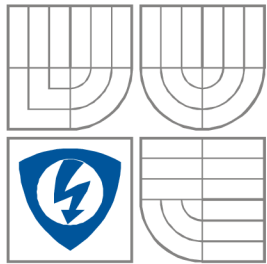


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# NÁVRH STEREO AUDIO VÝKONOVÉHO ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ AB

DESIGN OF CLASS AB STEREO AUDIO POWER AMPLIFIER

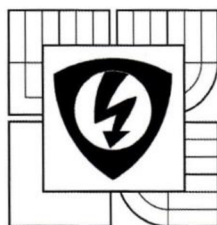
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MICHAL PODR

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. LUBOMÍR BRANČÍK, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií  
Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Michal Podr  
**Ročník:** 3

**ID:** 136576  
**Akademický rok:** 2012/13

## NÁZEV TÉMATU:

### Návrh stereo audio výkonového zesilovače ve třídě AB

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou návrhu nízkofrekvenčních výkonových zesilovačů klasických tříd a navrhnete zapojení stereo audio výkonového zesilovače ve třídě AB pro domácí použití, s výstupním výkonem cca 2 x 80 W. Koncový stupeň doplňte vhodným korekčním předzesilovačem a napájecí jednotkou. Vlastnosti zapojení simulujte v programu Pspice a navrhnete desky plošných spojů v programu Eagle.

Na základě předchozích návrhových prací realizujte funkční vzorek stereo audio výkonového zesilovače ve třídě AB, včetně korekčního předzesilovače a napájecí jednotky. Proveďte oživení celého zesilovače a proměřte jeho základní charakteristiky. Výsledky měření srovnajte s teoreticky deklarovanými parametry a s výsledky počítačových simulací.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KOTISA, Z. NF zesilovače 2 - integrované výkonové zesilovače. Praha: BEN - technická literatura, 2002.

[2] KOTISA, Z. NF zesilovače 3 - tranzistorové výkonové zesilovače. Praha: BEN - technická literatura, 2003.

**Termín zadání:** 11.2.2013

**Termín odevzdání:** 31.5.2013

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

**Konzultanti bakalářské práce:**

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida  
předseda oborové rady



#### 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**

Tato práce se zabývá návrhem kompletního zesilovače, pracujícího ve třídě AB. Obsahuje dva výkonové zesilovače s možností činnosti v můstkovém režimu, korekční zesilovač s regulací hlasitosti, hloubek, výšek a také s volbou fyziologické regulace hlasitosti. Předzesilovač se třemi různými vstupy a volbou mezi stereo a mono režimem.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Výkonový zesilovač, třída AB, stereo/můstek, chlazení, ochrany

## **ABSTRACT**

This thesis describes the design of a complete amplifier operating in class AB. It contain two power amplifiers with working in the bridge mode correction amplifier with volume control, bass, treble, and also with the choice of loudness. Preamplifier with three different inputs and the choice between stereo and mono modes.

## **KEYWORDS**

Power amplifier, class AB, stereo/bridge, cooling, protection

Podr, M. *Návrh stereo audio výkonového zesilovače ve třídě AB*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 57 s., 22 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. ing. Lubomír Brančík, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh stereo audio výkonového zesilovače jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. ing. Lubomíru Brančíkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>x</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>xii</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>1</b>
<b>1 NF AUDIO ZESILOVAČ</b>	<b>2</b>
1.1    Obecně o NF audio zesilovačích .....	2
1.2    Třídy NF zesilovačů.....	2
1.2.1    Třída A.....	2
1.2.2    Třída B .....	2
1.2.3    Třída AB .....	3
1.2.4    Třída C .....	3
1.2.5    Třída D.....	4
1.3    Dělení NF zesilovačů.....	4
1.3.1    Diskrétní.....	4
1.3.2    Monolitické IO.....	4
1.3.3    Hybridní IO.....	4
1.4    Napájení .....	5
1.4.1    Nesymetrické napájení zesilovače .....	5
1.4.2    Symetrické napájení zesilovače .....	5
1.5    Parametry NF zesilovačů .....	5
1.5.1    Výkon.....	5
1.5.2    Šířka přenášeného pásma.....	6
1.5.3    Rychlost přeběhu .....	6
1.5.4    Harmonické zkreslení .....	6
1.5.5    Intermodulační zkreslení.....	6
1.5.6    Citlivost.....	6
1.5.7    Minimální zatěžovací impedance .....	7
1.5.8    Vstupní odpor .....	7
1.5.9    Činitel tlumení .....	7
1.6    Chlazení .....	7

1.7	Zásady pro návrh .....	8
1.7.1	Požadovaný výkon.....	8
1.7.2	Pracovní třída.....	9
1.7.3	Typ.....	9
1.7.4	Doplňky .....	9
1.7.5	Cena .....	10
<b>2</b>	<b>NÁVRH AUDIO ZESILOVAČE</b>	<b>12</b>
2.1	Deklarace výsledných parametrů.....	12
2.2	Napájecí zdroj koncového zesilovače.....	12
2.3	Napájecí zdroj pro ostatní moduly.....	14
2.4	Předzesilovač .....	15
2.5	Mikrofonový zesilovač .....	16
2.6	Korekční zesilovač.....	17
2.7	Invertor fáze.....	18
2.8	Koncový zesilovač.....	18
2.9	Přepínač .....	20
2.10	Výstup na sluchátka .....	21
2.11	Indikátor vstupní úrovně.....	21
2.12	Indikátor výstupního výkonu .....	21
2.13	Ochrany zesilovače .....	22
2.14	Výběr a dimenzace součástek .....	23
2.14.1	Napájecí zdroj .....	23
2.14.2	Předzesilovač, mikrofonový zesilovač a korekční zesilovač.....	24
2.14.3	Koncový zesilovač.....	24
2.14.4	Doplňky .....	25
2.15	Návrh chlazení .....	25
<b>3</b>	<b>SIMULACE ZAPOJENÍ V PROGRAMU PSPICE</b>	<b>26</b>
3.1	Program PSpice.....	26
3.2	Simulace zapojení .....	26
3.2.1	Simulace předzesilovače.....	26
3.2.2	Simulace korekčního zesilovače.....	28
3.2.3	Simulace invertoru fáze .....	29
3.2.4	Simulace výkonového zesilovače .....	30

<b>4</b>	<b>NÁVRH DPS V PROGRAMU EAGLE</b>	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST</b>	<b>35</b>
5.1	Výroba zdroje napájecího napětí .....	35
5.2	Výroba chladiče koncových tranzistorů .....	35
5.3	Výroba DPS .....	36
5.4	Osazování DPS .....	36
5.4.1	Napájecí zdroje .....	36
5.4.2	Indikátor vstupní úrovně .....	36
5.4.3	Indikátor výstupního výkonu .....	37
5.4.4	Společný modul (korekce, předzesilovač, mikrofon, invertor) .....	37
5.4.5	Koncový stupeň .....	37
5.5	Ožívování / nastavování / testování DPS .....	37
5.5.1	Napájecí zdroje .....	37
5.5.2	Indikátor vstupní úrovně .....	38
5.5.3	Indikátor výstupní úrovně .....	38
5.5.4	Korekce, předzesilovač, mikrofon, invertor a přepínač .....	38
5.5.5	Koncový stupeň .....	38
5.6	Náhrada (REPLACE) součástek koncového stupně .....	39
5.7	Koncový stupeň a řešení problémů s funkcí .....	39
5.8	Měření základních parametrů .....	41
5.8.1	Měření kmitočtové charakteristiky .....	41
5.8.2	Kmitočtová charakteristika předzesilovače .....	41
5.8.3	Kmitočtová charakteristika korekčního zesilovače .....	43
5.8.4	Kmitočtová charakteristika koncového zesilovače .....	45
5.8.5	Celková kmitočtová charakteristika zesilovače .....	46
5.8.6	Celkové harmonické zkreslení THD+N .....	47
5.8.7	Měření vstupního odporu zesilovače .....	48
5.8.8	Měření výstupního odporu zesilovače a činitele tlumení .....	48
5.8.9	Měření účinnosti koncového zesilovače .....	48
5.8.10	Měření funkce invertoru fáze .....	50
5.8.11	Měření fázového posuvu zesilovače .....	50
5.9	Mechanická konstrukce .....	51
5.9.1	Přední panel .....	51



5.9.2	Zadní panel .....	51
5.9.3	Základní deska (podstavná) .....	51
5.9.4	Horní uzavírací díl .....	51
5.9.5	Stínící přepážka.....	51
5.9.6	Ovládací knoflíky .....	51
5.9.7	Potisk .....	51
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>52</b>
6.1	Porovnání návrhů, simulací a výsledků .....	52
6.1.1	Napájecí jednotka .....	52
6.1.2	Předzesilovač .....	53
6.1.3	Korekční zesilovač.....	53
6.1.4	Koncový zesilovač.....	53
6.1.5	Invertor fáze.....	54
6.1.6	Indikátory .....	54
6.1.7	Mikrofon .....	54
6.2	Celkové hodnocení .....	54
	Literatura .....	56
	<b>Seznam příloh</b>	<b>58</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Grafické znázornění průběhů analogových tříd[4].	3
Obr. 2.1:	Blokové schéma	12
Obr. 2.2:	Detail přepínačů	12
Obr. 2.3:	Zdroj napětí $\pm 7,5$ V	14
Obr. 2.4:	Zdroj napětí $\pm 15$ V	15
Obr. 2.5:	Korekce RIAA[6]	16
Obr. 2.6:	Předzesilovač	16
Obr. 2.7:	Mikrofonový zesilovač	17
Obr. 2.8:	Korekční zesilovač	17
Obr. 2.9:	Invertor fáze	18
Obr. 2.10:	Koncový zesilovač 1/2	19
Obr. 2.11:	Koncový zesilovač 2/2	20
Obr. 2.12:	Elektronický přepínač módů	20
Obr. 2.13:	Indikátor vstupní úrovně	21
Obr. 2.14:	Indikátor výstupního výkonu	22
Obr. 2.15:	Schéma modulu ochran[19]	23
Obr. 3.1:	Korekce RIAA a kmitočtová charakteristika vstupu PHONO	27
Obr. 3.2:	Kmitočtová charakteristika vstupu LINE	27
Obr. 3.3:	Kmitočtová charakteristika vstupu AUX	28
Obr. 3.4:	Kmitočtové charakteristiky korekčního zesilovače	29
Obr. 3.5:	Průběhy invertoru fáze	29
Obr. 3.6:	Kmitočtová charakteristika výkonového zesilovače	31
Obr. 3.7:	Výstupní výkon výkonového zesilovače	31
Obr. 3.8:	Celková výkonová ztráta jednoho páru	32
Obr. 3.9:	Kolektorový proud jednoho páru	32
Obr. 3.10:	Napěťové zesílení	33
Obr. 3.11:	Výstupní napětí koncových a budících tranzistorů	33
Obr. 3.12:	Celková účinnost výkonového zesilovače	34
Obr. 5.1:	Schéma zapojení napájecí jednotky	35
Obr. 5.2:	Přechodové zkreslení koncového tranzistoru	40

Obr. 5.3:	Naměřená kmitočtová charakteristika vstupu PHONO (RIAA korekce)....	42
Obr. 5.4:	Naměřená kmitočtová charakteristika vstupu LINE.....	42
Obr. 5.5:	Naměřená kmitočtová charakteristika vstupu AUX .....	43
Obr. 5.6:	Naměřená kmitočtová charakteristika korekčního zesilovače .....	44
Obr. 5.7:	Naměřená kmitočtová charakteristika fyziologické regulace (loudness) vs. lineární regulace.....	44
Obr. 5.8:	Kmitočtová charakteristika koncového zesilovače .....	45
Obr. 5.9:	Celková kmitočtová charakteristika zesilovače .....	46
Obr. 5.10:	Celkové harmonické zkreslení THD+N.....	47
Obr. 5.11:	Účinnost koncového zesilovače .....	49
Obr. 5.12:	Naměřené průběhy fázového invertoru.....	50
Obr. 5.13:	Fázový posuv zesilovače.....	50

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1:	Hodnoty tepelných odporů[3] .....	8
Tab. 5.1:	Naměřené hodnoty při měření předzesilovače .....	41
Tab. 5.2:	Naměřené hodnoty při měření korekčního zesilovače .....	43
Tab. 5.3:	Naměřené hodnoty koncového zesilovače .....	45
Tab. 5.4:	Naměřené hodnoty při měření celkové charakteristiky zesilovače .....	46
Tab. 5.5:	Naměřené hodnoty celkového harmonického zkreslení THD+N zesilovače .....	47
Tab. 5.6:	Naměřené hodnoty vstupního odporu jednotlivých vstupů zesilovače .....	48
Tab. 5.7:	Naměřené hodnoty při měření účinnosti koncového zesilovače .....	49
Tab. 6.1:	Porovnávací tabulka předzesilovače .....	53
Tab. 6.2:	Porovnávací tabulka korekčního zesilovače .....	53
Tab. 6.3:	Porovnávací tabulka koncového zesilovače .....	54

# ÚVOD

S NF zesilovači se v dnešní době prakticky setkáme všude. Ať už se jedná o mobilní telefon, televizi, domácí kino či diskotéku. Rozdíl mezi těmito aplikacemi je v zásadě ve výkonu daného zařízení. Pro mobilní telefon jsou to mW, pro televizor desítky W, pro domácí kino stovky W a na diskotéce jde výkon řádově k jednotkám kW.

V této práci, jež se zabývá návrhem NF zesilovače ve třídě AB, je pojednáno o základním dělení NF zesilovačů podle tříd, parametrů, vlastností a použití.

Další část se zaměřuje na praktický návrh kompletního řetězce, tedy od napájecí jednotky po výkonový (koncový) zesilovač, který je srdcem přístroje. Praktický postup návrhu, s přijatelným komentářem, by měl vytvořit u čtenáře alespoň přibližný pohled na problematiku návrhu jednotlivých částí. Rovněž zde najde informace o nejběžnějším vybavení zesilovačů, tj. ochrany, indikátory apod.

Třetí část je zaměřena na počítačové simulace v programu PSpice. Výsledky v podobě kmitočtových a časových charakteristik snadno ověří či vyvrátí teoretické předpoklady z první kapitoly.

Čtvrtá kapitola obsahuje popis návrhů DPS v programu Eagle.

Pátá kapitola je nazvána jako praktická část. Popisuje postup celé práce, od leptání DPS, osazování DPS, ožívování modulů až po měření a konstrukci.

Poslední kapitola je věnována závěrečnému hodnocení a porovnání dosažených výsledků práce.

# 1 NF AUDIO ZESILOVAČ

## 1.1 Obecně o NF audio zesilovačích

NF audio zesilovač je elektronické zařízení zpracovávající signály o nízkých frekvencích přibližně od 20 Hz do 20 kHz. Jeho úkolem je zvýšit amplitudu vstupního signálu na požadovanou napěťovou úroveň, v případě výkonového zesilovače na výkonovou úroveň, která vybudí membránu sluchátka nebo reproduktoru. Jelikož se skládá z lineárních a nelineárních prvků, dochází ke zkreslení signálu. Zkreslení lze eliminovat na minimum pomocí různých zapojení elementárních zesilovacích prvků.

V dnešní době se můžeme setkat prakticky se dvěma základními typy. S tranzistory a elektronkami. Elektronky se dnes již využívají pouze v HIGH-ENDových aplikacích hudební techniky a u vysílačů, proto se jimi dále zabývat, nemá smysl. Jejich výhodou je vysoký snášený výkon a vyšší odolnost oproti polovodičovým tranzistorům. Nevýhoda je však v účinnosti, v složitějším a nákladnějším zapojení. Naproti tomu tranzistory se staly již od svého objevení v roce 1948 W. Shockleym průlomovým prvkem nejen v oblasti NF techniky.

Každý NF zesilovač musí obsahovat zdroj stejnosměrného napětí, minimálně jeden zesilovací prvek a vhodně nastaven pracovní bod, který určuje třídu, ve které bude zesilovač pracovat.

## 1.2 Třídy NF zesilovačů

Existují 4 základní třídy a jedna mezitřída. Každá z nich má své výhody a nevýhody. Vždy je před samotným návrhem zapojení důležité určit, který třída je pro danou aplikaci nejvhodnější, ať už z hlediska funkčního nebo ekonomického. Na obr. 1.1 jsou zobrazeny průběhy tříd A, B, AB a C.

### 1.2.1 Třída A

Zesilovač pracující ve třídě A má pracovní bod nastaven doprostřed výstupních charakteristik tranzistoru. Výhodou této třídy je velmi malé zkreslení (za předpokladu, že na vstupu bude signál o amplitudě takové, že nedojde k zániku kolektorového proudu). Nevýhodou je malá účinnost (teoreticky max. 25 %, 50 % s výstupním transformátorem). Používá se především v předzesilovačích a obvodech, které pracují s malými výkony. V tomto zapojení stačí pouze jeden tranzistor, který zpracovává obě půlvlny signálu.

### 1.2.2 Třída B

Pracovní bod zesilovače je nastaven na bod zániku kolektorového proudu, protéká pouze zbytkový proud  $I_{CE0}$ . K vytvoření zapojení ve třídě B je zapotřebí dvou tranzistorů s opačnou vodivostí a shodnými parametry (komplementární dvojice) nebo

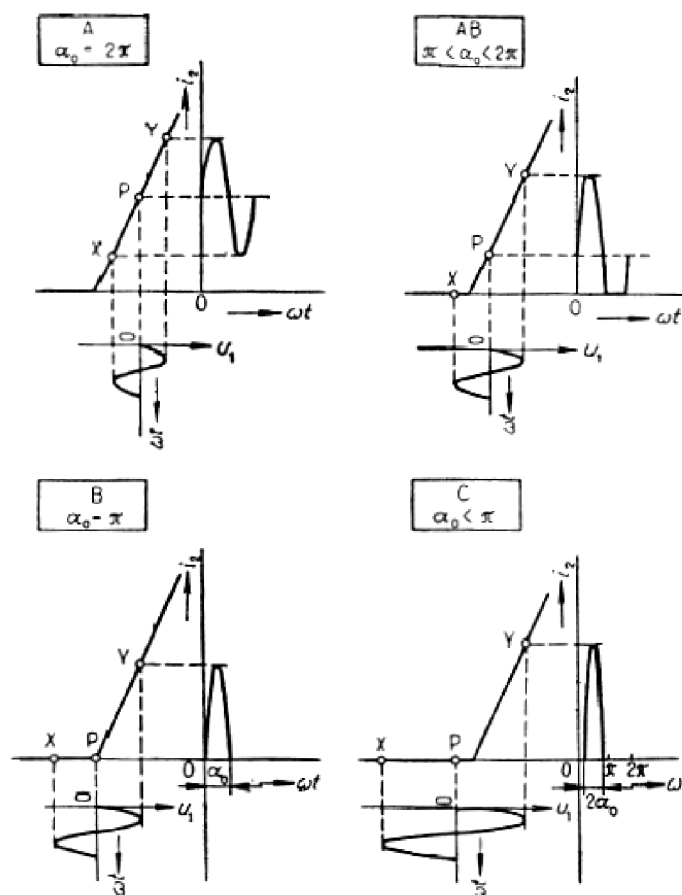
dvou shodných tranzistorů, avšak s fázovým invertorem, tvořeným dalšími dvěma tranzistory na vstupu (kvazi komplementární zapojení) nebo jiným fázovým invertorem např. s operačními zesilovači. Každý tranzistor tedy zpracovává pouze jednu půlvlnu signálu. NPN tranzistor zpracovává kladnou půlvlnu a PNP tranzistor zpracovává zápornou půlvlnu. Výhodou této třídy je vyšší účinnost (teoreticky max. 78,5 %). Nevýhodou je složitější zapojení v případě kvazikomplementárního zapojení (dnes se již téměř nepoužívá – dostupnost obou vodivostí daného typu tranzistoru) a značné přechodové zkreslení, dané tím, že se každý tranzistor otevírá přibližně od 0,7 V  $U_{BE}$ .

### 1.2.3 Třída AB

Jedná se o mezitřidu mezi třídami A a B. Vylepšuje vlastnosti třídy B tím, že je zaveden do koncových tranzistorů malý klidový proud (díky předpětí na tranzistorech), který snižuje přechodové zkreslení za cenu nižší účinnosti (60 - 70 %). Proto je tato třída nejpoužívanější čistě analogovou třídou.

### 1.2.4 Třída C

Tato třída má nastaveno záporné předpětí, čili kolektorový proud teče tranzistorem jen při velkých amplitudách signálu. Z tohoto plyne velmi velké zkreslení a pro audio nevhodné zapojení. Požívá se díky své vysoké účinnosti (cca 90 %, ideálně až 99 %) ve vysílačích velkého výkonu.



Obr. 1.1: Grafické znázornění průběhů analogových tříd[4].

## 1.2.5 Třída D

Je již považována za spínací (digitální). Signál je zpracováván pulsně šířkovou modulací PWM. Má dobrou účinnost ( $> 80 \%$ ), ale poměrně velké zkreslení ( $> 1 \%$ ).

## 1.3 Dělení NF zesilovačů

NF zesilovače lze rozdělit na 3 základní skupiny:

- diskrétní
- monolitické IO
- hybridní IO

### 1.3.1 Diskrétní

Diskrétní zesilovače se skládají kompletně z jednotlivých dílčích součástek. Jsou mnohonásobně rozměrnější oproti zbylým dvěma typům, avšak jejich parametry naopak mnohem lepší. Výkony, kterých lze dosáhnout, jsou takřka omezené pouze zapojením a typy součástek.

### 1.3.2 Monolitické IO

Monolitické integrované obvody jsou vyrobeny jako jedno pouzdro s n vývody, ke kterým se připojí pouze nezbytné součástky. Nachází uplatnění v aplikacích, kde není kladen nejvyšší důraz na kvalitu zvuku, i když mnohé IO splňují kvalitu Hi-Fi. Jejich kladem je malá velikost pouzdra, minimum externích součástek, snadná výměna a nižší cena, než-li u diskrétní verze. Záporům ovšem zůstávají dosažitelné parametry, které se v nejlepších případech pouze blíží k diskrétním verzím. Moderní integrované zesilovače rovněž bývají vybavené i základními ochranami při stále stejné velikosti pouzdra. Výkony se pohybují do řádově stovek W[2].

### 1.3.3 Hybridní IO

Je to jakási alternativa mezi předchozími dvěma typy. Část obvodu je vyrobena integrovanou technologií a část diskrétně, to vše zapouzdřené ve větších pouzdrech. Parametry jsou také něco mezi diskrétním a IO řešením. Výkony těchto obvodů sahají k hranici pár set W. Mezi nejznámější HIO patří řada STK a SVI, které se hojně požívají v japonských receiverech značek např. Technics nebo Sony.

Obecně lze říci, že pro aplikace do domácího použití se hodí integrované a hybridní zesilovače, pokud posluchač nepožaduje přehnaně vysokou kvalitu zpracování signálu a reprodukce. Diskrétní zesilovače najdou jednoznačně uplatnění v aplikacích nad 100 W, především ozvučování velkých prostorů, kde jde výkon nad hranici kW.



## 1.4 Napájení

Napájením se má na mysli použití jedné ze dvou základních koncepcí:

- nesymetrické napájení
- symetrické napájení

### 1.4.1 Nesymetrické napájení zesilovače

Nesymetrické napájení je v dnešní době již méně používané, dříve však šlo o běžnou koncepci. Znamená to, že je zesilovač napájen ze zdroje, který má pouze jedno vinutí (nemá vyvedený střed). Po usměrnění tedy dostáváme kladné napětí a zem. Proto se musí obvodově vyřešit výstup zesilovače přidáním kondenzátoru o velké kapacitě a na minimálně poloviční napájecí napětí. Velká kapacita musí být z důvodu kvalitního přenosu nízkých kmitočtů. Maximální napětí kondenzátoru je poloviční z důvodu toho, že se na něm akumuluje v jedné půlplně přibližně polovina napájecího napětí a v druhé půlplně toto napětí odevzdává jako zdroj.

### 1.4.2 Symetrické napájení zesilovače

Symetrické napájení je obvykle nákladnější, protože transformátor musí mít odbočku. Na druhou stranu ale odpadá potřeba výstupního kondenzátoru a přenos na nízkých kmitočtech je dán pouze zapojením a výstupní indukčností  $L$ . Tato koncepce se dnes používá nejčastěji a u všech typů (IO, HIO, DI). Nicméně pokud se již rozhodneme pro symetrické zapojení, nejlepší je celosymetrické zapojení ve všech stupních, včetně předzesilovače, případně korekcí[1][13].

## 1.5 Parametry NF zesilovačů

Kvalita NF zesilovačů je posuzována dle jejich parametrů. Mezi hlavní parametry patří:

- výkon
- šířka přenášeného pásma
- rychlost přeběhu
- harmonické zkreslení
- intermodulační zkreslení
- citlivost
- minimální zatěžovací impedance
- vstupní odpor
- činitel tlumení

### 1.5.1 Výkon

Výkon je nejdůležitější parametr zesilovače. Výkonů je celá řada, pro korektní srovnávání se vždy uvádí efektivní výkon harmonického signálu RMS (root mean

square). Jeho hodnota je vztažena k určité zatěžovací impedanci (typicky 4, 6 nebo 8  $\Omega$ ). Udává, jak velké teplo vznikne na rezistivní zátěži při maximálním vybuzení zesilovače, tj. na hranici limitace.

### 1.5.2 Šířka přenášeného pásma

Udává kmitočtové pásmo, ve kterém je zesilovač schopen pracovat. Je vymezeno frekvencemi, při kterých poklesne výkon o -3 dB, čili na polovinu. Za optimální pásmo je, vzhledem k vlastnostem lidského ucha, považováno 20 Hz – 20 kHz.

### 1.5.3 Rychlost přeběhu

Vypovídá o maximální změně napětí za jednotku času na výstupu zesilovače. Uvádí se ve V/ $\mu$ s. Obecně platí, že rychlost přeběhu by měla růst s výstupním výkonem. Měří se pomocí obdélníkového průběhu, který má ostré hrany. U integrovaných verzí nepřesahuje 20 V/ $\mu$ s.

### 1.5.4 Harmonické zkreslení

Tento údaj je často výrobcí udáván pro mnohem nižší výkon, než je maximální, což je zavádějící. Jedná se o jakousi deformaci signálu vlivem zesílení (tedy průchodem signálu přes nelineární prvky) oproti původnímu signálu a vznikají tedy vyšší harmonické složky díky nelinearitám součástek (diody, tranzistory). Údaj o harmonickém zkreslení je sice důležitý, ale nikoliv tak jeho velikost. Může se totiž stát, že zesilovač s vyšším harmonickým zkreslením bude posluchači znít lépe než zesilovač s údajem nižším. Důvod může být v typu použitých koncových tranzistorů. Protože unipolární tranzistory MOS-FET mají kvadratickou charakteristiku, stejně jako elektronky (výstupní charakteristika se dá aproximovat parabolou)[4], takže dominantní složkou bude 2. harmonická a vyšší harmonické budou zanedbatelné. Naopak bipolární tranzistory budou vytvářet vyšší harmonické složky (výstupní charakteristika se dá aproximovat exponenciálou). Proto subjektivně zesilovače s unipolárními tranzistory mají lepší zvuk, podobný elektronkovým zesilovačům.

### 1.5.5 Intermodulační zkreslení

Je vlastnost zesilovače vytvářet na výstupu různé kombinace kmitočtů, které přicházejí na vstup. Například pokud přivedeme na vstup signály o kmitočtu  $f_1 = 1$  kHz a  $f_2 = 3$  kHz, pak na výstupu můžeme dostat kombinace např.  $f_1 + f_2$ ,  $2 \cdot f_2 - f_1$  (4 kHz, 5 kHz)... apod. Základní požadavek je, aby bylo toto zkreslení co nejmenší.

### 1.5.6 Citlivost

Citlivost je nejmenší napětí na vstupu zesilovače, při kterém je schopen vybudit se na maximální výkon. Typické hodnoty bývají normovány na výstupní napětí CD přehrávačů, tunerů, DVD... Hodnota výstupního napětí bývá nejčastěji 100 – 250 mV.

### 1.5.7 Minimální zatěžovací impedance

Minimální velikost impedance reproduktoru (stejnoseměrného odporu), při které se zesilovač nebude přetěžovat, čili koncové tranzistory nebudou proudově namáhány natolik, aby mohlo dojít k jejich poškození. Typické hodnoty bývají 4 Ω, 8 Ω a 16 Ω (Japonci často mívají hodnoty 2 Ω, 6 Ω a 12 Ω).

### 1.5.8 Vstupní odpor

Představuje zátěž pro zdroj signálu. Měl by být co největší kvůli minimální zátěži zdroje a zároveň co nejmenší, aby se na něm neindukovaly velké brumy.

### 1.5.9 Činitel tlumení

Reproduktor, lépe řečeno jeho cívka, lze nahradit ztrátovým odporem  $R$  v sérii s indukčností  $L$ . Cívka má nepříjemnou vlastnost dokmitávání po přivedení impulsu. Toto dokmitávání lze eliminovat právě vysokým činitelem tlumení. Charakterizuje ho změna výstupního napětí zesilovače při připojení zátěže. Závisí na vnitřním odporu zesilovače, který by měl být alespoň 3x menší než je zatěžovací impedance reproduktoru. Čili pro impedanci 4 Ω by vnitřní odpor zesilovače neměl být vyšší než 1,33 Ω. Čím menší tento odpor bude, tím věrnější reprodukce dosáhneme. Pro činitel tlumení  $d$  platí rovnice (1.1)[3]:

$$d = \frac{R_a}{R_i} \quad (1.1)$$

kde  $R_a$  značí odpor cívky kmitačky (ztrátový odpor  $R$  v sérii s indukčností  $L$ ).

Pro určení výstupního odporu zesilovače slouží vztah (1.2)[3]:

$$R_i = R_a \frac{U_1 - U_2}{U_2} \quad (1.2)$$

kde  $R_a$  je jmenovitý výstupní odpor zesilovače,  $U_1$  je výstupní napětí naprázdno a  $U_2$  je napětí se zátěží.

## 1.6 Chlazení

Zesilovač se při své činnosti zahřívá, je tudíž žádoucí zajistit dostatečné chlazení součástí, na kterých dochází k velkému ztrátovému výkonu (teplu), především na koncových tranzistorech. Velikost ztrátového výkonu je dána účinností zesilovače. To znamená, že pokud bude mít zesilovač účinnost 60 % a výkon 100 W, ztrátové teplo bude přibližně 40 W, což bez chladiče není možné uchladit vzduchem. V tomto ohledu jsou nejvýhodnější integrované nebo hybridní zesilovače, které se chladí jako jeden celek. Pokud chceme vypočítat chladič, tak k tomuto výpočtu musíme přistupovat jako k součtu jednotlivých dílčích teplotních odporů. Celkový tepelný odpor se spočítá podle vztahu (1.3)[3]:

$$R_{(th)ge} = R_{(th)G} + R_{(th)U} + R_{(th)K} \quad (1.3)$$

kde  $R_{(th)G}$  je udán výrobcem součástky v katalogu,  $R_{(th)U}$  je tepelný odpor mezi

pouzdrém součástky a chladičem (např. izolační slídová podložka a také úprava chladiče např. eloxace),  $R_{(th)K}$  je tepelný odpor samotného chladiče.

Celkový tepelný odpor se vypočte dle rovnice (1.4)[3]:

$$R_{(th)ge} = \frac{T_i - T_u}{P_{max}}, \quad (1.4)$$

kde  $T_i$  je maximální teplota přechodu a  $T_u$  je teplota okolí.

Potřebný tepelný odpor chladiče tedy je podle vztahu (1.5)[3]:

$$R_{(th)K} = R_{(th)ge} - R_{(th)U} - R_{(th)G} \quad (1.5)$$

V případě třídy AB bude výkon přeměněný v teplo přibližně roven (1.6)[3]:

$$P_{V(max)} = \frac{P_O}{3}, \quad (1.6)$$

kde  $P_O$  je sinusový výkon zesilovače

$R_{(th)U} \Rightarrow$

0,5 K/W	slídová podložka 0,05mm
0,6 K/W	slídová podložka 0,1mm
0,2 K/W	chladič neupraven
0,4 K/W	chladič eloxován

Tab. 1.1: Hodnoty tepelných odporů[3]

## 1.7 Zásady pro návrh

Pokud se rozhodneme pro návrh zesilovače, tak si musíme nejprve deklarovat základní požadavky:

- požadovaný výkon
- pracovní třída
- typ
- doplňky
- cena

### 1.7.1 Požadovaný výkon

Hlavní parametr. Určuje v podstatě typ aplikace zesilovače. Veškeré dílčí součásti jsou odvíjeny právě z tohoto údaje.

Největší důraz je tedy kladen na napájecí zdroj, který musí být schopen dodat výkon, který požadujeme na výstupu, a pokrýt ztráty. Zároveň jeho filtrační kapacita musí být dostatečná, aby bylo výstupní napětí co nejméně zvlněno a příliš neklesalo při špičkách. Z tohoto plyne další dělení:

- spínaný zdroj
- spojitý zdroj

Spínaný zdroj je složitý na návrh, má vyšší činitel zvlnění, ale naopak menší rozměry a cenu. Rovněž při špatném návrhu hrozí průnik rušivých frekvencí, např. spínací (oblast neslyšitelného pásma), do zesilovače a tím mohou vzniknout nepříjemnosti v podobě kmitání apod. Proto je doporučován pro použití do digitálních tříd, jako třeba třída D. Tyto zdroje jsou schopny dodat výkony v řádech kW při kompaktních rozměrech.

Spojitý zdroj se dá rozdělit na transformátory s klasickým jádrem (EI, C, M...) a toroidní transformátory. První skupina transformátorů je vhodná do výkonu řádu stovek W, při vyšších výkonech musejí mít velké rozměry a z toho plynoucí váhu. Proto se na vyšší výkony používají toroidy. Jejich předností je minimální vyzařující rušení a vysoká účinnost > 90 %. Nevýhodou je cena, která je dosti vysoká vzhledem k obtížnosti navíjení na kruhové toroidní jádro a potřebě silného vodiče při navíjení pro velké výkony.

### 1.7.2 Pracovní třída

Tato volba je přímo závislá na předchozím požadavku. Ze základních vlastností jednotlivých tříd vyloučíme třídu C, která není vhodná pro audio aplikace, a třídu D, která není čistě analogová. V nabídce tedy zůstaly 3 třídy (A, B a AB).

Třída A je vhodná pro malé výkony, díky malé účinnosti. Proto se dá považovat za „neekonomické“ použití této třídy pro výkony > 40 W.

Třída B je naopak vhodná pro velké výstupní výkony, avšak zkreslení je dosti velké, proto se čistá třída B příliš nepoužívá.

Ideální řešení je třída AB, která nabízí vysoký výkon, přijatelnou účinnost a dobré parametry.

### 1.7.3 Typ

O jednotlivých typech bylo již pojednáno, avšak platí jakási úměra. A to taková, že při nejlevnější variantě se rozhodneme pro integrovanou formu, při požadavku na lepší kvalitu bude výhodný hybridní koncový zesilovač a pokud chceme opravdu kvalitní a věrnou reprodukci, nezatíženou velkým zkreslením, zvolíme diskrétní formu koncového zesilovače.

### 1.7.4 Doplnky

Doplňků pro zesilovače si můžeme vymyslet a zrealizovat celou škálu. Především se musíme soustředit na obvody ochranné, které eliminují škody a udržují správný chod zesilovače.

Mezi základní ochranu patří tepelná ochrana zesilovače. Má za úkol v případě vysoké teploty (obvykle kolem 90 °C) zajistit, aby se již dále nezvyšovala. Většinou dochází k úplnému vypnutí zesilovače nebo odpojení zátěže. Vyšší teplota by totiž mohla

poškodit koncové tranzistory vlivem nadměrné vnitřní teploty, která bývá o mnoho vyšší než teplota pouzdra samotného tranzistoru.

Rovněž je potřeba chránit zátěž-reproduktor před stejnosměrným napětím, které se může dostat na výstup například při proražení některého koncového tranzistoru. Cívka (kmitačka) totiž při stejnosměrném napětí nemá možnost chlazení pístovým pohybem jako při střídavém napětí. V případě průniku stejnosměrného napětí na zátěž je obvykle zátěž okamžitě odpojena. Samozřejmě, že se nemůže jednat o napětí řádově mV až 100ky mV (neškodí), ale o napětí kolem hranice 2 V (má již špatné účinky).

Další nezbytnou ochranou bývá u výkonnějších zesilovačů obvod připojení transformátoru k síti. U transformátoru totiž s rostoucím výkonem klesá odpor primárního vinutí a tím může dojít k výpadku jističe, byť může mít vysokou proudovou hodnotu. Záleží na tom, v jakém okamžiku periody síťového napětí (50 Hz) dojde k připojení. Největší náraz nastane při 90 ° nebo při 270 ° periody. Proudový náraz může dosahovat klidně až 100 A při faktu, že vinutí např. 1000 VA transformátoru může mít i méně než 2 Ω pro stejnosměrné měření odporu cívky. Existuje mnoho variant, avšak asi dvě základní:

- pomocí termistoru NTC
- pomocí relé a sériového rezistoru

Připojení pomocí termistoru NTC využívá jeho charakteristické vlastnosti, že se zvyšující se teplotou, klesá jeho odpor. To znamená, že po připojení k síti v sérii s primárním vinutím transformátoru, bude jeho odpor veliký a nedojde k velkému proudovému nárazu. Během pár okamžiků vzroste průchodem proudu teplota a tím klesne odpor termistoru na minimum a zesilovač může naplno pracovat.

Spojení transformátoru pomocí sériového rezistoru a následné přemostění relátkem je vhodnější pro vyšší odebíraný výkon ze sítě. V prvním okamžiku připojení k síti je v sérii s primárním vinutím výkonový rezistor v řádu desítek ohmů, po určitém čase (pár sekund) je přemostěn pomocí relé, jež je ovládané časovým spínačem, a dojde k přímému spojení primáru se sítí.

Mezi časté doplňky aplikované ve výbavě zesilovače patří zpožděné připojení zátěže. Jedná se o poměrně jednoduché obvodové řešení, hlavní prvek je opět nějaký přechodový děj (např. nabíjení kondenzátoru) či časovač, který po určitém čase sepne výstupní relé. Tímto řešením předejdeme nepříjemnému akustickému jevu jako je "lupnutí".

### 1.7.5 Cena

Cena zesilovače přímo koresponduje s použitými komponenty. Čím kvalitnější součástky, tím vyšší cena. Stejně tak pokud zakomponujeme mnoho doplňků, ochran, tak se sice zvýší spolehlivost, ale stejně tak cena. Na konečnou cenu mají tedy vliv předchozí volby. Mnohdy však je nejlepší cestou kompromisu. Uvážit, zda je daná komponenta opravdu nezbytná, či nikoliv.

V dnešní době startují ceny zesilovačů někde na hranici 1000 Kč při výkonu okolo 2 x 10 W při standartní výbavě v podobě regulace hlasitosti a kmitočtových korekcí.

Bývají většinou řešeny monolitickými integrovanými zesilovači.

Za cenu okolo 2000 Kč se nechají zakoupit zesilovače s hybridními integrovanými obvody s výkonem kolem 2 x 30 W.

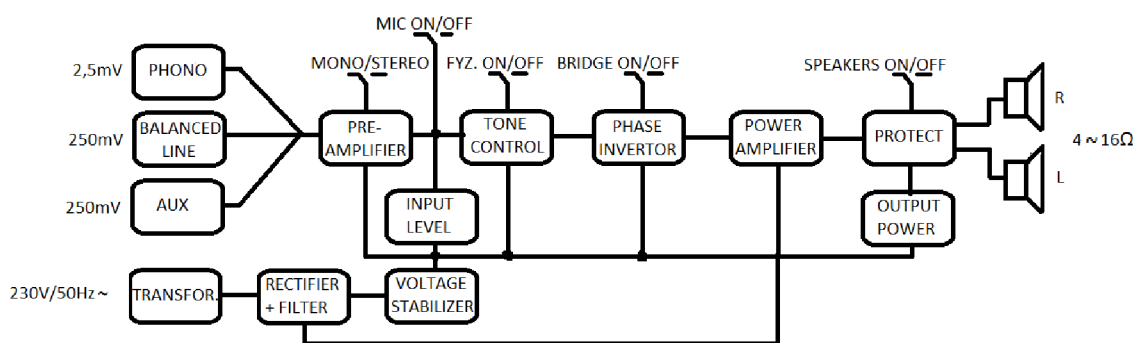
V ceně kolem 5000 Kč se již dají pořídit zesilovače se špičkovými parametry pro kvalitní domácí poslech. Osazení zpravidla diskrétními, kvalitními součástkami se spoustou funkcí, například dálkové ovládání. Výkon se již pohybuje do 2 x 100 W.

Případně pro domácí kina se používají receivery s 5.1 či 7.1 kanálovým výstupem, digitálními vstupy a spoustou možností, pro každý kanál výkon kolem 100 W. Nicméně cena těchto zařízení je již kolem 10000 Kč.

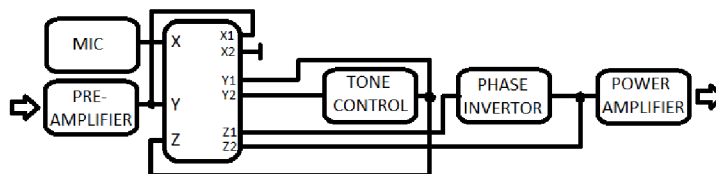
Nakonec je potřeba se zmínit o tzv. PA zesilovačích pro výkonné aplikace, především ozvučování velkých prostor. PA zesilovač je vlastně pouze koncový zesilovač bez veškerých korekcí. Výkony se pohybují ve stovkách W až jednotek kW (ať už ve stereo provozu nebo v můstkovém provozu). Cena takového zesilovače je úměrná výkonu, například PA zesilovač firmy Omnitronic o výkonu 2 x 100 W / 4 Ω vyjde zhruba na 4000 Kč a při výkonu 2 x 1000 W / 4 Ω vyjde zhruba na 14000 Kč.

## 2 NÁVRH AUDIO ZESILOVAČE

Tato kapitola se zabývá návrhem kompletního řetězce, který tvoří funkční celek. Jak naznačuje obr.2.1 zesilovač se bude skládat ze vstupního předzesilovače s elektronickým přepínáním vstupů. Dále korekčního zesilovače s regulací hlasitosti, hloubek, výšek, vyvážení a funkcí loudness. Poslední článek řetězce bude koncový stupeň s MOS-FET tranzistory na výstupu. To vše bude doplněno indikátorem vstupní úrovně pomocí ručkových ukazatelů, indikátorem výstupního výkonu do zátěže  $8 \Omega$ , mikrofonovým zesilovačem, invertorem fáze pro můstkový režim a modulem ochrany zesilovače. Jednotlivé módy se přepínají pomocí elektronického přepínače viz Obr. 2.2.



Obr. 2.1: Blokové schéma



Obr. 2.2: Detail přepínačů

### 2.1 Deklarace výsledných parametrů

- výkon:  $2 \times 500 \text{ W} / 8 \Omega$
- třída AB
- kmitočtové pásmo 20 – 20000 Hz
- harmonické zkreslení  $\leq 1 \%$

### 2.2 Napájecí zdroj koncového zesilovače

Aby bylo možno dosáhnout tohoto výkonu, je zapotřebí nejprve navrhnout napájecí zdroj. Při uvažování třídy AB a účinnosti každého kanálu cca 68 %, nám vyjde podle vzorce (2.1) potřebný výkon zdroje  $P_Z$ , kde  $\eta$  je účinnost,  $P_Z$  výstupní výkon jednoho



kanálu a  $k$  je počet kanálů. V tomto případě zvolíme 1500 VA. Dále je potřeba spočítat velikost napájecího napětí podle vzorce (2.4). Ze znalosti požadovaného výstupního výkonu a zatěžovací impedance vyjde hodnota 63,25 V<sub>ef</sub>. Maximální napětí na zátěži tedy bude podle (2.3) rovno 89,5 V. Proto zvolíme toroidní transformátor se sekundárním napětím 2x 65V~ z důvodu úbytku napětí na koncových tranzistorech (podle velikosti R<sub>DS(ON)</sub>) a emitorových odporech. Po usměrnění dostaneme podle (2.4) napětí ±90,7 V, se započtením úbytku napětí na můstkovém usměřňovači. Střední hodnota proudu, který poteče z transformátoru do každého koncového zesilovače se určí podle (2.5) a je rovna 3,95 A. Při výpočtu filtrační kapacity zvolíme maximální činitel zvlnění 1,5 % a podle vzorce (2.6)[12] dostaneme hodnotu 17,4 mF / větev, čili ideálně 20 mF / větev (paralelní spojení dvou kondenzátorů 10 mF / 100 V).

$$\eta = 68 \% \Rightarrow$$

$$P_Z = \frac{P_{\text{out}}}{\eta} \cdot k \quad (2.1)$$

$$P_Z = \frac{500}{0,68} \cdot 2 = 1470 \text{ VA}$$

$P_{\text{out}}$  je výstupní výkon,  $\eta$  je účinnost zesilovače [%] a  $k$  je počet výkonových zesilovačů [-].

$$U_{\text{ef}} = \sqrt{P_{\text{out}} \cdot R_Z} \quad (2.2)$$

$$U_{\text{ef}} = \sqrt{500 \cdot 8} = 63,25 \text{ V}$$

$R_Z$  je impedance zátěže [ $\Omega$ ].

$$U_m = U_{\text{ef}} \cdot \sqrt{2} \quad (2.3)$$

$$U_m = 63,25 \cdot \sqrt{2} = 89,5 \text{ V}$$

$$U_{\text{CC}} = (U_Z \cdot \sqrt{2}) - U_M \quad (2.4)$$

$$U_{\text{CC}} = (65 \cdot \sqrt{2}) - 1,2 = 90,7 \text{ V}$$

$U_M$  je úbytek na můstkovém usměřňovači [V].

$$I = \frac{P_{\text{out}}}{2 \cdot U_{\text{ef}}} \quad (2.5)$$

$$I = \frac{500}{2 \cdot 63,25} = 3,95 \text{ A}$$

$$C = \frac{k \cdot I}{p \cdot U_{\text{CC}}} \cdot n \quad (2.6)$$

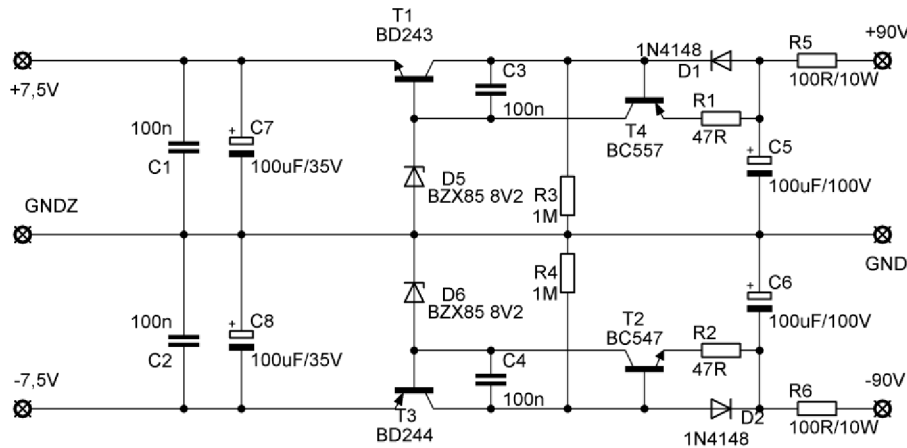
$$C = \frac{300 \cdot 3950}{1,5 \cdot 90,7} \cdot 2 = 17420 \mu\text{F}$$

$k$  je konstanta pro můstek [-],  $I$  je střední hodnota proudu [mA],  $p$  je činitel zvlnění napětí [%],  $U_{CC}$  je napětí naprázdno [V] a  $n$  je počet výkonových zesilovačů [-].

### 2.3 Napájecí zdroj pro ostatní moduly

Napájení předzesilovače, korekčního zesilovače a všech ostatních modulů je zabezpečeno pomocí stabilizátoru s výkonovými tranzistory.

Vstupní napětí  $\pm 90$  V je přes rezistory  $R_5(R_6)$   $100 \Omega / 10$  W a diodu  $D_1(D_2)$  přivedeno na kolektor tranzistoru  $T_1(T_3)$ . Výstupní napětí je určeno parametrickou součástí v bázi tranzistoru  $T_1(T_2)$  – Zenerovou diodou  $D_5(D_6)$ , konkrétně jejím závěrným napětím sníženým o úbytek na přechodu báze-emitor  $T_1$ . Tranzistor  $T_2(T_4)$  slouží jako omezovač proudu, který teče Zenerovou diodou.

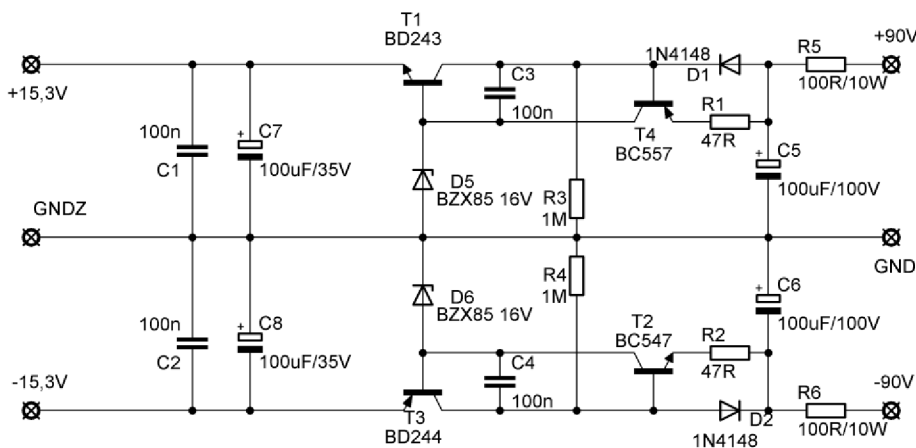


Obr. 2.3: Zdroj napětí  $\pm 7,5$  V

$$U_2 = U_{ZD} - U_{BE} \quad (2.7)$$

$$U_2 = 8,2 - 0,7 = 7,5 \text{ V}$$

$U_{ZD}$  je napětí Zenerovy diody [V],  $U_{BE}$  je úbytek na přechodu B-E tranzistoru [V].



Obr. 2.4: Zdroj napětí ±15 V

$$U_2 = U_{ZD} - U_{BE} \quad (2.8)$$

$$U_2 = 16 - 0,7 = 15,3 \text{ V}$$

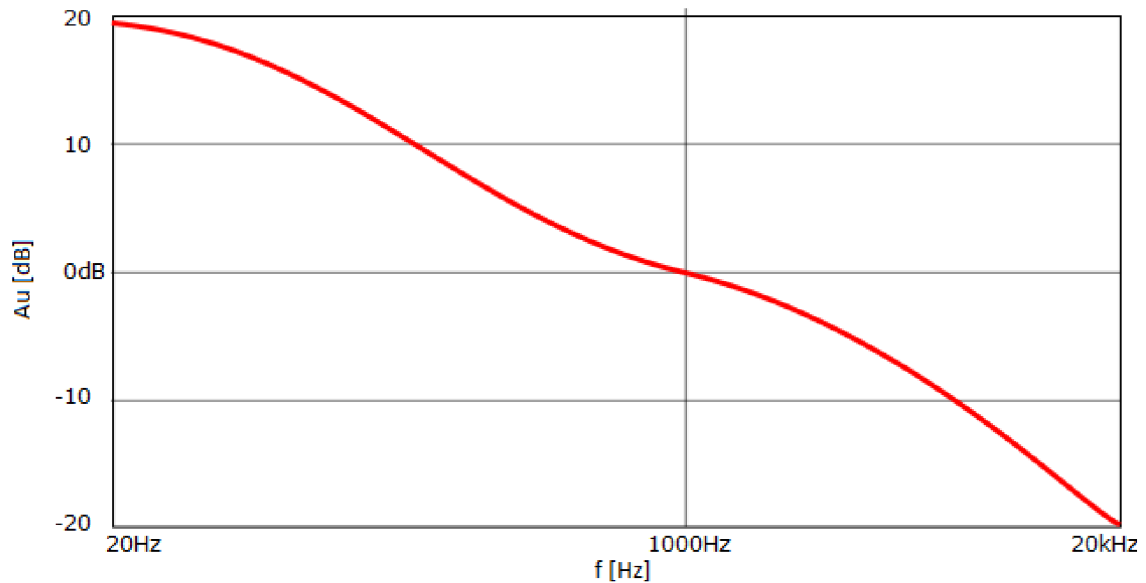
## 2.4 Předzesilovač

Předzesilovač je řešen jako 3-vstupový s elektronickým přepínáním vstupů, odpadá tedy nepříjemné lupání při volbě aktivního vstupu. Jednotlivé vstupy PHONO, BALANCED LINE a AUX mají nastaveny citlivosti dle oblasti použití. Přepínání zajišťují dva obvody CMOS 4053, což jsou tři vstupové multiplexory. Vstupy PHONO a BALANCED LINE mají své vlastní operační zesilovače, vstup AUX pouze odporový dělič. Jelikož může být aktivní pouze jeden vstup, tak jsou za přepínačem sloučeny všechny upravené vstupy do jednoho a přivedeny na výstupní operační zesilovač, který nastavuje výstupní úroveň na 1 V. Předzesilovač obsahuje rovněž přepínač mezi stereo a mono provozem[5].

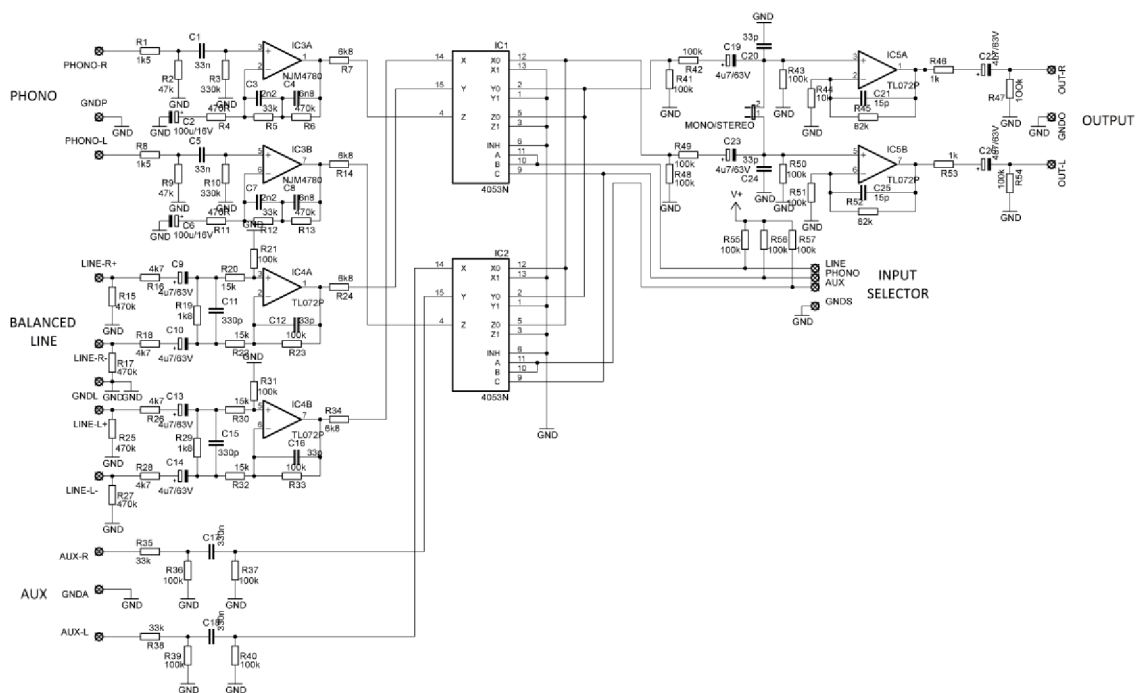
Vstup č. 1 je nazván PHONO a používá se pro magnetodynamickou přenosku gramofonu. Citlivost tohoto vstupu je 2,5 mV, celkový zisk vstupu PHONO je tedy 52 dB (zesílení 400x). Rovněž je u tohoto vstupu aplikována korekce RIAA, která se používá právě u gramofonového záznamu. RIAA korekce při záznamu utlumuje nízké kmitočty až na -20 dB a naopak zesiluje vysoké kmitočty až na +20 dB, tudíž je zapotřebí zajistit vyrovnaní charakteristiky při reprodukci opačným procesem, tedy posílením +20 dB na nízkých a zeslabením -20 dB na vysokých kmitočtech. Vzhledem k vysokému zisku je použit operační zesilovač s velmi nízkým šumem, NJM4580.

Vstup č. 2 je nazván BALANCED LINE kvůli tomu, že se jedná o symetrický (vyvážený) vstup. Má jednu obrovskou výhodu v podobě minimálního možného rušení, které projde ze vstupu do zesilovače. Je to dáno díky obrácené fázi ve vodiči + a -. Veškeré rušení se tak vzájemně vyruší. Tato varianta se používá především v profesionální praxi. Citlivost vstupu je 250 mV, celkový zisk tedy 12 dB (zesílení 4x). Jako operační zesilovač je použit nízkošumový, unipolární TL072[11].

Vstup č. 3 se jmenuje AUX a je určen pro obecné použití (CD, DVD, PC...). Citlivost je nastavena na 250 mV pomocí odporového děliče. Zisk je tedy 12 dB (4x). Napájení je ±7,5 V.



Obr. 2.5: Korekce RIAA[6]

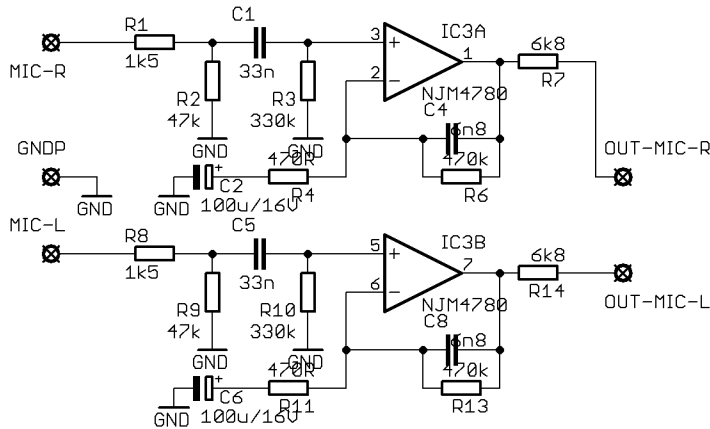


Obr. 2.6: Předsilovač

## 2.5 Mikrofonový zesilovač

Mikrofonový zesilovač vychází přímo z předzesilovače, konkrétně ze vstupu PHONO. Má citlivost 2,5 mV a lineární charakteristiku. Obsahuje jeden operační zesilovač NJM4580. Použitelnost je pro dynamické mikrofony o impedanci 33  $\Omega$ , 100  $\Omega$  nebo

600  $\Omega$ . Případně se dá využít jako vstup pro kytaru (s použitím děliče nebo omezením potenciometrem kytary).

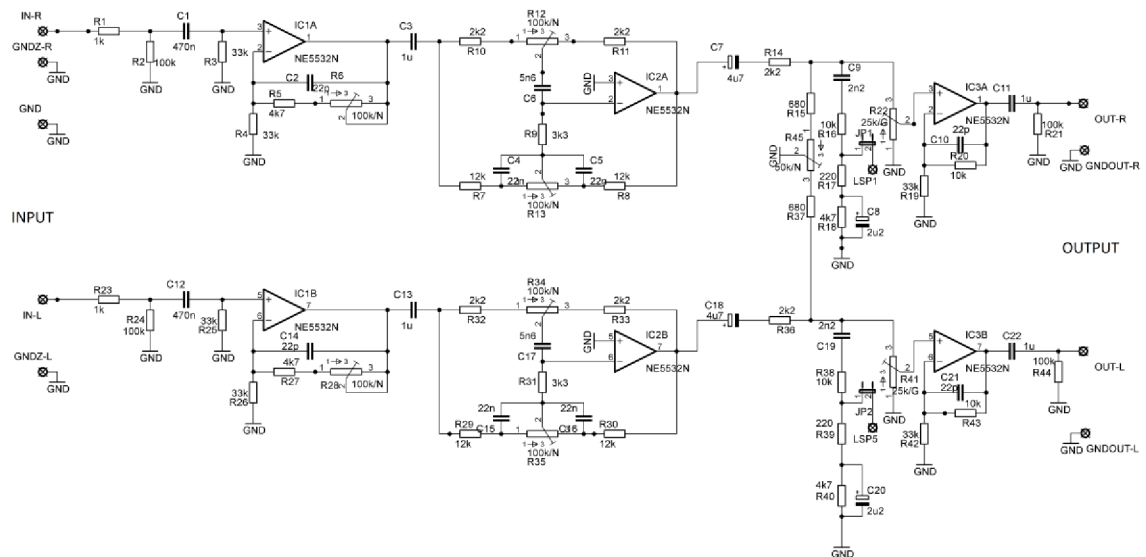


Obr. 2.7: Mikrofonový zesilovač

## 2.6 Korekční zesilovač

Korekční zesilovač umožňuje regulovat hlasitost, vyvážení, hloubky a výšky. Obsahuje též přepínač pro volbu fyziologické regulace (loudness)[14].

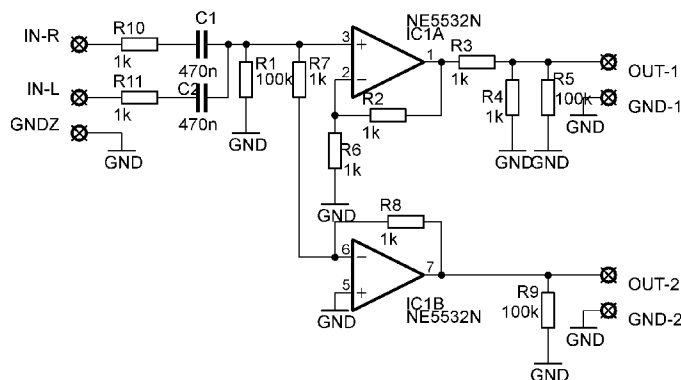
Je tvořen třemi operačními zesilovači *TL072*. První stupeň slouží jako napěťový zesilovač se ziskem 1-3, který se nastavuje pomocí trimru. Druhý stupeň je samotný obvod korekce. Je zde použit klasický korektor typu Baxandel. Hloubky se nastavují pomocí potenciometru *R13*(*R35*) v rozmezí  $\pm 16$  dB, výšky potenciometrem *R12*(*R34*) v rozmezí  $\pm 16$  dB, vyvážení v rozsahu  $\pm 20$ dB. Poslední stupeň v korekčním zesilovači je regulátor hlasitosti o rozsahu -80 dB – 0 dB. Napájen je  $\pm 15$  V.



Obr. 2.8: Korekční zesilovač

## 2.7 Invertor fáze

Aby se stal zesilovač užitečnějším a bylo možno využít maximálního výkonu, je potřeba jej vybavit možností práce v můstkovém zapojení. To znamená, že ze dvou identických kanálů vznikne jeden, který bude mít dvojnásobný výkon do dvojnásobné impedance. Čili pokud má jeden kanál výkon  $500 \text{ W} / 4 \Omega$ , v můstku vzroste výkon na  $1000 \text{ W} / 8 \Omega$ . Je to dané tím, že oba kanály pracují do jedné zátěže proti sobě, jeden kanál má tedy otočenou fázi signálu o  $180^\circ$  avšak stejnou amplitudu. Teoreticky vzroste výkon až 4x, avšak z důvodu velkého proudového namáhání koncových tranzistorů, je vhodnější použití dvojnásobné impedance. K této činnosti je zapotřebí fázový invertor[3], který z jednoho vstupního signálu vytvoří dva vzájemně invertované výstupní signály, kterými se budou budovat koncové zesilovače. Nejjednodušší varianta je v tomto případě použití dvou operačních zesilovačů, jeden v neinvertujícím zapojení a druhý v invertujícím zapojení. Je však nutno na výstupu neinvertujícího zapojení, aplikovat odporový dělič 1 : 2 jelikož zisk neinvertujícího je vyšší o 1, než-li u invertujícího zapojení. Operační zesilovač je NE5532N[8]. Napájení je symetrické  $\pm 15 \text{ V}$ .



Obr. 2.9: Invertor fáze

## 2.8 Koncový zesilovač

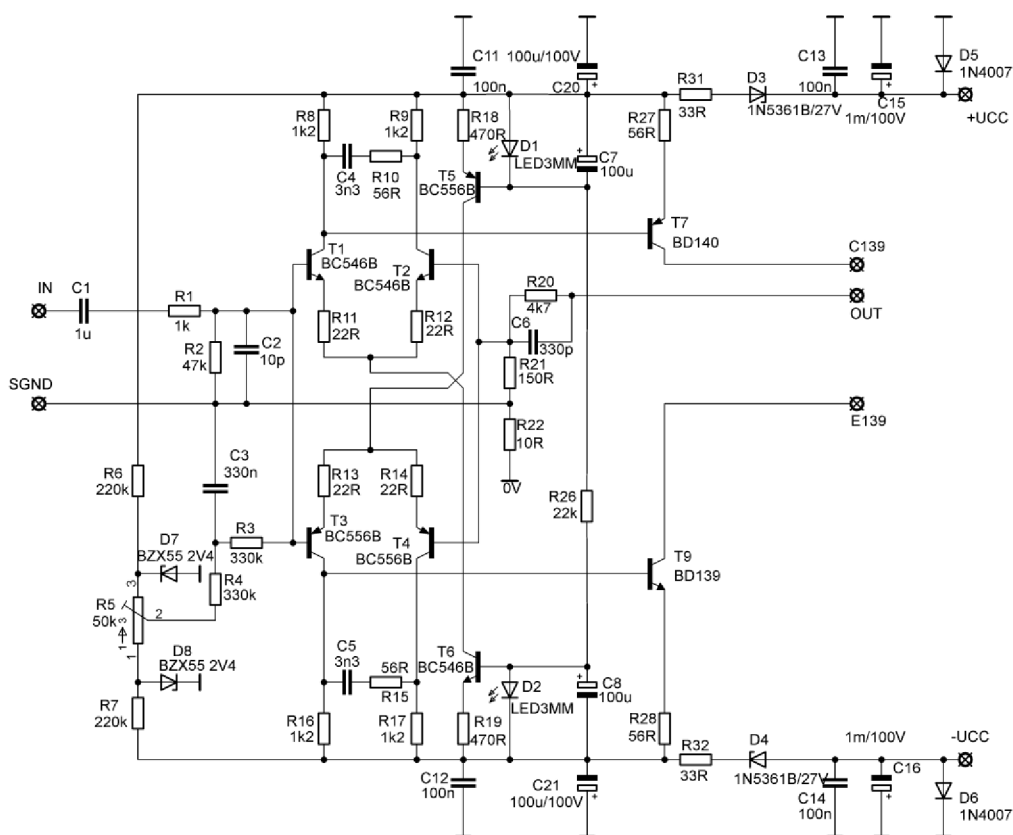
Předešlé stupně měly za úkol zvýšit úroveň vstupního signálu, upravit kmitočtovou charakteristiku a vytvořit signál vhodný pro buzení koncového (výkonového) zesilovače a ten má jediný úkol, vybudit reproduktor požadovaným výkonem. Nyní je na vstupu signál o úrovni cca.  $2 \text{ V}_{\sim}$ . To znamená, že pokud má mít zesilovač výkon  $500 \text{ W} / 8 \Omega$ , musí mít na výstupu napětí cca.  $63 \text{ V}_{\text{ef} \sim}$ . To znamená, že zisk koncového zesilovače by měl být tedy přibližně 32 (30 dB). Zesilovač pracuje ve třídě AB. To znamená, že je nastaven malý klidový proud koncovými tranzistory (asi  $15 \text{ mA} / \text{tranzistor}$ ). Z toho je patrné, že při malých amplitudách vstupního signálu pracují tranzistory ve třídě A a postupně se zvyšující se amplitudou vstupního signálu přechází do třídy B. To v praxi znamená dobrou účinnost a malé přechodové zkreslení. Podíváme-li se na schéma koncového stupně, můžeme jej rozdělit na 3 dílčí části.

První část je diferenciální a napěťově zesilující stupeň. Skládá se z diferenciálního (rozdílového) zesilovače, který je tvořen tranzistory  $T_1-T_4$  k nimž jsou zapotřebí proudové zdroje tvořené tranzistory  $T_5$  a  $T_6$ . Zajištění konstantního proudu je

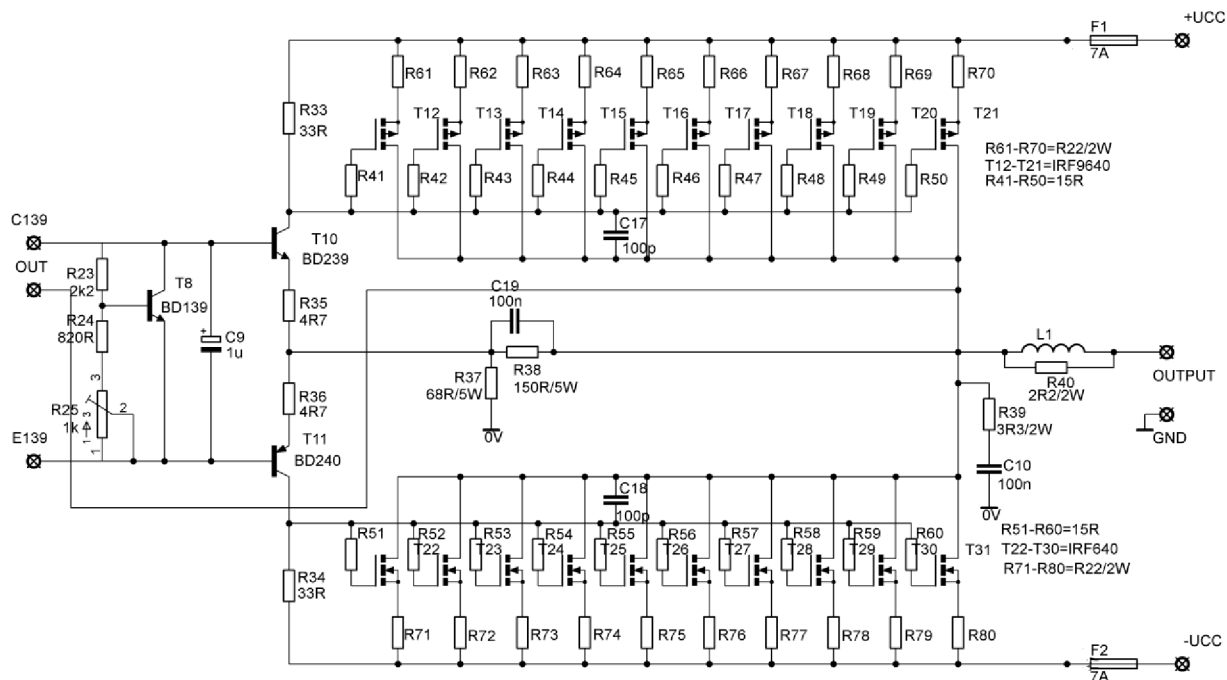
realizováno pomocí červených *LED*, které mají úbytek napětí na přechodu PN 1,6 – 2 V. Zároveň se v tomto stupni nachází trimr pro nastavení nulového stejnosměrného výstupního napětí zesilovače. To je realizováno pomocí dvou Zenerových diod 2V4. Princip spočívá v kompenzaci napětí na vstupních tranzistorech, které by mělo být ideálně nulové. Tento stupeň je napájen napětím o 27 V nižším (úbytek na Zenerových diodách  $D_3$  a  $D_4$ ), než-li je napětí koncových tranzistorů, z důvodu zabránění limitace přebuzením v koncových tranzistorech.

Druhá část je budící část. Diferenciální stupeň je přes tranzistory  $T_7$  a  $T_8$  navázán na budiče koncových tranzistorů  $T_{10}$  a  $T_{11}$ . Budiče pracují ve třídě A, čili pro malé amplitudy a do výkonu asi 2 W se koncové tranzistory neuplatňují. Budiče obsahují mezi svými bázemi tranzistor  $T_9$ , který pomocí trimru  $R_{25}$  slouží pro nastavení klidového proudu koncových tranzistorů a zároveň jako teplotní kompenzátor klidového proudu, proto je umístěn na chladiči.

Posledním stupněm jsou koncové tranzistory navázané na budiče. Osazení je deset párů na každou větev. Byly zvoleny tranzistory typu V-MOS a to *IRF640* (N-kanál) pro kladnou půlvlnu a *IRF9640* (P-kanál) pro zápornou půlvlnu signálu. Jedná se o spínací MOS-FET tranzistory a o jejich vhodnosti se dá polemizovat. Ale vzhledem k požadovanému výkonu by použití lepších a dražších tranzistorů vedlo k velkému zvýšení nákladů, které jsou i s těmito typy poměrně značné. Napěťový zisk koncových tranzistorů je dán poměrem  $R_{38}$  a  $R_{37}$ , čili přibližně 3. Na výstupu je tlumivka  $L_1$ , která má 16 závitů lakovaného drátu o průměru 1 mm na trnu 0,8 mm. Zároveň je zde Boucherotův RC člen, který zabráňuje rozkmitání zesilovače na vysokých frekvencích.



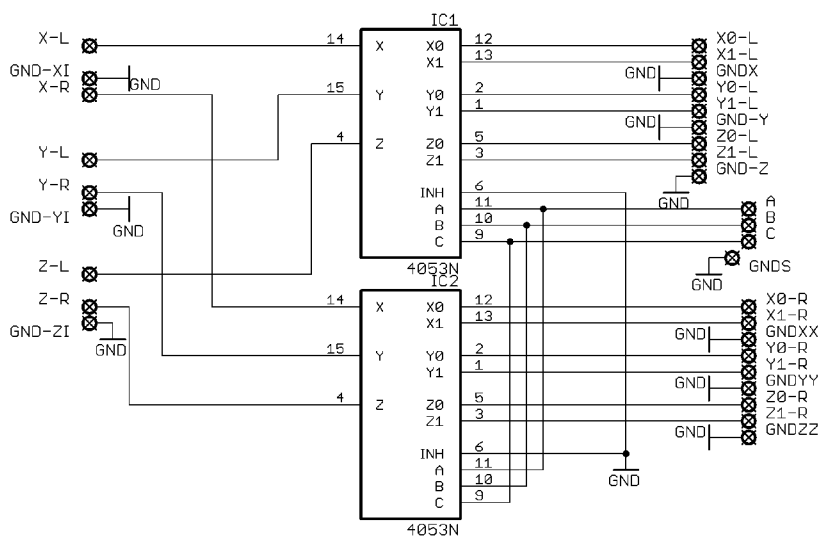
Obr. 2.10: Koncový zesilovač 1/2



Obr. 2.11: Koncový zesilovač 2/2

## 2.9 Přepínač

Elektronický přepínač módů (mikrofon, mŕstek, korekce) je tvořen pomocí multiplexorů 4053. Třemi přepínači lze volit nastavení stereo / mŕstek, korekce / přímý výstup předzesilovače a mikrofon zapnuto / vypnuto. Jednotlivé módy lze libovolně kombinovat. Na Obr. 2.12 je nakresleno schéma zapojení. Vstup X je výstup mikrofonového zesilovače, vstup Y je výstup předzesilovače a vstup Z je výstup korekčního zesilovače. Detailní funkce je znázorněna na Obr. 2.2.



Obr. 2.12: Elektronický přepínač módů



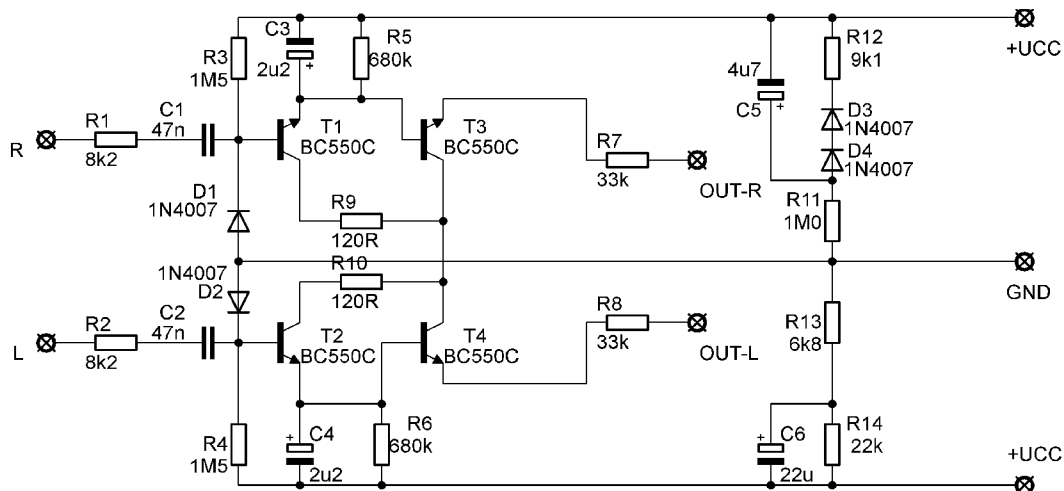
## 2.10 Výstup na sluchátka

Výstup na nízkoohmové sluchátka (cca 16 - 32  $\Omega$ ), je realizován pomocí dvou rezistorů 560  $\Omega$  / 2 W, které jsou připojeny k výstupu pravého a levého kanálu. Rezistory zajišťují, aby sluchátka při plném vybuzení zesilovače nebyla přetížena.

## 2.11 Indikátor vstupní úrovně

Indikátor vstupní úrovně je velice užitečný doplněk. Poskytuje nám údaj o úrovni vstupního signálu a případném přebuzení nebo naopak malém buzení zesilovače. Jeho použití je spíše známé jako indikátor záznamové úrovně, například u páskových magnetofonů, kde se hojně využíval.

Je řešen jako obyčejný dvoustupňový zesilovač, který má jako zátěž ručkový ukazatel s magneto-elektrickým ústrojím. Připojen je hned za předzesilovačem. Stupnice je cejchována od -20 dB do +3 dB a ukazuje střední úroveň signálu. Nastavení (cejchování) se provádí pomocí rezistoru  $R7(R8)$ . Napájení je nesymetrické, 15 V.



Obr. 2.13: Indikátor vstupní úrovně

## 2.12 Indikátor výstupního výkonu

Pokud připojujeme k zesilovači reproduktor, který má nižší dovolený příkon, než je výkon zesilovače, je důležité zajistit, aby nedošlo k přetížení samotného reproduktoru a tím k možnému poškození reproduktoru i zesilovače.

Indikátor je řešen pomocí monolitického integrovaného obvodu *LM3915* firmy National Semiconductor[7]. Jeho výhodou je zabudované logaritmické dělení stupnice a zobrazení pomocí deseti LED. Princip spočívá ve snímání napětí na definované zátěži, při známé impedanci. Rozsah se definuje pomocí odporového děliče  $R_3$  a  $R_4$ . Maximální napětí na vstupu obvodu je  $\pm 10$  V, tedy aby svítily všechny LED, musí mít zesilovač výkon alespoň 12,5 W / 8  $\Omega$ .

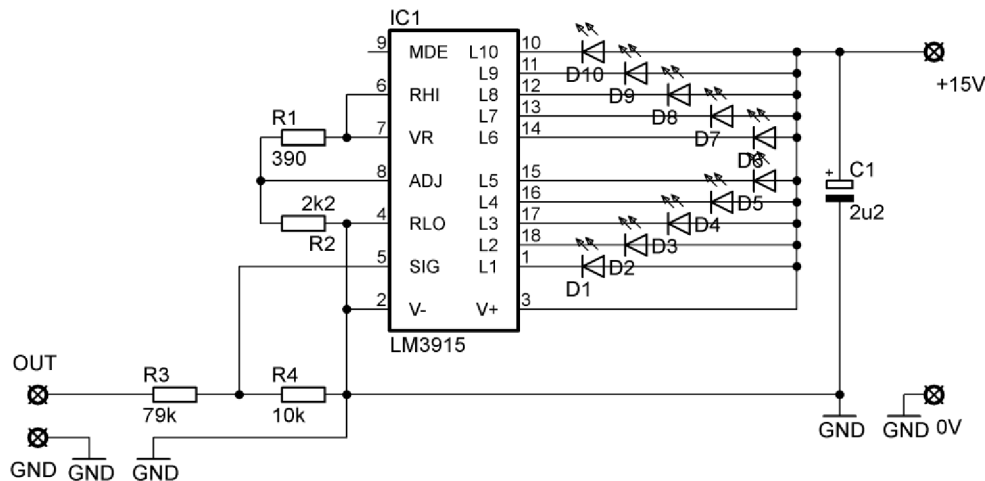
Čili pro rozsah 500W/8 $\Omega$  bude odporový dělič mít hodnoty  $R_3=79$  k $\Omega$  a  $R_4=10$  k $\Omega$ .

$$10 = U_{\max} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (2.9)$$

$$10 = 89 \cdot \frac{10}{R_3 + 10} \Rightarrow R_3 = \frac{890 - 100}{10} = 79 \text{ k}\Omega$$

10 [V] je maximální vstupní napětí obvodu;

$U_{\max}$  [V] je špičková hodnota napětí při výkonu 500 W / 8  $\Omega$ ;



Obr. 2.14: Indikátor výstupního výkonu

## 2.13 Ochrany zesilovače

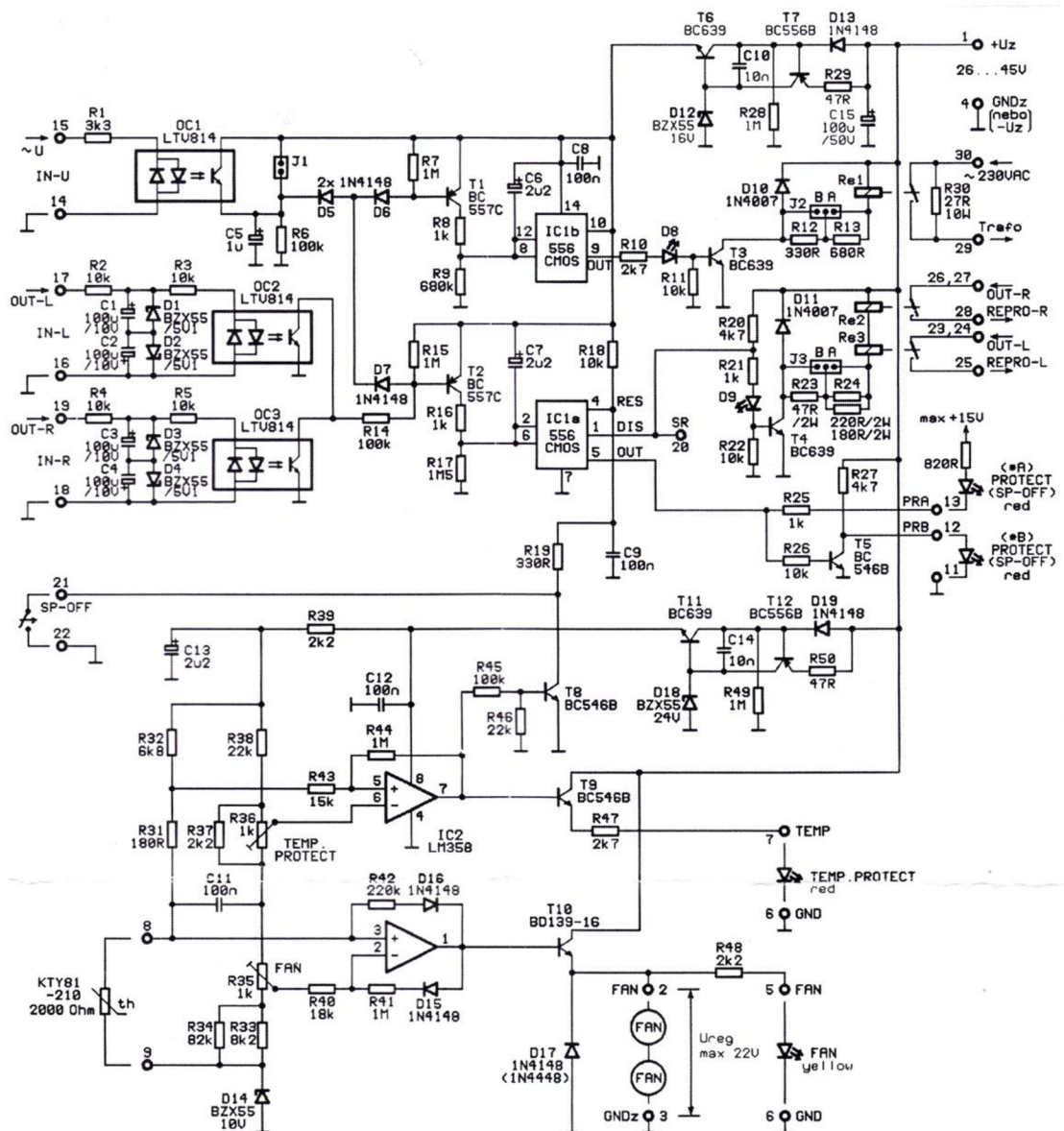
Aby byly co nejvíce minimalizovány škody, které mohou vzniknout při poruše zesilovače, je vhodné jej vybavit některými typy ochran. V našem případě se bude jednat o ochranu před stejnosměrným napětím na výstupu, ochranu proti přehřátí, zpožděné připojení k zátěži a ochranu proti proudovému nárazu po zapnutí (Obr. 2.15)

Ochrana proti stejnosměrnému napětí na výstupu zajišťuje odpojení zátěže při detekci stejnosměrného napětí  $\geq 2$  V. Stejnosměrné napětí totiž může zničit cívku-kmitačku reproduktoru. Detektor je připojen přímo na výstup zesilovače a pomocí Zenerových diod, kondenzátorů a rezistorů přes optron *LTV814* navázán na dvojitý časovač *CMOS556*, který při překročení hranice zajistí rozepnutí výstupních relé.

Tepelná ochrana je realizována pomocí operačního zesilovače *LM358* a teplotního čidla *KTY*, kterým je snímána teplota chladiče. První polovina OZ je využita pro spínání a ovládání napětí na ventilátorech, druhá polovina OZ pracuje jako komparátor a při překročení teploty pro odpojení zátěže překlápí a odpojí ji. Lze nastavit teplotu sepnutí ventilátorů na  $60 \pm 10$  °C a odpojení zátěže při  $80 \pm 10$  °C. Otáčky ventilátorů jsou regulované pomocí napětí, které roste s teplotou až na max. 21 V. Sepnutí ventilátorů je indikováno pomocí *LED*, stejně tak, jako přehřátí.

Zpožděné připojení k zátěži má na starosti 1. časovač *CMOS556*, který přibližně 4 s po zapnutí sepne výstupní relé obou kanálů.

Ochrana proti proudovému nárazu při zapnutí využívá 2. Časovač, který cca po 2 s sepne relé a přemostí tak rezistor 27  $\Omega$ , jež je po zapnutí v sérii s primárním vinutím transformátoru.



Obr. 2.15: Schéma modulu ochran[19]

## 2.14 Výběr a dimenzace součástek

Známe požadovaný výkon, máme vypočtené napájecí napětí, a tudíž podle těchto kritérií musíme vybrat vhodné součástky.

### 2.14.1 Napájecí zdroj

U napájecího zdroje bylo nutno zvolit vhodný usměrňovač a také kondenzátory o potřebné kapacitě pro zajištění požadovaného činitele zvlnění. Po výpočtu vyšlo 17,4 mF, proto byly zvoleny 20 mF kondenzátory v každé větvi.

## 2.14.2 Předzesilovač, mikrofonový zesilovač a korekční zesilovač

U těchto modulů bylo zapotřebí vhodně zvolit typy použitých operačních zesilovačů, ne každý je totiž vhodný pro daný vstup či výstup. Nicméně použité jsou pouze dva typy *NJM4580* a *TL072* (případně existuje varianta nahrazení typem *NE5532N*).

## 2.14.3 Koncový zesilovač

Z předchozích úvah je zřejmé, že každý aktivní prvek musí být schopen pracovat s minimálně napájecím napětím, lépe s dvojnásobkem. U koncových tranzistorů je nezbytné, aby závěrné napětí MOS-FET tranzistorů bylo minimálně 180 V. Z tohoto předpokladu byly vybrány V-MOS tranzistory *IRF640*[10] a *IRF9640*[9].

*IRF640* je typu N, má závěrné napětí maximálně 200 V, maximální proud  $I_D = 18$  A, výkon  $P_D = 150$  W a v sepnutém stavu  $R_{DS(on)} = 0,15$   $\Omega$ .

*IRF9640* je typu P, má závěrné napětí maximálně 200 V, maximální proud  $I_D = 11$  A, výkon  $P_D = 125$  W a v sepnutém stavu  $R_{DS(on)} = 0,5$   $\Omega$ .

Z katalogových údajů na první pohled plynou jisté rozdíly obou vodivostí, nicméně u unipolárních tranzistorů nebývají ryze komplementární dvojice tranzistorů a v našem případě nehrají tyto rozdíly zásadní roli, jelikož proud jedním tranzistorem bude při použití deseti párů, maximálně něco málo přes 1 A a úbytky na jednotlivých tranzistorech se vykompenzují emitorovými (sourceovými) rezistory.

Jako budiče koncových MOS-FETů byly vybrány tranzistory *BD239C* (NPN) a *BD240C* (PNP). Jedná se o bipolární výkonové tranzistory se zcela shodnými parametry, jde o čistě komplementární dvojici.

Parametry, kterých nabývají, jsou:  $U_{CE} = 115$  V,  $I_C = 2$  A,  $P_C = 30$  W a  $h_{21E} = 15..40$ . Opět jsou v pouzdře typu TO-220.

Další v pořadí jsou tranzistory navazující diferenciální stupeň na budící stupeň (napěťový stupeň). Děje se tak pomocí tranzistorů *BD139* (NPN) a *BD140* (PNP), které jsou napájeny již sníženým napětím o úbytek na Zenerových diodách (27 V), čili napětí v jedné větvi je asi 63 V.

*BD139* a *BD140* jsou bipolární tranzistory menšího výkonu v pouzdře TO-126. Opět se jedná o komplementární dvojici, jejíž parametry jsou:  $U_{CE} = 80$  V,  $I_C = 1,5$  A,  $P_C = 12,5$  W a  $h_{21E} = 100..250$ . Pro tyto tranzistory již postačuje vzduchové chlazení bez chladiče nebo jen malý chladič (ztrátový výkon je okolo 1 W). Mezi touto dvojicí je navíc umístěn třetí tranzistor, opět *BD139*, jež je přímo v kontaktu s chladičem koncových tranzistorů a má za úkol korigovat klidový proud v závislosti na teplotě (v podobné funkci jako termistor).

Posledními aktivní prvky výkonového zesilovače jsou ve vstupním diferenciálním stupni. V každé větvi jsou 3. V kladné větvi to jsou dva *BC546B* a jeden *BC556B*, v záporné větvi dva *BC556B* a jeden *BC546B*.

*BC546B* (NPN) a *BC556B* (PNP) jsou rovnocenné tranzistory s velkým zesílením. Mají pouzdro TO-92 a základní parametry:  $U_{CE} = 65$  V,  $I_C = 0,1$  A,  $P_C = 0,625$  W a  $h_{21E} = 200..450$ . Dvojice tvoří diferenciální zesilovač a třetí je funkci konstantního proudového zdroje za pomoci červené LED ( $U_f =$  cca 1,8 V).

Koncový stupeň obsahuje také 4 Zenerovy diody. Diody 2V4 jsou výkonu 0,5 W, slouží pouze k nastavení nulového výstupního napětí. Diody 27V jsou výkonu 5 W, snižují napětí koncového stupně a napájí diferenciální a napěťový stupeň.

Pasivní prvky, konkrétně rezistory jsou navrženy následovně: Emitorové odpory mají výkon 2 W, odporový dělič mezi budícím a koncovým stupněm má rezistory 5W. Ostatní rezistory jsou typu 0207/10 s výkonem 0,6 W.

U kondenzátorů je vždy respektováno maximální možné napětí v dané větvi, což je 90 V, a proto jsou použity kondenzátory na napětí 100 V. U signálových cest je možné použít nižší napětí 63 V.

## 2.14.4 Doplnky

U indikátoru výstupního výkonu bylo nutno pouze respektovat datasheet výrobce obvodu LM3915 (National Semiconductor) a správně nastavit dělicí poměr rezistorů  $R_3$  a  $R_4$ , aby byl výkon udáván v efektivní hodnotě.

## 2.15 Návrh chlazení

Chlazení necht' je zabezpečeno pomocí hliníkového žebrovaného chladiče o dostatečných rozměrech. Spočítáme tedy výkon, který je potřeba uchladiť podle (1.6), poté hodnotu odporu chladiče pro jeden kanál podle (1.5):

$$P_{V(\max)} = \frac{P_o}{3} = \frac{500}{3} \cong 167 \text{ W}$$

tento výkon se rozloží mezi paralelně spojené tranzistory. Čili v našem případě jich máme 10 (párů) a na každém tedy bude přibližně 17 W ztrátového tepla během jedné periody signálu.

$$R_{(\text{th})\text{ge}} = \frac{T_i - T_u}{P_{\max}} = \frac{150 - 60}{17} = 5,29 \text{ K/W}$$

tato hodnota platí při uvažování teploty 60 °C uvnitř zesilovače

$$R_{(\text{th})\text{G}} = 1 \text{ K/W}$$

hodnota získaná z katalogového listu (tepelný odpor mezi pouzdem a přechodem)

$$R_{(\text{th})\text{U}} = 0,6 \text{ K/W}$$

tepelný odpor slídové podložky o tloušťce 0,1mm.

$$R_{(\text{th})\text{K}} = R_{(\text{th})\text{ge}} - R_{(\text{th})\text{U}} - R_{(\text{th})\text{G}} = 5,29 - 1 - 0,6 = 3,69 \text{ K/W}$$

tepelný odpor chladiče pro jeden tranzistor.

$$R_{(\text{th})\text{K20}} = \frac{3,69}{20} = 0,1845 \text{ K/W}$$

celkový tepelný odpor chladiče jednoho kanálu.

## 3 SIMULACE ZAPOJENÍ V PROGRAMU PSpICE

Před samotnou realizací je vhodné pomocí softwarové simulace otestovat, zda-li naše zapojení má vůbec teoretickou funkčnost. K tomuto účelu využijeme program Orcad PSpice firmy Cadence.

### 3.1 Program PSpice

Je vhodné ve stručnosti říci pár slov o tomto programu. Obsahuje jak reálné tak ideální modely součástek. Umožňuje mnoho typů analýzy obvodu, například časovou, frekvenční, teplotní, šumovou... Konkrétní nastavení se nastavuje v simulačním profilu.

### 3.2 Simulace zapojení

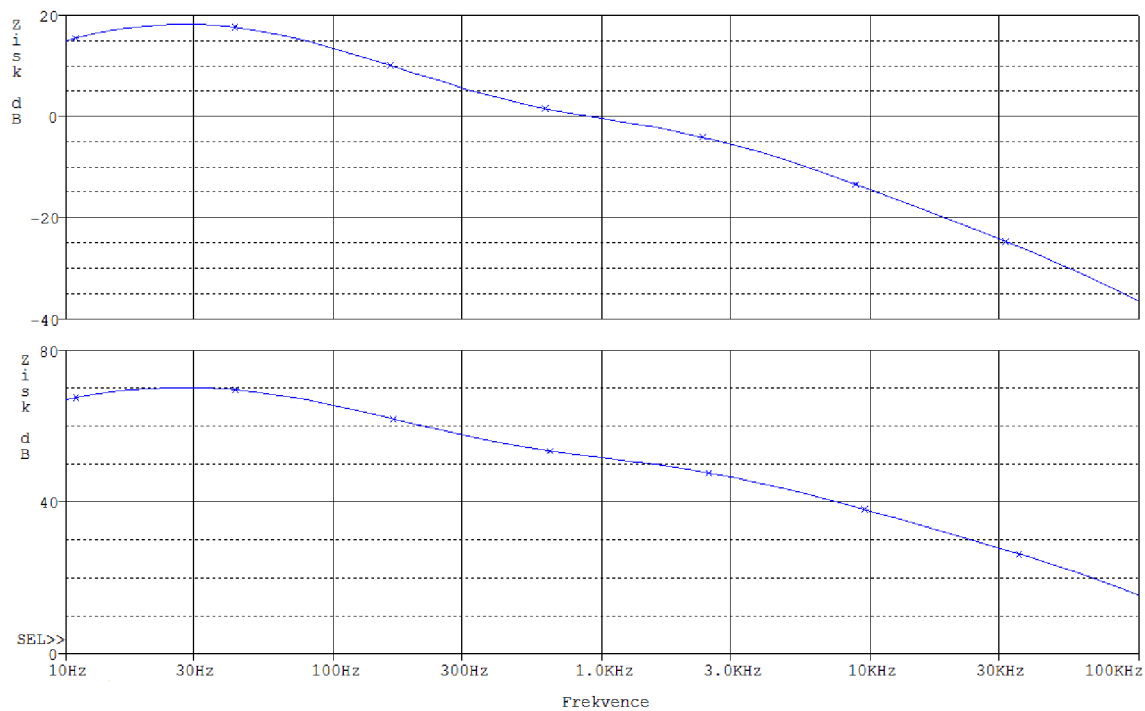
Po nakreslení schématu, nastavení hodnot součástek a odladění chyb je možno provést žádanou simulaci. V našem případě nám postačí časová (time domain) a frekvenční (AC sweep).

#### 3.2.1 Simulace předzesilovače

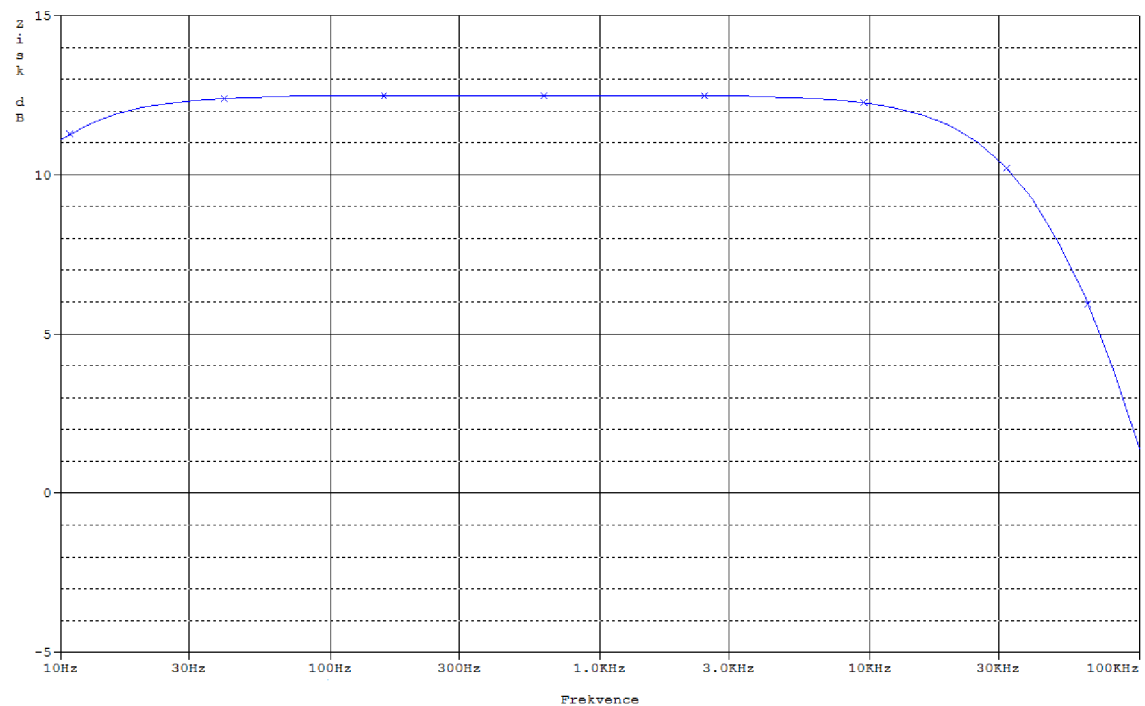
U simulace předzesilovače zkoumáme především frekvenční charakteristiku, zisk a korekci RIAA u vstupu PHONO. Jak můžeme vidět na Obr. 3.1 Korekce RIAA je navržena takřka dle normy a její průběh se shoduje s normou. Na kmitočtu 20 Hz má zisk +20 dB (oproti 1 kHz), klesá téměř lineárně a na kmitočtu přibližně 20 kHz má zisk -20dB (oproti 1 kHz).

Vstup BALANCED LINE, vykazuje téměř lineární přenosovou charakteristiku (Obr. 3.2) v pásmu 20 Hz – 20 kHz. Zisk tohoto vstupu je 12,5 dB, což souhlasí s teoretickým předpokladem (bylo použito zaokrouhlování).

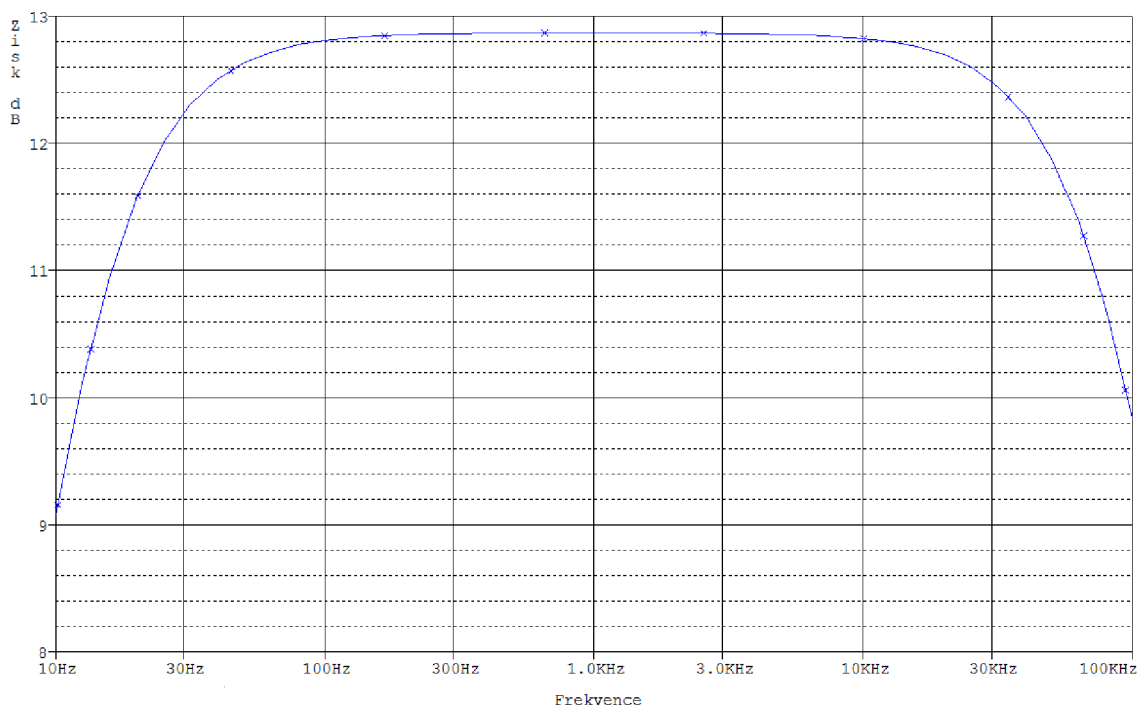
Vstup AUX má také takřka lineární průběh frekvenční charakteristiky (Obr. 3.3). Zisk je roven 12,8 dB, což je jen malá odchylka od předpokládané hodnoty.



Obr. 3.1: Korekce RIAA a kmitočtová charakteristika vstupu PHONO



Obr. 3.2: Kmitočtová charakteristika vstupu LINE

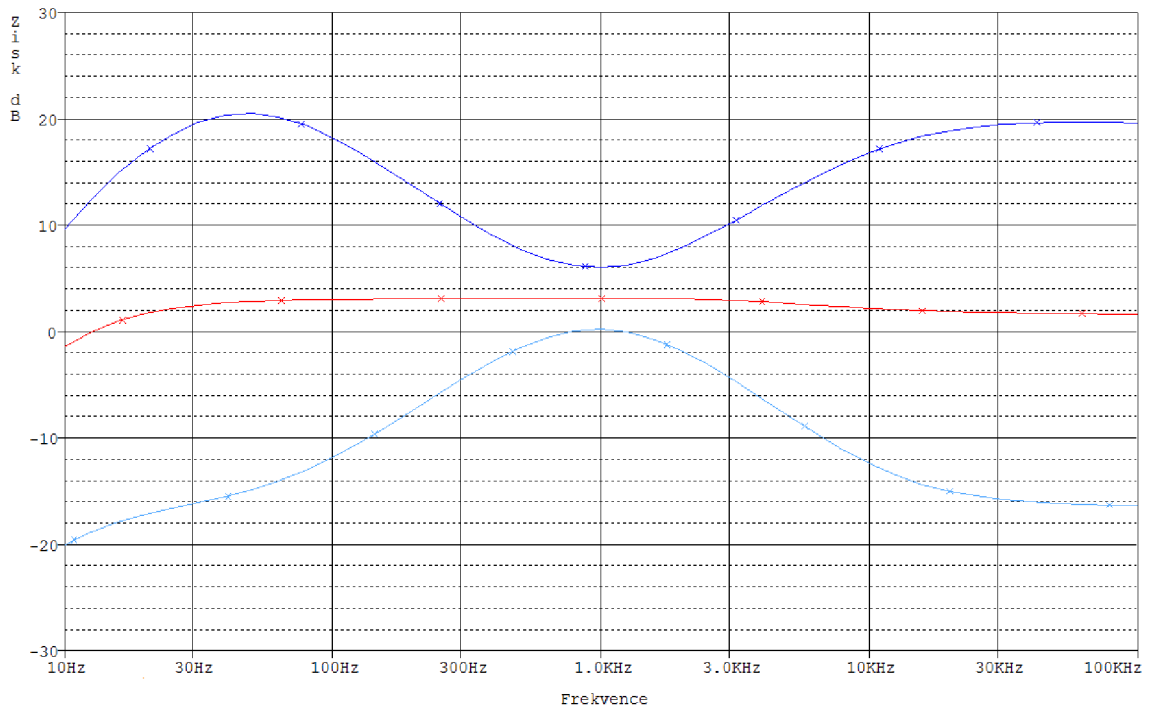


Obr. 3.3: Kmitočtová charakteristika vstupu AUX

### 3.2.2 Simulace korekčního zesilovače

Korekční zesilovač zabral poměrně dlouhý čas návrhu. Postupnými změnami hodnot součástek bylo nakonec dosaženo následujících parametrů dle Obr. 3.4: Regulace hloubek v rozmezí  $\pm 16$  dB, výšek v rozmezí  $\pm 16$  dB (v charakteristice vždy buď maximum, střed nebo minimum – 3 průběhy) a při střední poloze jezdců (nulové korekce) je přenos necelé 4 dB. Avšak nutno podotknout, že Tyto 4 dB jsou dány nastavením napěťového zesilovače v prvním stupni korekčního zesilovače, čili lze případně snížit na nulu.

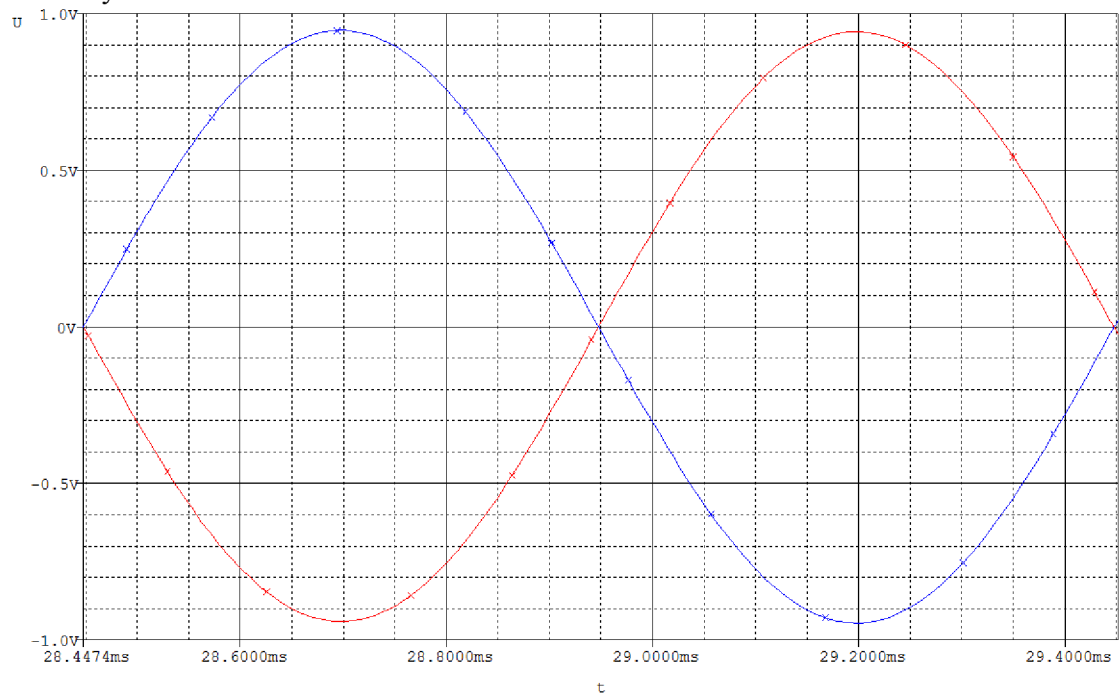




Obr. 3.4: Kmitočtové charakteristiky korekčního zesilovače

### 3.2.3 Simulace invertoru fáze

Simulace invertoru fáze měla za úkol prokázat, zda-li se bude moci použít zesilovač v můstkovém režimu. Na Obr. 3.5 je vidět, že z jednoho vstupního signálu, přivedeného na vstup invertoru, dostáváme na výstupu skutečně dva fázově otočené signály. A to vše s nulovým ziskem.



Obr. 3.5: Průběhy invertoru fáze

### 3.2.4 Simulace výkonového zesilovače

Těmto simulacím bylo potřeba věnovat nejvíce času, jelikož se jedná o hlavní prvek této práce. Na Obr. 3.6 máme kmitočtovou charakteristiku koncového zesilovače. V pásmu 20 Hz – 20 kHz se dá považovat za lineární. Zisk zesilovače je 30 dB a odpovídá tedy námi navrhovanému zesílení 32x.

Výstupní výkon zesilovače na Obr. 3.7 je opravdu 500 W RMS do zátěže 8  $\Omega$ . Je však vhodné dodat, že pro tento výkon je zapotřebí správně nastavení klidového proudu koncových tranzistorů. Při malém klidovém proudu docházelo k silným zákrmitům a zarušení sinusového průběhu. Po nastavení cca 15 mA (na tranzistor) se již zákrmity neobjevovaly. Špičkový výkon se pohybuje okolo 800 W.

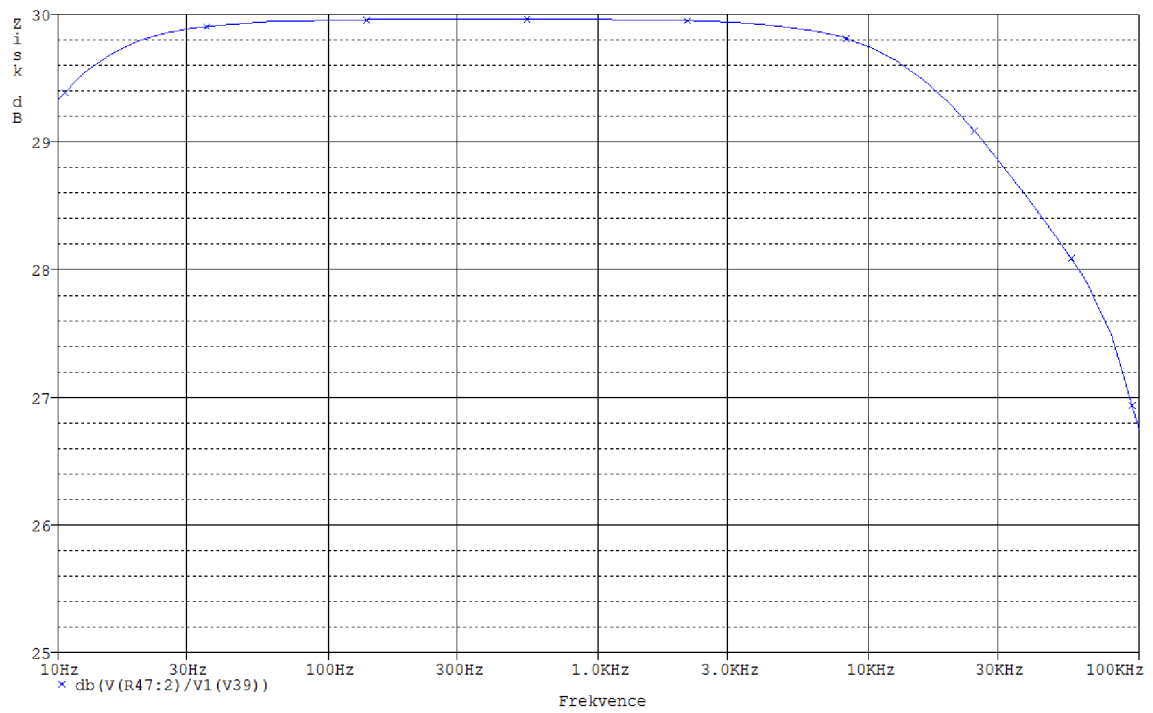
Na Obr. 3.8 je zobrazen výkon na jednom páru koncových tranzistorů. Je v něm započítána čistá kolektorová ztráta včetně samotných ztrát tranzistoru. Každý pár tedy během jedné periody spotřebuje přibližně 67 W ze zdroje, což při deseti párech činí 660 W a odevzdá 50 W čili 500 W.

Pro názornost a ověření, že koncové tranzistory pracují skutečně ve třídě B, slouží Obr. 3.9. Je zde průběh kolektorového proudu na jednom páru MOS-FET tranzistorů. Při detailnějším pohlednutí je vidět nepatrné přechodové zkreslení (přibližně do pár mA kolektorového proudu. Maximální proud jedním tranzistorem při maximálním výkonu se pohybuje kolem 1,2 A.

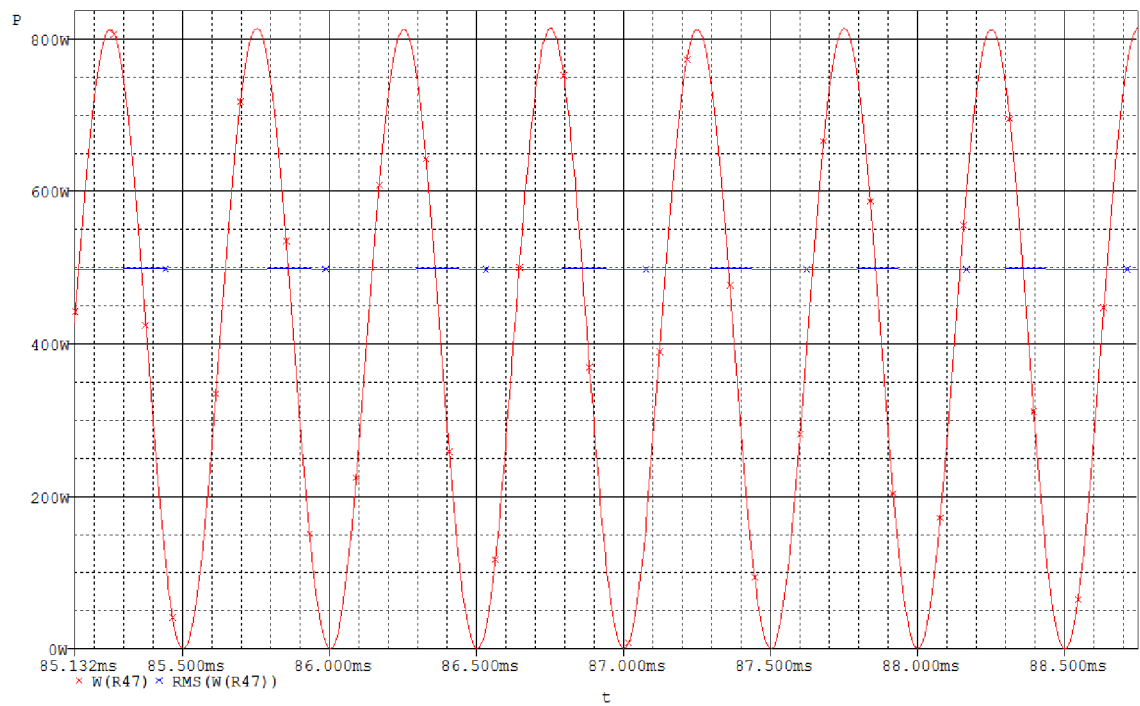
Obr. 3.10 pouze ilustruje napěťové zesílení, které koncový zesilovač poskytne. Při maximálním výkonu se pohybuje maximální napětí okolo 84V.

Napěťové zesílení koncových tranzistorů reprezentuje Obr. 3.11. Je vidět, že je přibližně trojnásobné.

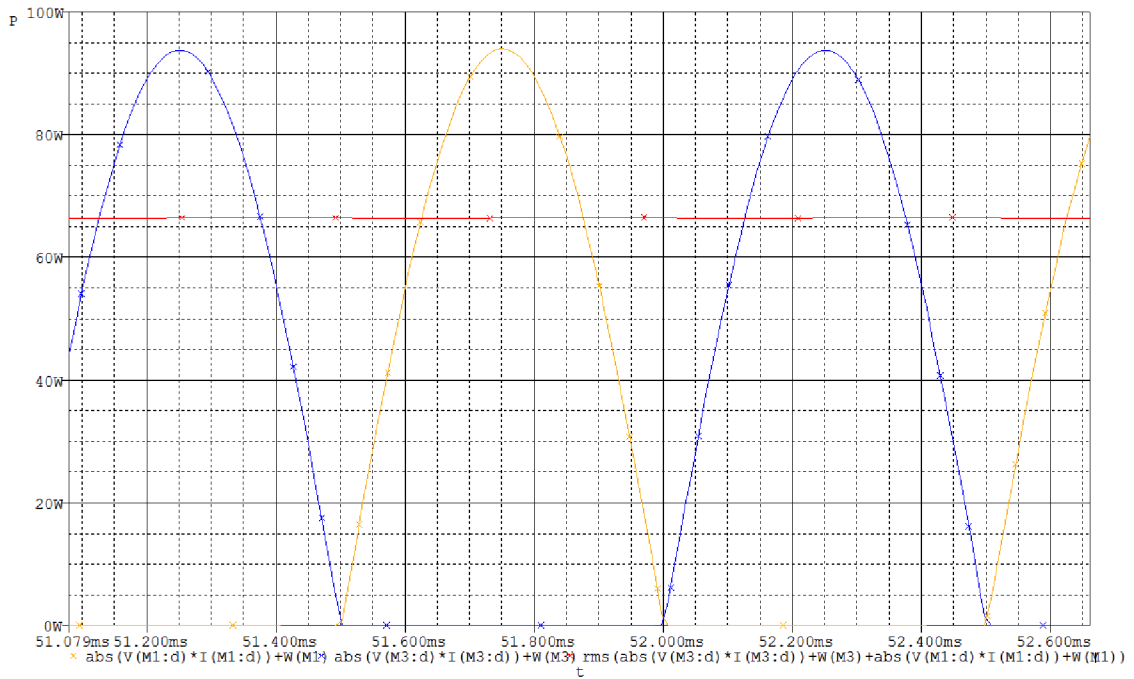
Na Obr. 3.12 je čistě teoretická účinnost při maximálním výkonu zesilovače. Vychází okolo 72 %, což by na třídu AB bylo vskutku úžasné, avšak je potřeba vzít v potaz, že se jedná o hodnotu při určité teplotě (50 °C), tedy za ideálních podmínek.



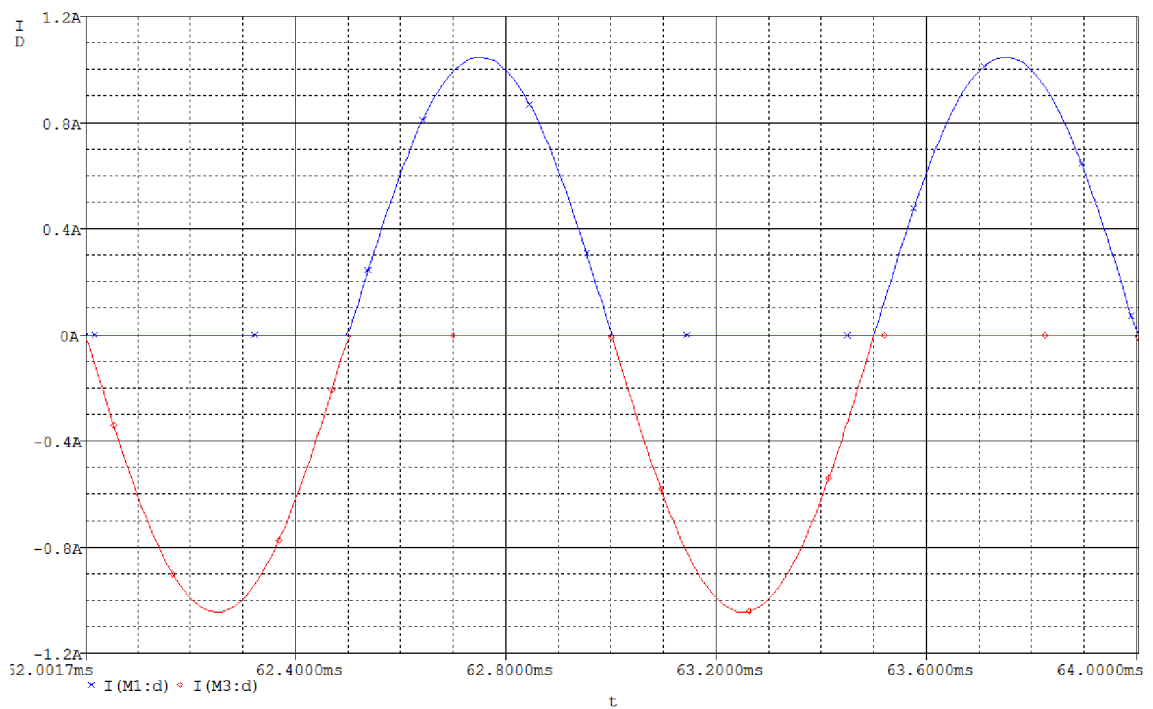
Obr. 3.6: Kmitočtová charakteristika výkonového zesilovače



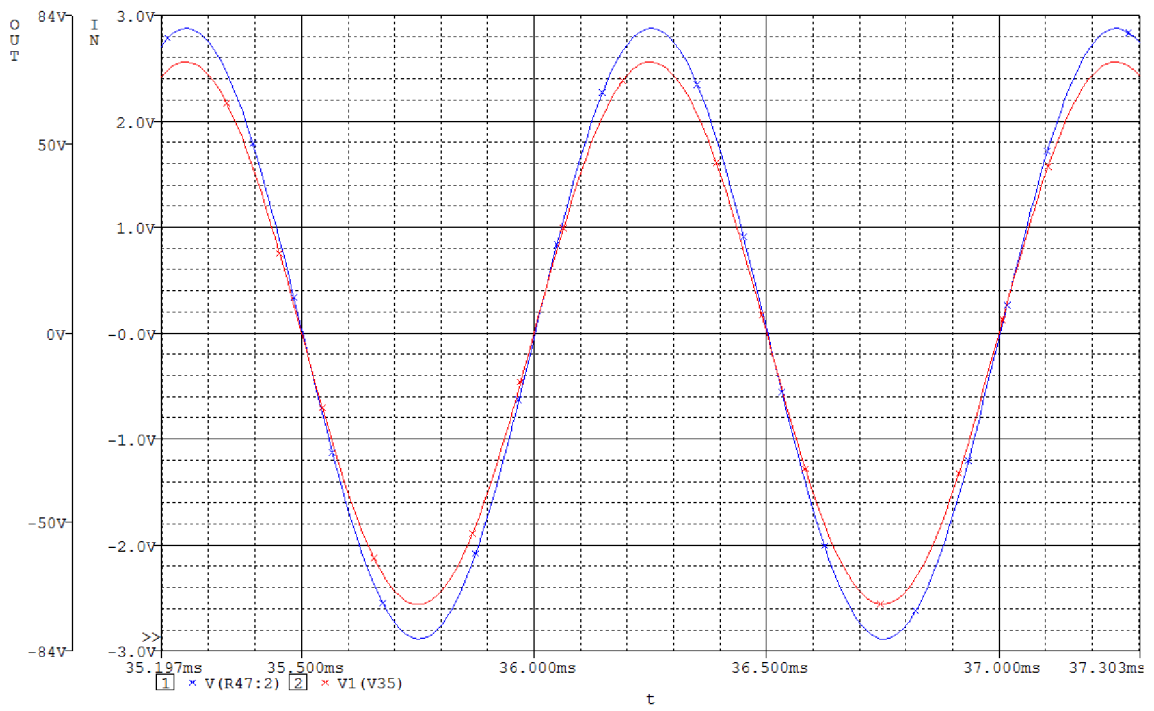
Obr. 3.7: Výstupní výkon výkonového zesilovače



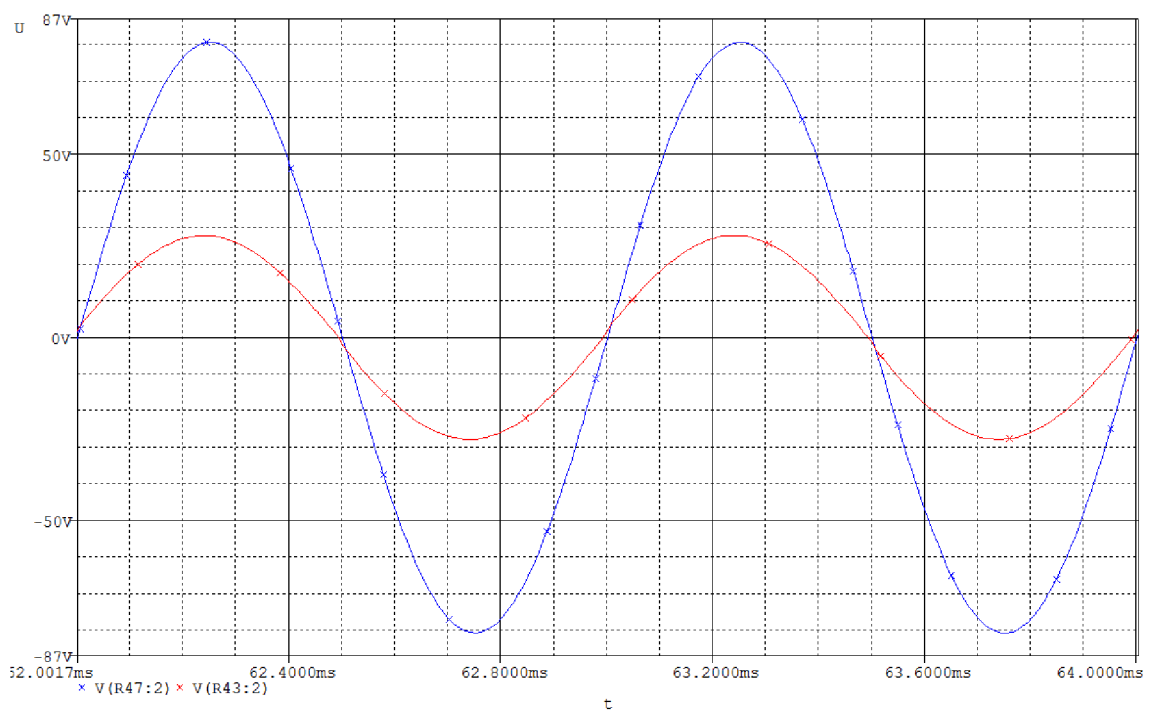
Obr. 3.8: Celková výkonová ztráta jednoho páru



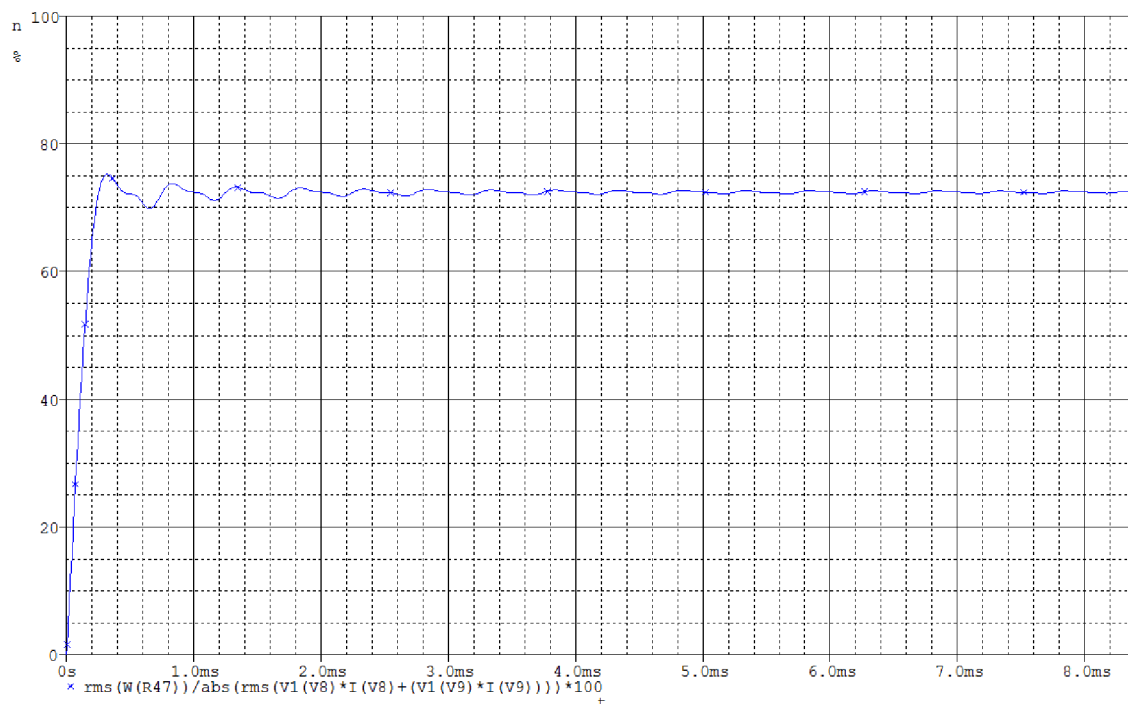
Obr. 3.9: Kolektorový proud jednoho páru



Obr. 3.10: Napěťové zesílení



Obr. 3.11: Výstupní napětí koncových a budících tranzistorů



Obr. 3.12: Celková účinnost výkonového zesilovače

## 4 NÁVRH DPS V PROGRAMU EAGLE

Program Eagle firmy Cadsoft je nástrojem ke kreslení schémat, z něhož lze vytvořit předlohu pro výrobu desek plošných spojů, zkráceně DPS. Obsahuje obrovské množství knihoven se součástkami a umožňuje také vytváření vlastních součástek (pokud daná součástka není v knihovně). Jednotlivé návrhy DPS proběhly víceméně úspěšně. Byla zvolena varianta s jednovrstvou deskou, jednak proto, že většina zapojení se dala, byť někdy po dlouhé době, navrhnout, tak aby DPS nemusela být na dvou vrstvách, byly použity drátové propojky (případně lze použít nulové rezistory).

Při návrhu předzesilovače byl prvotní úmysl vytvořit DPS a do ní napájet konektory RCA (CINCH), nicméně nakonec byla zvolena varianta s připojením konektoru pomocí krátkého stíněného kablíku, jež povede ze zadního panelu přístroje (nicméně toto ukáže až konstrukce samotná, rozteče na desce jsou víceméně použitelné i pro jednořadé konektory).

Korekční zesilovač by měl být naopak pomocí řady potenciometrů uchycen k přednímu panelu. Vstup bude opět pomocí stíněného kablíku přiveden z předzesilovače (druhá varianta je jedna společná DPS s předzesilovačem, korekčním zesilovačem a invertorem fáze).

Koncový zesilovač na samostatné DPS je navržen pro přímou montáž na chladič. Uchycení proběhne buď pomocí distančních sloupků nebo zapájením tranzistorů do DPS a následným přišroubováním k chladiči, jehož rozměry by měly být přibližně o 5cm na každé straně vyšší než je předloha DPS.

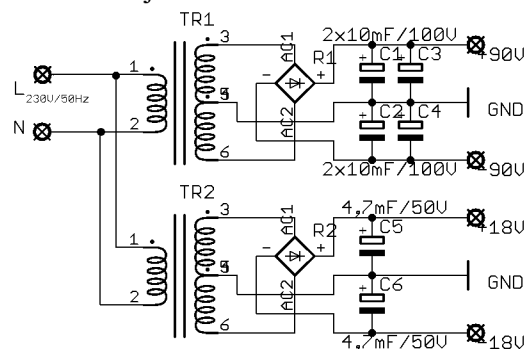
## 5 PRAKTICKÁ ČÁST

Tato kapitola patří k nejdůležitějším v celé práci. Vysvětluje podrobně popis realizace, komplikace a především řešení vzniklých problémů. Může být považována za jakýsi ucelený balík informací o průběhu prováděných prací.

### 5.1 Výroba zdroje napájecího napětí

Jako hlavní napájecí jednotka byl použit toroidní transformátor 2 x 65 V~ @1500 VA. Navinula jej na zakázku firma JK-ELTRA s.r.o. na základě stanovených požadavků. Je schopen dodat proud 11,54 A, což je dostačující vzhledem k tomu, že po filtraci vzroste napětí až na cca ±90 V. Usměrňovací můstek je opatřen samozřejmě žebrováním pro dostatečné chlazení.

Druhý transformátor je podstatně menších rozměrů, má klasické EI jádro a na výstupu 2 x 13 V~ @30 VA. Po filtraci vzroste napětí na ±18 V a je dále stabilizováno na ±15 V a ±7,5 V moduly stabilizátorů. Bylo upuštěno od myšlenky stabilizovat napětí pro periferie z napětí koncového stupně (zbytečná ztráta v teple kolem 15 W na stabilizačních tranzistorech viz obr. 2.3 respektive 2.4). Usměrňovač je klasický, v plastovém pouzdře. Na Obr. 5.1 je znázorněno elektrické schéma napájecí jednotky.



Obr. 5.1: Schéma zapojení napájecí jednotky

### 5.2 Výroba chladiče koncových tranzistorů

Chladič koncových tranzistorů je žebrováný, kvádrového typu a ze slitiny hliníku. Byl rozdělen na dva identické díly a jeho povrch byl upraven (vyhlazen frézováním). DPS je k němu přichycena pomocí 4 distančních šroubků. Jednotlivé tranzistory se k němu uchycují pomocí šroubků M3 x12 s podložkou. Díry byly vytvořeny vrtákem 2,4 mm a závity pomocí tří závitníků M3. Samotná váha jednoho chladiče je cca 1,5 kg.

## 5.3 Výroba DPS

Všechny DPS, kromě společného modulu (korekce, předzesilovač, mikrofon, a invertor) a přepínače, jež vyrobila dílna *UREL*, byly vyrobeny mnou v domácích podmínkách. Jednalo se o klasickou výrobu fotocestou a následující postup objasňuje jednotlivé kroky vedoucí ke zhotovení desky plošného spoje:

1. Zakoupení DPS opatřené fotocitlivou vrstvou. Stáhnutí ochranné fólie. Přiložení předlohy ze strany spojů, která je nastříkána přípravkem *TRANSPARENT*, pro průhlednění z obou stran papíru (po zaschnutí) a vložení do přípravku se 4mi UV trubnicemi pro přenesení obrazce na DPS (dojde k vytvrzení vodivých cest, které se pak neodleptají).
2. Zhruba po 6ti minutách vyjmeme desku z UV zářiče a vložíme ji do připraveného roztoku hydroxidu sodného *NaOH* (asi 4 %) a opatrně necháme vyvolat obrazec na DPS (doba vyvolání závisí na koncentraci roztoku, obvyklá doba je 2 - 3 minuty).
3. Poté opláchneme DPS vodou, osušíme a vložíme do lázně s chloridem železitým *Fe<sub>2</sub>Cl<sub>3</sub>* (asi 50 %) a necháme odleptat nevytvrzené části obrazce. Musíme však dbát na to, aby se neodleptaly vlastní vodivé cesty. To se nejlépe zajistí přípravkem s nakloněnou rovinou, ohříváčem na 50 °C a čerpadlem, které zajistí neustálou cirkulaci po povrchu desky. Leptání trvá přibližně 5 - 8 minut v závislosti na stáří leptací lázně a počtu vyleptaných desek.
4. Po vyleptání desku opět opláchneme, opticky shlédneme případné nedostatky (můžeme vrátit do lázně) a natřeme ji ochranným kalafunovým lakem (kalafuna rozpuštěná v lihu) a necháme zaschnout (asi půl hodiny).
5. Vyvrtáme pomocí stojanové vrtačky jednotlivé díry, v případě rozdílných průměrů vrtáků, začínáme od nejmenších (pokud se spleteme, tak malý vrták na velkou díru vůbec nevádí, naopak velký vrták může nenávratně poškodit vodivou cestu).

## 5.4 Osazování DPS

V těchto podkapitolách se zaměříme na postup při osazování jednotlivých DPS, důvody volby daných postupů a řešení vyskytlých problémů.

### 5.4.1 Napájecí zdroje

DPS napájecího zdroje byla osazena nejprve rezistory, Zenerovými diodami, kondenzátory, tranzistory a na závěr vodiči, kterými jsou připojeny 4 výkonové tranzistory na chladiči. Vstupy zdrojů jsou propojeny, jelikož jsou napájeny z výstupu transformátoru  $\pm 18$  V.

### 5.4.2 Indikátor vstupní úrovně

DPS se osadila rezistory, kondenzátory a nakonec trimry s ozubením pro nastavení (cejchování). Ručkové ukazatele jsou připojeny pomocí vodičů z DPS.



### 5.4.3 Indikátor výstupního výkonu

Po osazení rezistory bylo zapotřebí zapájet patici *DIL-16* pro obvod *LM3915*. Jednotlivé *LED* jsou cca 2 cm nad *DPS* (pro snazší instalaci do objímek v panelu) a v pořadí 4 zelené, 4 žluté a 2 červené. Pro lepší uchycení v panelu byl použit silikon.

### 5.4.4 Společný modul (korekce, předzesilovač, mikrofon, invertor)

Tato *DPS* byla nakonec vyrobena jako jeden kus a (v původním návrhu se jednalo o samostatné *DPS*). Opět se nejprve osadily rezistory, kondenzátory a patice *DIL-16* pro multiplexory 4053 a *DIL-8* pro operační zesilovače *NE5532AN* a *NJM4580*. Jednotlivé bloky jsou mezi sebou propojené pomocí stíněných vodičů. Napájení je pro všechny bloky společné  $\pm 7,5$  V. Zároveň je s modulem spřažen i modul přepínače, jež volí jednotlivé bloky do cesty signálu. Jednotlivé audio vstupy jsou připojeny na *RCA* (*CINCH*) zásuvky, navíc symetrický vstup má ještě vstup řešen pomocí zásuvky *JACK* 6,3 mm (paralelně k *RCA* pro možnost volby).

### 5.4.5 Koncový stupeň

Nejtěžší *DPS* na osazení byla samozřejmě ta hlavní – *KS*. V první fázi byly osazeny rezistory 0,6 W, poté rezistory 2 W, dále rezistory 20 W. Stejně tak nejprve malé kondenzátory (keramické) poté větší (fóliové) a nakonec velké (elektrolytické). Dalším krokem byly držáky pojistek, trimry, Zenerovy diody a tranzistory.

Co se týče tranzistorů, tak bylo zapotřebí vytvořit a tepelně svázat dvojice tranzistorů stejné vodivosti pro diferenciální stupeň. Nejprve se tranzistory pomazaly teplo-vodivou pastou a poté se pomocí zdrhovací pásky pevně stáhly k sobě, aby bylo dosaženo co nejlepšího kontaktu plošek (z důvodu minimálního tepelného driftu výstupního stejnosměrného napětí). Následovalo vytvoření chladiče pro tranzistory následující po diferenciálním stupni.

Je pravda, že by se daly tyto tranzistory uchládit i vzduchem (ztrátový výkon kolem 1W), avšak pro lepší stabilitu byl zvolen malý, žebrovaný, chladič z hliníku. Ten je přichycen k *DPS* pomocí distančního sloupku délky 5 cm a matice *M3*. Nejdůležitější částí *KS* je bezesporu chlazení koncových výkonových tranzistorů (*MOSFET*). O konkrétním řešení bude pojednáno později.

## 5.5 Oživování / nastavování / testování *DPS*

Tyto práce jsou vždy nejméně oblíbené v celém postupu výroby. Je to z důvodu toho, že dopředu nevíme, zda-li námi zvolené součástky, hodnoty a typy jsou právě ty kýmžné, byť dle simulací se jevíly jako naprosto správné.

### 5.5.1 Napájecí zdroje

Při oživování této *DPS* nedošlo k žádným problémům. Po připojení na  $\pm 18$  V bylo na výstupu skutečně  $\pm 15$  V a  $\pm 7,5$  V. I při zátěži proudem 1 A se napětí nezměnilo o více jak  $\pm 0,05$  V, což je naprosto dostačující. Výkonové tranzistory se ani při delší zátěži nikterak nezahřály (asi zbytečně velký chladič). Nicméně, jen tak pro potvrzení

nevhodnosti použití napětí pro koncový stupeň, jsem stabilizátor zapojil na  $\pm 90$  V. Výsledkem bylo opět napětí  $\pm 15$  V a  $\pm 7,5$  V, avšak tentokrát výkonové tranzistory měly již po minutě provozu nějakých  $50$  °C, což jsou jen zbytečné tepelné ztráty, čili zhoršená celková účinnost zesilovače a proto je vhodnější varianta s druhým transformátorem.

### 5.5.2 Indikátor vstupní úrovně

U tohoto modulu byl při ožívování problém pouze s tím, že jsem zapomněl na to, že je nutno přivést kladné napětí na dvě místa. Poté již indikátor reagoval i na dotek ruky (výchylka měřičů). Správné nastavení (kalibrace) se dělá až na závěr (při funkci všech bloků) při měření.

### 5.5.3 Indikátor výstupní úrovně

Tento modul opět fungoval bez potíží na první připojení k napájecímu napětí. Nicméně stejně tak jako indikátor vstupní úrovně, tak i tento indikátor potřebuje nastavit správný poměr děliče až při celkovém měření, proto se o nastavení zmiňuje až kapitola měření.

### 5.5.4 Korekce, předzesilovač, mikrofon, invertor a přepínač

DPS zabrala mnoho času, než se jí podařilo úspěšně a kompletně oživit. Mezi prvotní problémy patřil problém s elektronickým přepínačem, jež nechtěl pracovat správně. Problém se skrýval v zapomenutých rezistorech pro nastavení horní logické úrovně u neaktivních vstupů (docházelo k silnému kmitání multiplexoru).

Další problém se naskytl přímo v aplikaci přepínače. Jelikož jsou různé módy připojeny do různých částí řetězce, tak nastal problém například s výstupem operačního zesilovače (má vysoce malý výstupní odpor  $\sim 1 \Omega$ ) a při připojení signálu na výstup OZ (vstup dalšího bloku) proto dojde k silnému nepřizpůsobení mezi obvody (značný pokles amplitudy signálu). Řešení spočívalo v přidání rezistoru  $1 \text{ k}\Omega$  na výstup OZ.

Poslední větší problém spočíval v odstínění ruchů, především mikrofonu a vstupu PHONO. Každý kanál má dva samostatné stínící vodiče, na jednom konci připojené přímo k zemi zdroje (GND).

### 5.5.5 Koncový stupeň

Největší problémy se daly očekávat při ožívování „srdce“ zesilovače. To se bohužel ukázalo jako běh na dlouhou trať. Bylo nutno aplikovat spousty změn, kompromisů a kompenzací.

Po prvotním oživení koncový stupeň vykazoval funkčnost téměř bez problémů na napájení  $\pm 30$  V. Fungovala regulace klidového proudu i stejnosměrného napětí na výstupu. Tento provoz byl samozřejmě testován pouze na jeden pár tranzistorů MOSFET. Po nastavení minimálního přechodového zkreslení pomocí osciloskopu.

Při osazení všech deseti párů IRF640/9640 začaly značné komplikace. Měření jednotlivých proudů  $I_D$  (kolektorový proud) pomocí úbytku napětí na emitorových rezistorech a současné zobrazení osciloskopem prokázalo, že každým tranzistorem teče jiný proud, čili dochází k nerovnoměrnému zatížení tranzistorů a hrozí přetížení kusu, kterým teče vyšší proud. Navíc pouzdro TO-220 není úplně nejlépe chladitelné. Proto

následující podkapitola je věnována právě náhradám a úpravám koncového stupně.

## 5.6 Náhrada (REPLACE) součástek koncového stupně

Jak již bylo uvedeno, původně zvolené typy nebyly nejvhodnější, a proto koncový stupeň doznal značných změn. Navíc detailnější simulace (dělané v průběhu konstrukce), prokázaly i takové věci, kterých si návrhář hned nevšimne.

V první řadě bylo nutné vyměnit dva výkonové rezistory ve vazbě mezi budiči a koncovými tranzistory. Původně tam byly rezistory o výkonu 5 W a hodnotách 150  $\Omega$  a 68  $\Omega$ . Simulace prokázaly, že při maximálním výkonu se ztráty budou blížit 20 W. Čili původní rezistory byly nahrazeny rezistory o výkonu 20 W a hodnotách 220  $\Omega$  a 100  $\Omega$  (poměr, jež určuje napěťové zesílení koncových tranzistorů, zůstává stejný).

Další náhrada spočívala ve výměně budících tranzistorů *BD239* (NPN) a *BD240* (PNP). Na těchto tranzistorech totiž při špičkách signálu může vzniknout napětí až 130 V a to by mohlo mít za následek jejich destrukci (jsou pouze na 115 V C-E). Náhradou byly zvoleny tranzistory určené přímo pro NF zesilovače – *MJE15032* (NPN) [17] a *MJE15033* (PNP) [18] na napětí 250 V.

Třetí typ, jež byl nahrazen z důvodu možného špičkového napětí než je povolená hodnota výrobce byl typ *BD139* (NPN) a *BD140* (PNP) s maximálním napětím 80 V a funguje jako napěťový zesilovací stupeň, který je navázán na diferenciální stupeň. Náhradami byly zvoleny tranzistory *MJE340* (NPN) a *MJE350* (PNP), určené přímo pro NF zesilovače a s maximálním napětím 300 V.

Čtvrtá důležitá náhrada spočívala ve výměně tranzistorů diferenciálního stupně. Z důvodu zbytečného namáhání tranzistorů *BC546* (NPN) a *BC556* (PNP), které jsou na maximálně 65 V (63 V napájení, pouze 2 V rezervy), byly zvoleny typy *BC639* (NPN) a *BC640* (PNP), které jsou na napětí 80 V.

Nejdůležitější změna se týkala bezesporu koncových tranzistorů. Tranzistory *IRF640* (N) a *IRF9640* (P) na 200 V samozřejmě fungují, nicméně je s nimi trochu problém je správně napájet. To znamená najít 10 kusů každé vodivosti tak, aby měly shodný práh otevírání, tedy protékal jimi přibližně stejný proud a byl na nich stejný ztrátový výkon. Proto byla zvolena náhrada z důvodu lepšího odvodu tepla, díky většímu pouzdru, v podobě *IRFP240* (N) [16] a *IRFP9240* (P) [15] v pouzdře TO-247. Mají stejné parametry, pouze jiné pouzdro. Navíc jako výhoda se může jevit plastové pouzdro (není nutno tedy použít izolační průchodky).

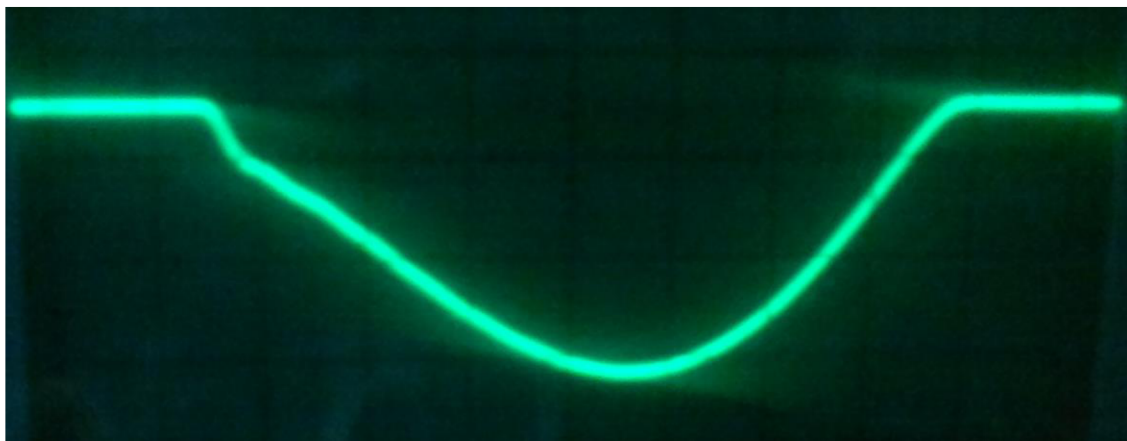
## 5.7 Koncový stupeň a řešení problémů s funkcí

Bohužel se ukázalo, že náhradou součástek se všechny problémy nevyřeší. Proto je tato podkapitola věnována přehledu komplikací, které vznikly po výměně součástek za vhodnější typy a vlastně celé cestě za cílem – stabilnímu, výkonnému a spolehlivému koncovému stupni.

Nejprve považujeme situaci za následující: Máme osazenou DPS, tranzistory připevněné k chladiči (samosebou přes izolační podložky, případně průchodky), zdroj o poloviční hodnotě napětí, tedy  $\pm 45$  V, generátor o kmitočtu 1 kHz a zátěž reprobox 8  $\Omega$ .

První problém, jež se začal uplatňovat, bylo ořezávání půl vln, šlo o klasické

přechodové zkreslení viz. Obr. 5.2, které bylo způsobené malým, nastaveným klidovým proudem. Pouze 60 mA, který teče pouze budiči koncových tranzistorů a zbytkem součástek (koncové tranzistory jsou zcela uzavřené). Po nastavení cca 120 mA (12 mA na každý koncový FET), přechodové zkreslení zcela vymizelo.



Obr. 5.2: Přechodové zkreslení koncového tranzistoru

Druhý jev, komplikující funkčnost, byl v podobě rušení signálu frekvencí 50 Hz (síťový kmitočet). Po nastavení časové základny na vyšší hodnotu (asi 50ms) bylo patrné, jak se mění amplituda sinusovky v rytmu 50 Hz – dochází k modulaci. Odstranění tohoto rušení spočívalo v dodatečné filtraci napájecího napětí pomocí 100 nF kondenzátorů (keramických) přímo na DPS u přívodu.

Další problém byl se stabilizací stejnosměrného napětí na výstupu. Mělo totiž tendenci oscilovat v širokém rozsahu cca  $\pm 150$  mV, to je nepřijatelná hodnota pro kvalitní koncový stupeň. Vyřešilo to precizní svázání tranzistorů v diferenciálním stupni pomocí teplovodivé pasty a zdrhovacích pásek. Po této aplikaci se již napětí ustálilo po vylazení na hodnotě kolem 3 mV a měnilo se v rozmezí  $\pm 10$  mV.

Zdalo se, že již nic nebrání v tom, vybudit koncový stupeň na vyšší výkon. Proto bylo použito již toroidní trafo  $\pm 90$ V, připravené do finální verze. Avšak přibližně od 10 W (cca 9  $V_{ef}$ ) začaly proudy obou větví koncových tranzistorů silně oscilovat na kmitočtu kolem 8 MHz. Dlouhé dny se nedařilo tohoto jevu zbavit, až po důkladné studii datasheetu výrobce byla shledána jako možný problém kapacita tranzistoru v závislosti na napájecím napětí. To se naštěstí projevilo jako správné řešení a po pár hodinách testování a přidávání několika kusů 100 pF keramických kondenzátorů mezi společné uzly všech GATE, DRAIN a SOURCE, bylo dosaženo vykompenzování a zániku oscilací. Výkon šel zvyšovat bez potíží, proto byl jako zátěž vyměněn reprobox za rezistorovou zátěž (3 varné konvice po 22,5  $\Omega$  paralelně = 7,5  $\Omega$ ).

## 5.8 Měření základních parametrů

Abychom mohli porovnat rozdíly mezi očekávanými a naměřenými hodnotami (průběhy), je nutno provést měření základních parametrů. Měření je většinou omezeno tím, jaké přístroje máme k dispozici. Proto se v této podkapitole nenachází všechny možné parametry, pouze ty, které jsme sledovali v simulacích a pár navíc. Měření probíhalo v rámci celého zesilovače, čili na vstupu je připojen generátor, průchod signálu přes předzesilovač a dále buď přes korekce či invertor (v závislosti na měřené veličině) do koncového stupně a z něj výstupní signál do měřících přístrojů a umělé zátěže v podobě topných těles (viz výše).

### 5.8.1 Měření kmitočtové charakteristiky

Při měření kmitočtové charakteristiky se měří závislost zesílení zesilovače na frekvenci. V ideálním případě by měla být v pásmu 20 Hz – 20 kHz zcela konstantní, v praxi se udává pracovní oblast v rozmezí, ve kterém zesilovač může pracovat, ohraničeném -3 dB, tedy polovinou výkonu. U zařízení třídy Hi-Fi se toleruje v pásmu 30 Hz – 15 kHz odchylka  $\pm 1,5$  dB. Měření probíhalo dle tabulek.

### 5.8.2 Kmitočtová charakteristika předzesilovače

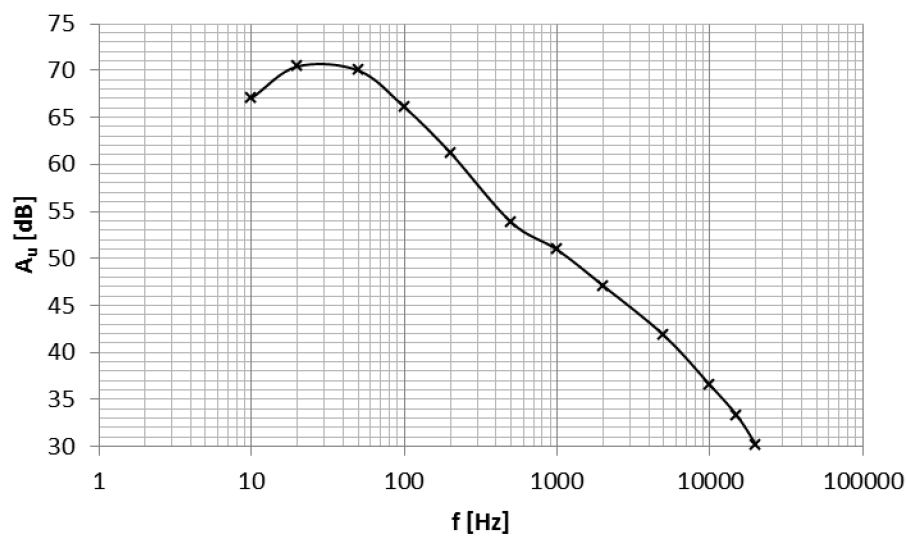
Kmitočtová charakteristika předzesilovače byla měřena na všech vstupech, tedy PHONO, LINE a AUX. Naměřené hodnoty byly zpracovány formou grafické závislosti zesílení na kmitočtu. Výsledky v Tab. 5.1 a na Obr. 5.3 – 5.5 jsou v souladu s návrhem a mírné odchylky jsou akceptovatelné. Příklad výpočtu zisku podle (5.8) je pro vstup PHONO a frekvenci 10 Hz.

f [Hz]	PHONO			LINE			AUX	
	U <sub>in</sub> [mV]	U <sub>out</sub> [mV]	A <sub>u</sub> [dB]	U <sub>in</sub> [mV]	U <sub>out</sub> [mV]	A <sub>u</sub> [dB]	U <sub>out</sub> [mV]	A <sub>u</sub> [dB]
10	2	4487,76	67,02	250	723,50	9,23	713,58	9,11
20	2	6630,25	70,41	250	996,41	12,01	1009,11	12,12
50	2	6317,28	69,99	250	1040,97	12,39	1046,98	12,44
100	2	4041,38	66,11	250	1045,78	12,43	1060,33	12,55
200	2	2309,56	61,25	250	1049,40	12,46	1071,37	12,64
500	2	986,35	53,86	250	1051,82	12,48	1075,08	12,67
1000	2	703,93	50,93	250	1051,82	12,48	1073,84	12,66
2000	2	452,93	47,1	250	1051,82	12,48	1072,61	12,65
5000	2	246,62	41,82	250	1050,61	12,47	1071,37	12,64
10000	2	134,13	36,53	250	1046,98	12,44	1070,14	12,63
15000	2	92,37	33,29	250	1043,37	12,41	1065,22	12,59
20000	2	64,50	30,17	250	1039,78	12,38	1059,11	12,54

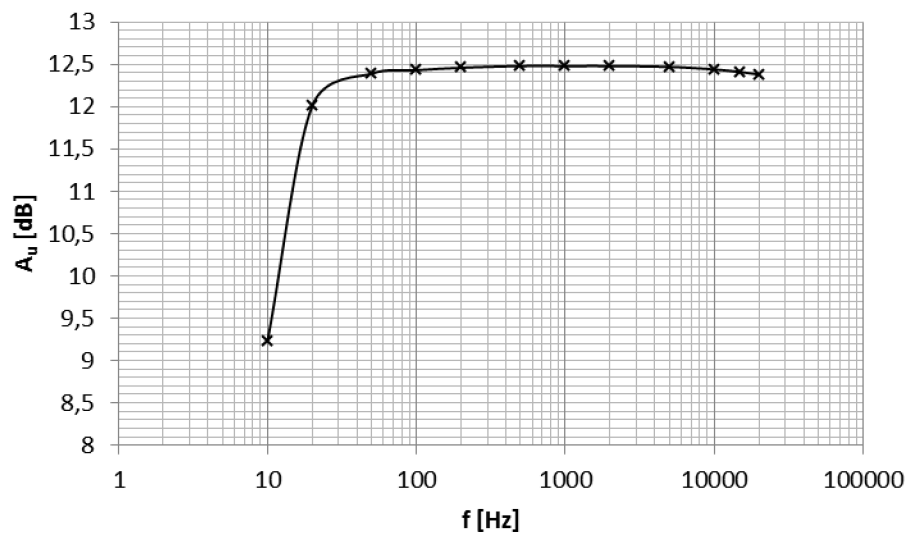
Tab. 5.1: Naměřené hodnoty při měření předzesilovače

$$A_u = 20 \cdot \log \left( \frac{U_{out}}{U_{in}} \right) \quad (5.8)$$

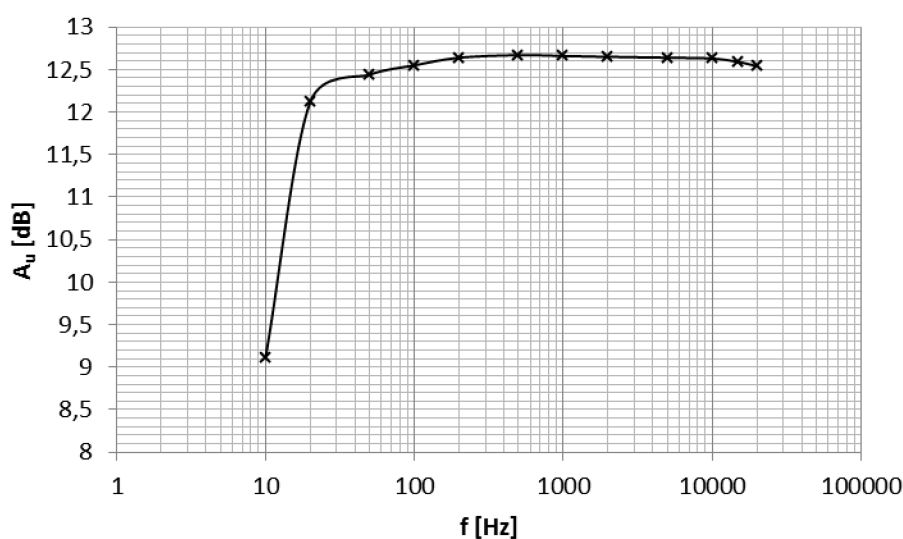
$$A_u = 20 \cdot \log\left(\frac{4487,76}{2}\right) = 67,02 \text{ dB}$$



Obr. 5.3: Naměřená kmitočtová charakteristika vstupu PHONO (RIIA korekce)



Obr. 5.4: Naměřená kmitočtová charakteristika vstupu LINE



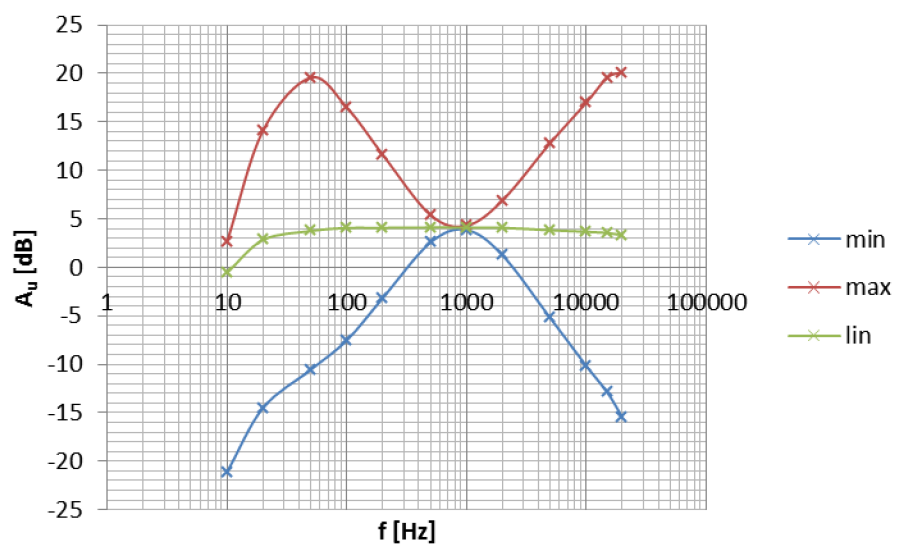
Obr. 5.5: Naměřená kmitočtová charakteristika vstupu AUX

### 5.8.3 Kmitočtová charakteristika korekčního zesilovače

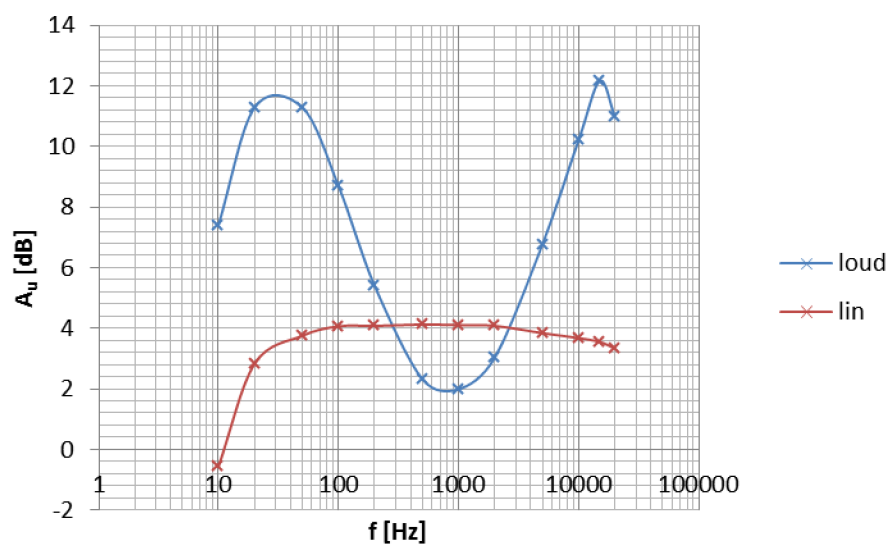
Toto měření mělo za úkol prokázat regulaci hloubek, výšek a fyziologické regulace v závislosti na kmitočtu. Z naměřených výsledků v Tab. 5.2 a grafických závislostí na Obr. 5.6 jsou patrné jednotlivé funkce regulace. Měření proběhlo při minimálním a maximálním zisku (hloubek a výšek). Hloubky se dají regulovat v rozmezí -14,43 až +15,28 dB. Výšky lze regulovat v rozmezí -16,76 až +15,27 dB. Fyziologická křivka na Obr. 5.7 má pouze informativní charakter (poukazuje na základní princip funkce), jelikož naměřená křivka je závislá na aktuální poloze jezdce a pro kvalitativní srovnání by bylo zapotřebí provést měření, které by zabralo mnoho času.

f [Hz]	LINEAR			KOR MIN		KOR MAX		LOUDNESS	
	U <sub>in</sub> [mV]	U <sub>out</sub> [mV]	A <sub>u</sub> [dB]	U <sub>out</sub> [mV]	A <sub>u</sub> [dB]	U <sub>out</sub> [mV]	A <sub>u</sub> [dB]	U <sub>out</sub> [mV]	A <sub>u</sub> [dB]
10	500	468,34	-0,57	43,83	-21,14	676,39	2,62	1172,73	7,40
20	500	692,49	2,83	94,19	-14,50	2536,93	14,11	1833,33	11,29
50	500	770,16	3,75	148,29	-10,56	4767,13	19,59	1833,33	11,29
100	500	798,26	4,06	210,18	-7,53	3347,06	16,51	1360,00	8,69
200	500	799,34	4,08	347,48	-3,16	1908,50	11,63	930,56	5,40
500	500	803,51	4,12	671,91	2,57	931,95	5,41	652,78	2,32
1000	500	802,01	4,10	780,24	3,87	821,00	4,31	628,57	1,99
2000	500	799,57	4,08	577,65	1,25	1108,61	6,92	708,96	3,03
5000	500	777,93	3,84	274,49	-5,21	2189,39	12,83	1090,91	6,78
10000	500	763,36	3,68	155,25	-10,16	3534,53	16,99	1621,21	10,22
15000	500	752,24	3,55	113,39	-12,89	4766,43	19,58	2027,78	12,16
20000	500	733,63	3,33	84,33	-15,46	5070,04	20,12	1772,73	10,99

Tab. 5.2: Naměřené hodnoty při měření korekčního zesilovače



Obr. 5.6: Naměřená kmitočtová charakteristika korekčního zesilovače



Obr. 5.7: Naměřená kmitočtová charakteristika fyziologické regulace (loudness) vs. lineární regulace

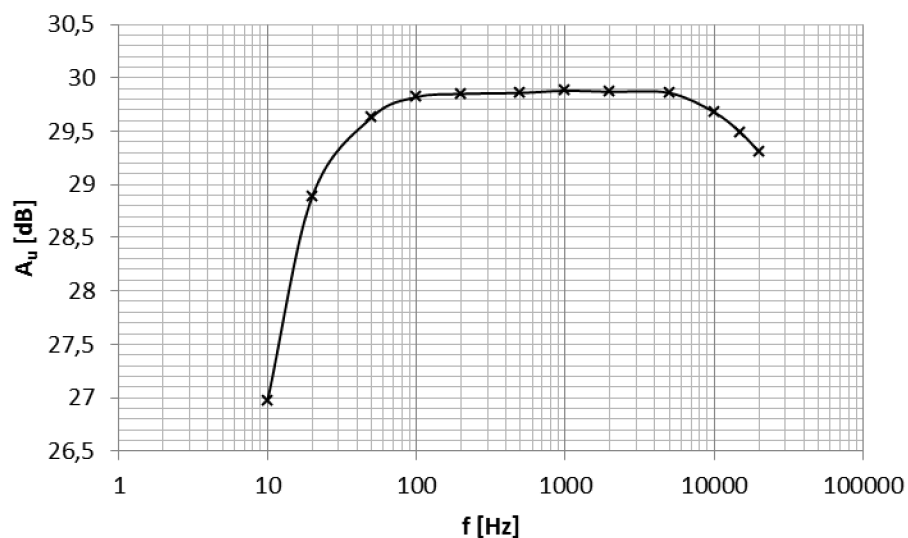


### 5.8.4 Kmitočtová charakteristika koncového zesilovače

Kmitočtová charakteristika koncového zesilovače promlouvá nejvíce do celkové charakteristiky kompletního zesilovače. Neměla by zbytečně brzy omezovat kmitočtové pásmo, avšak zároveň za hranicí přenášeného pásma by mělo dojít k prudkému poklesu (kmitočty nad 20 kHz nejsou potřeba u tohoto zesilovače přenášet). Z naměřených hodnot v Tab. 5.3 a výsledné charakteristiky na Obr. 5.8 je možno říci, že toto zesilovač splňuje, byť nad 20 kHz nejsou naměřené hodnoty (rozsah generátoru do 20 kHz, určen pro NF zesilovače).

f [Hz]	U <sub>in</sub> [mV]	U <sub>out</sub> [mV]	A <sub>u</sub> [dB]
10	100	2231,00	26,97
20	100	2782,92	28,89
50	100	3030,40	29,63
100	100	3097,42	29,82
200	100	3108,14	29,85
500	100	3111,72	29,86
1000	100	3118,89	29,88
2000	100	3115,30	29,87
5000	100	3111,72	29,86
10000	100	3047,89	29,68
15000	100	2981,95	29,49
20000	100	2920,79	29,31

Tab. 5.3: Naměřené hodnoty koncového zesilovače



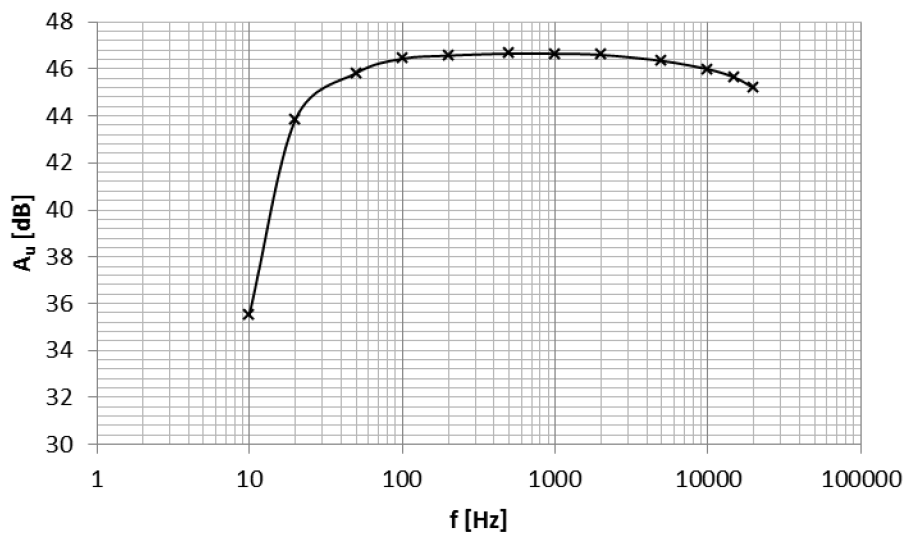
Obr. 5.8: Kmitočtová charakteristika koncového zesilovače

### 5.8.5 Celková kmitočtová charakteristika zesilovače

Tato charakteristika na Obr. 5.9 vyjadřuje celkový průběh kmitočtové charakteristiky na výstupu zesilovače, tedy po průchodu všemi bloky. Z globálního hlediska vyšla ve velmi přijatelných mezích. Podle Tab. 5.4 je pokles v pásmu 20 Hz – 20 kHz maximálně o 2,81 dB a v pásmu Hi-Fi (30 Hz – 15 kHz) dokonce maximálně o 1,45 dB, což splňuje požadavek  $\pm 1,5$  dB max.

f [Hz]	U <sub>in</sub> [mV]	U <sub>out</sub> [mV]	A <sub>u</sub> [dB]
10	20	1192,95	35,51
20	20	3111,51	43,84
50	20	3909,65	45,82
100	20	4194,72	46,43
200	20	4258,86	46,57
500	20	4300,83	46,65
1000	20	4297,76	46,64
2000	20	4274,82	46,60
5000	20	4149,55	46,34
10000	20	3983,72	45,99
15000	20	3823,10	45,63
20000	20	3631,08	45,18

Tab. 5.4: Naměřené hodnoty při měření celkové charakteristiky zesilovače



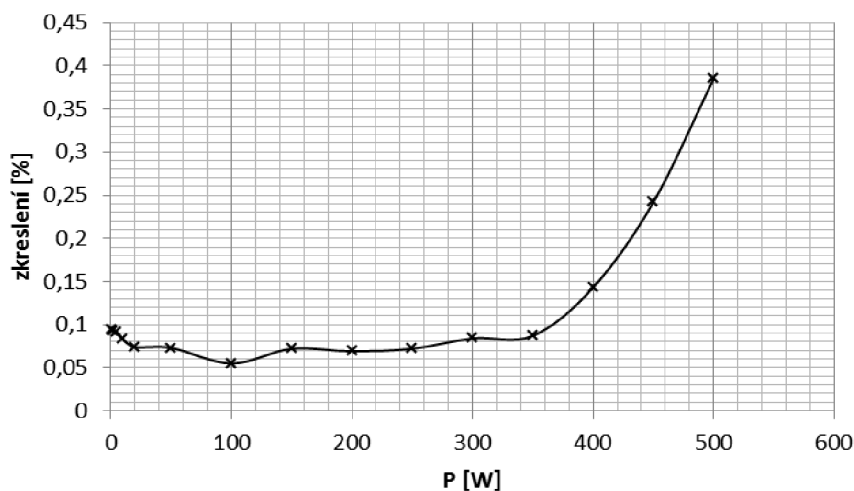
Obr. 5.9: Celková kmitočtová charakteristika zesilovače

### 5.8.6 Celkové harmonické zkreslení THD+N

Toto měření bylo uskutečněno za pomoci staršího měřicího přístroje *TESLA BM543*, jež umožňuje měřit harmonické zkreslení od 0,1 % (při dodržení tipů výrobce dokonce <0,1 %, avšak s malou přesností). Měření proběhlo na kmitočtu 1 kHz a umělé zátěži 7,5  $\Omega$ . Nemá smysl měřit jednotlivé přírůstky, zajímá nás celkové zkreslení viz. Tab. 5.5. Výsledky měření nejsou naprosto přesné, ale pouze orientační, nicméně řádově odpovídající, je totiž nutno brát v potaz ručkový ukazatel výchylky a stáří přístroje. Naměřená charakteristika je na Obr. 5.10. Každopádně naměřené výsledky se dají považovat za reálné, neboť nelze očekávat hodnoty kolem 0,005 % apod., jak je uvádí mnoho výrobců. Je zde mnoho bloků a každý přivádí dílčí zkreslení na další blok.

P [W]	DIST [%]
1	0,094
2	0,093
5	0,091
10	0,083
20	0,074
50	0,073
100	0,055
150	0,072
200	0,069
250	0,072
300	0,084
350	0,087
400	0,143
450	0,242
500	0,385

Tab. 5.5: Naměřené hodnoty celkového harmonického zkreslení THD+N zesilovače



Obr. 5.10: Celkové harmonické zkreslení THD+N

### 5.8.7 Měření vstupního odporu zesilovače

Měření vstupního odporu zesilovače se provádí tak, že přivádíme na jednotlivé vstupy přes proměnný odpor 100 k $\Omega$  (nastavíme na 0  $\Omega$ ) zdroj signálu o kmitočtu 1 kHz, amplitudě takové, aby na výstupu zesilovače byl 1 V<sub>ef</sub>. Nyní odpor zvyšujeme do té doby, než napětí na výstupu klesne na polovinu, tj. na 500 mV<sub>ef</sub>. Nastavený odpor = vstupní odpor zesilovače.

vstup	R <sub>vst</sub> [k $\Omega$ ]
PHONO	23
LINE	15,5
AUX	27,5

Tab. 5.6: Naměřené hodnoty vstupního odporu jednotlivých vstupů zesilovače

### 5.8.8 Měření výstupního odporu zesilovače a činitele tlumení

Toto měření probíhalo na kmitočtu 1kHz při výstupním napětí 1406 mV do zátěže 4,3  $\Omega$ . Jedná se o změnu napětí při odpojení zátěže (naprázdno) viz (1.1) a (1.2). Dle naměřených hodnot je vidět, že zesilovač má skutečně velmi nízký výstupní odpor, tedy může pracovat do velmi nízké zátěže, činitel tlumení je velký a proto zesilovač s přehledem splňuje třídu Hi-Fi (minimálně 3).

$$R_i = R_a \frac{U_1 - U_2}{U_2} = 4,3 \cdot \frac{1421 - 1406}{1406} = 45,9 \text{ m}\Omega$$

$$d = \frac{R_a}{R_i} = \frac{4,3}{45,9 \cdot 10^{-3}} = 93,8 \cong 94 [-]$$

### 5.8.9 Měření účinnosti koncového zesilovače

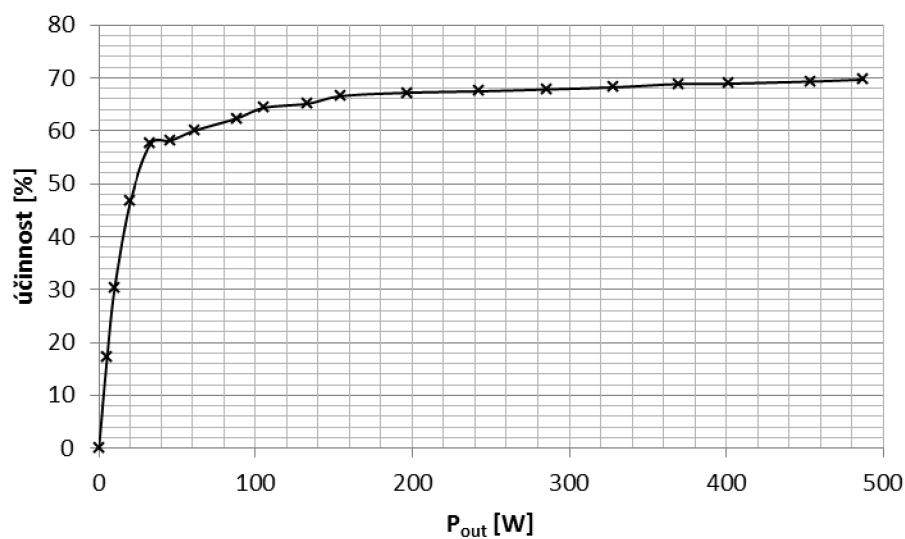
Účinnost koncového zesilovače byla měřena na umělé zátěži 7,5  $\Omega$  při kmitočtu 1 kHz. Klidový proud 0,12 A. Podařilo se dosáhnout účinnosti až 69,67 %, což je vynikající. Podle tendence růstu by se dalo dojít až k 70 % v můstkovém režimu.

Bohužel právě u tohoto měření začal kolabovat toroidní transformátor. Došlo pravděpodobně k porušení izolace na vinutí (vznikl asi 2 V rozdíl v jednotlivých vinutích při napětí naprázdno). Proto bylo vytvořeno rychlé řešení v podobě výměny transformátoru. Jelikož je oprava toroidu plánována později, je ve finální verzi osazen transformátor EI s parametry: U = 2 x 48 V $\sim$  ( $\pm$ 68 V); I = 8,33 A; P = 800 W.

To v praxi znamená, že zesilovač je nyní schopný dodat rovněž 500 W, ale pouze do zátěže 4  $\Omega$  a pouze pro jeden kanál (do zátěže 8  $\Omega$  je to asi 300 W). Samozřejmě při využití obou kanálů nelze očekávat výkon 2 x 500 W, ale cca 2 x 250 W do zátěže 4  $\Omega$  nebo 8  $\Omega$ .

$P_{in}$ [W]	U- [V]	U+ [V]	I- [A]	I+ [A]	$U_{out}$ [V <sub>ef</sub> ]	$P_{out}$ [W]	$\eta$ [%]
22,90	90,24	90,23	0,13	0,13	0,00	0	0
30,10	90,23	90,21	0,17	0,17	6,23	5,18	17,21
33,18	90,20	90,18	0,18	0,18	8,70	10,09	30,41
43,07	90,17	90,16	0,24	0,24	12,27	20,09	46,64
57,73	90,14	90,12	0,32	0,32	15,78	33,21	57,53
78,54	90,05	90,01	0,44	0,44	18,50	45,65	58,12
102,12	90,01	89,98	0,57	0,57	21,44	61,28	60,01
141,34	89,91	89,85	0,79	0,79	25,71	88,11	62,34
164,04	89,84	89,79	0,91	0,91	28,14	105,56	64,35
204,59	89,70	89,67	1,14	1,14	31,61	133,23	65,12
232,54	89,58	89,54	1,30	1,30	34,07	154,78	66,56
293,24	89,26	89,21	1,64	1,64	38,44	197,03	67,19
359,06	89,09	89,03	2,02	2,02	42,62	242,22	67,46
421,79	88,99	88,92	2,37	2,37	46,32	286,06	67,82
480,66	88,80	88,76	2,71	2,71	49,59	327,86	68,21
537,39	88,58	88,54	3,03	3,03	52,67	369,94	68,84
582,59	88,47	88,41	3,29	3,29	54,87	401,46	68,91
654,27	88,33	88,29	3,70	3,71	58,32	453,54	69,32
699,28	88,18	88,12	3,97	3,97	60,45	487,19	69,67

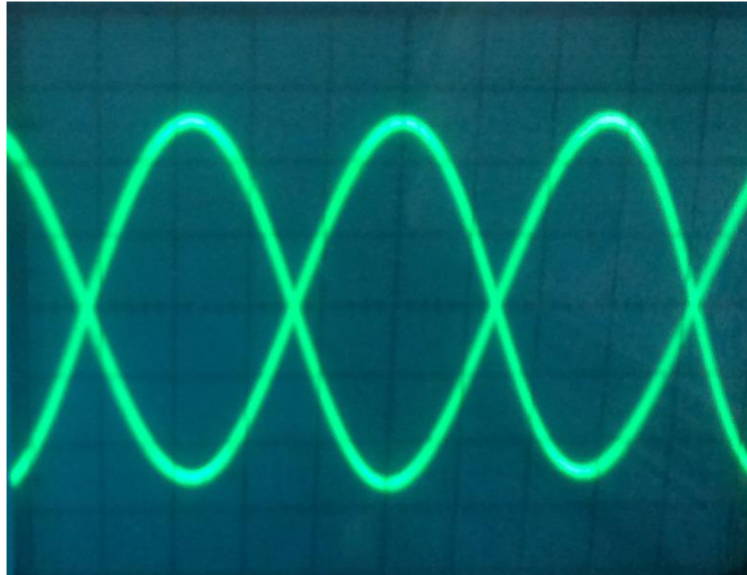
Tab. 5.7: Naměřené hodnoty při měření účinnosti koncového zesilovače



Obr. 5.11: Účinnost koncového zesilovače

### 5.8.10 Měření funkce invertoru fáze

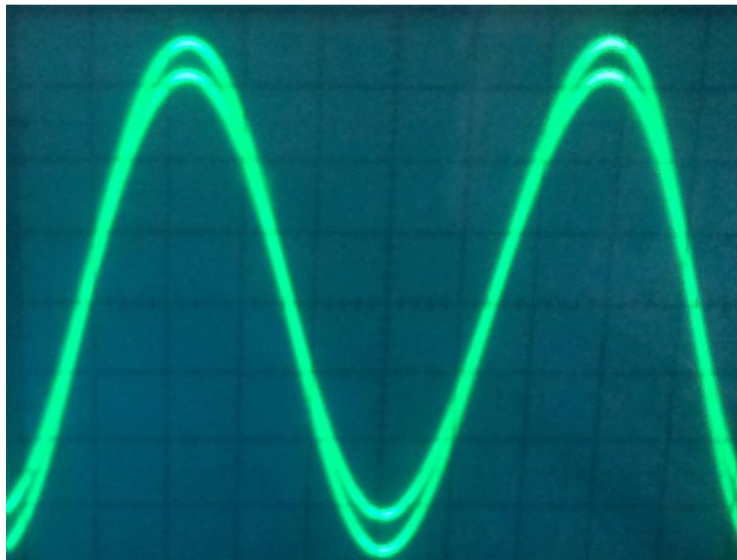
Invertor fáze, jak již bylo uvedeno, slouží k zajištění dvou fázově posunutých signálů pro buzení dvou koncových stupňů, které pracují při aplikaci invertoru v můstkovém režimu. Měření spočívalo pouze v potvrzení správné funkce pomocí osciloskopu. Z jednoho vstupního signálu měly vzniknout dva signály posunuté o  $180^\circ$ . Výsledek dokumentuje Obr. 5.12.



Obr. 5.12: Naměřené průběhy fázového invertoru

### 5.8.11 Měření fázového posuvu zesilovače

U tohoto měření byl pomocí osciloskopu zkoumán fázový posuv, který vytváří zesilovač. Na Obr. 5.13 je možno vypořadovat, že celkový fázový posuv je minimální.



Obr. 5.13: Fázový posuv zesilovače

## **5.9 Mechanická konstrukce**

Mechanická konstrukce má za úkol vhodně rozmístit jednotlivé bloky uvnitř zesilovače, zajistit odrušení od napájecího (síťového) zdroje a zároveň vykazovat jistý stupeň designové kvality, aby na uživatele působila příjemným a přehledným dojmem. Pro tento zesilovač byla zvolena kombinace hliníkového plechu, dřeva a kůže.

### **5.9.1 Přední panel**

Přední panel je vyroben z hliníkového plechu tloušťky 3 mm. Před zpracováním materiálu proběhla eloxace. V konečné fázi je plech pokryt vrstvou průhledného laku.

### **5.9.2 Zadní panel**

Zadní panel je vyroben taktéž z 3 mm silného hliníkového plechu. Obsahuje díry pro foukání vzduchu pomocí dvou ventilátorů, které jsou na něm umístěny.

### **5.9.3 Základní deska (podstavná)**

Podstavná deska je vyrobena z 30 mm silného dřeva s otvorem opatřeným mřížkou uprostřed, pro dostatečné proudění vzduchu.

### **5.9.4 Horní uzavírací díl**

Horní uzavírací díl ve tvaru U je vyroben z 20 mm silného dřeva potaženého kůží.

### **5.9.5 Stínící přepážka**

Stínící přepážka uvnitř zesilovače slouží k odstínění napájecího zdroje a ostatních částí. Je zhotovena z 2 mm silného ocelového plechu, který je připojen na společnou zem.

### **5.9.6 Ovládací knoflíky**

Ovládací knoflíky jsou vyrobené z duralu za pomoci soustruhu. Po obvodu je vytvořeno vroubkování.

### **5.9.7 Potisk**

Potisk je vytvořen ze slabé, černé fólie. Jednotlivé nápisy a číslice byly vytvořeny pomocí plotteru. Nalepení se provádí pomocí přenášecí fólie.

## 6 ZÁVĚR

V této kapitole je zhodnocena výsledná práce. Především porovnává deklarované, simulované a naměřené výsledky. Je to v podstatě jakési měřítko, zda-li byla práce odvedena dobře a na maximální možný výsledek, vzhledem k možnostem a podmínkám. Cílem práce bylo navrhnout jednotlivé komponenty zesilovače. Původně deklarované parametry, které dávaly za cíl zapojení koncového zesilovače o výstupním výkonu cca 2 x 80 W byly zaměněny za poněkud vyšší a to 2 x 500W / 8 Ω. Bylo tak učiněno z důvodu jakéhosi pokusu o vytvoření výkonného zesilovače nejen pro domácí použití, ale i pro menší venkovní použití. To se nakonec podařilo, byť zpočátku s velkými problémy v podobě nevhodně zvolených součástek.

### 6.1 Porovnání návrhů, simulací a výsledků

Jednotlivé, důležité části musely projít třemi fázemi. Návrhem, simulací a měřením (výrobou). V následujících podkapitolách je uvedeno srovnání jednotlivých bloků a jejich nejdůležitějších vlastností.

#### 6.1.1 Napájecí jednotka

Hlavní toroidní transformátor  $TR1$  o navrženém výkonu 1500 VA se ukázal jako dostatečně výkonný pro koncové stupně. Stejně tak pomocný EI transformátor  $TR2$  o výkonu 30 VA dostatečně napájí pomocné obvody. Celková účinnost sice nebyla měřena, nicméně jednoduchými počty se lze dopočítat k tomu, že pokud má jeden koncový stupeň účinnost cca 69 % při 500 W / 8 Ω a ostatní periferie mají omezen ztrátový výkon na 30 VA tak dostáváme:

$$P_{TR1} = 2 \cdot \frac{P_{out}}{\eta_{ks}} \quad (6.1)$$

$$P_{TR1} = 2 \cdot \frac{500}{0,69} = 1449 \text{ W}$$

kde  $P_{TR1}$  [W] je výstupní odebíraný výkon z toroidního transformátoru ;  $P_{out}$  [W] je výstupní výkon koncového zesilovače;  $\eta_{ks}$  [-] je účinnost koncového zesilovače.

$$P_{inmax} = \frac{P_{TR1}}{\eta_{TR1}} + \frac{P_{TR2}}{\eta_{TR2}} \quad (6.2)$$

$$P_{inmax} = \frac{1449}{0,95} + \frac{30}{0,8} = 1579 + 37,5 = 1563 \text{ W}$$

kde  $P_{inmax}$  [W] je maximální příkon celého zesilovače (zařízení);  $P_{TR2}$  [W] je odebíraný výkon z EI transformátoru;  $\eta_{TR1}$  [-] je uvažovaná účinnost toroidního transformátoru;  $\eta_{TR2}$  [-] je uvažovaná účinnost EI transformátoru.



### 6.1.2 Předzesilovač

Předzesilovač se podařilo realizovat s parametry, které odpovídají návrhu, simulacím a měření s minimálními rozdíly. Všechny 3 vstupy (PHONO, LINE a AUX) a jejich charakteristiky mají průběh, který se liší od ideálního pouze na okrajích přenosového pásma 20 Hz – 20 kHz. Rozdíl je dán především reálnými součástkami a jejich zapojením. Jednotlivé vstupy srovnává Tab. 6.1.

Zisk	Návrh	Simulace	Měření
PHONO [dB]	52	52,3	50,93
LINE [dB]	12	12,8	12,48
AUX [dB]	12	12,5	12,66

Tab. 6.1: Porovnávací tabulka předzesilovače

### 6.1.3 Korekční zesilovač

Korekční zesilovač se ve finálním stavu liší od návrhu taktéž v malých mezích. Největší rozdíl je cca 1,5 dB v kmitočtovém pásmu 20 Hz – 20 kHz, což je velmi přijatelná hodnota (navíc na okraji pásma). Celkové srovnání vyjadřuje Tab. 6.2.

zisk	Návrh		Simulace		Měření	
	hloubky	výšky	hloubky	výšky	hloubky	výšky
min [dB]	-16	-16	-15,9	-16,2	-14,43	-16,76
max [dB]	16	16	16,1	16,2	15,28	15,27
lin [dB]	4	4	3,65	2,35	4,06	3,68

Tab. 6.2: Porovnávací tabulka korekčního zesilovače

### 6.1.4 Koncový zesilovač

Hlavní modul celého přístroje, jež byl hlavním cílem práce, se v návrhu, simulacích a reálném měření liší vsutku minimálně. Je to dáno především citlivým odlazováním a pracovním nastavováním, případně výměnou součástek. V konečném hodnocení lze říci, že se návrh koncového zesilovače stal povedeným. Kmitočtové charakteristiky jsou naprosto shodné s předpokládanými a simulovanými. Hodnota zisku je ve skutečnosti o trochu nižší, nicméně 0,12 dB odchylka je naprosto dostačující. Podrobnější srovnání nabízí Tab. 6.3. Výsledné zkresení je rovněž velmi dostačující s hledem na výstupní výkon zesilovače. Zkrátka pohonná jednotka reproduktorů splnila očekávání více než skvěle.

	Návrh	Simulace	Měření
zisk [dB]	30	29,98	29,88
THD+N [%]	≤ 1	-	0,385
R <sub>out</sub> [mΩ]	< 100	-	45,9
d [-]	> 10	-	93,8

Tab. 6.3: Porovnávací tabulka koncového zesilovače

### 6.1.5 Invertor fáze

Invertor fáze skutečně funguje přesně dle návrhu. Je ovládán přepínačem na panelu. Pokud je připojen reproduktor mezi výstupy obou koncových zesilovačů a invertor je vypnutý, tak zvuk, který je reprodukován, postrádá složky společné pro oba kanály (jsou vyrušeny). Po zapnutí invertoru je zvuk již součet obou kanálů a výkon je do dvojnásobné zátěže také dvojnásobný.

### 6.1.6 Indikátory

Oba typy indikátorů se chovají přesně podle nastavených parametrů. To znamená, že po překročení maximální vstupní úrovně +3 dB na ručkovém ukazateli je signál již zkreslen. A stejně tak na LED stupnici odpovídá číslování stupnice efektivnímu výkonu jdoucímu do zátěže, vztaženo k 8 Ω.

### 6.1.7 Mikrofon

Mikrofonový zesilovač je opět ovládán pomocí přepínače na panelu. Po připojení dynamického (nebo dvou dynamických) mikrofonu je zvuk čistý, nepřebuzený. Funkce mikrofonu je tedy zcela správná.

## 6.2 Celkové hodnocení

Celkové hodnocení práce z pohledu autora (návrháře) je takové, že výsledek je nad rámec očekávání, navíc vše bylo omezeno finančními možnostmi. Celkové náklady práce, jež přibližně vyjadřuje Tab. 6.4 jsou poměrně značné, výroba je zkrátka nákladná. Celková cena je tedy cca 14000 Kč (bráno pouze přibližně z dohledaných faktur, zřejmě to byla částka vyšší), což je na první pohled částka vysoká, avšak vzhledem k cenám jednotlivých komponentů je to cena adekvátní. Co se týče časové náročnosti, tak ta se pohybuje kolem hranice 600 hodin čisté práce, spíše více. Je to především z důvodu dlouhého odladování, to zabralo stovky hodin. Nicméně výsledek stojí za tuto finanční a časovou investici. Tato práce prokázala nutnou znalost problematiky NF zesilovačů. Použitá literatura pomohla ve zdokonalení znalostí a v přímé aplikaci nabytých poznatků. Praktická část dokázala, že není vždy vhodné spoléhat na simulace a již vytvořená schémata. Je nutno zamyslet se v první řadě nad problémem a ten řešit jednoduchými úvahami a postupy. To vše se v této práci prolínalo, až v konečném výsledku vznikl prototyp zesilovače s uvedenými parametry.

Byl to běh na dlouhou trať, ale s o to větším potěšením z výsledku.

<b>Položka</b>	<b>Cena [Kč]</b>
transformátor 1500 VA	3499
transformátor 30 VA	99
součástky + konektory	2879
koncové tranzistory	2120
chladič + frézování	1560
konstrukce (materiál)	450
potisk (předloha)	600
knoflíky (materiál)	100
modul ochran	578
<b>celkem</b>	<b>11885</b>
+	
poškozené součástky, náhrada, předělávání a další náklady	2000
<b>celkové náklady (přibližně)</b>	<b>13885</b>

## Literatura

- [1] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 495 s. ISBN 80-730-0059-8.
- [2] KOTISA, Zdeněk. *NF zesilovače - 2.díl: integrované výkonové zesilovače*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 87 s. ISBN 80-730-053-9.
- [3] KOTISA, Zdeněk. *NF zesilovače - 3.díl: tranzistorové a výkonové zesilovače*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 95 s. ISBN 80-730-0065-2.
- [4] DUDEK, Pavel. *Moderní výkonové zesilovače řady DPA*. Amatérské rádio řada A, 1992 č.1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11
- [5] Elektronika Zdeněk Krčmář [online]. 2009 [cit. 2012-12-05]. *NF předzesilovače*. Dostupné z WWW: <<http://www.ezk.cz/psp3032.htm>>
- [6] WIKIPEDIA THE FREE ENCYCLOPEDIA [online]. 2006 [cit. 2012-12-05]. *RIAA equalisation curve for vinyl records*. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/File:RIAA-EQ-Curve.svg>>
- [7] NATIONAL SEMICONDUCTOR. [cit. 2012-12-06]. *Datasheet LM3915, LM3915 DOT/BAR DISPLAY DRIVER*. National Semiconductor 1995, 21s. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS005104.PDF>>
- [8] TEXAS INSTRUMENTS, *Datasheet NE5532, NE5532 DUAL LOW-NOISE OPERATIONAL AMPLIFIERS*. Texas Instruments Incorporated 2002, 5s. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/ne5532.pdf>>
- [9] INTERNATIONAL RECTIFIER. [cit. 2012-12-07] , *Datasheet IRF9640, IRF9640 POWER MOS-FET*. International Rectifier 2003, 7s. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/irf/irf9640.pdf>>
- [10] INTERNATIONAL RECTIFIER. [cit. 2012-12-07] , *Datasheet IRF640, IRF640 POWER MOS-FET*. International Rectifier 2003, 7s. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/irf/irf640.pdf>>
- [11] TEXAS INSTRUMENTS. [cit. 2012-12-07], *Datasheet TLO72, TLO72 LOW-NOISE JFET-INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS*. Texas Instruments Incorporated 1998, 18s. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/tl072.pdf>>
- [12] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku*. 3. vyd. České Budějovice: KOPP, 2003, 222 s. ISBN 80-723-2039-4.
- [13] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika: I*. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2007, 271 s. ISBN 978-80-7232-321-0.
- [14] ImageShack [online]. 2008 [cit. 2012-12-05]. *Korekce EZK RSD4132*. Dostupné z WWW: <<http://img337.imageshack.us/i/ezkkorekqv9.jpg/>>
- [15] INTERNATIONAL RECTIFIER. [cit. 2013-05-15] , *Datasheet IRFP9240, IRFP9240 POWER MOS-FET*. International Rectifier 2003, 7s. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/irf/irfp9240.pdf>>

- [16] INTERNATIONAL RECTIFIER. [cit. 2013-05-15] , *Datasheet IRFP240, IRFP240 POWER MOS-FET*. International Rectifier 2003, 7s. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/irf/irfp9240.pdf>>
- [17] MOTOROLA SEMICONDUCTOR. [cit. 2013-05-16]. *Datasheet MJE15032, MJE15032 POWER TRANSISTOR*. Motorola Semiconductor 1998, 7s. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MJE15032.pdf> >
- [18] MOTOROLA SEMICONDUCTOR. [cit. 2013-05-16]. *Datasheet MJE15033, MJE15033 POWER TRANSISTOR*. Motorola Semiconductor 1998, 7s. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MJE15033.pdf> >
- [19] ImageShack [online]. 2008 [cit. 2012-11-15]. *Ochrany EZK XJS2168*. Dostupné z WWW: <<http://img337.imageshack.us/i/ezkkochr.jpg>>

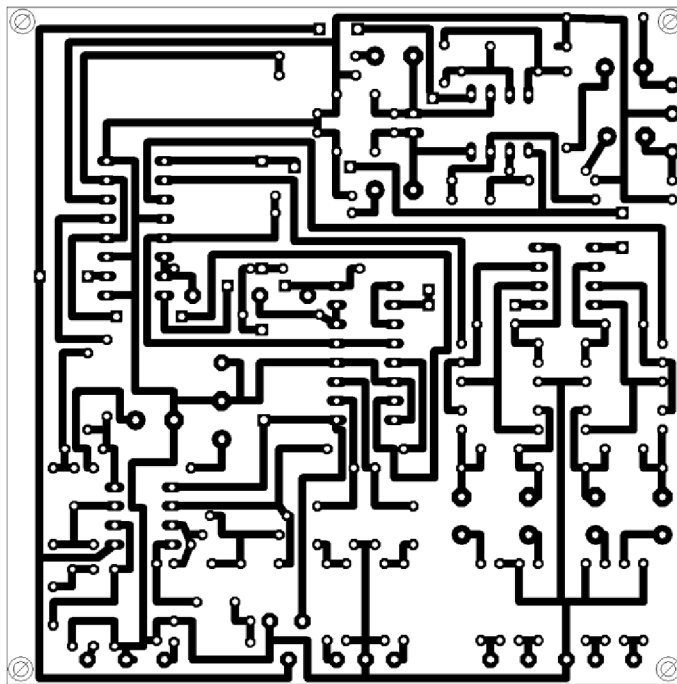
# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>NÁVRH ZAŘÍZENÍ</b>	<b>60</b>
A.1	Deska plošného spoje předzesilovače – bottom (strana spojů).....	60
A.2	Deska plošného spoje korekčního zesilovače – bottom (strana spojů)...	61
A.3	Deska plošného spoje mikrofonového zesilovače – bottom (strana spojů).....	61
A.4	Deska plošného spoje koncového zesilovače – bottom (strana spojů) ...	61
A.5	Deska plošného spoje zdroje – bottom (strana spojů) .....	63
A.6	Deska plošného spoje indikátoru vstupní úrovně – bottom (strana spojů).....	63
A.7	Deska plošného spoje indikátoru výstupního výkonu – bottom (strana spojů).....	64
A.8	Deska plošného spoje indikátoru invertoru fáze – bottom (strana spojů).....	64
A.9	Deska složená (předzesilovač + mikrofon + invertor + korekce) – bottom (strana spojů) .....	65
A.10	Elektronický přepínač – bottom (strana spojů).....	66
<b>B</b>	<b>SEZNAM SOUČÁSTEK</b>	<b>66</b>
B.1	Předzesilovač .....	66
B.2	Mikrofonový zesilovač .....	67
B.3	Korekční zesilovač.....	67
B.4	Koncový zesilovač.....	68
B.5	Indikátor vstupní úrovně.....	69
B.6	Indikátor výstupního výkonu .....	70
B.7	Invertor fáze.....	70
B.8	Zdroj.....	70
B.9	Elektronický přepínač.....	71
<b>C</b>	<b>OSAZOVACÍ PLÁNY</b>	<b>71</b>
C.1	Předzesilovač .....	71
C.2	Korekční zesilovač.....	72
C.3	Koncový zesilovač.....	72

C.4	Indikátor vstupní úrovně.....	74
C.5	Indikátor výstupního výkonu .....	74
C.6	Invertor fáze.....	75
C.7	Zdroj.....	75
C.8	Elektronický přepínač.....	76
<b>D</b>	<b>SCHÉMA AUDIO ČÁSTI</b>	<b>77</b>

# A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

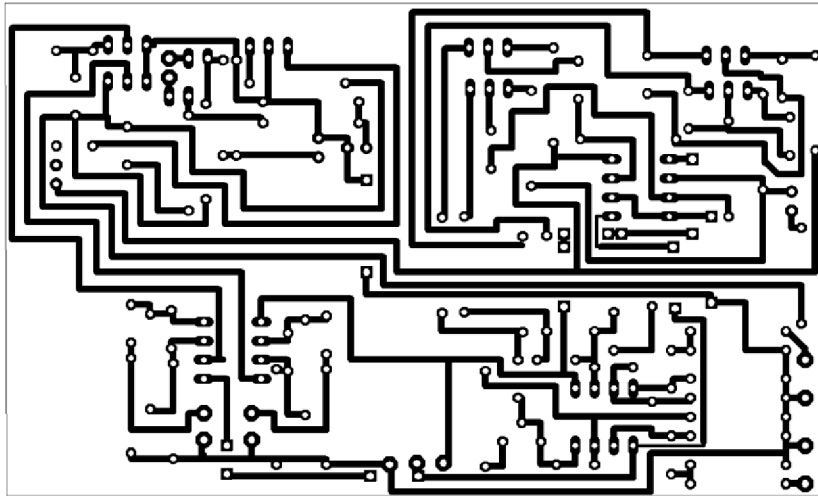
## A.1 Deska plošného spoje předzesilovače – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 90 x 90 [mm], měřítko M1:1

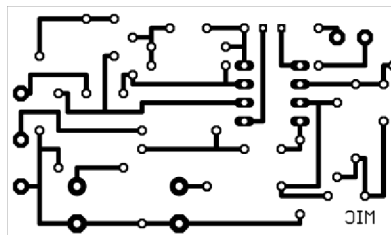


## A.2 Deska plošného spoje korekčního zesilovače – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 109 x 66 [mm], měřítko M1:1

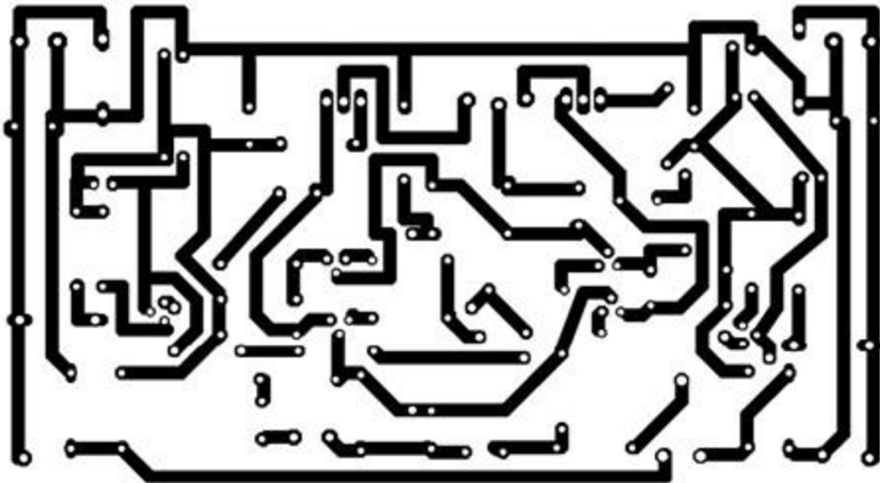
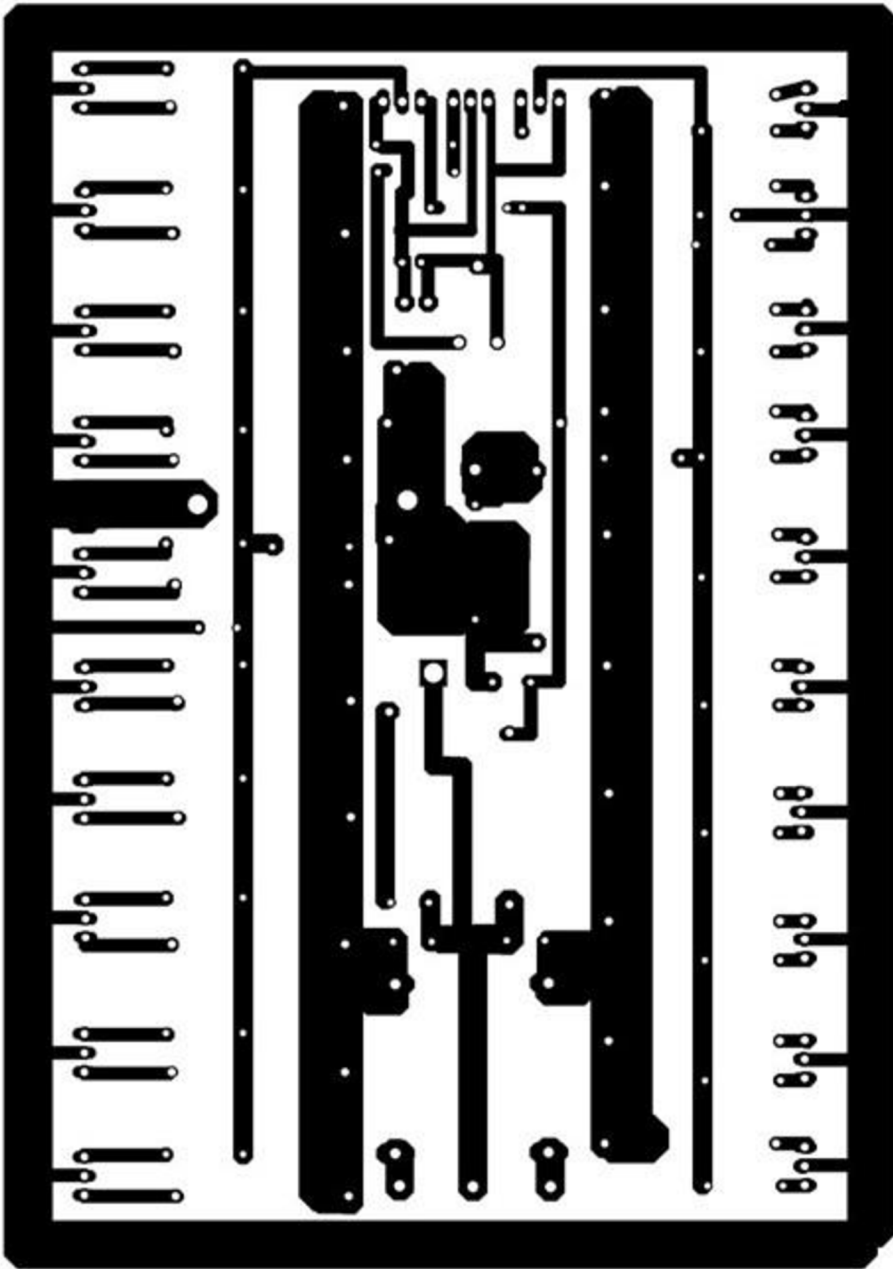
## A.3 Deska plošného spoje mikrofonového zesilovače – bottom (strana spojů)



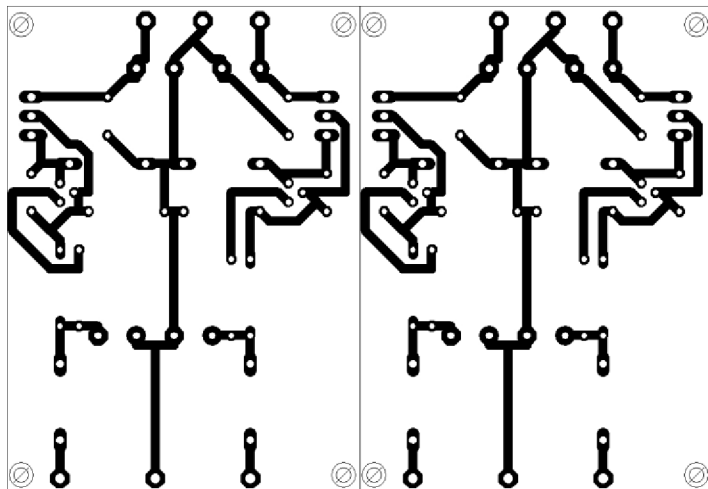
Rozměr desky 53 x 31 [mm], měřítko M1:1

## A.4 Deska plošného spoje koncového zesilovače – bottom (strana spojů)

Rozměr desky 120 x 237 [mm], měřítko M1:1

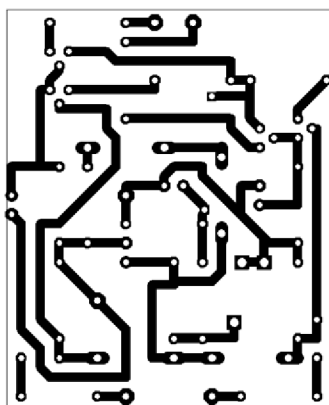


### A.5 Deska plošného spoje zdroje – bottom (strana spojů)



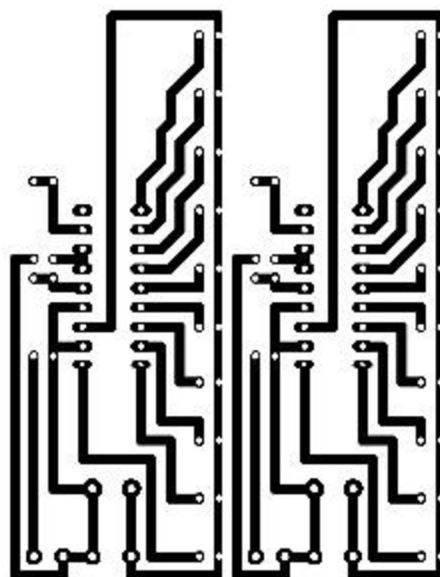
Rozměr desky 94 x 64 [mm], měřítko M1:1

### A.6 Deska plošného spoje indikátoru vstupní úrovně – bottom (strana spojů)



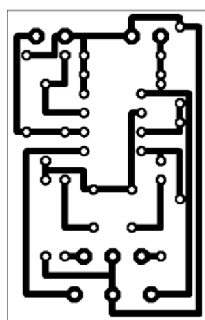
Rozměr desky 44 x 55 [mm], měřítko M1:1

### A.7 Deska plošného spoje indikátoru výstupního výkonu – bottom (strana spojů)



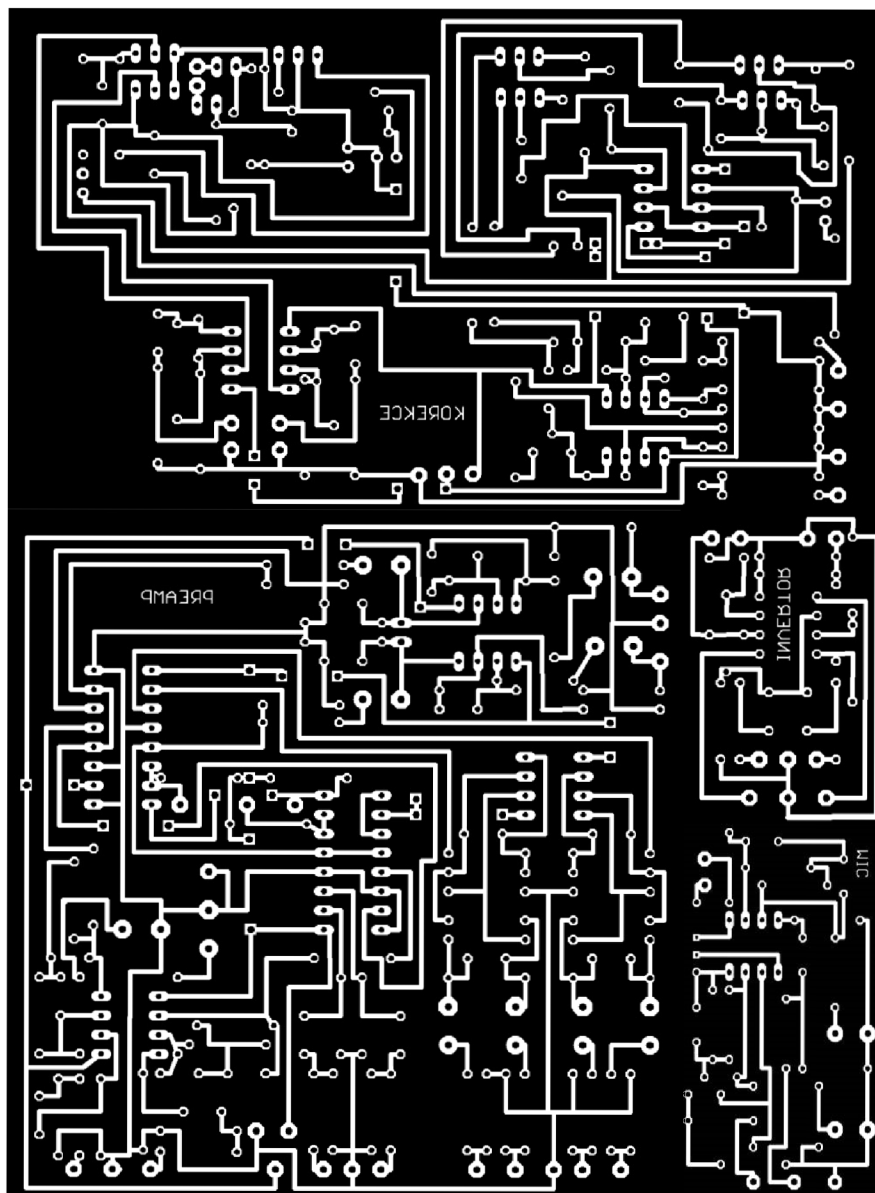
Rozměr desky 59 x 77 [mm], měřítko M1:1

### A.8 Deska plošného spoje indikátoru invertoru fáze – bottom (strana spojů)



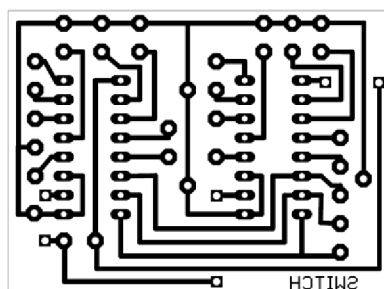
Rozměr desky 27 x 42 [mm], měřítko M1:1

## A.9 Deska složená (předzesilovač + mikrofon + invertor + korekce) – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 116 x 159 [mm], měřítko M1:1

## A.10 Elektronický přepínač – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 116 x 159 [mm], měřítko M1:1

## B SEZNAM SOUČÁSTEK

### B.1 Předzesilovač

ks	Hodnota	Typ	Označení	Součástka
2	1k	R-EU_0207/10	R46, R53	rezistor
2	1k5	R-EU_0207/10	R1, R8	rezistor
2	1k8	R-EU_0207/10	R19, R29	rezistor
2	2n2	C-EU050-025X075	C3, C7	kondenzátor
4	4k7	R-EU_0207/10	R16, R18, R26, R28	rezistor
8	4u7/63V	CPOL-EUE5-8.5	C9, C10, C13, C14, C19, C22, C23, C26	elektrolyt. kondenzátor
4	6k8	R-EU_0207/10	R7, R14, R24, R34	rezistor
2	6n8	C-EU050-025X075	C4, C8	kondenzátor
1	10k	R-EU_0207/10	R44	rezistor
4	15k	R-EU_0207/10	R20, R22, R30, R32	rezistor
2	15p	C-EU050-025X075	C21, C25	kondenzátor
4	33k	R-EU_0207/10	R5, R12, R35, R38	rezistor
2	33n	C-EU050-025X075	C1, C5	kondenzátor
4	33p	C-EU050-025X075	C12, C16, C20, C24	kondenzátor
2	47k	R-EU_0207/10	R2, R9	rezistor
2	82k	R-EU_0207/10	R45, R52	rezistor
20	100k	R-EU_0207/10	R21, R23, R31, R33, R36, R37, R39, R40, R41, R42, R43, R47, R48, R49, R50, R51, R54, R55, R56, R57	rezistor
2	100u/16V	CPOL-EUE5-8.5	C2, C6	elektrolyt. kondenzátor
2	330k	R-EU_0207/10	R3, R10	rezistor

2	330n	C-EU050-025X075	C17, C18	kondenzátor
2	330p	C-EU050-025X075	C11, C15	kondenzátor
2	470R	R-EU_0207/10	R4, R11	rezistor
6	470k	R-EU_0207/10	R6, R13, R15, R17, R25, R27	rezistor
2		4053N	IC1, IC2	demultiplexor
1		JP1E	JP1	jumper
1		NJM4780	IC3	operační zesilovač
2		TL072P	IC4, IC5	operační zesilovač

## B.2 Mikrofonový zesilovač

ks	Hodnota	Typ	Označení	Součástka
2	1k5	R-EU_0207/10	R1, R8	rezistor
2	6k8	R-EU_0207/10	R7, R14	rezistor
2	6n8	C-EU050-025X075	C4, C8	kondenzátor
2	33n	C-EU050-025X075	C1, C5	kondenzátor
2	47k	R-EU_0207/10	R2, R9	rezistor
2	100u/16V	CPOL-EUE5-8.5	C2, C6	elektrolyt. kondenzátor
2	330k	R-EU_0207/10	R3, R10	rezistor
2	470R	R-EU_0207/10	R4, R11	rezistor
2	470k	R-EU_0207/10	R6, R13	rezistor
1	NJM4780	TL072P	IC3	operační zesilovač

## B.3 Korekční zesilovač

ks	Hodnota	Typ	Označení	Součástka
2		JP1E	JP1, JP2	jumper
2	1k	R-EU_0207/12	R1, R23	rezistor
4	1u	C-EU050-025X075	C3, C11, C13, C22	kondenzátor
6	2k2	R-EU_0207/12	R10, R11, R14, R32, R33, R36	rezistor
2	2n2	C-EU050-025X075	C9, C19	kondenzátor
2	2u2	CPOL-EUE2.5-5	C8, C20	elektrolyt. kondenzátor
2	3k3	R-EU_0207/12	R9, R31	rezistor
4	4k7	R-EU_0207/12	R5, R18, R27, R40	rezistor
2	4u7	CPOL-EUE2.5-5	C7, C18	elektrolyt. kondenzátor
2	5n6	C-EU050-025X075	C6, C17	kondenzátor
4	10k	R-EU_0207/12	R16, R20, R38, R43	rezistor
4	12k	R-EU_0207/12	R7, R8, R29, R30	rezistor
4	22n	C-EU050-025X075	C4, C5, C15, C16	kondenzátor

4	22p	C-EU050-024X044	C2, C10, C14, C21	kondenzátor
2	25k/G	B64Y	R22, R41	log. potenciometr
6	33k	R-EU_0207/12	R3, R4, R19, R25, R26, R42	rezistor
1	50k/N	B64Y	R45	lin. potenciometr
4	100k	R-EU_0207/12	R2, R21, R24, R44	rezistor
2	100k/N	B25P	R6, R28	trimr
4	100k/N	B64Y	R12, R13, R34, R35	lin. potenciometr
2	220	R-EU_0207/12	R17, R39	rezistor
2	470n	C-EU050-025X075	C1, C12	kondenzátor
2	680	R-EU_0207/12	R15, R37	rezistor
3		NE5532N	IC1, IC2, IC3	operační zesilovač

## B.4 Koncový zesilovač

ks	Hodnota	Typ	Označení	Součástka
2	1N4007	1N4007	D5, D6	dioda
2	1N5361B/27V	BZX85	D3, D4	dioda
1	1k	R-EU_0207/10	R1	rezistor
4	1k2	R-EU_0207/10	R8, R9, R16, R17	rezistor
2	1m/100V	CPOL-EUE5-13	C15, C16	elektrolyt. kondenzátor
1	1u	C-EU050-045X075	C1	kondenzátor
2	3n3	C-EU050-025X075	C4, C5	kondenzátor
1	4k7	R-EU_0207/10	R20	rezistor
1	10R	R-EU_0207/10	R22	rezistor
1	10p	C-EU050-025X075	C2	kondenzátor
4	22R	R-EU_0207/10	R11, R12, R13, R14	rezistor
1	22k	R-EU_0207/10	R26	rezistor
4	33R	R-EU_0207/10	R31, R32, R33, R34	rezistor
1	47k	R-EU_0207/10	R2	rezistor
1	50k	LI10	R5	rezistor
4	56R	R-EU_0207/10	R10, R15, R27, R28	rezistor
4	100n	C-EU050-025X075	C11, C12, C13, C14	kondenzátor
2	100u	CPOL-EUE2.5-7	C7, C8	elektrolyt. kondenzátor
2	100u/100V	CPOL-EUE2.5-7	C20, C21	elektrolyt. kondenzátor
1	150R	R-EU_0207/10	R21	rezistor
2	220k	R-EU_0207/10	R6, R7	rezistor
2	330k	R-EU_0207/10	R3, R4	rezistor
1	330n	C-EU050-025X075	C3	kondenzátor
1	330p	C-EU050-024X044	C6	kondenzátor
2	470R	R-EU_0207/10	R18, R19	rezistor
3	B	BC639*	T1, T2, T6	tranzistor NPN
3	B	BC640*	T3, T4, T5	tranzistor PNP



2		BD239*, BD139	T8, T9	tranzistor NPN
1		BD240*	T7	tranzistor PNP
2	2V4	BZX55	D7, D8	Zenerova dioda
2	LED3MM RED	LED3MM	D1, D2	LED
10		IRFP240*	T22, T23, T24, T25, T26, T27, T28, T29, T30, T31	
10		IRFP9240*	T12, T13, T14, T15, T16, T17, T18, T19, T20, T21	
1	10μH	L-US0207/15	L1	tlumivka
20	15R	R-EU_0207/10	R41, R42, R43, R44, R45, R46, R47, R48, R49, R50, R51, R52, R53, R54, R55, R56, R57, R58, R59, R60	rezistor
20	OR22/2W	R-EU_0617/22	R61, R62, R63, R64, R65, R66, R67, R68, R69, R70, R71, R72, R73, R74, R75, R76, R77, R78, R79, R80	rezistor
1	1k	LI10	R25	trimr
1	1u	CPOL-EUE2.5-6	C9	elektrolyt. kondenzátor
1	2R2/2W	R-EU_0617/22	R40	rezistor
1	2k2	R-EU_0207/10	R23	rezistor
1	3R3/2W	R-EU_0617/22	R39	rezistor
2	4R7	R-EU_0207/10	R35, R36	rezistor
2	7A	SH22,5	F1, F2	pojistka
1	100R/20W	R-EU_0922/22*	R37	rezistor
2	100n	C-EU050-025X075	C10, C19	kondenzátor
2	100p	C-EU050-025X075	C17, C18	kondenzátor
1	220R/20W	R-EU_0922/22*	R38	rezistor
1	820R	R-EU_0207/10	R24	rezistor
1		MJE15032*	T10	tranzistor NPN
1		MJE15033*	T11	tranzistor PNP

Pozn. Součástky označené \* jsou náhrady (pojednáno v kapitole 5.6)

## B.5 Indikátor vstupní úrovně

ks	Hodnota	Typ	Označení	Součástka
1	1M0	0207/10	R11	rezistor
2	1M5	0207/10	R3, R4	rezistor
4	1N4007	1N4004	D1, D2, D3, D4	dioda
2	2u2	CPOL-EUE2.5-6	C3, C4	elektrolyt. kondenzátor

1	4u7	CPOL-EUE2.5-6	C5	
1	6k8	0207/10	R13	rezistor
2	8k2	0207/10	R1, R2	rezistor
1	9k1	0207/10	R12	rezistor
1	22k	0207/10	R14	rezistor
1	22u	CPOL-EUE2.5-6	C6	elektrolyt. kondenzátor
2	33k	0207/10	R7, R8	rezistor
2	47n	C-EU050-025X075	C1, C2	kondenzátor
2	120R	0207/10	R9, R10	rezistor
2	680k	0207/10	R5, R6	rezistor
4		BC550C	T1, T2, T3, T4	tranzistor NPN

## B.6 Indikátor výstupního výkonu

ks	Hodnota	Typ	Označení	Součástka
20		LED5MM	D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10	dioda
2	2k2	R-EU_0207/10	R2	rezistor
2	2u2/25V	CPOL-EUE5-8.5	C1	elektrolyt. kondenzátor
2	10k	R-EU_0207/10	R4	rezistor
2	79k	R-EU_0207/10	R3	rezistor
2	390	R-EU_0207/10	R1	rezistor
2		LM3915N	IC1	Integrovaný obvod

## B.7 Invertor fáze

ks	Hodnota	Typ	Označení	Součástka
8	1k	R-EU_0207/10	R2, R3, R4, R6, R7, R8, R10, R11	rezistor
3	100k	R-EU_0207/10	R1, R5, R9	rezistor
2	470n	C-EU050-035X075	C1, C2	kondenzátor
1		NE5532N	IC1	operační zesilovač

## B.8 Zdroj

ks	Hodnota	Typ	Označení	Součástka
4	100n	C-EU050-025X075	C1, C2, C3, C4	kondenzátor
2	100u/100V	CPOL-EUE5-8.5	C5, C6	elektrolyt. kondenzátor
2	100u/35V	CPOL-EUE5-8.5	C7, C8	elektrolyt. kondenzátor
2	1M	R-EU_0207/10	R3, R4	rezistor

1		BC547	T2	tranzistor NPN
1		BC557	T4	tranzistor PNP
1		BD242	T3	tranzistor PNP
1		BD243	T1	tranzistor NPN
2	BZX85 8V2	BZX85	D5, D6	Zenerova dioda
2	BZX85 16V	BZX85	D5*, D6*	Zenerova dioda

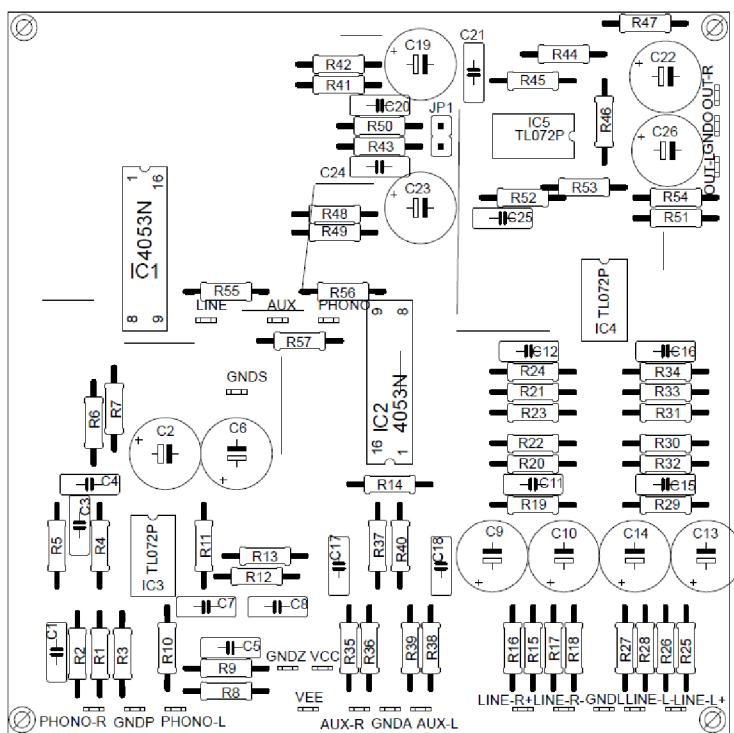
Pozn. Součástky označené \* se jako jediné liší (jsou použity dva identické moduly pro dvě různá napětí 7V5 a 15V) .

## B.9 Elektronický přepínač

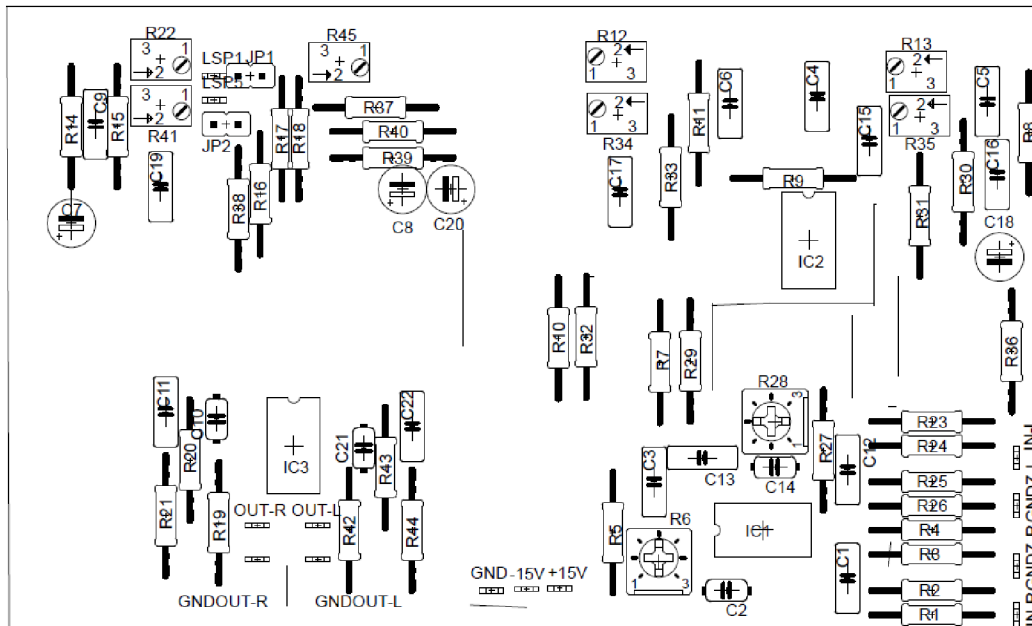
ks	Hodnota	Typ	Označení	Součástka
2		4053N	IC1, IC2	demultiplexor

# C OSAZOVACÍ PLÁNY

## C.1 Předzesilovač

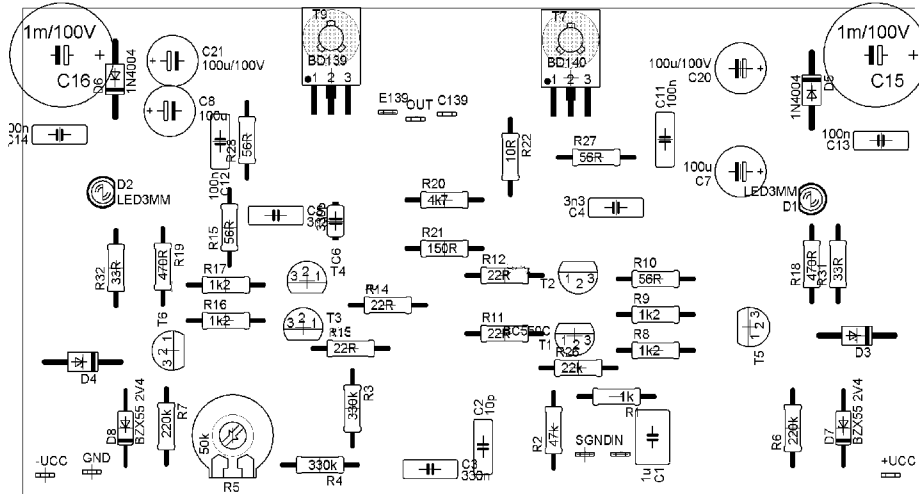
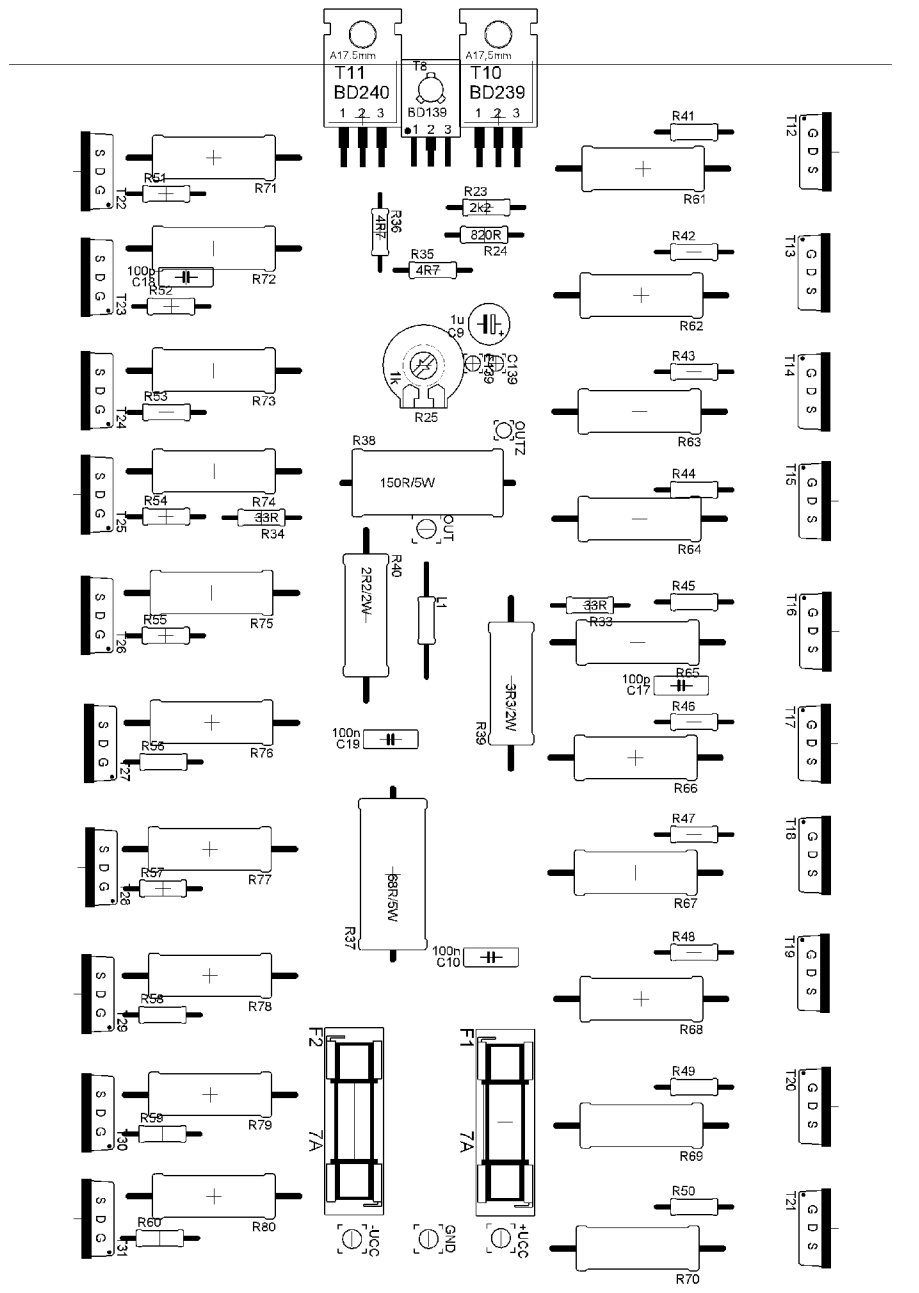


## C.2 Korekční zesilovač

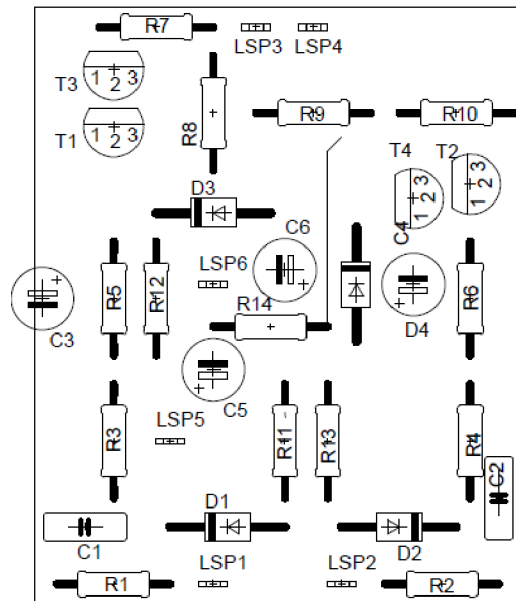


## C.3 Koncový zesilovač

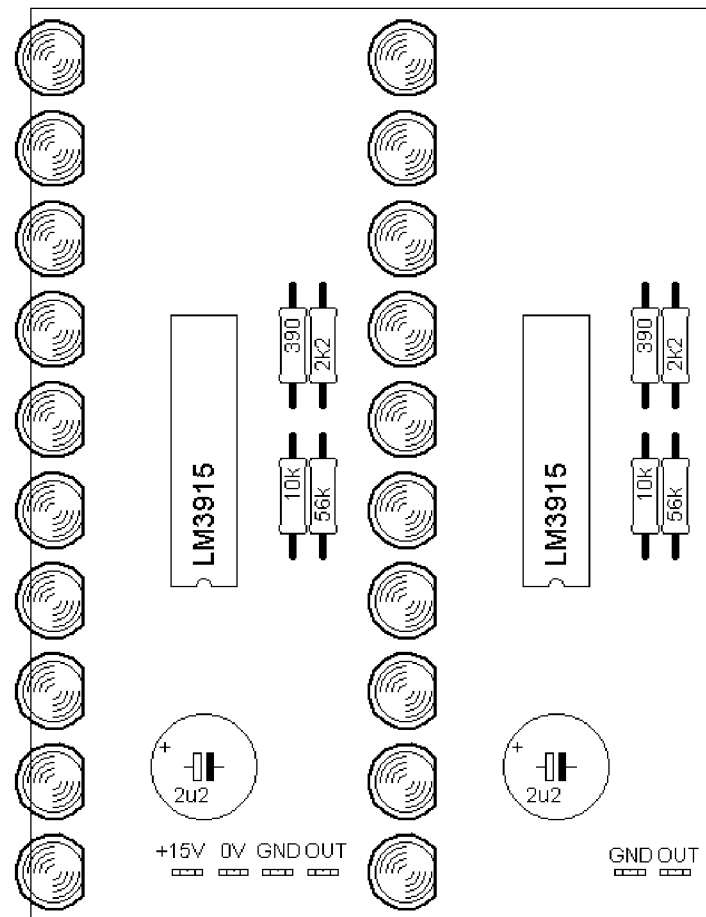
Pozn. Součástky označené \* v seznamu součástek nejsou v osazovacím plánu znázorněny. Je proto nutné tomuto věnovat pozornost.



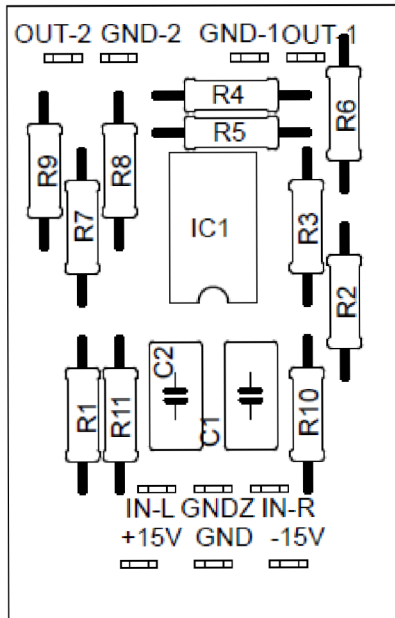
## C.4 Indikátor vstupní úrovně



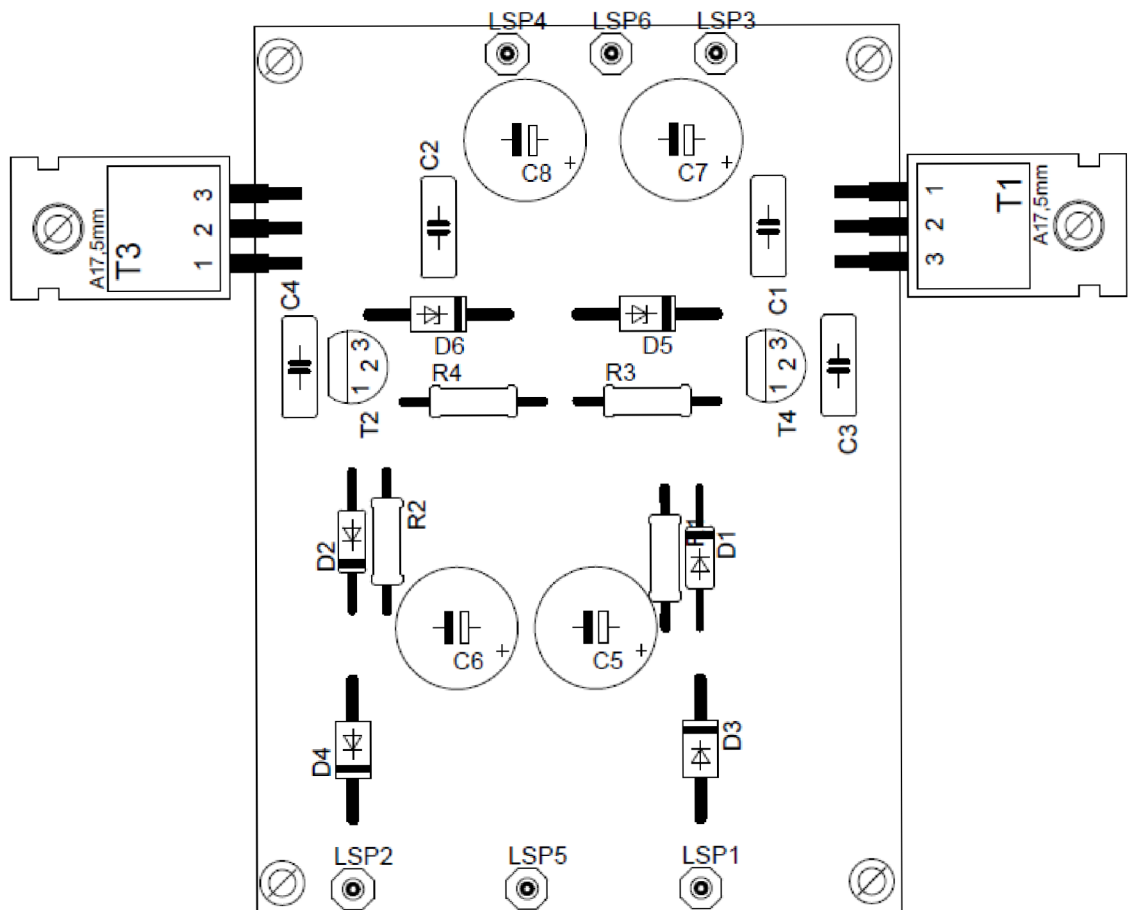
## C.5 Indikátor výstupního výkonu



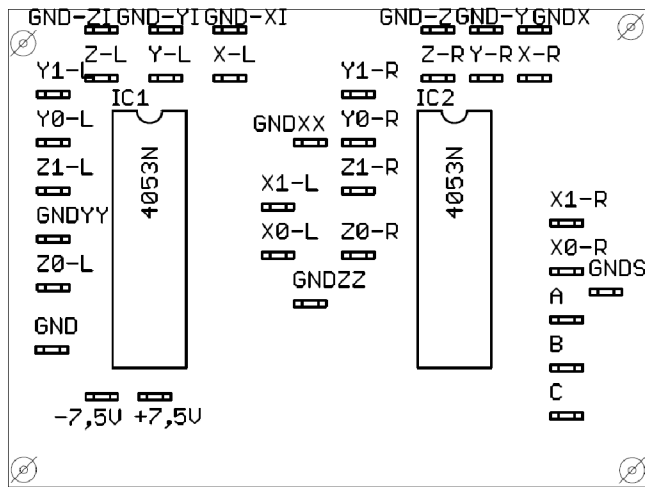
## C.6 Invertor fáze



## C.7 Zdroj



## C.8 Elektronický přepínač





# D SCHÉMA AUDIO ČÁSTI

