEKT VUT 2012. ISBN 978-80-214-4453-9.
- [18] VALKENBURG, M.E. Van. *Analog Filter Design*. Japan: Holt-Saunders International Editions, 1982. ISBN 0-03-059246-1.
- [19] PAARMANN, Larry D. *Design and analysis of analog filters: a signal processing perspective*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001. ISBN 0-7923-7373-1.
- [20] WILLIAMS, Arthur B.; TAYLOR, Fred J. *Electronic filter design handbook*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2006. ISBN 0-07-147171-5.
- [21] GILBERT, Barry K. *A Low-noise Wideband Variable-gain Amplifier Using An Interpolated Ladder Attenuator*. 1991 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers, 1991, pp. 280-281, doi: 10.1109/ISSCC.1991.689160.
- [22] ZHANG, J.; DING, H.; WANG, B.; GUO, X.; PADMANABAN, S. *Active Power Decoupling for Current Source Converters: An Overview Scenario*. Electronics 2019.
Dostupné na: <<https://doi.org/10.3390/electronics8020197>>
- [23] ROBERTS Steve. *DC/DC Book of Knowledge*. 3rd ed. Austria: RECOM Engineering GmbH & Co KG, 2016.
Dostupné na: <<https://bit.ly/3lmWSyH>>
- [24] KIND, D.; FESER, K. *High Voltage Test Techniques*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2001. ISBN: 978 075 065 1837
- [25] ORTMeyer, Cliff. *Then and now: a brief history of Single Board Computers*. Electronic Design Uncovered, 6, 1-11(2014).
Dostupné na: <<https://bit.ly/3o7dxIc>>

- [26] SHAH Samarth. *Learning Raspberry Pi*. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2015. ISBN 978-1-78398-282-0.
- [27] GAY, Warren. *Custom Raspberry Pi Interfaces*. Canada: Apress Media, 2017. ISBN 978-1-4842-2405-2.
- [28] Philips Semiconductors. *I2S bus specification* [online] 1996 [cit. 08.11.2021].
Dostupné na: <<https://bit.ly/3lnoy6t>>
- [29] F. Leens. *An introduction to I2C and SPI protocols*. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, vol. 12, no. 1, pp. 8-13, February 2009, doi: 10.1109/MIM.2009.4762946.
- [30] LUCIDCHART. Vytvorené autorom práce pomocou stránky Lucidchart [online]. [cit. 25.11.2021]. Dostupné na:
<<https://www.lucidchart.com/pages/?noHomepageRedirect=true>>.
- [31] Texas Instruments Inc, Datasheet PCM1791A [online]. *24-Bit, 192kHz Sampling, Advanced Segment, Audio Stereo Digital To Analog Converter*. [cit. 25.11.2021].
Dostupné na: <<https://bit.ly/3oE8yz4>>.
- [32] Texas Instruments Inc, Datasheet TPA3244 [online]. *60-W Stereo, 110-W peak PurePath™ Ultra-HD Pad Down Class-D Amplifier*. [cit. 25.11.2021].
Dostupné na: <<https://bit.ly/3ya5Zbk>>.
- [33] Burr-Brown Products from Texas Instruments Inc, Datasheet PGA4311 [online]. *4-Channel Audio Volume Control*. [cit. 24.11.2021].
Dostupné na: <<https://bit.ly/3i0YQCY>>.
- [34] Texas Instruments Inc, Datasheet LM2576 [online]. *LM2576xx Series Simple Switcher® 3-A Step-Down Voltage Regulator*. [cit. 25.11.2021].
Dostupné na: <<https://bit.ly/3ICfqrR>>.
- [35] ON Semiconductor®, Datasheet NCV8535 [online]. *Voltage Regulator - Ultra High Accuracy, Low Iq, Low Dropout*. [cit. 25.11.2021].
Dostupné na: <<https://bit.ly/3oJnGev>>.
- [36] Texas Instrumens Inc, Datasheet LM2662 [online]. *LM266x Switched Capacitor Voltage Converter*. [cit. 15.2.2022].
Dostupné na: <<https://bit.ly/3v06cfS>>.
- [37] ROHM Semiconductor, Datasheet BA50DD0T [online]. *2A/1A Fixed Output LDO Regulators With Shutdown Switch*. [cit. 4.3.2022].
Dostupné na: <<https://bit.ly/3x5hpys>>.

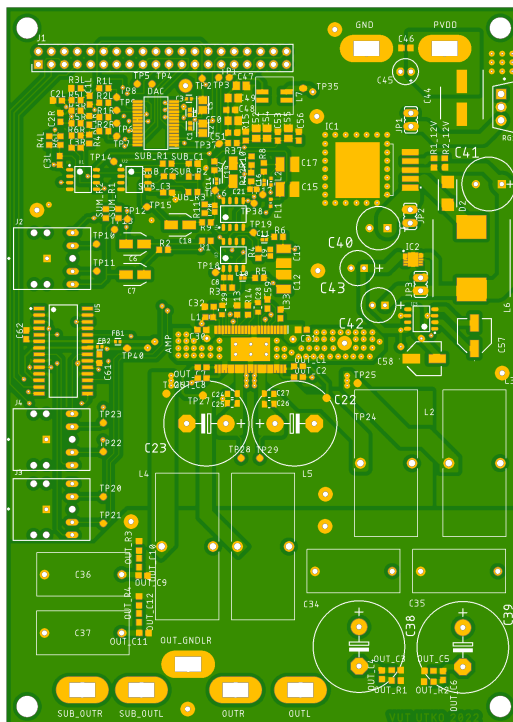
Prílohy

A Schéma celkového zapojenia DPS

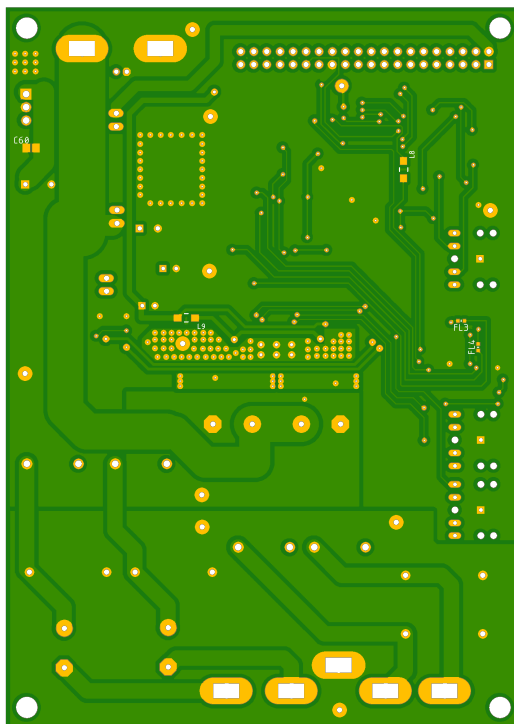


B Vytvorený návrh dosky plošného spoja

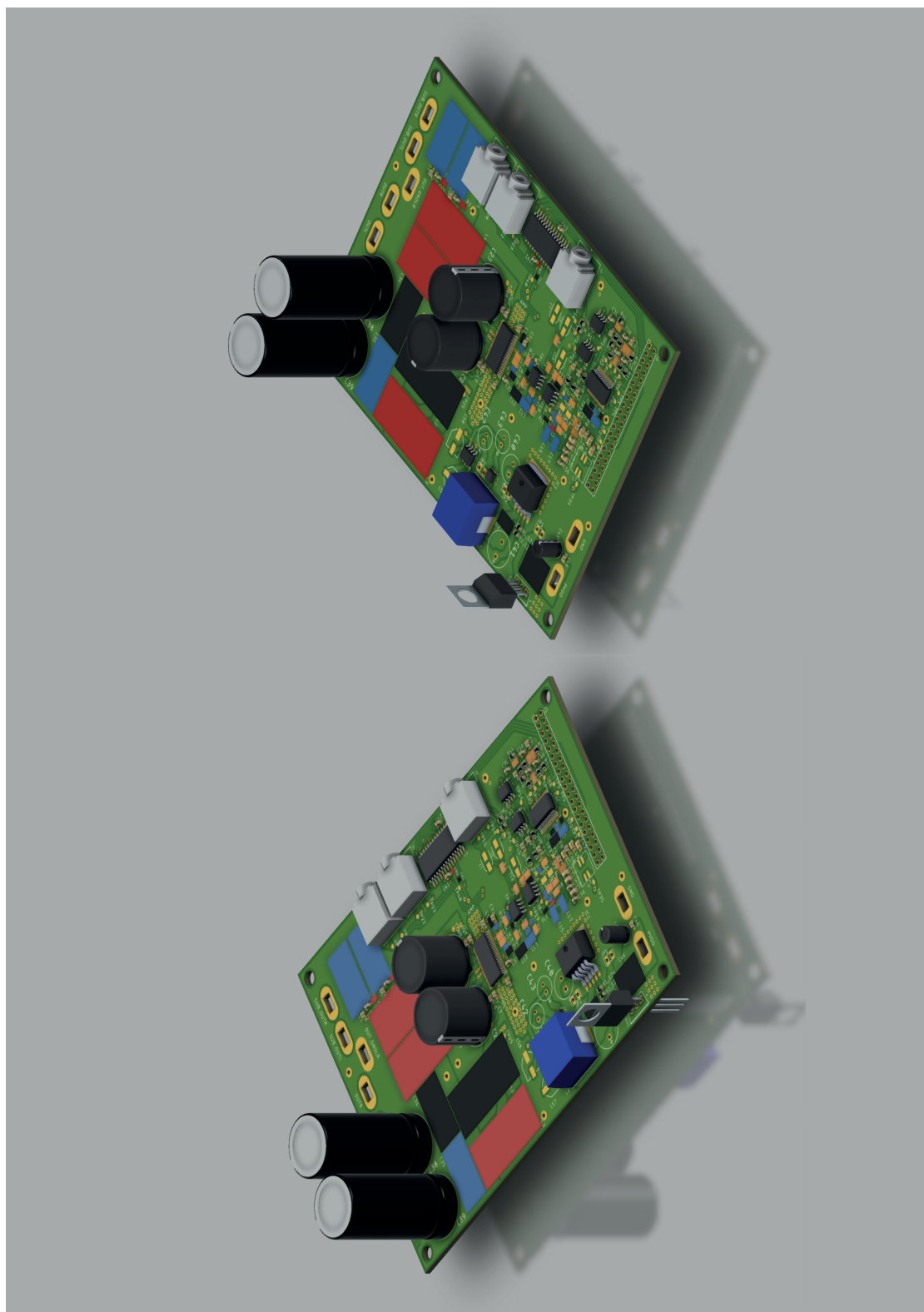
B.1 Doska plošného spoja - Top



B.2 Doska plošného spoja - Bottom



C Grafická vizualizácia DPS



D Zoznam použitéh súčiastok

Ks	Hodnota	Púzdro/označenie	Súčiastka	Popis
3	-	JP1	JP1, JP2, JP3	JUMPER
1	B330B-13-F	DIOM5336X250N	D2	30 V, 3.0 A Schottky Diode
1	220 µH, 2.6 A	MSS1583-224KEB	L6	SMD-Shielded Power Inductors Coilcraft
4	0.01uF	C1608	OUT_C4, OUT_C6, OUT_C10, OUT_C12	CAPACITOR, European symbol
8	0.1uF	C1608	C30, C31, C32, C33, C48, C51, C53, C56	CAPACITOR, European symbol
4	100	R0603	R5, R6, R7, R8	RESISTOR, European symbol
1	10000pF	C1608	C46	CAPACITOR, European symbol
4	1000pF	C1608	OUT_C3, OUT_C5, OUT_C9, OUT_C11	CAPACITOR, European symbol
1	100uF	EEUEB1H101S, ECEA1HN101U	C40	Alu Elelyt Capacitors,
2	100k	R0603	SUM_R1, SUM_R2	RESISTOR, European symbol
4	100u	C1608	C12, C13, C15, C17	CAPACITOR, European symbol
10	10k	R0603	R1, R2, R3, R4, R9, R10, R11, R12, R15, R37	RESISTOR, European symbol
6	10uF	C0805	C47, C49, C50, C52, C54, C55	CAPACITOR, American symbol
2	1500u/63V	E7,5-18, HIT-EXR 18x36	C38, C39	POLARIZED CAP, HITANO, HIT-EXR 18x36
2	1uF	ECA2GHG010, 400LLE1MEFC6.3X11	C42, C43	Al. Electrolytic Capacitors/Radial type
1	1k	R0603	R1_12V	RESISTOR, European symbol
4	1k8	R0603	R1L, R1R, R2L, R2R	RESISTOR, European symbol
2	1n8	C1608	C1L, C1R	CAPACITOR, European symbol
1	1uF	E2-5	C45	POLARIZED CAP, MCGPR63V105M5X11
2	2200uF/50V	E7,5-16	C22, C23	POLARIZED CAP, MCKSK050M222J36S
1	22k	R0603	R13	RESISTOR, European symbol
3	2k	R0603	SUB_R1, SUB_R2, SUB_R3	RESISTOR, European symbol
4	3.3	R0603	OUT_R1, OUT_R2, OUT_R3, OUT_R4	RESISTOR, European symbol
1	30k	R0603	R14	RESISTOR, European symbol
1	680uF	EEUFK1V681L, 860020575016	C41	Aluminum Electrolytic Capacitors
4	33nF	C1608	OUT_C1, OUT_C2, OUT_C7, OUT_C8	CAPACITOR, European symbol
4	3k3	R0603	R3L, R3R, R4L, R4R	RESISTOR, European symbol
1	47uF	CAPAE830X650N, MCVVT050M470FB3L	C44	SMD Hlinikový Elektrolytický Kondenzátor
4	560p	C1608	C2L, C2R, C3L, C3R	CAPACITOR, European symbol
4	680	R0603	R5L, R5R, R6L, R6R	RESISTOR, European symbol
3	680n	C1608	SUB_C1, SUB_C2, SUB_C3	CAPACITOR, European symbol
1	10 uH, 2A	WE-DD_7332/734512	L7	SMD Inductor Ferrite Core, 744878100
1	8.76k	R0603	R2_12V	RESISTOR, European symbol
4	1uF 250V	ECWF2105JA	C34, C35, C36, C37	Cap Film Radial 15mm 105C Bulk
4	10 uF	KEMET_C0402C	C10, C11, C14, C16	C0402 10 uF X7R 10.00% 16 V
1	10uH, 10%	INDC1608X100N	L1	LBMF1608T100K - INDUCTOR
4	10uH, 6.1A	MA5172AE	L2, L3, L4, L5	Fixed Inductors 26mOhms
1	NCV8535MN500R2G	SONS0P300X300X100-11N	IC2	LDO Voltage Regulators 500mA
4	10uF, 16V	EEE-1CA100SR	C6, C7, C18, C19	Aluminum Electrolytic Capacitors
1	PCM1791ADB	SOP65P780X200-28N	DAC	Audio DAC Dual 24 bit-, 192kpsps
2	100nF 16V	SAMSUNG_CL05F104Z05NNNC	C1, C4	Cap Ceramic SMD 0402 +85 Paper T/R
2	10uF 6.3V	SAMSUNG_CL21B106KQQNNE	C2, C5	CL21 Series 0805 Ceramic Chip Capacitor
1	SPC20497	40WAY, 2ROW	J1	BOARD CONNECTOR, HEADER
1	BA50DD0T	BA50DD0T	RG1	Linear 5V regulator
3	3.5mm Jack	SWITCHCRAFT_35RAPC4BHN2	J2, J3, J4	3.5MM PC horizontal mount Jack, stereo
1	1uF, 6,3V	TAIYO_YUDEN_JMK105BJ105KV-F	C3	High Value Multilayer Ceramic Capacitors
6	1uF, 50V	TDK_C2012X7R1H105K125AB	C24, C25, C26, C27, C28, C29	Ceramic Capacitors X7R SMD 0805
4	NE5532DR	TEXAS_INSTRUMENTS_NE5532DR	U1, U2, U3, U4	TI-AMP-D6-2-8_D
1	LM2576D2T	NCP5663DSADJR4G	IC1	Switching Volt. Reg., 3AOUT, 1,23-37VIN
1	TPA3244DDWR	SOP64P810X120-45N	AMP	60W Stereo/110W Peak Class-D Amplifier
4	22pF, 50V	YAGEO_CC0603JRNPO9BN220	C8, C9, C20, C21	CAP-NP-2
1	LM2662MX/NOPB	LM2662MX/NOPB	IC3	Invertor 5V
2	47uF 0.05ohm ESR	YAGEO_CC0603JRNPO9BN220	C57, C58	CAPACITOR, European symbol
4	Ferrite Bead 500ohm	MAF1005GAD352AT000	FL1, FL2, FL3, FL4	BEADC1005X55N, Ferrite Bead
2	Ferrite Bead 1800ohm	MURATA_BLM15HD182BH1D_0	FB1, FB2	Ferrite Bead
1	0.47uF, 50V	UMK107B7474KA-TR	C59	CAPACITOR, European symbol
1	1uF, 50V	UMF212B7105KGHT	C60	CAPACITOR, European symbol
2	Ferrite Bead 50ohm	WURTH 742792114	L8, L9	WE-CBF 1206 100MHz 50ohm 3A
1	PGA4311	PGA4311	U5	Volume Control