



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

AUDIO VÝKONOVÝ ZESILOVAČ VE TŘÍDĚ AB PRO DOMÁCÍ POUŽITÍ

CLASS AB AUDIO POWER AMPLIFIER FOR HOME USE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Vaško

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Dominik Vaško

ID: 230342

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Audio výkonový zesilovač ve třídě AB pro domácí použití

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte návrh stereo audio výkonového zesilovače klasické třídy AB s min. výkonem $2 \times 25 \text{ W}$ pro domácí použití. Koncový stupeň doplňte aktivním korekčním předzesilovačem (ekvalizérem) s možností grafického zobrazení charakteristiky a indikátorem vybuzení reproduktorových soustav. Funkci navržených zapojení ověřte simulacemi ve vhodném programu, např. Pspice.

Pro výkonový zesilovač a předzesilovač navrhnete vhodnou napájecí jednotku, vč. potřebného transformátoru. Navrhnete desky plošných spojů v programu Eagle a realizujete funkční vzorek celého zařízení. Provedte oživení a proměření základních parametrů zesilovače, výsledky měření porovnejte s výsledky simulací i očekávanými parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] CORDELL, B. Designing Audio Power Amplifiers, 2nd edition. New York: Routledge, 2019.
- [2] SELF, D. Audio Power Amplifier Design, 6th edition. New York: Focal Press, 2013.
- [3] KOTISA, Z. NF zesilovače 2. Integrované výkonové zesilovače. Praha: BEN – technická literatura, 2002.

Termín zadání: 16.2.2024

Termín odevzdání: 27.5.2024

Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom audio výkonového zosilňovača v klasickej triede AB s minimálnym výkonom 2x25W určeného pre domáce použitie a návrhom vhodnej napájacej jednotky. Koncový stupeň zosilňovača je realizovaný integrovaným obvodom LM3886, ktorý je doplnený o návrh korekčného predzosilňovača a indikátorom vybudenia. Korekčný predzosilňovač je realizovaný pomocou integrovaného obvodu LM1036, indikátor vybudenia zasa integrovaným obvodom LM3915. Výsledkami práce sú návrhy schematických zapojení koncového stupňa, korekčného predzosilňovača a indikátora vybudenia ako aj návrhy a realizované dosky plošných spojov a výsledné zariadenie s premeranými charakteristikami.

Kľúčové slova

Koncový zosilňovač, korekčný predzosilňovač, indikátor vybudenia, napájací zdroj LM3886, LM1036, LM3915, L7812

Abstract

This bachelor's thesis deals with the design of a classic class AB audio power amplifier with a minimum power of 2x25W intended for home use and the design of a suitable power supply unit. The final stage of the amplifier is realized by an integrated circuit LM3886, which is supplemented by the design of a correction preamplifier and an excitation indicator. The correction preamplifier is implemented using the LM1036 integrated circuit, the excitation indicator, in turn, by the LM3915 integrated circuit. The results of the work are designs for the schematic connections of the final stage, correction preamplifier and excitation indicator, as well as designs and implemented printed circuit boards and the resulting device with measured characteristics.

Keywords

Power amplifier, correction preamplifier, excitation indicator, power supply LM3886, LM1036, LM3915, L7812

Bibliografická citácia

VAŠKO, Dominik. *Audio výkonový zesilovač ve třídě AB pro domácí použití* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159093>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Lubomír Brančík.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: *Dominik Vaško*

VUT ID studenta: *230342*

Typ práce: *Bakalárska práca*

Akademický rok: *2023/24*

Téma závěrečné práce: *Audio výkonový zesilovač ve třídě AB pro domácí použití*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne: 20. května 2024

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce prof. Ing. Lubomírovi Brančíkovi, CSc. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brně dne: 20. května 2024

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	9
ZOZNAM TABULIEK	10
ÚVOD	11
1. BLOKOVÁ SCHÉMA	12
2. NÁVRH KOREKČNÉHO PREDZOSILŇOVAČA	13
2.1 CHARAKTERISTIKA KOREKČNÝCH PREDZOSILŇOVAČOV	13
2.2 POPIS INTEGROVANÉHO OBVODU LM1036	13
2.2.1 <i>Technické parametre obvodu LM1036</i>	15
2.3 NÁVRH SCHÉMY PREDZOSILŇOVAČA S OBVODOM LM1036	16
2.3.1 <i>Popis funkcie a schematickeho zapojenia</i>	17
3. NÁVRH INDIKÁTORA VYBUDENIA	18
3.1 NÁVRH SCHÉMY INDIKÁTORA VYBUDENIA S LM3915	18
3.1.1 <i>Popis schémy zapojenia</i>	18
4. NÁVRH KONCOVÉHO STUPŇA ZOSILŇOVAČA	20
4.1 POPIS INTEGROVANÉHO OBVODU LM3886	20
4.1.1 <i>Popis PINOV integrovaného obvodu LM3886</i>	20
4.2 NÁVRH SCHÉMY ZAPOJENIA S LM3886	21
4.2.1 <i>Popis schémy zapojenia</i>	21
4.2.2 <i>Výpočet parametrov a hodnôt súčiastok koncového stupňa</i>	23
4.3 SIMULÁCIA KONCOVÉHO STUPŇA	25
5. NAPÁJACÍ ZDROJ	27
5.1.1 <i>Transformátor</i>	27
5.1.2 <i>Usmerňovač</i>	28
5.1.3 <i>Výhladzovací filter</i>	28
5.2 VÝPOČET PARAMETROV ZDROJA	28
5.2.1 <i>Návrh zdroja pre LM1036 a LM3915</i>	30
5.2.2 <i>Návrh celkovej schémy zapojenia zdroja</i>	31
6. NÁVRH CHLADENIA	32
6.1 MOŽNOSTI CHLADENIA	32
6.2 CHLADENIE KONCOVÝCH STUPŇOV ZOSILŇOVAČA	32
6.2.1 <i>Výpočet stratového výkonu</i>	32
6.2.2 <i>Výpočet tepelného odporu</i>	33
6.3 CHLADENIE USMERŇOVACIEHO MOSTÍKU	34
7. DOSKY PLOŠNÝCH SPOJOV	35
7.1 DOSKA PRE KOREKČNÝ PREDZOSILŇOVAČ	35
7.2 DOSKA PRE INDIKÁTOR VYBUDENIA	35
7.3 DOSKA PRE KONCOVÝ ČLEN	36
7.4 DOSKA PRE NAPÁJACÍ ZDROJ	36

8. MERANIE ZÁKLADNÝCH PARAMETROV	37
8.1 KOREKČNÍ PREDZOSILŇOVAČ	37
8.1.1 Meranie modulovej frekvenčnej charakteristiky	37
8.1.2 Meranie regulácie hlasitosti	39
8.1.3 Meranie vyváženie kanálov	40
8.2 KONCOVÝ ČLEN.....	42
8.2.1 Modulová frekvenčná charakteristika.....	42
8.2.2 Meranie maximálnej hodnoty výkonu	42
8.3 MERANIE NAPÁŤOVÉHO ZDROJA	43
8.3.1 Meranie.....	43
8.4 POUŽITÉ MERACIE PRÍSTROJE	43
9. ZÁVER.....	44
LITERATÚRA.....	46
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	47
ZOZNAM PRÍLOH.....	49

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Bloková schéma zosilňovača 2 x 40W	12
2.1	Vnútorne blokové zapojenie LM1036, Prevzaté z [1].....	14
2.2	Schéma zapojenia korekčného predzosilňovača s LM1036	16
3.1	Schéma zapojenia indikátora vybudenia s LM3915	18
4.1	Puzdro integrovaného obvodu LM3886, popis pinov, prevzaté z [3]	20
4.2	Návrh schémy koncového stupňa zosilňovača s LM3886.....	21
4.3	Schémy koncového stupňa zosilňovača s LM3886 v simulačnom programe PSpice for TI.....	26
4.4	Chyba pri pokuse o simuláciu.	26
5.1	Návrh schémy zapojenia napájacieho zdroja.....	31
6.1	Obrázok chladiča SK85/100SA prevzatý z [9].....	33
8.1	Modulová frekvenčná charakteristiky pravý kanál	38
8.2	Modulová frekvenčná charakteristiky Ľavý kanál	38
8.3	Modulová frekvenčná charakteristika meraná výrobcom prevzaté z [1].....	39
8.4	Regulácia hlasitosti pre pravý kanál.....	40
8.5	Regulácia hlasitosti pre ľavý kanál	40
8.6	Regulácia vyváženia kanálov	41
8.7	Regulácia vyváženia kanálov meraná výrobcom prevzaté z [1].....	41
8.8	Graf modulovanej frekvenčnej charakteristiky	42

ZOZNAM TABULIEK

2.1	Tab. 1 Technické parametre LM1036, prevzaté z [1]	15
8.1	Meranie modulejovej frekvenčnej charakteristiky	37
8.2	Maximálne hodnoty výkonu.....	43
8.2	Meranie napájacieho zdroja.....	43

ÚVOD

Táto bakalárska práca sa zaoberá spracovaním a úpravou zvukového signálu.

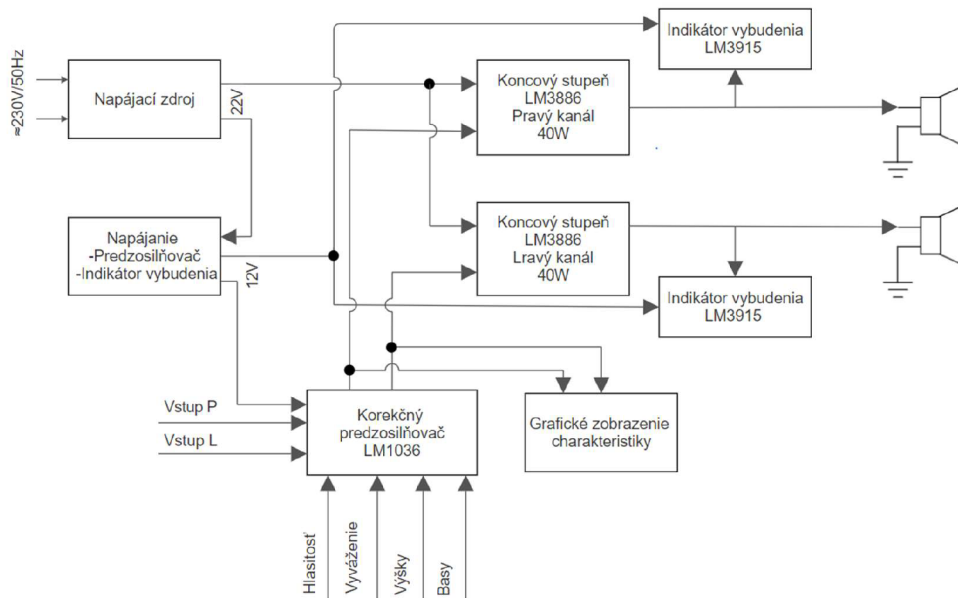
Cieľom tejto bakalárskej práce je návrh a realizácia audio výkonového zosilňovača v triede AB s minimálnym výstupným výkonom $2 \times 25\text{W}$. Koncový stupeň má byť doplnený o korekčný predzosilňovač, ktorý má mať možnosť grafického zobrazenia charakteristiky a indikátorom vybudenia.

Koncový stupeň audio výkonového zosilňovača je tvorený integrovaným obvodom LM3886, ktorý je konštrukcie mono a je vybavený hneď niekoľkými ochranami ako napríklad ochranou proti skratu, prepätiu ako aj podpätiu a tepelné ochrany. Integrovaný obvod je charakteristický aj celkom širokým rozmedzím napájacieho napätia, ktoré je od 20V do 94V. Tento obvod má aj veľmi zaujímavé hodnoty skreslenia (THD+N) a to len 0,03%, jeho odstup signálu od šumu je väčší ako 92dB. Obvod je charakteristický aj svojou funkciou „mute“, ktorá sa stará o utlmenie zosilňovača, táto funkcia vytvára časové oneskorenie po zopnutí funkcie, ktoré je možné nastaviť pri návrhu obvodu. Koncový stupeň bol doplnený o korekčný predzosilňovač tvorený integrovaným obvodom LM1036. Tento integrovaný obvod je schopný ovládať obe časti stereo signálu súčasne pomocou jednej sady potenciometrov bez vzájomného ovplyvňovania. V obvode je taktiež možnosť zmenou dvojíc kondenzátorov upraviť stred jeho frekvenčného pásma pre výšky a hĺbky. Koncový stupeň bol ešte doplnený o indikátor vybudenia, ktorý je realizovaný integrovaným obvodom LM3915, zapojenie tohto obvodu je veľmi jednoduché, skladá sa len z desiatich indikačných LED diód a štyroch rezistorov.

Bakalárska práca je rozdelená do deviatich častí. V prvej časti je zobrazené blokové zapojenie celého zariadenia. V druhej až piatej časti sa práca zaoberá korekčným predzosilňovačom, indikátorom vybudenia, koncovým stupňom zosilňovača, napájacím zdrojom a návrhmi ich schematických zapojení. V šiestej časti sa práca zaoberá návrhom chladenia pre výkonové prvky práce. V siedmej časti sa práca zaoberá doskami plošných spojov ich návrhom, výrobou a osadením. V ôsmej časti práce sú zobrazené grafické charakteristiky a merané hodnoty zhotovených zariadení. Deväta a zároveň posledná časť obsahuje zhrnutie celej práce, jej cieľov a použitých riešení pre návrh jednotlivých častí práce.

1. BLOKOVÁ SCHÉMA

Návrh výkonového zosilňovača 2 x 40W, 4Ω vychádza z blokovej schémy ktoré môžeme vidieť na obrázku č. 1.1.



Obrázok 1.1 Bloková schéma zosilňovača 2 x 40W

2. NÁVRH KOREKČNÉHO PREDZOSILŇOVAČA

2.1 Charakteristika korekčných predzosilňovačov

Korekčný predzosilňovač je zariadenie, ktoré slúži na korekciu alebo úpravu vstupného signálu. Predzosilňovač môže riadiť nastavovanie napríklad hlasitosti, výšok, hĺbok alebo vyváženia reproduktorov „balance“.

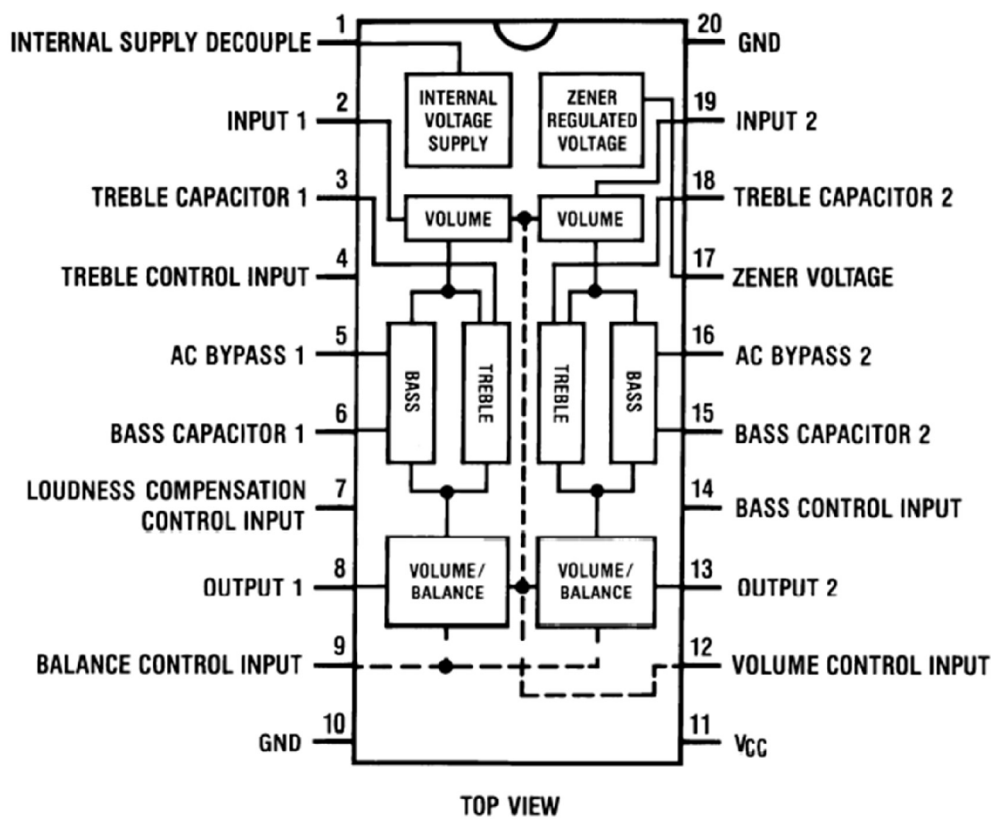
Korekčný predzosilňovač môže byť navrhnutý vo forme ekvalizéra. Ekvalizér je druh predzosilňovača, ktorého jednotlivé ovládacie prvky (potenciometre) ovládajú frekvenčnú charakteristiku na určitej frekvencii. Čo znamená, že počet potenciometrov, ktoré obsahuje predzosilňovač taký istý počet frekvenčných pásiem je ním možné ovládať. Pre naše potreby koncového zariadenia, ktoré je určené pre domáce použitie a nie pre profesionálne spracovanie zvukového signálu nebude korekčný predzosilňovač typu ekvalizér potrebný.

Korekčné predzosilňovače je možné realizovať dvoma spôsobmi, diskretnou metódou alebo za pomoci použitia integrovaných obvodov. Diskretná metóda je náročnejšia na návrh aj spracovanie a s vysokou pravdepodobnosťou by vyžadovala aj väčšiu výslednú dosku plošných spojov, dokonca v dnešnej dobe by mohla byť aj nákladnejšia čo sa týka financií. Práve pre tieto dôvody sme sa rozhodli pre použitie integrovaného obvodu. Táto metóda je jednoduchšia, bude obsahovať menší počet potrebných súčiastok a ušetrí čas.

Integrovaný obvod ktorý bol vybraný pre našu konštrukciu je LM1036 firmy Texas Instruments.

2.2 Popis integrovaného obvodu LM1036

Integrovaný obvod LM1036 je predzosilňovač, ktorý obsahuje dva vstupy ktoré je možné ovládať súčasne. Tento predzosilňovač dokáže regulovať hlasitosť, vyváženie, výšky a hĺbky. Regulácia funguje za pomoci štyroch potenciometrov cez ktoré sa privedie jednosmerné napätie. Týmito potenciometrami sa následne cez riadiace vstupy nastavujú úroveň basov, výšok, hlasitosti a vyváženia kanálov. LM1036 je osadený v 20 „PINovom“ PDIP puzdre.



Obrázok 2.1 Vnútoré blokové zapojenie LM1036, Prevzaté z [1]

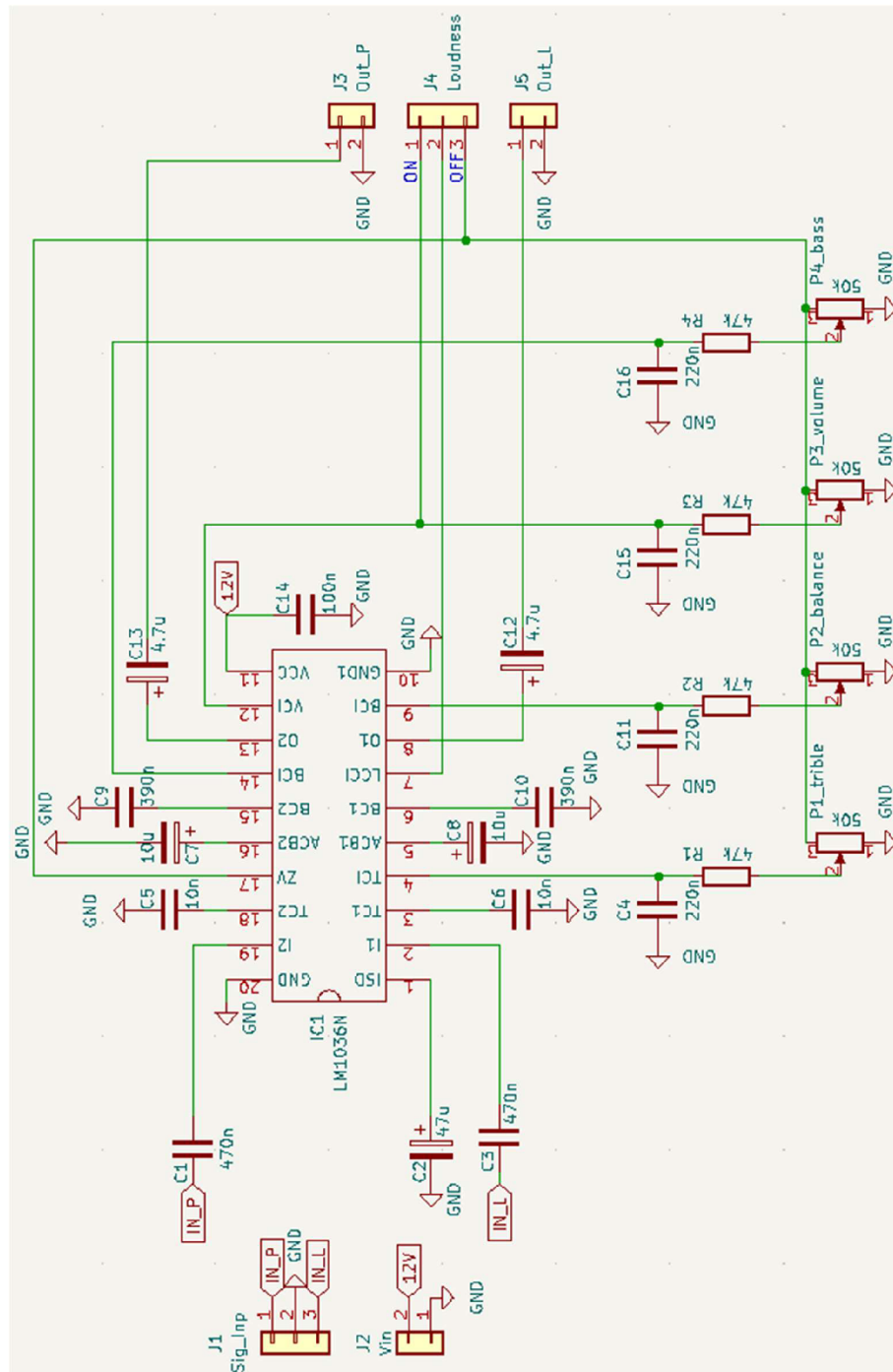
2.2.1 Technické parametre obvodu LM1036

$V_{CC} = 12V$, $T_A = 25^\circ C$

Tabulka 2.1 Tab. 1 Technické parametre LM1036, prevzaté z [1]

Parameter	Podmienka	Min.	Typ.	Max.	Jednotka
Napájacie napätie		9		16	V
Odber prúdu			35	45	mA
Maximálne výstupné napätie	$f = 1 \text{ kHz}$, $U_{CC} = 9 \text{ V}$	0,8	0,8		V
	$f = 1 \text{ kHz}$, $U_{CC} = 12 \text{ V}$		1		V
Maximálne vstupné napätie	$f = 1 \text{ kHz}$, Gain = - 10 dB	1,3	1,6		V
Zener. regulovaný výstup	Napät'ový Prúdový		5,4	5	V mA
Vstupná impedancia	$f = 1 \text{ kHz}$	20	30		k Ω
Výstupná impedancia	$f = 1 \text{ kHz}$		20		Ω
Maximálne zosilnenie	$f = 1 \text{ kHz}$	-2	0	2	dB
Rozsah regulácie hlasitosti	$f = 1 \text{ kHz}$	70	75		dB
Rozsah regulácie hĺbok	$f = 40 \text{ Hz}$, $C_b = 0,39 \mu\text{F}$ $V(\text{PIN } 14) = V(\text{PIN } 17)$ $V(\text{PIN } 14) = 0V$	12	15	18	dB
		-12	-15	-18	dB
Rozsah regulácie výšok	$f = 16 \text{ kHz}$, $C_t = 0,01 \mu\text{F}$ $V(\text{PIN } 4) = V(\text{PIN } 17)$ $V(\text{PIN } 4) = 0V$	12	15	18	dB
		-12	-15	-18	dB
Celkové harmonické skreslenie	$f = 1 \text{ kHz}$, $U_{IN} = 0,3 \text{ V}$ Gain = 0 dB Gain = -30 dB		0,06	0,3	%
			0,03		%
Odstup signál-šum		75	80		dB

2.3 Návrh schémy predzosilňovača s obvodom LM1036



Obrázok 2.2 Schéma zapojenia korekčného predzosilňovača s LM1036

2.3.1 Popis funkcie a schematickeho zapojenia

Obrázok 1.2 zobrazuje schému zapojenia korekčného predzosilňovača s LM1036. Schéma zapojenia ako aj hodnoty použitých súčiastok vychádzajú z doporučeného katalógového zapojenia daného integrovaného obvodu ktorý je uvedený v [1].

Korekčný predzosilňovač založený na obvode LM1036, ktorého návrh je vidieť na obr. 1.2 využíva ku svojmu riadeniu jednosmerné napätie z vnútorného referenčného zdroja, ktoré je tvorené zenerovou diódou. Veľkosť tohto jednosmerného napätia zenerovej diódy je 5,4V, čo je možné vidieť v tab. 1.1 (technické parametre LM1036). Napätie z diódy je vyvedené na pin č. 17, z tohto nenapätia je možné odoberať prúd o hodnote 5mA.

Toto napätie je následne cez pin č. 17 pripojené na štvoricu potenciometrov ($P_1 - P_4$), ktorými je následne možné upravovať vlastnosti signálu. Potenciometer P_1 (pin č. 4) slúži k nastavovaniu výšok, potenciometer P_2 (pin č. 9) slúži na nastavovanie rovnováhy, potenciometer P_3 (pin č. 12) slúži na nastavovanie hlasitosti a potenciometer P_4 (pin č. 14) slúži na nastavovanie hĺbok. K bežcom potenciometrov sú pripojené RC články, ktoré sú tvorené rezistormi R_1, R_2, R_3, R_4 a kondenzátormi $C_4, C_{11}, C_{15}, C_{16}$. Tieto RC články majú za úlohu potlačiť rušivé zložky vplývajúce na obvod riadenia jednosmerného napätia.

Referenčným napätím zenerovej diódy (pin č. 17) sa taktiež riadi fyziologická regulácia hlasitosti takzvaná Loudness. Fyziologickú reguláciu je možné aktivovať prepojením pinou č. 7 a 12, ktoré sú privedené na konektor J4 ktorý bude ovládaný spínačom.

Dvojice kondenzátorov C_5, C_6 a C_9, C_{10} sa starajú o úpravu nastavenie strednej frekvenčnej charakteristiky. Kondenzátory C_5 a C_6 zabezpečujú nastavenie výšok a kondenzátory C_9 a C_{10} zabezpečujú nastavenie hĺbok.

Znížením hodnoty dvojice kondenzátorov C_7 (pin č. 16) a C_8 (pin č. 5) je možné znížiť basovú odozvu na okrajoch frekvenčnej charakteristiky o hodnotu 3dB ak by sa X_C rovnalo $1,3 \text{ k}\Omega$ čo je hodnota vnútorného odporu pinou č. 5 a 16.

Dvojice kondenzátorov C_1 a C_2 ako aj C_{12} a C_{13} slúžia na odstránenie jednosmernej zložky signálu. Kondenzátory C_1 a C_2 sa starajú o odstránenie jednosmernej zložky signálu na vstupe a kondenzátory C_{12} a C_{13} sa starajú o odstránenie jednosmernej zložky signálu na výstupe integrovaného obvodu.

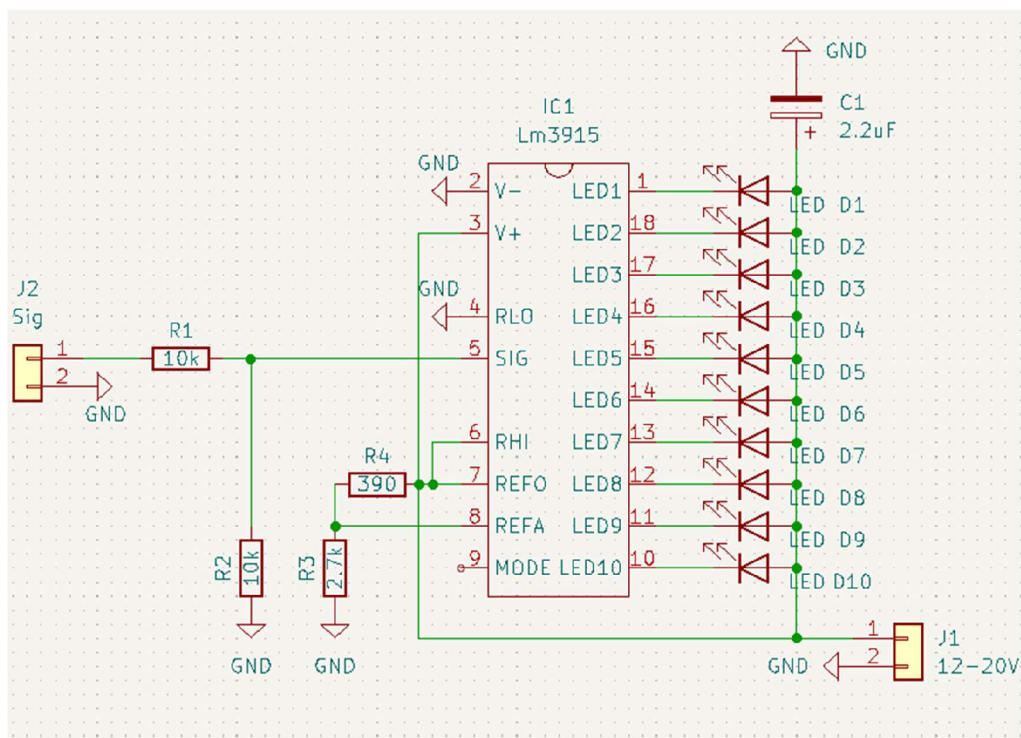
Konektor J1 slúži na privedenie stereo vstupného signálu pre následné spracovanie obvodom, konektor J2 slúži pre privedenie napájacieho napätia do obvodu a konektory J3, J5 slúžia pre pripojenie výstupného upraveného signálu pre ďalšie spracovanie. Konektor J3 sa stará o prvý kanál signálu a konektor J5 sa stará o ľavý kanál signálu.

3. NÁVRH INDIKÁTORA VYBUDENIA

Indikátor vybudenia je zariadenie ktoré sa využíva k približnému zobrazeniu výstupného výkonu dodávaného na reproduktor zo zosilňovaču. Indikátory vybudenia môžu byť napríklad ručičkové alebo LED-diódové. Indikátory vybudenia sa pripájajú na výstupné svorky zosilňovacieho obvodu preto jednou z ich nevýhod je odoberanie určitej časti výstupného výkonu, ktorý slúži na napájanie indikátoru.

Ako indikátor vybudenia bol vybratý integrovaný obvod LM3915, ktorý je osadený v 18 „PINovom“ PDIP puzdre, tento integrovaný obvod potrebuje k svojej činnosti externé napájanie a vďaka tejto vlastnosti nepotrebuje zo zosilňovacieho obvodu odoberať signálový výkon. Integrovaný obvod LM3915 má funkciu logaritmického merania zvukového výkonu.

3.1 Návrh schémy indikátora vybudenia s LM3915



Obrázok 3.1 Schéma zapojenia indikátora vybudenia s LM3915

3.1.1 Popis schémy zapojenia

Schéma zapojenia indikátora vybudenia s LM3915 zobrazená na obrázku 2.1 vychádza z katalógového zapojenia daného integrovaného obvodu uvedeného v [2]

LED-diódy 1-10 pripojené k Pinom 1, 18-10 slúžia k zobrazeniu hodnoty vybudenia obvodu. Zobrazovaný výkon diódami nie je lineárny. Diódy zobrazujú výkon nasledovne (LED 1-10) 0,2W 0,4W 0,8W 1,6W 3W 6W 13W 25W 50W 100W.

PIN 2 (V-) slúži k pripojeniu integrovaného obvodu k zemi.

PIN 3 (V+) slúži k pripojeniu kladného napájacieho napätia obvodu.

PIN 4 (R_{LO}) slúži k pripojeniu zeme signálu.

PIN 5 (SIG) slúži k pripojeniu sledovaného signálu k obvodu.

PIN 6,7,8 slúžia k nastavovaniu citlivosti zobrazovania integrovaného obvodu, pomer odporov R₃ a R₄ ovplyvňuje prúd, ktorý bude tiecť cez LED diódy.

PIN 9 slúži k nastaveniu režimu zobrazovania, ak by sa pripojil k PINU 3 zobrazenie by sa zmenilo z bodovej indikácie na pásovú indikáciu. Zmena zobrazovania z bodovej na pásovú indikáciu by však zvýšila odoberaný prúd obvodom čo by mohlo mať za následok zvýšenie zahrievania obvodu, preto je použitý režim bodového zobrazenia.

Rezistor R1 ktorý leží na vstupe signálu má hodnotu 10k Ω , hodnota tohto rezistoru je určená hodnotou impedancie záťaže. Hodnota rezistoru R1 je nastavená pre hodnotu impedancie záťaže 4 Ω .

Konektor J2 slúži na pripojenie vstupného signálu do obvodu a J1 slúži pre pripojenie napájacieho napätia k obvodu.

4. NÁVRH KONCOVÉHO STUPŇA ZOSILŇOVAČA

Koncový stupeň zosilňovača zaisťuje konečné zosilnenie vstupného signálu. Vstupný signál do koncového stupňa bude pracovať s upraveným signálom z korekčného predzosilňovača s LM1036.

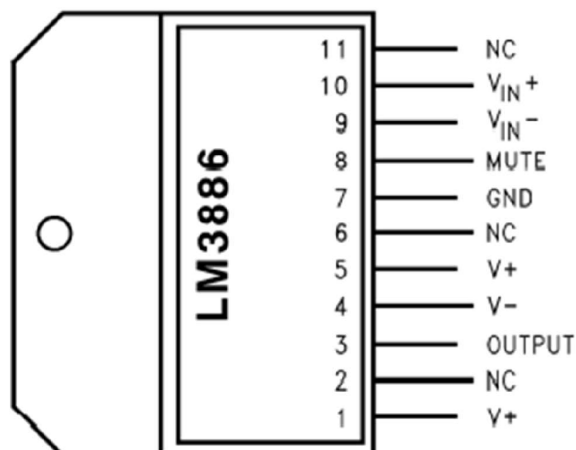
V zadaní práce sú uvedené požiadavky, ktoré má koncový stupeň zosilňovača splňovať. Zosilňovač má pracovať v klasickej triede AB a jeho výkon má byť aspoň 25W na jeden kanál. Ako hlavná časť koncového zosilňovača bol vybraný integrovaný obvod LM3886.

4.1 Popis Integrovaného obvodu LM3886

Integrovaný obvod LM3886 spoločnosti Texas Instruments pracuje len ako mono zosilňovač a preto k splneniu zadania je potrebné použiť dva zosilňovače pre vytvorenie požadovaného stereo zosilňovača. Integrovaný obvod pracuje v triede AB.

Výrobcom udávaný výkon tohto zosilňovača je až 68W do záťaže s impedanciou 4Ω pri hodnote napájacieho napätia $\pm 28V$, jeho krátkodobý špičkový výkon môže však dosahovať až 135W. Celkové harmonické skreslenie pri plnom výkone by nemalo presiahnuť hodnotu 0,03%. Odstup signálu od šumu by mal byť väčší ako 92dB. Integrovaný obvod je osadený v puzdre TA11B. Obvod je vybavený hneď niekoľkými ochranami. Ochranou proti skratu výstupu voči zemi tak ale aj voči napájaciemu napätiu, ochranou proti prepätiu ako aj podpätiu, tepelné ochrany a obsahuje taktiež tlmiaci „Mute“, ktorý má za úlohu oneskoriť odpojenie reproduktorov.

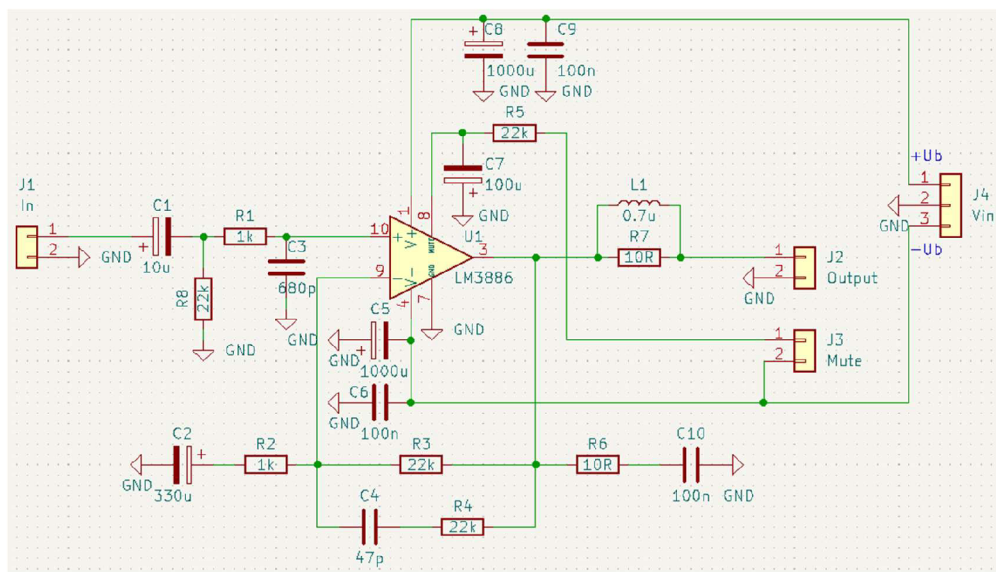
4.1.1 Popis PINOV integrovaného obvodu LM3886



Obrázok 4.1 Puzdro integrovaného obvodu LM3886, popis pinov, prevzaté z [3]

- Pin č. 1, 5 slúžia na privedenie kladnej zložky napájacieho napätia
- Pin č. 2, 6, 11 nie sú pripojené k vnútornej štruktúre integrovaného obvodu
- Pin č. 4 slúži na privedenie zápornej zložky napájacieho napätia
- Pin č. 7 slúži na pripojenie zeme
- Pin č. 8 slúži na nastavovanie funkcie „mute“
- Pin č. 9 slúži na privedenie zápornej zložky vstupného signálu
- Pin č. 10 slúži na privedenie kladnej zložky vstupného signálu

4.2 Návrh schémy zapojenia s LM3886



Obrázok 4.2 Návrh schémy koncového stupňa zosilňovača s LM3886

4.2.1 Popis schémy zapojenia

Schéma zapojenia jedného kanálu na obrázku 4.2 bola pôvodne prevzatá z [4], jedná sa o upravené katalógové zapojenie z [3], táto schéma zapojenia bola ešte následne upravená vďaka podrobne vysvetleným informáciám z [5].

Rozdiely voči pôvodnému návrhu schémy z [4] a návrhu schémy, ktorý je zobrazený na obrázku 3.2 budú spomenuté v nasledujúcom popise jednotlivých súčiastok.

Konektor J1 slúži k pripojeniu vstupného signálu.

Hlavnou úlohou kondenzátora C1 je odstránenie prípadnej jednosmernej zložky signálu, ktorá by sa mohla dostať na integrovaný obvod. Ďalšou úlohou kondenzátora C1 je vytvorenie hornej priepuste v kombinácii s rezistorom R8.

Prvá zmena oproti zapojeniu z [4] je v hodnote rezistoru R8 zo $100\text{k}\Omega$ na 22Ω . Táto zmena bola za účelom vyváženia prúdov medzi invertujúcim a neinvertujúcim vstupom integrovaného obvodu. Ak by boli prúdy medzi dvoma vstupmi integrovaného obvodu

rozdielne malo by to za následok indukovanie napätia medzi nimi. Vyváženie prúdov týchto dvoch vstupov sa docieli vyrovnanim odporu invertujúceho a neinvertujúceho vstupu ($R1+R8\approx R3$). Rezistory R1 a R8 spolu upravujú vstupnú impedanciu.

Kondenzátor C3 bol povodne zapojený medzi invertujúci a neinvertujúci vstup integrovaného obvodu, avšak v takomto zapojení sa zvyšuje šanca vzniku oscilácii. Kondenzátor je preto zapojený medzi neinvertujúci vstup a zem. V takomto zapojení kondenzátor C3 je stále schopný filtrovania rádiových frekvencií navyiac však zastáva úlohu dolnej priepuste v kombinácii s Rezistorom R1.

Táto štvorica prvkov C1, R8 a R1, C3 spoločne vytvárajú pásmovú priepust, do obvodu sa tak nedostanú ani moc nízke frekvencie a ani príliš vysoké, ktorých spracovanie by bolo zbytočné.

Sériová kombinácia rezistoru R2 a C2 tvoria hornú priepust spätnej väzby integrovaného obvodu. Medzná frekvencia tejto priepuste by mala byť 3 až 5 krát menšia ako tá pre neinvertujúci vstup. Pre tento dôvod bola hodnota kondenzátoru zmenená. Ak by toto pravidlo nebolo splnené zosilňovač by cez spätnovezobnú slučku prepustil frekvencie, ktoré by nedokázal spracovať, čo by malo za následok vytvorenie napätia na kondenzátore C2. Toto napätie by následne bolo zosilnené a mohlo by spôsobovať skreslenie.

Sériová kombinácia rezistoru R4 a kondenzátoru C4 má za úlohu tmiť rezonancie v spätnovezobnej slučke a zlepšuje stabilitu obvodu. Následne je nim paralelne pripojený rezistor R3 tieto tri súčiastky spolu vytvárajú dolnú priepust spätnovezobnej slučky o hodnote asi 150kHz.

Sériová kombinácia rezistoru R6 a kondenzátoru C10 sa nazýva „Boucherotov člen“ (zobelov filter) a slúži k odstráneniu vysokofrekvenčných oscilácií a zároveň zabraňuje rádiovým frekvenciám zachyteným vodičmi reproduktorov dostať sa naspäť do obvodu cez spätnovezobnú slučku. Hodnota rezistoru R6 bola zmenená za účelom zníženia medznej frekvencie.

Rezistor R5 nastavuje hodnotu prúdu tečúceho z PIN 8 (mute) a v kombinácii s kondenzátorom C7 nastavujú čas pri zapínaní alebo vypínaní funkcie PINU. Zapnutie alebo vypnutie tejto funkcie bude ovládané spínačom pripojeným ku konektoru J3.

Paralelná kombinácia rezistoru R7 a cievky L1 má za úlohu zvýšenie stability obvodu. Taktiež zabraňuje osciláciám spôsobeným v dôsledku kapacitnej záťaže, táto kombinácia môže taktiež zabrániť chytaniu rádiových frekvencií.

Dvojice kondenzátorov C5, C6 a C8, C9 majú za úlohu dodatočne filtrovať napájacie napätie obvodu, taktiež môžu dané napätie čiastočne stabilizovať pri malých zmenách.

Konektor J4 slúži k pripojeniu napájacieho napätia obvodu. Konektor J2 slúži k vyvedeniu výstupného signálu z obvodu na ďalšie zariadenia (reproduktory, indikátor vybudení).

4.2.2 Výpočet parametrov a hodnôt súčiastok koncového stupňa

Všetky nasledujúce rovnice, ktoré táto podkapitola obsahuje boli prevzaté z katalógového dokumentu k integrovanému obvodu LM3886 ktorý je dostupný z [3] a zo zdroja dostupného z [5].

Hodnota napájacieho napätia pre funkčnosť obvodu v požadovaných hodnotách sa vypočíta nasledovne:

$$U_{nap} = \sqrt{2 \cdot P_{out} \cdot R_L} = \sqrt{2 \cdot 40 \cdot 4} = 17,888 \cong 18V \quad (4.1)$$

Kde P_{out} je požadovaná hodnota výkonu a R_L je impedancia záťaže. Hodnotu napájacieho napätia U_{nap} je potrebné ešte navýšiť o úbytok napätia na integrovanom obvode, tento úbytok napätia sa podľa [3] rovná 4V.

Výsledná hodnota celkového napájacieho napätia bude :

$$U_{cc} = U_{nap} + U_{IO} = 18 + 4 = 22V \quad (4.2)$$

Výpočet maximálneho prúdu je nasledovný:

$$I_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{out}}{R_L}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 40}{4}} = 4,47A \cong 4,5A \quad (4.3)$$

Popis premenných v rovnici je popísaný pri výpočte napájacieho napätia.

Výsledné zosilnenie obvodu je vypočítané pomocou rezistorov R_3 a R_2 nasledovne:

$$A = \frac{R_3}{R_2} + 1 = \frac{22 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} + 1 = 23 \quad (4.4)$$

$$A_{dB} = 20 \cdot \log_{10}(A) = 20 \cdot \log_{10}(23) = 27,23dB \quad (4.5)$$

Výpočet vyváženia odporov medzi invertujúcim a neinvertujúcim vstupom integrovaného obvodu je nasledovný:

$$\begin{aligned} R_8 + R_1 &\cong R_3 \\ 22 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3 &\cong 23 \cdot 10^3 \\ 22 \cdot 10^3 \Omega &\cong 22 \cdot 10^3 \Omega \end{aligned} \quad (4.6)$$

Vyváženie odporov nie je úplne presné, ale je dostatočné na to, aby vzniknuté javy nemali na integrovaný obvod veľké negatívne účinky.

Pred výpočtom hodnoty hornej priepuste neinvertujúceho vstupu je potrebné ešte vypočítať reálnu hodnotu vstupného kondenzátora. Toto je za potreby z dôvodu, že na

výstupe obvodu korekčného predzosilňovača je osadený kondenzátor a na vstupe koncového stupňa zosilňovača je taktiež osadený kondenzátor. Po prepojení týchto dvoch obvodov teda vznikne sériová kombinácia kondenzátorov. Reálna hodnota vstupného kondenzátora C_1 sa preto vypočíta nasledovne:

$$C_1 = \frac{C_{KP} \cdot C_{KS}}{C_{KP} + C_{KS}} = \frac{4,7 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{4,7 \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 10^{-6}} = 3,197 \mu\text{F} \cong 3,2 \mu\text{F} \quad (4.7)$$

Kde C_{KP} je kondenzátor na výstupe korekčného predzosilňovača a C_{KS} je kondenzátor na vstupe koncového stupňa zosilňovača.

Výpočet dolnej medznej frekvencie neinvertujúceho vstupu je nasledovný:

$$F_{Dn} = \frac{1}{2\pi \cdot R_8 \cdot C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 3,2 \cdot 10^{-6}} = 2,26 \text{Hz} \quad (4.8)$$

Výpočet hornej medznej frekvencie neinvertujúceho vstupu je nasledovný:

$$F_{Hn} = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_3} = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 680 \cdot 10^{-12}} = 234,051 \text{kHz} \quad (4.9)$$

Táto dvojica priepusty spolu vytvára pásmovú priepust, ktorá pracuje v pásme 2,26Hz až 234,051kHz.

Výpočet dolnej medznej frekvencie spätnej väzby je nasledovný:

$$F_{Ds} = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot C_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 330 \cdot 10^{-6}} = 0,482 \text{Hz} \cong 0,48 \text{Hz} \quad (4.10)$$

Následne je potreba overiť podmienku, ktorá hovorí, že dolná medzná frekvencia spätnej väzby má byť 3 až 5 krát menšia ako dolná medzná frekvencia neinvertujúceho vstupu.

Túto podmienku overíme nasledovne:

$$n = \frac{F_{Dn}}{F_{Ds}} = \frac{2,26}{0,48} = 4,708 \cong 4,7 \quad (4.11)$$

Kde „n“ je hodnota pomeru medzi medznými frekvenciami. Z tohto výpočtu je vidieť, že podmienka je splnená keďže „n“ nadobúda hodnotu 4,7.

Výpočet hornej medznej frekvencie spätnej väzby je nasledovný:

$$F_{HS} = \frac{R_3 \cdot R_4 \cdot \left(2\pi \frac{1}{R_4 \cdot C_4}\right)}{(R_3 + R_4) \cdot \left(2\pi + \frac{1}{C_4 \cdot (R_3 + R_4)}\right)} \quad (4.12)$$

$$F_{HS} = \frac{22 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot \left(2\pi \frac{1}{22 \cdot 10^3 \cdot 47 \cdot 10^{-12}}\right)}{(22 \cdot 10^3 + 22 \cdot 10^3) \cdot \left(2\pi + \frac{1}{47 \cdot 10^{-12} \cdot (22 \cdot 10^3 + 22 \cdot 10^3)}\right)} =$$

$$F_{HS} = 138228,281 \text{ Hz} = 138,228 \text{ kHz}$$

Výpočet medznej frekvencie „Bouchertovho“ člena (Zobelov filter) vyzerá nasledovne:

$$F_Z = \frac{1}{2\pi \cdot R_6 \cdot C_{10}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = 159154,94 \text{ Hz} = 159,155 \text{ kHz} \quad (4.13)$$

Výpočet odporu R_5 ktorý riadi funkciu integrovaného obvodu „Mute“ musí prepúšťať z PINU 8 hodnotu prúdu aspoň 0,5 mA inak by obvod bol utlmený. Výpočet hodnoty tohoto rezistoru je nasledovný:

$$R_5 \leq \frac{(|U_{CC}| - 2,6)}{I_{MUTE}} = \frac{|-22| - 2,6}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 38800 = 38,8 \text{ k}\Omega \quad (4.14)$$

Kde U_{CC} je absolútna hodnota zápornej zložky napájacieho napätia, I_{MUTE} je minimálna hodnota odoberaného prúdu z PINU 8, ktorý je potrebný pre chod obvodu bez zopnutia funkcie „mute“. Hodnota rezistoru bola určená na hodnotu 22k Ω .

Kombinácia rezistoru R_5 a kondenzátoru C_7 sa taktiež nastavuje časové oneskorenie počas ktorého sa obvod dostane z netlmeného stavu do stavu tlmeného. Toto časové oneskorenie sa vypočíta nasledovne:

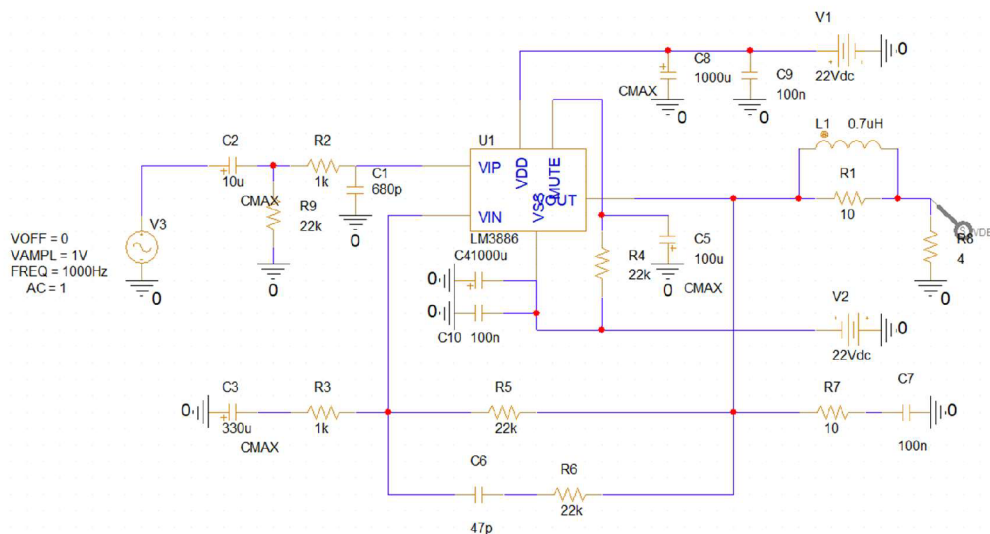
$$T = R_5 \cdot C_7 = 22 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 2,2 \text{ s} \quad (4.15)$$

Kde T predstavuje hodnotu časového oneskorenia.

4.3 Simulácia koncového stupňa

Simulácia bola vytvorená pomocou simulačného programu priamo od firmy Texas Instruments pod ktorú patrí integrovaný obvod, ktorý je použitý ako základná časť koncového zosilňovača. Program sa nazýva „PSpice for TI“.

Keďže k simulácii bol použitý tento simulačný program nebolo potrebné externé vkladanie modelu integrovaného obvodu LM3886, keďže tento simulačný program ho už má vo svojej knižnici.



Obrázok 4.3 Schémy koncového stupňa zosilňovača s LM3886 v simulačnom programe PSpice for TI

Pri spustení simulácie však simulačný program vypísal nasledovnú chybu:

ERROR(ORPSIM-15142): Node X_U1.11 is floating

Obrázok 4.4 Chyba pri pokuse o simuláciu.

Program hlási chybu priamo na integrovanom obvode. Chyba je vraj neuzavretie obvodu cez PIN 11, ktorý, ale nie je pripojený k vnútornej štruktúre integrovaného obvodu čo je možné vidieť v obrázku 3.1.

Po hľadaní riešenia danej chyby na internete bolo zistené že chyba sa objavuje aj iným užívateľom pri pokusoch o simuláciu daného integrovaného obvodu. Preto bol vytvorený predpoklad, že je chybný samotný model integrovaného obvodu LM3886. Práve z tohto dôvodu nebolo možné simulovať navrhnutú schému zapojenia a overenie charakteru obvodu.

5. NAPÁJACÍ ZDROJ

Napájacie zdroje sú základom každého elektrického zariadenia, používajú sa z dôvodu, že väčšina elektrických zariadení nie je stavaná na napájanie sieťovým napätím (230V). Niektoré zariadenia taktiež potrebujú byť napájané jednosmerným napájaním a nie striedavým napájaním, ktoré je dodávané v sieti.

Napájacie zdroje využívané k napájaniu zosilňovačov sa väčšinou používajú nestabilizované a so symetrickým napájaním.

Nestabilizované z dôvodu nutnosti využívania ďalších výkonových prvkov, ktoré by potrebovali extra chladenie.

Symetrické, pretože väčšina integrovaných obvodov používaných k realizácii zosilňovačov sú konštruované práve so symetrickým napájaním, tak ako je tomu aj v prípade tejto práce.

Napájací zdroj tohto typu sa skladá z troch častí, transformátora, ktorý má za úlohu transformovať sieťové napätie na nami požadované hodnoty, usmerňovača, ktorý sa stará o zmenu napätia zo striedavého na jednosmerné a vyhladzovacieho filtra, ktorý vyhladzuje napájacie napätie z usmerňovača a prípadne eliminuje výkyvy v sieti.

5.1.1 Transformátor

Sú dva druhy transformátorov o ktorých by sme mohli uvažovať pri aplikácii do tejto práce. Tými sú práve toroidné transformátory a transformátory s EI plechmi.

Oba tieto druhy transformátorov majú svoje výhody a nevýhody. Transformátory s EI plechmi majú väčšie rozmery a tým aj väčšiu hmotnosť, hmotnosť by nemusela robiť až tak veľké problémy, ale pri zariadení, ktoré bude uzatvorené v konštrukčnej krabici by menšie rozmery toroidných transformátorov mohli byť značnou výhodou. Toroidné transformátory majú taktiež menší rozptyl magnetického poľa do okolia tým pádom má menšie rušivé efekty pre okolité zariadenia, čo by pre našu aplikáciu malo jasné výhody. Transformátory majú ešte jednu zaujímavú vlastnosť, ktorou je to, že galvanicky oddeľujú obvody za transformátorom od obvodov pred ním.

Pre naše účely budeme potrebovať transformátor, ktorý dokáže dodávať dostatočné napätie do obvodu aj v zaťaženom stave a neprenáša rušivé impulzy zo siete na sekundárne vinutie, ktoré by ich následne mohlo preniesť na napájacie obvody zariadenia. Taktiež, aby svojou činnosťou negatívne neovplyvňoval zariadenia v okolí. Práve kvôli týmto požiadavkám a informáciám je pre naše účely lepšie zvoliť práve toroidný transformátor.

Pri výbere transformátora by sme taktiež mali uvažovať s určitou výkonovou rezervou voči maximálnemu požadovanému výkonu pre prípadnú kompenzáciu sieťových výkyvov a nezaťaženie transformátoru na maximum.

Pre naše účely bol zvolený toroidný transformátor s hodnotami napätia na sekundárnom vynúti 2 x 18V, výkon tohto transformátoru je 112,5VA pre jedno vinutie (225VA pre obe vinutia transformátoru).

5.1.2 Usmerňovač

Usmerňovač má za úlohu usmerniť napätie, ktoré bolo transformované pomocou transformátoru (výstup sekundárnej strany transformátoru).

Ako už bolo povedané úlohou usmerňovača je usmerniť napäťový výstup z transformátora, o to sa práve v usmerňovači starajú 4 diódy zapojené do graetzovho mostíka. Toto zapojenie môže byť realizované pomocou 4 samostatne osadených diód na DPS alebo môže byť realizované ako jedna súčiastka, ktorá obsahuje spomínané zapojenie diód ako je tomu aj v prípade tejto práce. K tomuto zapojeniu sa zvyknú pripájať takzvané blokované kondenzátory s menšou kapacitou v paralelnom zapojení k mostíku. Úlohou týchto kondenzátorov je vyhladenie rušivých prienikov zo siete a zabránenie ich vplyvu na výstupné napätie.

Pre účely tejto práce bol použitý usmerňovací mostík KBPC1504W (400V/15A), tento typ mostíku obsahuje 4 diódy zapojené do graetzovho zapojenia v jednom puzdre.

5.1.3 Vyhladzovací filter

Po tom ako je napätie transformované pomocou transformátora, následne usmernené pomocou usmerňovača je ešte potrebné toto napätie vyfiltrovať.

Filtrácia výstupného napätia spôsobí zníženie zvlnenia výstupného napätia ktorým napájame zariadenia. K tejto filtrácii sa používajú elektrolytické kondenzátory vysokej kapacity, ktorej hodnota sa odvíja napríklad od našich požiadaviek na maximálne zvlnenie výstupného napätia.

Kondenzátory sa taktiež starajú o kompenzáciu poklesov alebo špičiek v sieti, ktoré sa snažia eliminovať a zabrániť tak poklesu napätia na výstupe zdroja.

Pre účely tejto práce boli použité elektrolytické kondenzátory 10000 μ F/50V (3ks pre obe vetve zdroja) v paralelnom zapojení k dosiahnutiu požadovanej kapacity.

Po vyhladzovacom filtri boli do obvodu pridané ešte dve led diódy, ktorých úlohou je zobrazovacia funkcia funkčnosti napájacieho zdroja. Jedna dióda zabezpečuje zobrazovaciu funkciu kladnej vetvy napájacieho napätia a druhá dióda zabezpečuje zobrazovaciu funkciu negatívnej vetvy napájacieho napätia.

5.2 Výpočet parametrov zdroja

Požadované výstupné napätie zdroja je 22V. Z tohto napätia a požadovanému výkonu môžeme vypočítať výstupný prúd zdroja ktorý je nasledovný:

$$I_{out} = \frac{P_{zos}}{U_{out}} = \frac{80}{22} = 3,636A \quad (5.1)$$

Kde P_{zos} – je celkový výkon zosilňovača

U_{out} – je požadované výstupné napätie.

Pri uvažovaní rezervy a využitia zdroja k napájaniu nielen zosilňovačov, ale aj korekčného predzosilňovača a indikátorov vybudenia by zdroj mal byť schopný dodávať prúd okolo 5A.

Ďalej môžeme vypočítať napätie na sekundárnom vynúti transformátora:

$$U_2 = \frac{U_{out} + U_{drop}}{\sqrt{2}} = \frac{22 + 1,1}{\sqrt{2}} = 16,3342V \quad (5.2)$$

U_{out} – výstupné napätie zdroja

U_{drop} – je úbytok napätia na usmerňovacom mostíku (pre KBPC1506W podľa [7] 1,1V)

Ďalej môžeme vypočítať požadovaný výkon transformátora. Keďže počítame s požadovaným prúdom 5A a požadovaným napájacím napätím 16,3342V. Výkon transformátoru P_T je:

$$P_T = U_2 \cdot I_{out} = 16,3342 \cdot 5 = 81,671W \quad (5.3)$$

I_{out} – požadovaný výstupný prúd

Ako už bolo spomenuté vyššie pre účely tejto práce bol zvolený toroidný transformátor s hodnotami napätia na sekundárnom vynúti 2 x 18V, výkon tohto transformátora je 112,5VA pre jedno vinutie (225VA pre obe vinutia transformátora).

Následne môžeme vypočítať skutočnú hodnotu napätia na sekundárnom vynúti transformátora:

$$U_{out} = U_2 \cdot \sqrt{2} - U_{drop} = 18 \cdot \sqrt{2} - 1,1 = 24,356V \quad (5.4)$$

Keďže sa ale jedná o nestabilizovaný zdroj táto hodnota sa pri záťaži ešte o niečo zníži.

Výpočet výstupného prúdu bude vyzeráť nasledovne:

$$I_{out} = \frac{P_{tr}}{U_{out}} = \frac{112,5}{24,356} = 4,619A \quad (5.5)$$

Následne môžeme vypočítať hodnotu filtračných kondenzátorov:

$$C_{dc} = \frac{k \cdot I_{out}}{p \cdot U_{out}} = \frac{300 \cdot 5000}{2,5 \cdot 22} = 27272,727\mu F \quad (5.6)$$

Kde k je konštanta, p je zvlnenie výstupného napätia v % - volíme 2,5%

Pre dosiahnutie požadovanej kapacity boli použité tri paralelne zapojené elektrolytické kondenzátory 10000 μ F/50V (3ks pre obe vetve zdroja).

Táto rovnica pre výpočet potrebnej kapacity filtračných kondenzátorov bola prevzatá z [6].

Následne môžeme vypočítať hodnotu predradných rezistorov indikačných LED diód.

$$R_{LED} = \frac{U_{out} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{22 - 2,4}{20 \cdot 10^{-3}} = 990\Omega \quad (5.7)$$

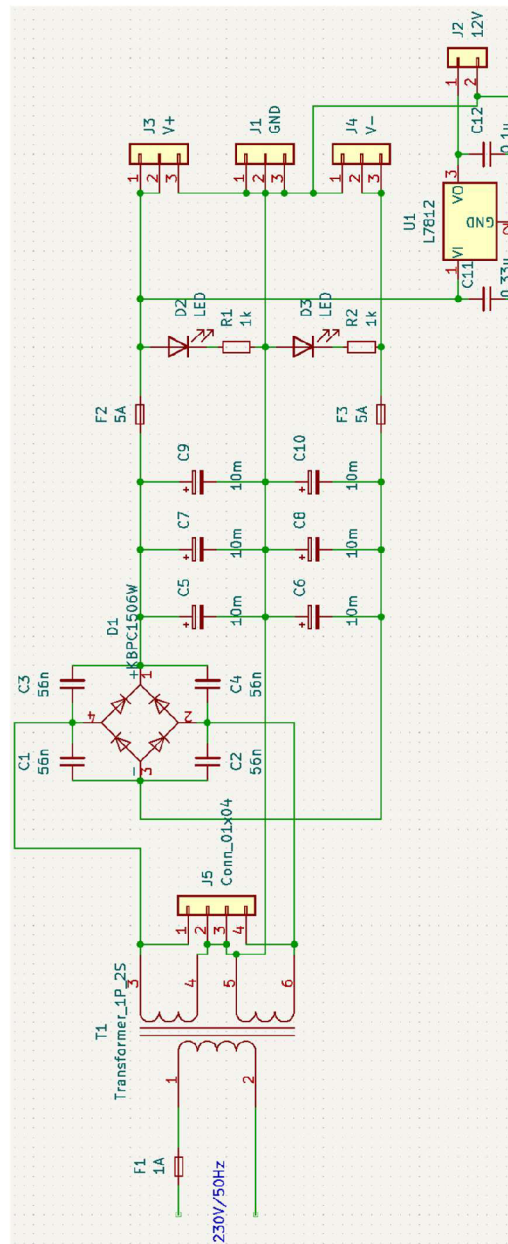
Bol zvolený rezistor s hodnotou $1k\Omega/0,5W$

5.2.1 Návrh zdroja pre LM1036 a LM3915

Návrh zdroja pre korekčný predzosilňovač realizovaný pomocou integrovaného obvodu LM1036 a indikátoru vybudenia realizovaného pomocou integrovaného obvodu LM3915 musel byť vytvorený separátne od napájacieho zdroja pre koncový člen zosilňovača. Dôvodom bolo to, že napájacie napätie integrovaného obvodu LM3886, ktorým je realizovaný koncový stupeň zosilňovača sa nezhoduje s obvody LM1036 a LM3915.

Z tohoto dôvodu bolo nutné navrhnuť vhodné napájacie zariadenie pre napájanie týchto dvoch čipov. Rozsah napájacieho napätia pre čip LM1036 je 9 až 16V. Rozsah napájacieho napätia pre čip LM3915 je 12 až 20V. Napájacie napätie bolo zvolené na hodnotu 12V. Na takúto hodnotu napätia sme sa dostali jednoducho pomocou využitia súčiastky L7812. Návrh schémy zapojenia ako aj hodnoty použitých súčiastok k tejto časti zdroja boli prevzaté z [8]. Pre napájanie tohto zariadenia bola použitá kladná vetva napájacieho napätia zdroja pre koncový člen.

5.2.2 Návrh celkovej schémy zapojenia zdroja



Obrázok 5.1 Návrh schémy zapojenia napájacieho zdroja

6. NÁVRH CHLADENIA

6.1 Možnosti chladenia

V elektrotechnike sa často stretávame s problémom, ktorým je zahrievanie sa výkonových prvkov (prevažne polovodičových prvkov) v elektronických obvodov. Tento problém vzniká v dôsledku, že súčiastky nemajú 100% efektívnosť a časť ich energie sa pri ich prevádzke mení na teplo. Pri prvkoch patriacich do triedy AB sa tento stratový výkon, ktorý sa mení na teplo pohybuje okolo 30%. Čo znamená, že 30% celkového dodaného výkonu súčiastke sa premení čisto len na nami nežiaduce zahrievanie prvkov. Tieto výkonové prvky sú stavané na to, aby zniesli isté teploty, to však, ale nestačí na ich dlhodobú prevádzku bez externého chladenia. Pre tieto dôvody je potrebné výkonové prvky v obvode chladiť, aby si udržali prevádzkovú teplotu, ktorá by nevedla k ich zničeniu.

Možnosti chladenia výkonových prvkov je niekoľko, napríklad chladenie pomocou hliníkového profilu, aktívne chladenie pomocou cirkulácie vzduchu, vodné chladenie za pomoci cirkulácie vody ktorá odvádza teplo alebo je možnosť súčiastku ponoriť do minerálneho oleja. Ponorenie prvku do minerálneho oleja je podobné ako pri chladení vodou, ale odstraňuje sa cirkulácia, pretože minerálni nemôže vytvárať skrat a tak nemusí byť chladená len časť výkonového prvku ale môže byť ponorený celý.

6.2 Chladenie koncových stupňov zosilňovača

Pri tejto práci sa ako najvhodnejšia možnosť chladenia páru výkonových integrovaných obvodov LM3886 poskytuje chladenie pomocou hliníkového profilu. Pre voľbu vhodného hliníkového profilu, ktorý bude schopný poskytnúť dostatočné chladenie si najskôr musíme vypočítať hodnotu stratového výkonu a hodnotu tepelného odporu obvodu.

6.2.1 Výpočet stratového výkonu

Rovnica pre výpočet stratového výkonu vyzerá nasledovne (vzťah využitý z [3]):

$$P_{D_{MAX}} = \frac{U_{cc}^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot R_L} \quad (6.1)$$

Kde U_{cc} je celkové napájacie napätie a R_L je impedancia záťaže (reproduktoru).

$$P_{D_{MAX}} = \frac{U_{cc}^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot R_L} = \frac{(|22| + |-22|)^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot 4} = 24,52W \quad (6.2)$$

Takže podľa rovnice o maximálnom stratovom výkone od výrobcu nám vyšla hodnota 24,52W, pre zjednodušenie môžeme uvažovať hodnotu 25W.

6.2.2 Výpočet tepelného odporu

V katalógovom liste pre integrovaný obvod LM3886 [3] nájdeme hodnotu tepelného odporu pre čip LM3886, ale nájdeme tam aj rovnicu pre výpočet tepelného odporu chladiča ktorá vyzerá nasledovne:

$$\theta_{SA} = \frac{(T_{Jmax} - T_{Amb}) - P_{DMAX} \cdot (\theta_{JC} + \theta_{CS})}{P_{DMAX}} \quad (6.3)$$

Kde θ_{SA} je tepelný odpor chladiča, T_{Jmax} je maximálna teplota čipu, pri ktorej dosiahnutí sa čip vypne, aby predišiel poškodeniu jej hodnota je 150°C , T_{Amb} je teplota okolia, P_{DMAX} je maximálny stratový výkon, ktorého hodnota je 25W , θ_{JC} je hodnota tepelného odporu medzi súčiastkami v čipe a jeho puzdrom, ktorá má podľa výrobcu hodnotu 1°C/W , θ_{CS} je hodnota tepelného odporu medzi puzdrom čipu a chladičom, ktorá podľa výrobcu nadobúda hodnotu $0,2^{\circ}\text{C/W}$.

Pred výpočtom si ešte musíme zvoliť teplotu okolia T_{Amb} , ktorú volíme na hodnotu 40°C

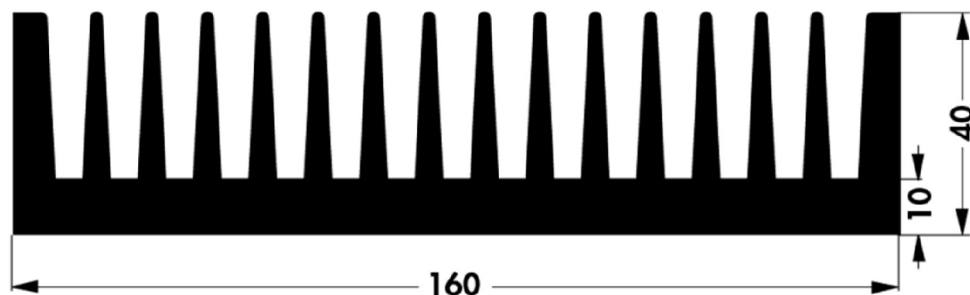
$$\theta_{SA} = \frac{(150 - 40) - 25 \cdot (1 + 0,2)}{25} = 3,2^{\circ}\text{C/W} \quad (6.4)$$

Toto je hodnota tepelného odporu chladiča v prípade, že bude k chladiču pripojený len jeden integrovaný obvod LM3886, v našom prípade budú ku chladiču pripojené tieto obvody dva a preto musíme urobiť ešte nasledujúci krok:

$$\theta_{SAcelok} = \frac{\theta_{SA}}{2} = \frac{3,2}{2} = 1,6^{\circ}\text{C/W} \quad (6.5)$$

Pre naše potreby bude nutné zaobstarať chladič s tepelným odporom $1,6^{\circ}\text{C/W}$ alebo nižším.

Chladič pre chladenie oboch integrovaných obvodov LM3886 koncového stupňa zosilňovača bol zvolený SK85/100SA od spoločnosti Fischer Elektronik. Rozmery tohto chladiča sú $100 \times 160 \times 40\text{ mm}$ a tepelný odpor tohto chladiča je $0,9^{\circ}\text{C/W}$, čo spĺňa naše požiadavky aj s dostatočnou rezervou. Chladič môžeme vidieť na nasledujúcom obrázku:



Obrázok 6.1 Obrázok chladiča SK85/100SA prevzatý z [9]

6.3 Chladienie usmerňovacieho mostíku

Nanešťastie návrh chladienia môže byť len približný keďže v katalógovom liste [7] nie sú informácie o teplotných odporoch, preto nie je možné vypočítať presné požiadavky na chladienie usmerňovacieho mostíka KBPC1504W.

Najskôr si vypočítame maximálny stratový výkon a to nasledovne:

$$P_{zmax} = U_{drop} \cdot I_{max} \quad (6.6)$$

Kde P_{zmax} je maximálny stratový výkon, U_{drop} je pokles napätia na mostíku a I_{max} je maximálny pretekajúci prúd.

$$P_{zmax} = 1,1 \cdot 5 = 5,5W \quad (6.7)$$

Následne môžeme prejsť k orientačnému výpočtu tepelného odporu chladiča kvôli vyššie spomenutým chýbajúcim premenným ten bude nasledovný:

$$\theta_{SA} = \frac{T_{Jmax} - T_{Amb}}{P_{DMAX}} = \frac{150 - 40}{5,5} = 20^{\circ}C/W \quad (6.8)$$

Ako už bolo spomenuté táto hodnota je len veľmi orientačná a preto sme pre naše využitie volili chladič s výrazne nižšou hodnotou tepelného odporu. Chladič zvolený pre chladienie usmerňovacieho mostíku je V5583E od výrobcu ASSMANN s rozmermi 46 x 50 x 33 mm s tepelným odporom 4,8°C/W. Tento chladič bol zvolený z dôvodu relatívne pekného zapadnutia do konštrukcie zariadenia a s jeho hodnotou tepelného odporu by mal byť viac ako schopný chladiť usmerňovací mostík. Hodnota tepelného odporu a rozmery chladiča boli prevzaté zo stránky predajcu [10].

7. DOSKY PLOŠNÝCH SPOJOV

Všetky návrhy dosiek plošných spojov boli realizované v programe KiCad. Výroba dosiek plošných spojov bola následne prenechaná externej firme, ktorá po zaslaní potrebných dokumentov k výrobe dosiek ich vyrobila a doručila. Všetky návrhy dosiek plošných spojov sú uvedené v prílohe A, v prílohe B sú následne uvedené všetky plány pre osadenie súčiastok.

7.1 Doska pre korekčný predzosilňovač

Doska plošného spoja korekčného predzosilňovača má rozmery 100 x 80 mm. Návrh tejto dosky je obojstranný. Obrázok dosky plošných spojov je možné vidieť v prílohe A obr. A1 a A2.

Plán osadenia pre túto dosku je možné vidieť v prílohe B obr. B1. Pri osadzovaní súčiastok sa postupovalo nasledovne. Najskôr sa na dosku plošných spojov osadili svorkovnice, následne sa osadila 20 pinová päťica, rezistory, kondenzátory a následne bol osadený integrovaný obvod do už osadenej päťice. Potenciometre sú umiestnené mimo dosky plošných spojov, s ktorou sú prepojené skrz vodiče. Potenciometre sú osadené na prednom paneli konštrukčnej krabice, preto boli s doskou plošných spojov spájané ako posledné, aby neboli prepojovacie vodiče príliš dlhé. K prepojeniu bola použitá takzvaná „trojlinka“. Obdobne ako pri potenciometroch bol riešený aj signálový vstup, ktorý je riešený pomocou konektoru zásuvky konektoru Jack, ten je taktiež uchytený na prednom paneli a tak isto je tomu aj pri prepínači, ktorým sa ovláda fyziologická regulácia loudness. Napájacie vodiče a vodiče prenášajúce signál na koncový výkonový člen zariadenia, boli pridané po osadení dosky plošných spojov do konštrukčnej krabice.

7.2 Doska pre indikátor vybudenia

Doska plošného spoja indikátora vybudenia má rozmery 100 x 47 mm. Návrh tejto dosky je obojstranný. Obrázok dosky plošných spojov je možné vidieť v prílohe A obr. A3 a A4.

Plán osadenia pre túto dosku je možné vidieť v prílohe B obr. B2. Pri osadzovaní súčiastok postupujeme nasledovne. Najskôr boli na dosku plošných spojov osadené svorkovnice, následne sa osadila 18 pinová päťica, rezistory, led diódy a nakoniec bol osadený integrovaný obvod do už predom osadenej päťice. Ako aj pri predchádzajúcej doske plošných spojov boli zvolené pri osádzaní integrovaných obvodov päťice. Takéto riešenie bolo zvolené z dôvodu ochrany integrovaného obvodu pred prípadným poškodením teplom, pri spájkovacom procese a pre prípadnú jednoduchšiu výmenu integrovaného obvodu v prípade problému. Indikátor vybudenia je schopný sledovať úroveň výstupného signálu len pre jeden kanál (mono), takže pre stereofónnu verziu je potrebné osadiť tieto dosky dve. Indikátor vybudenia má za úlohu zobrazovať vybudenie reproduktora, toto vybudenie je indikované pomocou led diód osadených na doske

plošných spojov. Kvôli tomuto dôvodu je potrebné pred osadením dosky plošných spojov do konštrukčnej krabice vyvrtáť diery do predného panelu pre spomínané LED diódy. Po osadení dosky sú následne pripojené vodiče pre napájacie napätie a signálový vstup na svorkovnice. Signálový vstup je pripojený k 4 pinovému audio konektoru, ktorý slúži pre pripojenie reproduktorov, ten je umiestnený v zadnom paneli konštrukčnej krabice.

7.3 Doska pre koncový člen

Doska plošného spoja koncového člena má rozmery 95 x 67 mm. Návrh tejto dosky je obojstranný, ale jedná sa o návrh vo verzii mono takže pre jeden kanál, pre stereofónnu verziu (pravý a ľavý kanál) je potrebné osadiť dosky dve. Obrázok dosky plošných spojov je možné vidieť v prílohe A obr. A5 a A6.

Plán osadenia pre túto dosku je možné vidieť v prílohe B obr. B3. Pred začiatkom osadzovania súčiastok je potrebné vyrobiť dve identické cievky L_1 pre každú dosku jednu. Cievka je vyrobená tak, že sa navinie 12 zavítohou lakovaného medeného drôtu o priemer 0,6 mm tesne vedľa seba. Cievky je možné navinúť aj na rezistor R7, v prípade tejto práce takto postupované však nebolo. Po vytvorení cievok postupujeme pri osadzovaní súčiastok nasledovne. Najskôr boli na dosku plošných spojov osadené svorkovnice, rezistory, kondenzátory, cievka a nakoniec integrovaný obvod. Dosky plošných spojov musia byť pred osadením do konštrukčnej krabice ešte namontované na chladič, následne sa môžu uchytávať do konštrukčnej krabice aj spolu s chladičom. Po osadení je ešte následne pripojený spínač ovládajúci funkciu „mute“, ktorý je umiestnený na prednom paneli konštrukčnej krabice. Následne sú pripojené vodiče pre napájacie napätie, signálový vstup a výstup do svorkovnic.

7.4 Doska pre napájací zdroj

Doska plošného spoja napájacieho zdroja má rozmery 130 x 127 mm. Návrh tejto dosky je jednostranný. Obrázok dosky plošných spojov je možné vidieť v prílohe A obr. A7.

Plán osadenia pre túto dosku je možné vidieť v prílohe B obr. B4. Pri osadzovaní súčiastok postupujeme nasledovne. Najskôr boli na dosku plošných spojov osadené svorkovnice, rezistory, svorky pre poistky, usmerňovací mostík, kondenzátory a následne čip L7812. Indikačné LED diódy sú k doske pripojené pomocou takzvanej „dvojlinky“ a sú umiestnené na prednom paneli konštrukčnej krabice, pre ktoré je potrebné vyvrtáť diery. Po uchytaní dosky do konštrukčnej krabice sú pripojené vodiče pre napájanie zariadenia a taktiež je pripojený aj transformátor, ktorý je už v krabici uchytaný a pripojený k napájacímu AC konektoru cez 1A poistku a vypínač, ktorý je umiestnený v zadnom paneli konštrukčnej krabice.

8. MERANIE ZÁKLADNÝCH PARAMETROV

Po osadení a kompletizácii dosiek plošných spojov ktoré bolo popísané v predchádzajúcej časti a ich následnom oživení nasledovalo premeranie korekčného predzosilňovača a koncového člena.

8.1 Korekční predzosilňovač

V nasledujúcich podkapitolách sa bude riešiť meranie základných parametrov korekčného predzosilňovača s integrovaným obvodom LM1036. Tieto merania budú následne porovnávané s meraniami poskytnutými výrobcom v katalógovom liste, ktorý je dostupný v [1]. Toto bude jediné možné porovnanie meraní z dôvodu nemožnosti tento obvod simulovať, pretože neexistuje simulačný model integrovaného obvodu LM1036.

8.1.1 Meranie modulovej frekvenčnej charakteristiky

Meranie modulovej frekvenčnej charakteristiky prebiehalo nasledovne. Na signálový vstup bol privedený sínusový signál s napätím $U_{IN} = 800\text{mV}$ z generátoru. Následne bolo nastavené zosilnenie $A = 1$ pri frekvencii $f = 1\text{kHz}$ a korelácii výšok a hĺbok nastavené na zhruba stredovú hodnotu.

Meranie prebiehalo pre nastavenie výšok a hĺbok na minimum a následne na maximum. Meranie bolo vytvorené pre oba kanály.

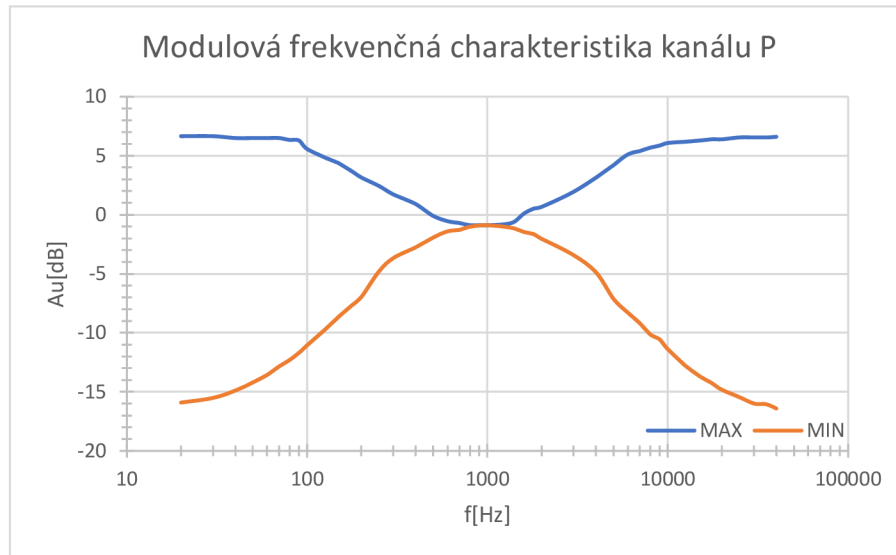
Celú tabuľku meraných hodnôt možno vidieť v prílohe C Tab. 1., tabuľka s pár vybranými hodnotami vyzerá nasledovne:

Tabuľka 8.1 Meranie modulovej frekvenčnej charakteristiky

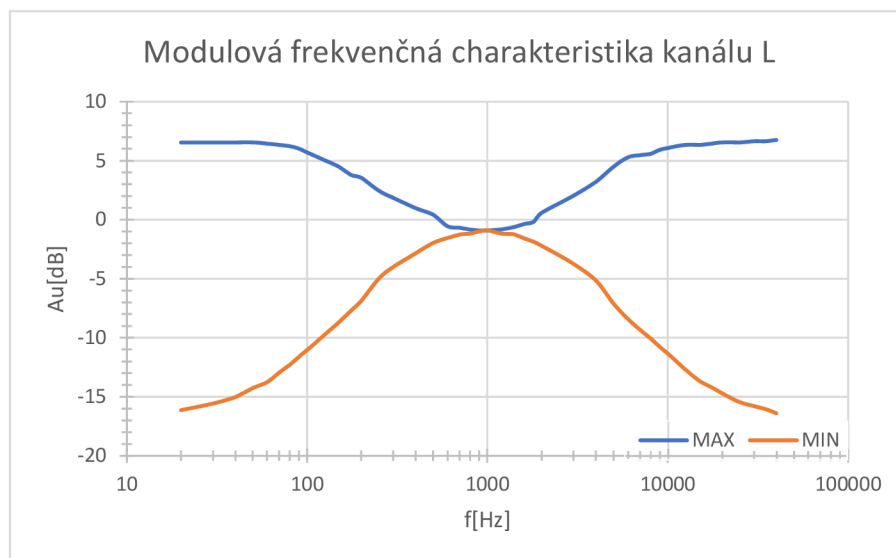
	Korelácie max				Korelácie min			
	Pravý kanál		Ľavý kanál		Pravý kanál		Ľavý kanál	
f [Hz]	U_{out} [V]	Au [dB]	U_{out} [V]	Au [dB]	U_{out} [mV]	Au [dB]	U_{out} [mV]	Au [dB]
20	1,72	6,649	1,7	6,547	128	-15,918	125	-16,124
50	1,69	6,496	1,7	6,547	156	-14,199	155	-14,255
100	1,52	5,575	1,54	5,689	224	-11,057	224	-11,057
200	1,15	3,152	1,2	3,522	360	-6,936	364	-6,840
500	0,792	-0,087	0,839	0,413	640	-1,938	637	-1,979
1000	0,722	-0,891	0,72	-0,915	722	-0,891	721	-0,903
2000	0,864	0,668	0,855	0,578	632	-2,047	620	-2,214
5000	1,3	4,217	1,34	4,480	352	-7,131	353	-7,106
10000	1,61	6,075	1,61	6,075	216	-11,373	217	-11,333
20000	1,67	6,393	1,7	6,547	145	-14,834	147	-14,715

Príklad výpočtu pre Au v prvom riadku tabuľky pre pravý kanál je nasledovný:

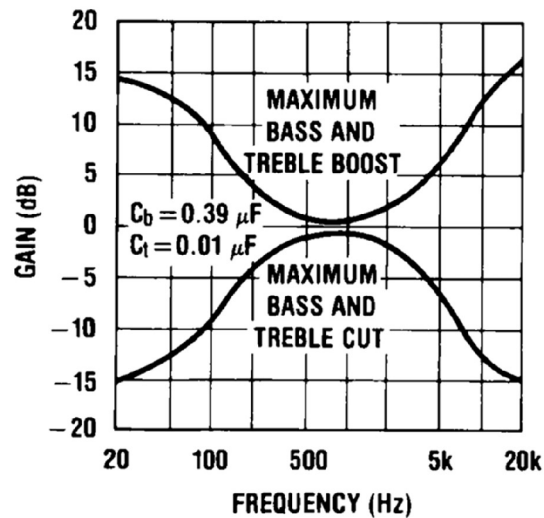
$$A_u = 20 \cdot \log \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = 20 \cdot \log \frac{1,72}{0,8} = 6,649 \text{ dB} \quad (8.1)$$



Obrázok 8.1 Modulová frekvenčná charakteristiky pravý kanál



Obrázok 8.2 Modulová frekvenčná charakteristiky Ľavý kanál



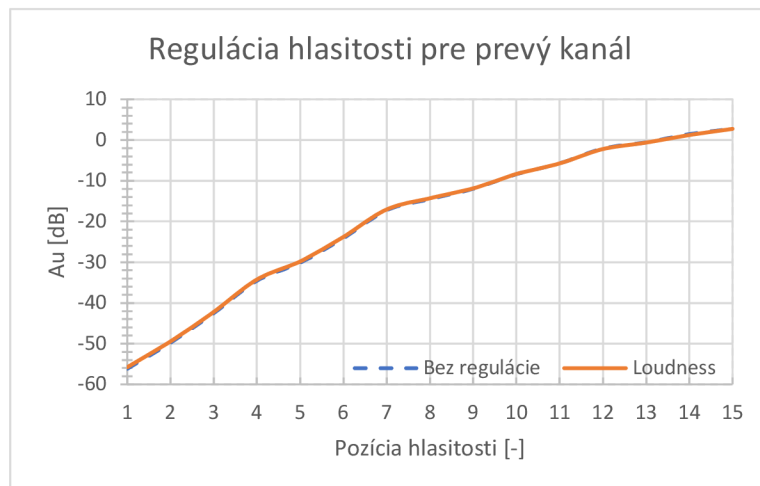
Obrázok 8.3 Modulová frekvenčná charakteristika meraná výrobcom prevzaté z [1]

Ak sa pozrieme na meranie praveho a ľaveho kanálu korekčného predzosilňovača použitého v tejto práci Obr. 8.1, 8.2 a porovnáme si ho s meraním poskytnutým výrobcom, môžeme vidieť, že charaktery priebehov sú si podobné. Odchýlka pri meraní maxim korelácie bude zapôsobená nižšou napäťovou hodnotou vstupného signálu. Taktiež je viditeľné, že má krivka o niečo lineárnejší charakter ako pri meraní výrobcom, to bude pravdepodobne spôsobené z dôvodu nevybudenia výšok a hĺbok na úplne maximum, keďže pri nastavení výšok a hĺbok na úplne maximum dochádzalo k skresleniu výstupného signálu. Meranie tak bolo realizované tesne pred maximálnymi hodnotami výšok a hĺbok.

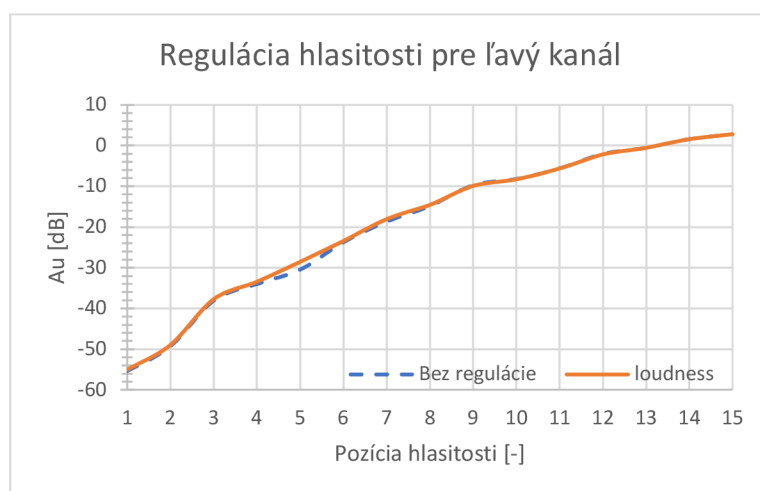
8.1.2 Meranie regulácie hlasitosti

Meranie regulácie hlasitosti voči pozícii potenciometra prebiehalo nasledovne. Na signálový vstup bol privedený sínusový signál s napätím $U_{IN} = 800mV$ a frekvenciou $f = 1kHz$ z generátoru. Regulácia výšok a hĺbok boli po privedení vstupného signálu nastavené na stredové hodnoty, následne sa mohlo začať meranie nastavením potenciometru ovládajúcim hlasitosť skoro na minimum a postupným zvyšovaním.

Tabuľka meraných hodnôt možno vidieť v prílohe C Tab. 2.



Obrázok 8.4 Regulácia hlasitosti pre pravý kanál



Obrázok 8.5 Regulácia hlasitosti pre ľavý kanál

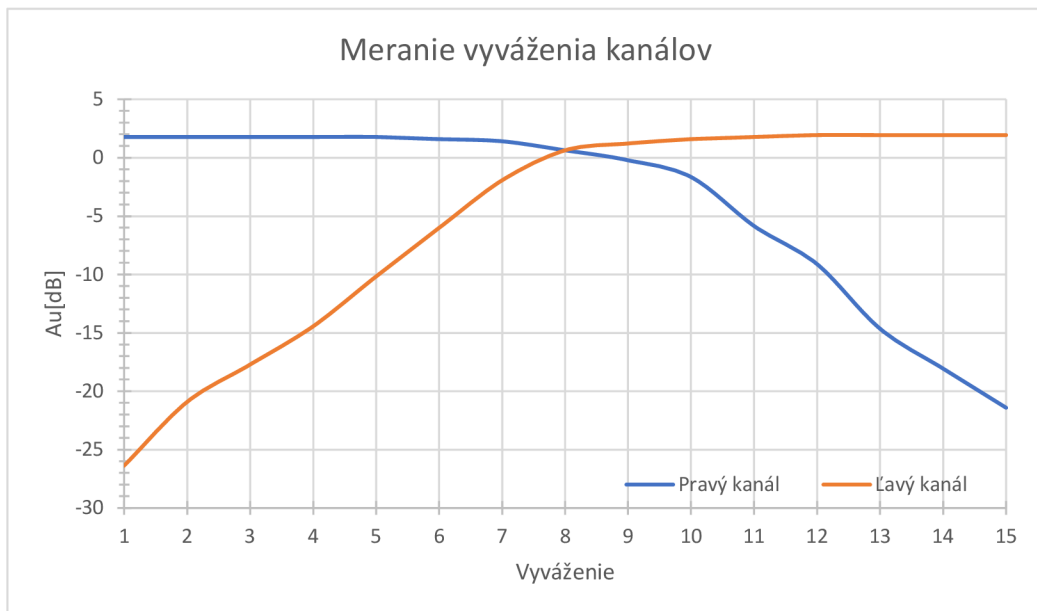
Ako je možné pozorovať z grafov na obrázkoch 8.4, 8.5 grafický priebeh pre pravý a ľavý kanál sú skoro identické. Charakter priebehu má lineárny charakter čo nie je najideálnejšie z dôvodu zmeny hlasitosti pri začiatku regulácie bude mať len veľmi ťažko zreteľné zmeny pre ľudský sluch.

8.1.3 Meranie vyváženie kanálov

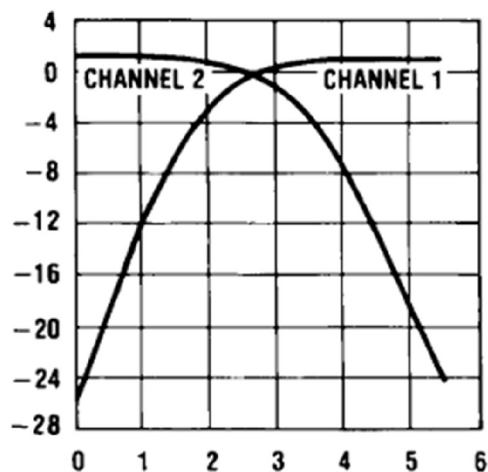
Meranie vyváženia kanálov pomocou regulácie potenciometrom prebiehalo nasledovne. Na signálový vstup bol privedený sínusový signál s napätím $U_{IN} = 800\text{mV}$ a frekvenciou $f = 1\text{kHz}$ z generátoru, kde bolo najskôr nastavené regulovanie výšok a hĺbok na stred

a zosilnenie $A \cong 1$. Potom bol potenciometer regulujúci vyváženie nastavený najskôr na minimum a postupne sa otáčal až do maxima.

Tabuľka meraných hodnôt možno vidieť v prílohe C Tab. 3.



Obrázok 8.6 Regulácia vyváženia kanálov



Obrázok 8.7 Regulácia vyváženia kanálov meraná výrobcom prevzaté z [1]

Ako je možné pozorovať z grafu na obrázku 8.6 a grafu meraného výrobcom na obrázku 8.7 je možné pozorovať, že grafy majú rovnaký charakter.

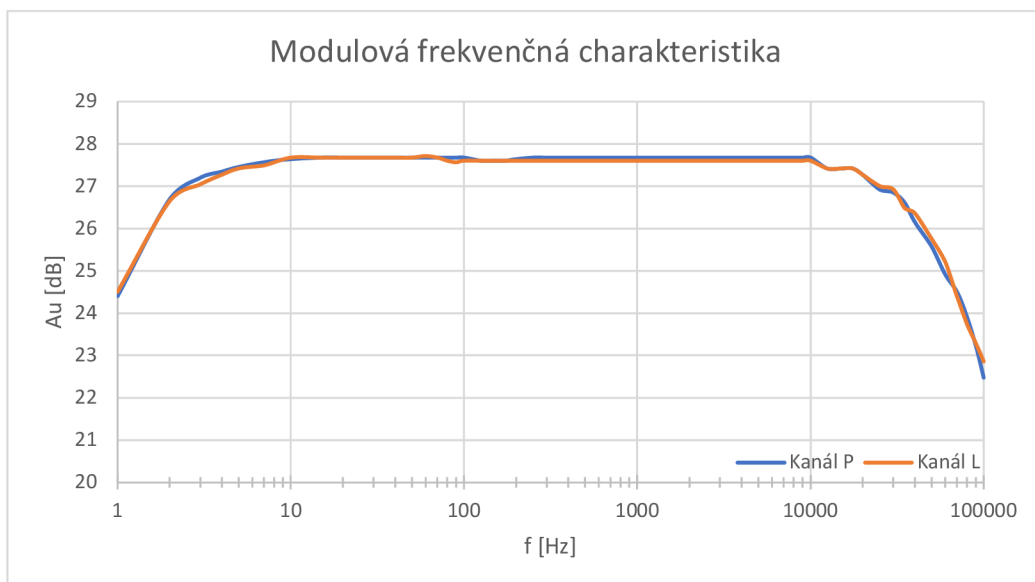
8.2 Koncový člen

V nasledujúcich podkapitolách sa bude riešiť meranie základných parametrov koncového člena s integrovaným obvodom LM3886. Nanešťastie merania nie je možné porovnať so simuláciami z dôvodu nemožnosti tento obvod simulovať kvôli chybe v simulačnom modeli integrovaného obvodu LM3886, ktorá je bližšie spomenutá v kapitole 4.3.

8.2.1 Modulová frekvenčná charakteristika

Meranie modulovej frekvenčnej charakteristiky pre koncový člen s integrovaným obvodom LM3886 prebiehalo nasledovne. Na signálový vstup bol privedený sínusový signál s napätím $U_{IN} = 100\text{mV}$, následne prebiehalo meranie zosilnenia výstupného napätia, ktoré bolo prepočítané na zosilnenie A_u [dB] a z týchto hodnôt zosilnenia bol následne vytvorený graf.

Tabuľka meraných hodnôt možno vidieť v prílohe C Tab. 4.



Obrázok 8.8 Graf modulovanej frekvenčnej charakteristiky

8.2.2 Meranie maximálnej hodnoty výkonu

Meranie maximálnej hodnoty výkonu prebiehalo nasledovne. Na signálový vstup bol privedený sínusový signál s napätím $U_{IN} = 800\text{mV}$ a frekvenciou $f = 1\text{kHz}$ z generátoru korekcie výšok, hĺbok a vyváženia kanálov boli nastavené na stredovú pozíciu a následne sa vytvorilo meranie pri maximálnej hlasitosti nastavenej potenciometrom regulujúcim hlasitosť. Jednotlivé kanály boli pri meraní zaťažené 4Ω výkonovým rezistorom.

Tabuľka meraných hodnôt vyzerala nasledovne:

Tabuľka 8.2 Maximálne hodnoty výkonu

Kanál P		Kanál L	
U _{OUT} [V]	P _{max} [W]	U _{OUT} [V]	P _{max} [W]
14,99	56,175	14,43	52,056

Príklad výpočtu pre pravý kanál je nasledovný:

$$P_{max} = \frac{U_{out}^2}{R_z} = \frac{14,99^2}{4} = 56,175 \text{ W} \quad (8.2)$$

8.3 Meranie napät'ového zdroja

Meranie zdroja bolo vytvárané v dvoch meraniach a to meranie bez záťaže a meranie so záťažou.

8.3.1 Meranie

Tabuľka 8.3 Meranie napájacieho zdroja

Nezaťažený		Zaťažený	
Kladná vetva [V]	Záporná vetva [V]	Kladná vetva [V]	Záporná vetva [V]
27,1	-26,7	24,9	-24,6

Meranie bez záťaže bolo vytvárané pred zapojením napájacích vodičov a meranie so záťažou bolo vytvárané po zapojení vodičov a privedení signálového vstupu na obvody.

8.4 Použité meracie prístroje

K meraniu v celej kapitole 8 boli použité nasledovné meracie prístroje

Generátor Tektronix AFG310

Osciloskop AaveAce 101

Digitálny multimeter METEX M-3800

Prepojovacie vodiče s BNC konektormi

Sondy pre osciloskop

4Ω výkonový rezistor

9. ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo vytvoriť návrh a funkčné zariadenie stereo audio výkonového zosilňovača triedy AB s minimálnym výkonom 2 x 25W pre domáce použitie. Tento cieľ práce bol splnený a realizované zariadenie má výkon okolo 50W. Koncový stupeň mal byť doplnený o korekčný predzosilňovač s možnosťou grafického zobrazovania charakteristiky a indikátorom vybudenia reproduktorov. Táto časť práce bola čiastočne splnená, práca obsahuje návrh a realizáciu korekčného predzosilňovača a indikátora vybudenia reproduktorovej súpravy. Práca mala taktiež obsahovať overenie navrhnutých zapojení simuláciami. Overenie návrhov v práci pomocou simulácií nebolo možné dosiahnuť.

Riešenie práce bolo rozdelené na návrh korekčného predzosilňovača, indikátora vybudenia, koncového stupňa zosilňovača, napájacieho zdroja, návrh chladenia a nakoniec meranie zostrojeného zariadenia. Všetky návrhy schematických zapojení a návrhy dosiek plošných spojov v tejto práci boli vypracované pomocou programu KiCad. Realizácia dosiek plošných spojov bola prenechaná externej firme.

Pre plnenie funkcie korekčného predzosilňovača bol zvolený integrovaný obvod LM1036, tento obvod dokáže operovať s dvoma vstupnými signálmi (stereo). Tieto vstupné signály môžu byť regulované súčasne bez vzájomného ovplyvňovania sa za pomoci štvorice riadiacich potenciometrov. Návrh schematického zapojenia bol prevzatý z doporučeného katalógového zapojenia [1] od výrobcu, podľa ktorého bol následne realizovaný návrh DPS. Simuláciu korekčného predzosilňovača nanešťastie nebolo možné vytvoriť z dôvodu neexistencie modelu pre simuláciu. Korekčný predzosilňovač taktiež nebol doplnený o požadované grafické zobrazenie charakteristiky.

Pre plnenie funkcie indikátora vybudenia bol zvolený integrovaný obvod LM3915, jedná sa o v celku jednoduchý obvod, ktorý ku svojej funkčnosti potrebuje len relatívne malé množstvo externých súčiastok. Integrovaný obvod dokáže zobrazovať vybudenie len jedného kanálu preto museli byť v práci použité dva. Integrovaný obvod zobrazuje vybudenie sústavy za pomoci 10 LED diód, má taktiež možnosť prepínania režimu zobrazovania z bodového na pásové. Obvod má výhodu externého napájania, čo má za dôsledok to, že sa nemusí napájať cez koncový stupeň, preto svojou činnosťou neznižuje výstupný výkon zosilňovača. Návrh schematického zapojenia indikátora bol prevzatý z doporučeného katalógového zapojenia [2] od výrobcu, podľa ktorého bol následne znovu realizovaný návrh DPS.

Pre plnenie funkcie koncového stupňa zosilňovača bol zvolený integrovaný obvod LM3886, ktorý hravo presahuje zadaním požadované hodnoty výsledného zosilnenia. Tento integrovaný obvod je, ale v konštrukcii mono a preto k dosiahnutiu požadovaného stereo zariadenia boli použité tieto integrované obvody dva. Integrovaný obvod obsahuje niekoľko ochranných funkcií ako aj funkciu „mute“ ktorá zabezpečuje utlmenie zosilňovača ako aj časové oneskorenie pri prechode z netlmeného do utlmeného stavu.

Návrh schematickeho zapojenia bol prevzatý z [4], zapojenie vychádza z doporučeného katalógového zapojenia [3] výrobcom. Toto schéma zapojenia bolo následne ešte čiastočne upravené pomocou [5], následne boli vypočítané hodnoty súčiastok a premenných daného zapojenia. Po finálnom návrhu schematickeho zapojenia bola následne navrhnutá DPS. Simulovanie navrhnutého schematickeho zapojenia sa bohužiaľ nepodarilo z predpokladaným dôvodom bola chyba v modeli integrovaného obvodu.

Ďalšou časťou práce bol návrh vhodnej napájacej jednotky pre všetky zariadenia. Bol vytvorený návrh schematickeho zapojenia a následne návrh DPS. Jedná sa o jednoduchý symetrický nestabilizovaný zdroj, ktorý napája koncovú časť. Tento zdroj je doplnený o stabilizovanú časť zdroja, ktorá dodáva 12V pomocou čipu L7812. Samotný zdroj je schopný dodávať napájacie napätie v zaťaženom stave o hodnote 24,9V pre kladnú polaritu a -24,6V pre zápornú polaritu.

Ďalšou časťou práce bolo navrhnuť chladenie pre výkonové prvky, konkrétne pre koncový stupeň zosilňovača a usmerňovacieho mostíka. Bolo zvolené chladenie hliníkovými profilmi pre koncový stupeň, to bol chladič SK85/100SA s rozmermi 100 x 160 x 40 mm a hodnotou tepelného odporu 0,9°C. Pre chladenie usmerňovacieho mostíka bol zvolený chladič V5583E s rozmermi 46 x 50 x 33 mm a hodnotou tepelného odporu 4,8°C.

V ďalšej časti sa práca zaoberala návrhom, realizáciou a osadzovaním dosiek plošných spojov pre zariadenie. Konkrétne doskami pre korekčný predzosilňovač, ktorá má rozmery 100 x 80mm, indikátorom vybudenia s rozmermi 100 x 47 mm, koncového stupňa s rozmermi 95 x 67 mm a napájacieho zdroja s rozmermi 130 x 127 mm.

V ďalšej časti sa práca zaoberá meraním zhotovených zariadení. V tejto časti môžeme vidieť merania pre korekčný predzosilňovač, koncový stupeň a napájací zdroj. Pre korekčný predzosilňovač sú to merania modulovej frekvenčnej charakteristiky, regulácie hlasitosti a vyváženia kanálov. Pre koncový stupeň to sú meranie modulovanej frekvenčnej charakteristiky a maximálneho dosiahnutého výkonu, ktorý bol pre pravý kanál na hodnote 56,175W a pre ľavý kanál 52,056W. Môžeme tu taktiež vidieť meranie hodnôt napájacieho napätia zo zdroja pri záťaži a bez záťaže.

LITERATÚRA

- [1] Katalógový list LM1036: *Dual DC Operated Tone/Volume/Balance Circuit* [online]. Jan 1995, April 2013 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/836825/TI1/LM1036.html>
- [2] Katalógový list LM3915: *Dot/Bar Display Driver* [online]. Jan 2000, Marec 2013 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/558236/TI/LM3915.html>
- [3] Katalógový list LM3886 Overture: *Audio Power Amplifire series* [online]. Máj 1999, Marec 2013 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/517665/TI1/LM3886.html>
- [4] KOTISA, Zdeněk. *NF zesilovače: Integrované výkonové zesilovače. 2.* Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0053-9.
- [5] CAMPBELL, Scott. *Circuit Basic: A COMPLETE GUIDE TO DESIGN AND BUILD A HI-FI LM3886 AMPLIFIER* [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/design-hi-fi-audio-amplifier-lm3886/>
- [6] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Lineární napájecí zdroje.* Online. Praha: Technická Literatura BEN, 2001. ISBN 80-7300-002-4. Dostupné z: http://kdf1s1.troja.mff.cuni.cz/knihy/Linearni_napajeci_zdroje.pdf. [cit. 2024-05-20].
- [7] Katalógový list KBPC1506W: *TECHNICAL SPECIFICATIONS OF SINGLE-PHASE SILICON BRIDGE RECTIFIER VOLTAGE RANGE - 50 to 1000 Volts.* Online. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/092697539beadc9c235b1562349627ff/KBPC15xxW_ser.pdf. [cit. 2024-05-20].
- [8] Katalógový list L78: *Positive voltage regulator ICs.* Online. STMicroelectronics, November 2016. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/ca9f9ea733232dbf9060d5224849cc58/L78.pdf>. [cit. 2024-05-20].
- [9] Katalógový list: *Standard extruded heatsinks.* Online. Fischer Elektronik. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/17529.pdf>. [cit. 2024-05-20].
- [10] GMElectronic. Online. Dostupné z: <https://www.gme.sk/v/1500921/assmann-v5583e-chladic-to-220>. [cit. 2024-05-20].

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií
VUT	Vysoké učení technické v Brne
PDIP	Plastové dvoj-radové puzdro
Obr.	Obrázok
Tab.	Tabuľka
DPS	Doska plošných spojov

Symbols:

U	napätie	(V)
I	prúd	(A)
U_{NAP}	napájacie napätie	(V)
P_{OUT}	požadovaná hodnota výkonu	(W)
R_L	impedancia záťaže	(Ω)
U_{IO}	úbytok napätia na integrovanom obvode	(V)
I_{max}	maximálna hodnota prúdu	(A)
X_C	kapacitná reaktancia	(Ω)
U_{CC}	celkové napájacie napätie	(V)
A	zosilnenie	(-)
A_{dB}	zosilnenie	(dB)
F_{Dn}	dolná medzná frekvencia neinvertujúceho vstupu	(Hz)
F_{Hn}	horná medzná frekvencia neinvertujúceho vstupu	(Hz)
F_{Ds}	dolná medzná frekvencia spätnej väzby	(Hz)
F_{Hs}	horná medzná frekvencia spätnej väzby	(Hz)
F_Z	medzná frekvencia Zobelovho filtra	(Hz)
T	časové oneskorenie	(s)
I_{OUT}	výstupný prúd zdroja	(A)
P_{ZOS}	celkový výkon zosilňovača	(W)
U_{OUT}	výstupné napätie	(V)
U_2	napätie na sekundárnom vynúti transformátora	(V)
U_{drop}	úbytok napätia na usmerňovacom mostíku	(V)
P_T	výkon transformátora	(W)
C_{dc}	kapacita filtračných kondenzátorov	(μ F)
R_{LED}	predradný rezistor LED diód	(Ω)
P_{DMAX}	stratový výkon	(W)
θ_{SA}	tepelný odpor chladiča	($^{\circ}$ C/W)
T_{Jmax}	maximálna teplota čipu	($^{\circ}$ C)

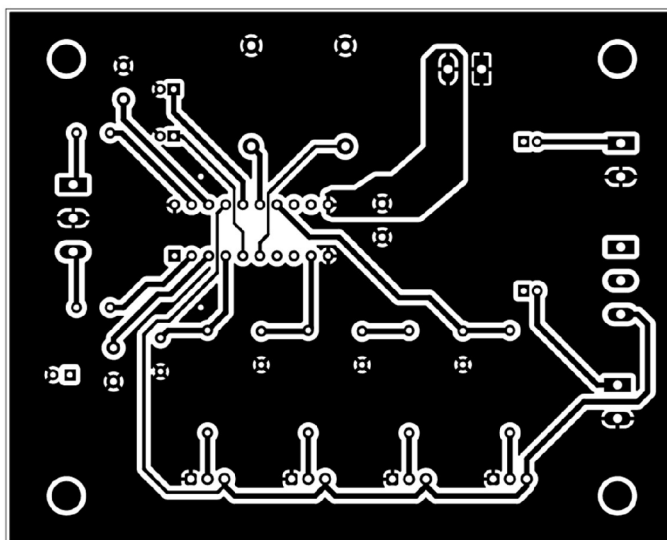
T_{Amb}	Teplota okolia	(°C)
θ_{JC}	Tepelný odpor medzi obvodom a puzdrom čipu	(°C/W)
θ_{CS}	Tepelný odpor medzi puzdrom čipu a chladičom	(°C/W)
P_{ZMAX}	stratový výkon	(W)

ZOZNAM PRÍLOH

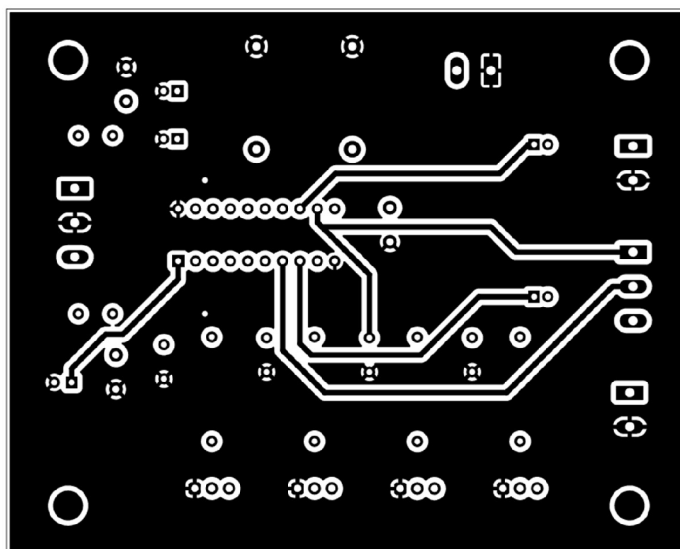
PŘÍLOHA A - DOSKY PLOŠNÝCH SPOJOV	50
PŘÍLOHA B - PLÁNY OSADENIA SÚČIASTOK.....	53
PŘÍLOHA C - TABUĽKY MERANÝCH HODNÔT	55

Příloha A - Dosky plošných spojů

Korekčný predzosilňovač LM1036

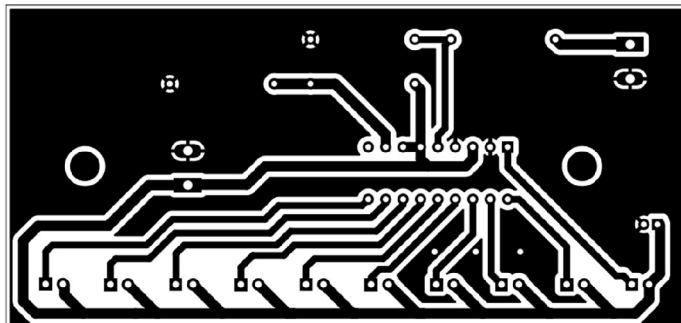


Obr. A.1 – Doska plošného spoja korekčného predzosilňovača TOP, rozmery 100 x 80 mm, M1:1

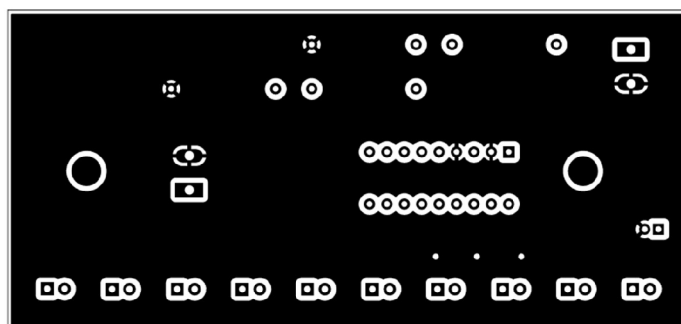


Obr. A.2 – Doska plošného spoja korekčného predzosilňovača BOTTOM, rozmery 100 x 80 mm, M1:1

Indikátor vybudenia LM3915

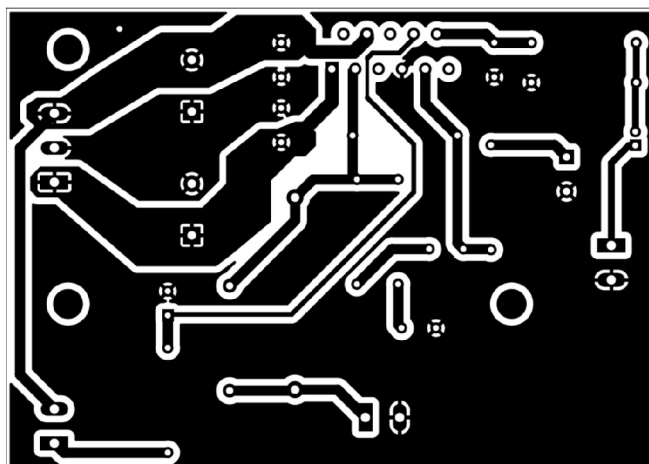


Obr. A.3 – Doska plošného spoja indikátora vybudenia TOP, rozmery 100 x 47 mm, M1:1

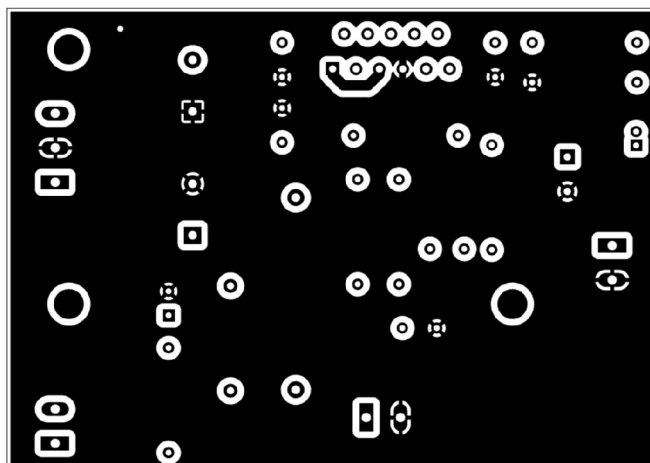


Obr. A.4 – Doska plošného spoja indikátora vybudenia BOTTOM, rozmery 100 x 47 mm, M1:1

Koncový stupeň LM3886

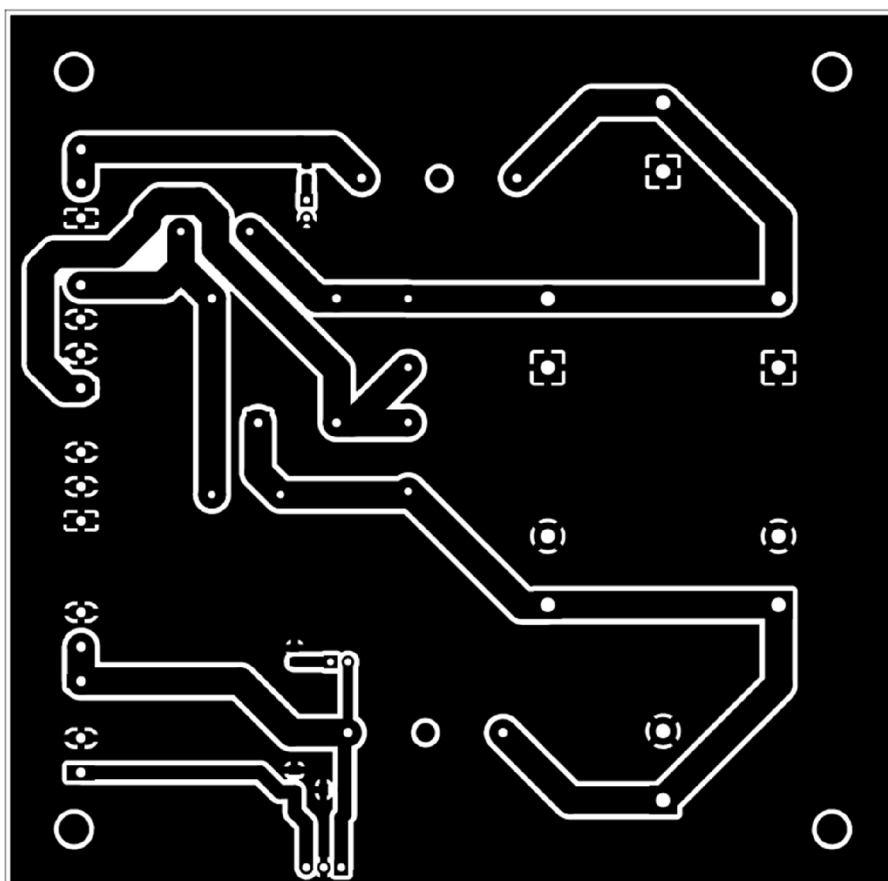


Obr. A.5 – Doska plošného spoja koncového stupňa TOP, rozmery 95 x 67 mm, M1:1



Obr. A.6 – Doska plošného spoja koncového stupňa BOTTOM, rozmery 95 x 67 mm, M1:1

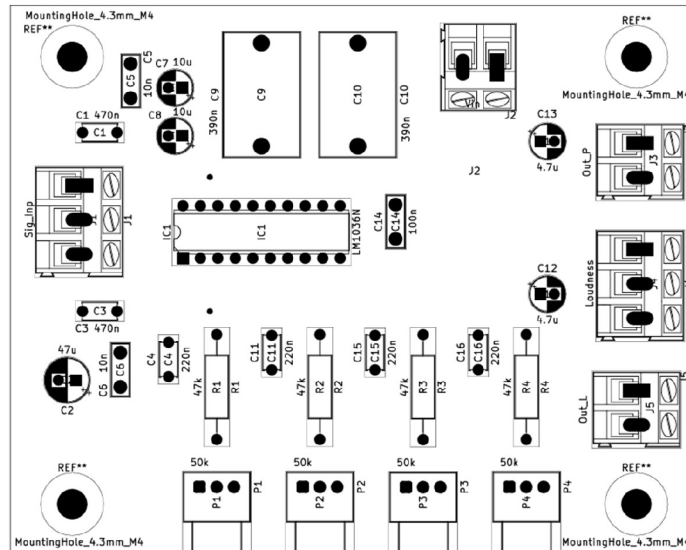
Napájací zdroj



Obr. A.7 – Doska plošného spoja napájacieho zdroja BOTTOM, rozmery 130 x 128 mm, M1:1

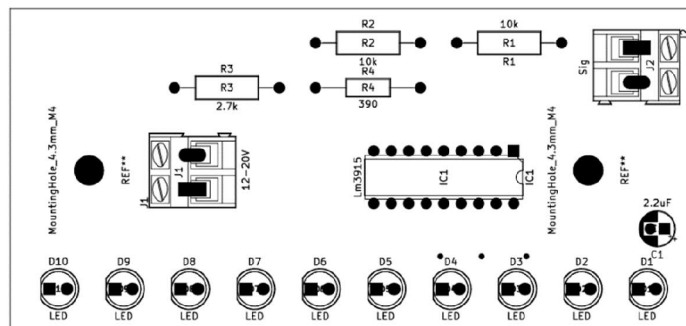
Příloha B - Plány osadenia súčiastok

Korekčný predzosilňovač LM1036



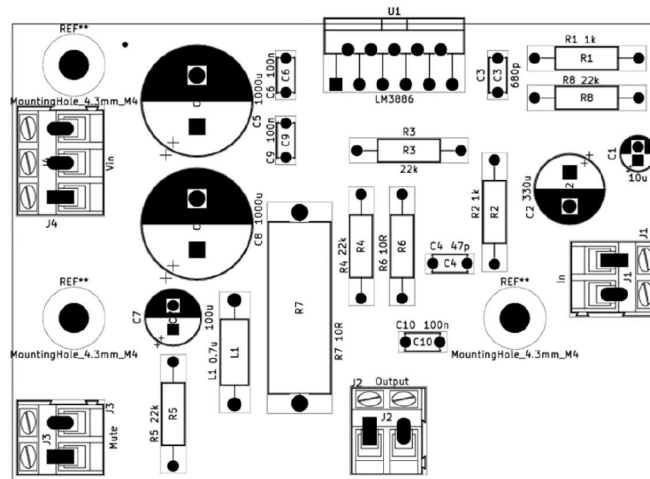
Obr. B.1 – Plán osadzovania – korekčný predzosilňovač, M1:1

Indikátor vybudenia LM3915



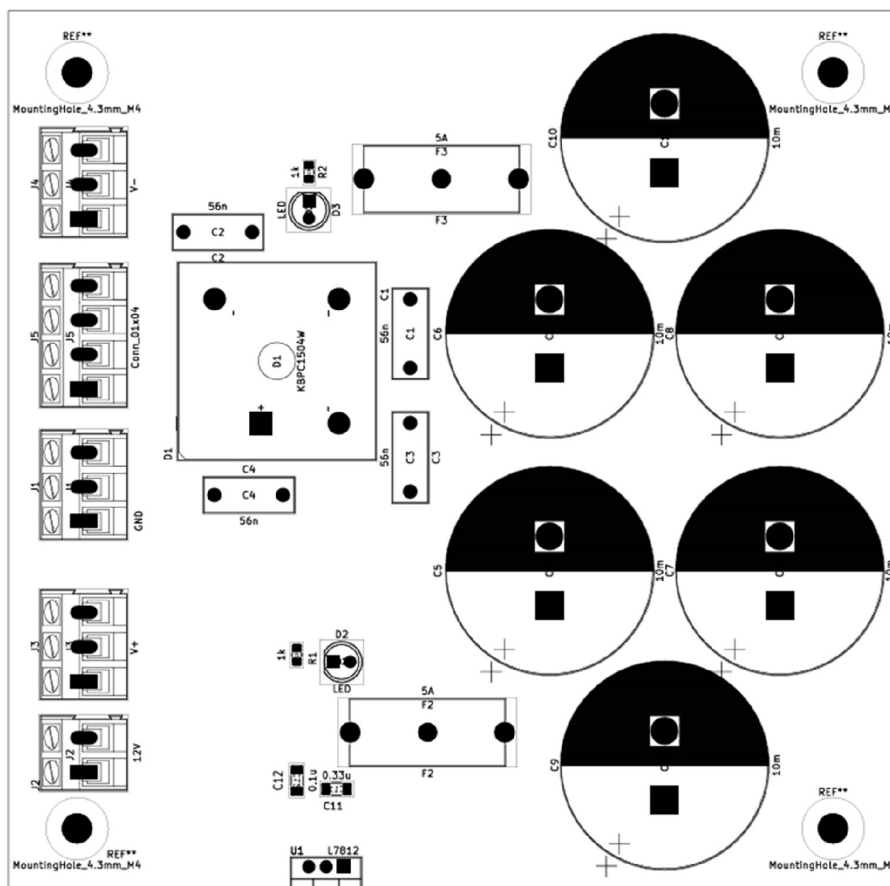
Obr. B.2 – Plán osadzovania – indikátor vybudenia, M1:1

Koncový stupeň LM3886



Obr. B.3 – Plán osadzovania – koncový stupeň, M1:1

Napájací zdroj



Obr. B.4 – Plán osadzovania – napájací zdroj, M1:1

Příloha C - Tabulky meraných hodnôt

f [Hz]	Korelácie max				Korelácie min			
	Pravý kanál		Ľavý kanál		Pravý kanál		Ľavý kanál	
	U _{out} [V]	Au [dB]	U _{out} [V]	Au [dB]	U _{out} [mV]	Au [dB]	U _{out} [mV]	Au [dB]
20	1,72	6,649	1,7	6,547	128	-15,918	125	-16,124
30	1,72	6,649	1,7	6,547	134	-15,520	133	-15,585
40	1,69	6,496	1,7	6,547	144	-14,895	142	-15,016
50	1,69	6,496	1,7	6,547	156	-14,199	155	-14,255
60	1,69	6,496	1,68	6,444	168	-13,556	164	-13,765
70	1,69	6,496	1,66	6,340	182	-12,860	180	-12,956
80	1,66	6,340	1,64	6,235	194	-12,306	194	-12,306
90	1,65	6,288	1,6	6,021	208	-11,701	210	-11,617
100	1,52	5,575	1,54	5,689	224	-11,057	224	-11,057
125	1,4	4,861	1,43	5,045	260	-9,762	260	-9,762
150	1,32	4,350	1,34	4,480	296	-8,636	294	-8,695
175	1,23	3,736	1,24	3,807	328	-7,744	329	-7,718
200	1,15	3,152	1,2	3,522	360	-6,936	364	-6,840
250	1,06	2,444	1,06	2,444	460	-4,807	451	-4,978
300	0,977	1,736	0,989	1,842	524	-3,675	504	-4,013
400	0,887	0,897	0,896	0,984	582	-2,763	576	-2,853
500	0,792	-0,087	0,839	0,413	640	-1,938	637	-1,979
600	0,752	-0,537	0,75	-0,561	680	-1,412	669	-1,553
700	0,737	-0,712	0,739	-0,689	691	-1,272	691	-1,272
800	0,722	-0,891	0,727	-0,831	712	-1,012	699	-1,172
900	0,722	-0,891	0,72	-0,915	720	-0,915	714	-0,988
1000	0,722	-0,891	0,72	-0,915	722	-0,891	721	-0,903
1200	0,728	-0,819	0,729	-0,807	714	-0,988	698	-1,185
1400	0,744	-0,630	0,744	-0,630	700	-1,160	693	-1,247
1600	0,811	0,119	0,767	-0,366	676	-1,463	666	-1,592
1800	0,848	0,506	0,784	-0,175	662	-1,645	646	-1,857
2000	0,864	0,668	0,855	0,578	632	-2,047	620	-2,214
3000	1	1,938	1,01	2,025	540	-3,414	520	-3,742
4000	1,15	3,152	1,16	3,227	456	-4,883	441	-5,173
5000	1,3	4,217	1,34	4,480	352	-7,131	353	-7,106
6000	1,44	5,105	1,47	5,285	308	-8,291	304	-8,404
7000	1,49	5,402	1,5	5,460	278	-9,181	274	-9,307
8000	1,54	5,689	1,52	5,575	249	-10,138	252	-10,034
9000	1,57	5,856	1,58	5,911	237	-10,567	232	-10,752

10000	1,61	6,075	1,61	6,075	216	-11,373	217	-11,333
12500	1,63	6,182	1,66	6,340	184	-12,765	186	-12,672
15000	1,65	6,288	1,66	6,340	166	-13,660	166	-13,660
17500	1,67	6,393	1,68	6,444	155	-14,255	156	-14,199
20000	1,67	6,393	1,7	6,547	145	-14,834	147	-14,715
25000	1,7	6,547	1,7	6,547	135	-15,455	135	-15,455
30000	1,7	6,547	1,72	6,649	127	-15,986	130	-15,783
35000	1,7	6,547	1,72	6,649	126	-16,054	126	-16,054
40000	1,71	6,598	1,74	6,749	121	-16,406	121	-16,406

Tab. 1. Meranie modulovej frekvenčnej charakteristiky korekčného predzosilňovača

Pozícia hlasitosti	Pravý kanál				Ľavý kanál			
	U_{out} [V]	A_u [dB]	U_{out} [V]	A_u [dB]	U_{out} [mV]	A_u [dB]	U_{out} [mV]	A_u [dB]
1	1,25	-56,124	1,3	-55,783	1,36	-55,391	1,41	-55,077
2	2,6	-49,762	2,7	-49,435	2,75	-49,275	2,86	-48,934
3	6	-42,499	6,2	-42,214	10	-38,062	10,4	-37,721
4	15	-34,540	15,5	-34,255	16	-33,979	17	-33,453
5	25	-30,103	26	-29,762	24	-30,458	30	-28,519
6	50	-24,082	52	-23,742	52	-23,742	54	-23,414
7	110	-17,234	113	-17,000	93	-18,692	100	-18,062
8	151	-14,482	155	-14,255	145	-14,834	150	-14,540
9	202	-11,955	204	-11,869	260	-9,762	255	-9,931
10	305	-8,376	306	-8,347	310	-8,235	308	-8,291
11	415	-5,701	413	-5,743	420	-5,597	418	-5,638
12	630	-2,075	620	-2,214	630	-2,075	620	-2,214
13	750	-0,561	745	-0,619	751	-0,549	752	-0,537
14	950	1,493	925	1,261	960	1,584	960	1,584
15	1100	2,766	1100	2,766	1100	2,766	1100	2,766

Tab. 2. Meranie regulácie hlasitosti korekčného predzosilňovača

Pozícia vyváženia	U_{OUTP} [mV]	A_u [dB]	U_{OUTL} [mV]	A_u [dB]
1	980	1,763	38,4	-26,375
2	980	1,763	72	-20,915
3	980	1,763	104	-17,721
4	980	1,763	152	-14,425
5	980	1,763	248	-10,173
6	960	1,584	400	-6,021
7	940	1,401	640	-1,938

8	860	0,628	860	0,628
9	780	-0,220	920	1,214
10	660	-1,671	960	1,584
11	408	-5,849	980	1,763
12	280	-9,119	1000	1,938
13	148	-14,657	1000	1,938
14	100	-18,062	1000	1,938
15	68	-21,412	1000	1,938

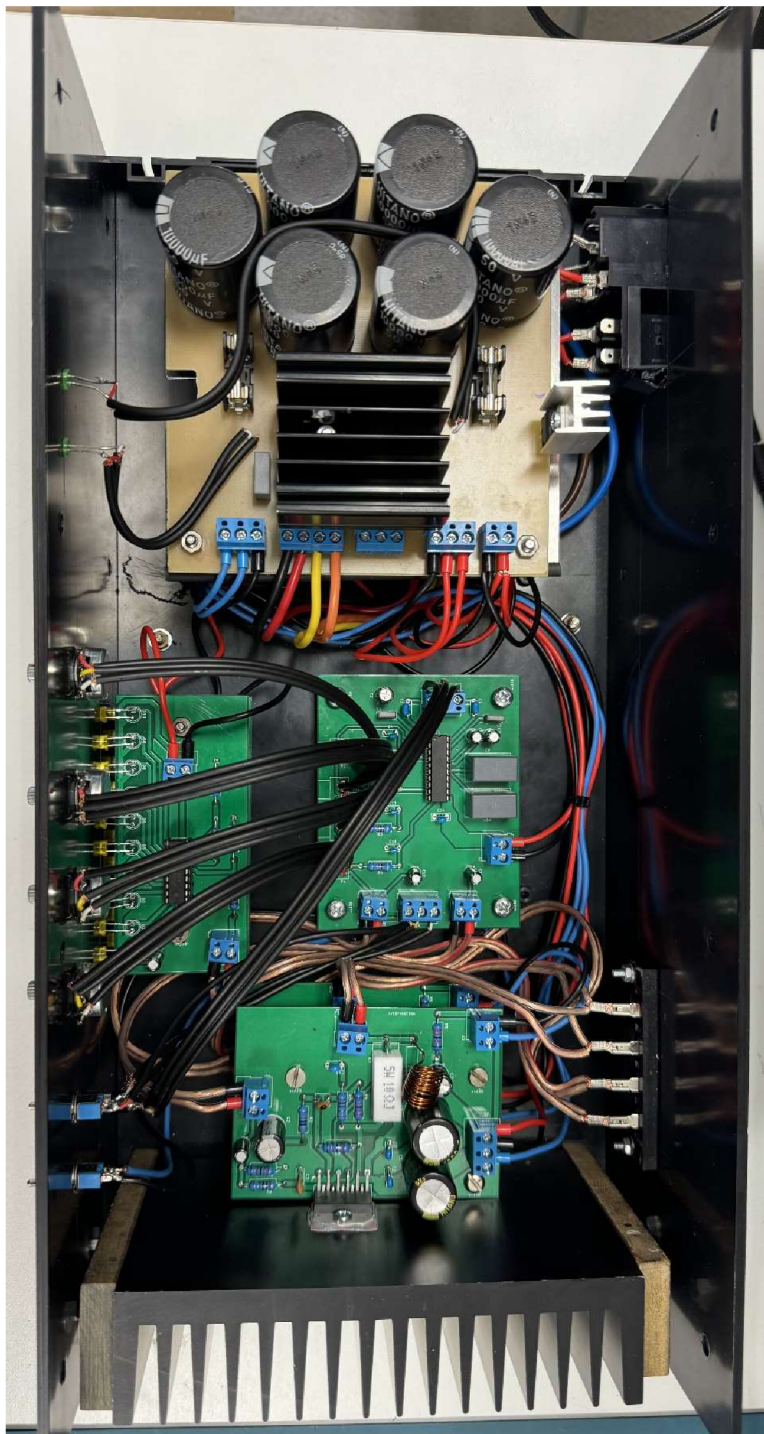
Tab. 3. Meranie vyváženia kanálov korekčného predzosilňovača

f[Hz]	Kanál P		Kanál L	
	V _{out} [V]	Au[dB]	V _{out} [V]	Au[dB]
1	1,66	24,402	1,68	24,506
2	2,16	26,689	2,15	26,649
3	2,29	27,197	2,25	27,044
4	2,33	27,347	2,31	27,272
5	2,36	27,458	2,35	27,421
7	2,39	27,568	2,37	27,495
10	2,41	27,640	2,42	27,676
15	2,42	27,676	2,42	27,676
20	2,42	27,676	2,42	27,676
30	2,42	27,676	2,42	27,676
40	2,42	27,676	2,42	27,676
50	2,42	27,676	2,42	27,676
60	2,42	27,676	2,43	27,712
70	2,42	27,676	2,42	27,676
80	2,42	27,676	2,4	27,604
90	2,42	27,676	2,39	27,568
100	2,42	27,676	2,4	27,604
125	2,4	27,604	2,4	27,604
150	2,4	27,604	2,4	27,604
175	2,4	27,604	2,4	27,604
200	2,41	27,640	2,4	27,604
250	2,42	27,676	2,4	27,604
300	2,42	27,676	2,4	27,604
400	2,42	27,676	2,4	27,604
500	2,42	27,676	2,4	27,604
600	2,42	27,676	2,4	27,604
700	2,42	27,676	2,4	27,604
800	2,42	27,676	2,4	27,604

Tab. 4. Meranie modulovej frekvenčnej charakteristiky koncového člena

27,604	2,4	27,676	2,42	900
27,604	2,4	27,676	2,42	1000
27,604	2,4	27,676	2,42	1200
27,604	2,4	27,676	2,42	1400
27,604	2,4	27,676	2,42	1600
27,604	2,4	27,676	2,42	1800
27,604	2,4	27,676	2,42	2000
27,604	2,4	27,676	2,42	3000
27,604	2,4	27,676	2,42	4000
27,604	2,4	27,676	2,42	5000
27,604	2,4	27,676	2,42	6000
27,604	2,4	27,676	2,42	7000
27,604	2,4	27,676	2,42	8000
27,604	2,4	27,676	2,42	9000
27,604	2,4	27,676	2,42	10000
27,421	2,35	27,421	2,35	12500
27,421	2,35	27,421	2,35	15000
27,421	2,35	27,421	2,35	17500
27,272	2,31	27,272	2,31	20000
27,005	2,24	26,927	2,22	25000
26,927	2,22	26,848	2,2	30000
26,486	2,11	26,608	2,14	35000
26,361	2,08	26,150	2,03	40000
25,756	1,94	25,575	1,9	50000
25,201	1,82	24,910	1,76	60000
24,402	1,66	24,506	1,68	70000
23,750	1,54	23,918	1,57	80000
23,287	1,46	23,227	1,45	90000
22,860	1,39	22,477	1,33	100000

Příloha D - Fotografie realizovaného zariadenia



Obr. D1 Fotografia rozloženia DPS, súčiastok a konštrukčných prvkov vo finálnom zariadení



Obr. D2 Fotografia finálneho zariadenia, predný pohľad



Obr. D3 Fotografia finálneho zariadenia, zadný pohľad

Příloha E - Zoznam použitých súčiastok

Korekčný predzosilňovač

Integrované obvody:

LM1036	N20A	1ks
--------	------	-----

Rezistory

47k Ω		4ks
--------------	--	-----

Potenciometre

47k Ω	Lineárne	4ks
--------------	----------	-----

Kondenzátory

47 μ F	Elektrolytický	1ks
10 μ F	Elektrolytický	2ks
4,7 μ F	Elektrolytický	2ks
470nF	Keramický	2ks
390nF	Polypropylénový	2ks
220nF	Keramický	4ks
100nF	Keramický	1ks
10nF	Fóliový	2ks

Svorkovnice

2-pólové	3ks
3-pólové	2ks

Indikátor vybudenia

Integrované obvody:

LM3915	18-lead PDIP	1ks
--------	--------------	-----

Rezistory

390 Ω		2ks
2,7k Ω		2ks
10k Ω		4ks

Kondenzátory

2,2 μ F	Elektrolytický	2ks
-------------	----------------	-----

LED diódy

5mm	20ks
-----	------

Svorkovnice

2-pólové	4ks
----------	-----

Koncový stupeň

Integrované obvody:

LM3886	11-lead TO-220	2ks
--------	----------------	-----

Rezistory

10 Ω		2ks
10 Ω , 5W		2ks
1k Ω		4ks
22k Ω		8ks

Kondenzátory

1000 μ F	Elektrolytický	4ks
330 μ F	Elektrolytický	2ks
100 μ F	Elektrolytický	2ks
10 μ F	Elektrolytický	2ks
100nF	Keramický	6ks
680pF	Keramický	2ks
47pF	Keramický	2ks

Svorkovnice

2-pólové	6ks
3-pólové	2ks

Chladič

SK85/100SA	1ks
------------	-----

Napájecí zdroj

Rezistory

1k Ω	0805	1ks
-------------	------	-----

Kondenzátory

10000 μ F	Elektrolytický	6ks
56nF	Fóliový	4ks
0,33nF	Keramický	1ks
0,1nF	Keramický	1ks

LED diódy

5mm	2ks
-----	-----

Svorkovnice

2-pólové	1ks
3-pólové	3ks
4-pólové	1ks

Poistky

5A	2ks
----	-----

Chladič

V5583E	1ks
--------	-----

Konštrukčné prvky

Distančné stĺpiky M4 (rôzne veľkosti)	22ks
Skrutky M4	13ks
Matičky M4	13ks
Napájací konektor AC	1ks
Reproduktorová zásuvka 4 PIN	1ks
Poistka 1A	1ks
Prepojovacie vodiče	