

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 A KONSTRUKCE AUDIO VÝKONOVÉHO ZESILOVAČE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

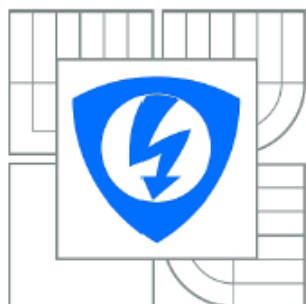
AUTHOR

VÍTĚZSLAV MALINA

BRNO 2012



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 A KONSTRUKCE AUDIO VÝKONOVÉHO ZESILOVAČE

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE AUDIO POWER AMPLIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

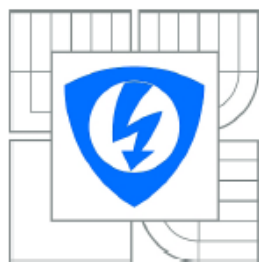
AUTOR PRÁCE VÍTĚZSLAV MALINA

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. ZDENĚK HRUBOŠ

SUPERVISOR

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Vítězslav Malina
Ročník: 3

ID: 115224
Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a konstrukce audio výkonového zesilovače

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte audio výkonový zesilovač s výstupním výkonem minimálně 2 x 75 W. Zesilovač doplňte korekčním předzesilovačem s fyziologickou regulací hlasitosti, přepínačem vstupů a samostatným výstupem na sluchátka. Současně navrhněte i vhodnou napájecí jednotku. Vlastnosti jednotlivých navržených zapojení simulujte v programu PSpice.

Na základě získaných znalostí navrhněte desky plošných spojů jednotlivých částí zesilovače v programu Eagle. Proveďte kompletní konstrukci audio výkonového zesilovače s předepsanými vlastnostmi, včetně předzesilovače a napájecí jednotky. Zařízení oživte, proměřte základní charakteristiky a výsledky srovnajte s parametry očekávanými a získanými počítačovou simulací.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN - technická literatura, 2003.

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

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Hruboš
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 částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

V této bakalářské práci se zabývám návrhem kompletního audio výkonového zesilovače v provedení stereo a s výkonem minimálně 2x75W. Zesilovač obsahuje přepínání vstupů mezi mikrofonom a linkovým vstupem, korekční předzesilovač s výstupem na sluchátka a výkonový zesilovač s možností přepínání výstupu. Smyslem této práce je návrh obvodového řešení a počítačové simulace jednotlivých částí zesilovače, návrh desek plošných spojů a sestavení zesilovače..

Klíčová slova

Nízkofrekvenční zesilovač, mikrofonní zesilovač, předzesilovač, operační zesilovač, integrovaný výkonový zesilovač, napájecí zdroj, simulace, návrh DPS.

Abstract

In this bachelor's thesis, I explore the design of complete audio performance amplifiers in stereo and the output power of 2x75W. Amplifier contains the switching between microphone and line input, correction pre-amplifier with output to headphones and power amplifier with output switching options. The purpose of this thesis is the design of circuit and computer simulation of individual parts of the amplifiers, PCB design and build amplifiers.

Keywords

Low pas amplifier, microphone amplifier, pre-amplifier, operating amplifier, integrated power amplifier, supply source, simulation, PCB design.

Bibliografická citace:

MALINA, V. *Návrh a konstrukce audio výkonového zesilovače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 53s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hruboš.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma NÁVRH A KONSTRUKCE 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 práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 25. května 2012

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Hrubošovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce

V Brně dne 25. května 2012

.....
podpis autora

Obsah

Seznam ilustrací.....	7
1 Úvod.....	8
2 Návrh zesilovače.....	9
2.1 Blokové schéma.....	9
2.1.1 Popis jednotlivých bloků.....	9
2.2 Koncový stupeň 2x75W.....	10
2.2.1 Popis a vlastnosti použitého integrovaného obvodu.....	10
2.2.2 Paralelní zesilovač pro zátěž 4Ω	11
2.2.3 Můstkový zesilovač pro zátěž 8Ω	16
2.2.4 Zapojení přepínatelného zesilovače pro zátěž 4Ω a 8Ω	19
2.2.5 Obvod pro zpožděné připojení reproduktorů.....	19
2.2.6 Návrh chladiče.....	22
2.3 Předzesilovač.....	22
2.3.1 Korektor hloubek.....	22
2.3.2 Výškový korektor.....	25
2.3.3 Zesilovač pro úpravu hlasitosti.....	26
2.3.4 Kompletní zapojení předzesilovače	27
2.3.5 Simulace předzesilovače v Pspice.....	29
2.3.6 Měření korekčního zesilovače.....	32
2.3.7 Výstup na sluchátka.....	33
2.4 Vstupní zesilovač.....	35
2.4.1 Mikrofonní vstup.....	35
2.4.2 Linkový vstup.....	37
3 Napájecí zdroj.....	38
3.1 Transformátor.....	38
3.2 Usměrňovač.....	38
3.3 Filtrace.....	39
3.4 Napájecí zdroj pro předzesilovač.....	39
3.5 Bezpečnost a konstrukce.....	39
4 Závěr.....	41
5 Použitá literatura.....	42
6 Seznam zkratk a symbolů.....	43
Seznam příloh.....	44

Seznam ilustrací

Obr. 2.1: Blokové schéma zesilovače.....	9
Obr. 2.2: Paralelní zapojení operačního zesilovače.....	11
Obr. 2.3: Zapojení koncového stupně se zátěží 4Ω	12
Obr. 2.4: Frekvenční a fázová charakteristika paralelního koncového stupně.....	13
Obr. 2.5: Průběhy napětí na výstupu paralelního zesilovače.....	14
Obr. 2.6: Průběhy proudu na výstupu paralelního zesilovače.....	14
Obr. 2.7: Můstkové zapojení operačního zesilovače.....	16
Obr. 2.8: Schéma zesilovače s výkonem 75W do zátěže 8Ω	17
Obr. 2.9: Frekvenční a fázová charakteristika můstkového zesilovače.....	18
Obr. 2.10: Průběhy proudu na výstupu můstkového zesilovače.....	18
Obr. 2.11: Průběh napětí na výstupu můstkového zesilovače.....	18
Obr. 2.12: Zapojení koncového stupně.....	19
Obr. 2.13: Obvod pro zpožděné připojení reproduktorů.....	20
Obr. 2.14: Časový průběh napětí na kondenzátoru a proudu cívkou relé.....	21
Obr. 2.15: Korektor hloubek.....	23
Obr. 2.16: Přenosová charakteristika hloubkového korektoru.....	24
Obr. 2.17: Korektor výšek.....	25
Obr. 2.18: Přenosová charakteristika výškového korektoru.....	26
Obr. 2.19: Zesilovač pro úpravu hlasitosti.....	26
Obr. 2.20: Předzesilovač.....	28
Obr. 2.21: Frek. char. předzesilovače v závislosti na korekcích, hlasitost=50%.....	29
Obr. 2.22: Frek. char. předzes. v závislosti na korekcích, hlasitost=100%.....	29
Obr. 2.23: Výstupní napětí předzes. v závislosti na korekcích, hlasitost=50%.....	30
Obr. 2.24: Výstupní napětí předzes. v závislosti na korekcích, hlasitost=100%.....	30
Obr. 2.25: Frek. char. předzes. v závislosti na hlasitosti, korekce=0%.....	31
Obr. 2.26: Výstupní napětí na předzes. v závislosti na hlasitosti, korekce=0%.....	31
Obr. 2.27: Frek. char. předzesilovače pro krajní polohy potenciometrů při hlasitosti 50%.....	32
Obr. 2.28: Sluchátkový zesilovač.....	33
Obr. 2.29: Časový průběh proudu na výstupu komplementárního zesilovače.....	34
Obr. 2.30: Vstupní zesilovač.....	35
Obr. 2.31: Frekvenční charakteristika mikrofonního zesilovače (simulace).....	36
Obr. 2.32: Frekvenční charakteristika mikrofonního zesilovače pro citlivost 3mV (měření).....	37
Obr. 2.33: Frekvenční charakteristika mikrofonního zesilovače pro citlivost 1mV (měření).....	37
Obr. 3.1: Schéma zapojení napájecích zdrojů.....	40

1 ÚVOD

V zadání se požaduje zesilovač o výkonu $2 \times 75\text{W}$. U nízkofrekvenčních zesilovačů je obecně trochu problém s určením výstupního výkonu, protože různí výrobci ho definují nejrůznějšími vlastními způsoby aby zdánlivě zvýšili udávaný výkon svého výrobku a zvýšila se tak jeho prodejnost. Lze se pak snadno setkat se zesilovači o výkonu 1kW pro domácí použití což je samozřejmě v drtivé většině případů nesmysl. Správně je výstupní jmenovitý výkon součinem efektivních hodnot výstupního napětí a proudu při frekvenci signálu 1kHz a zkreslení maximálně 1% . Případně se lze často setkat s tzv. audio výkonem což je součin amplitud napětí a proudu bez ohledu na frekvenci [1]. V této práci bude zesilovač navržen na jmenovitý výkon minimálně $2 \times 75\text{W}$, který bude schopen dodat do 4Ω i 8Ω zátěže.

Korekční předzesilovač je možno řešit několika způsoby, první možnost je jednoduchý regulátor hlasitosti, upravený tak aby se při nízké hlasitosti automaticky zvýšilo zesílení na nízkých a vysokých frekvencích. Druhá možnost je samostatná korekce výšek a basů spolu s úpravou hlasitosti a poslední varianta je kompletní equalizer složený z řady pásmových propustí, který umožňuje přesné nastavení frekvenční charakteristiky.

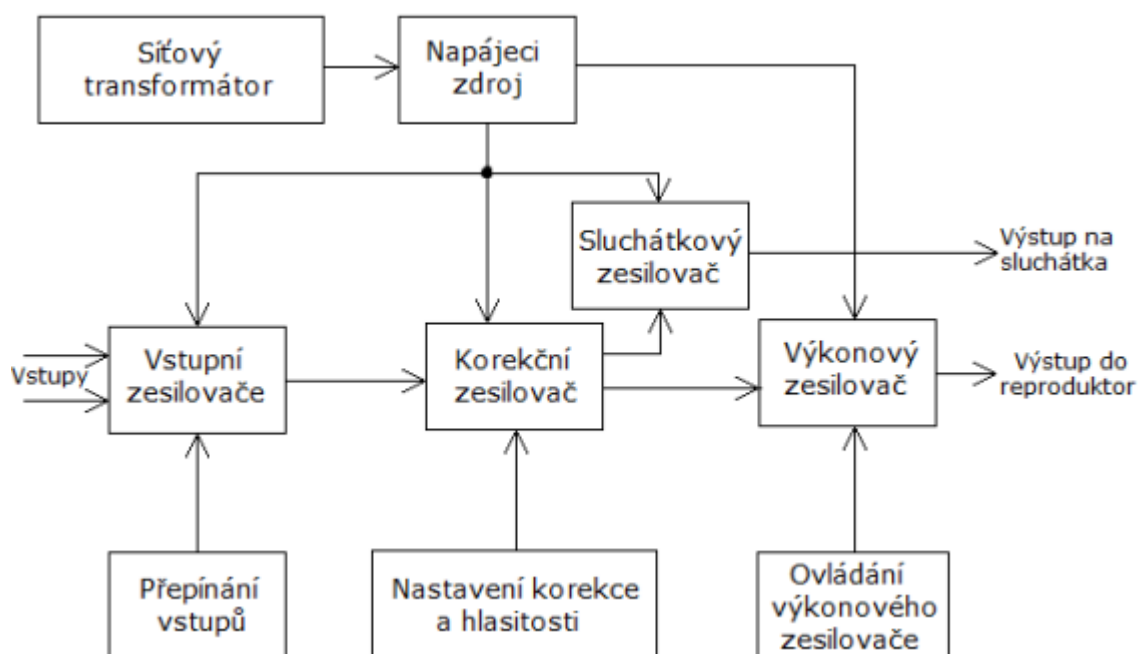
Součástí předzesilovače má být přepínání vstupů čímž je myšleno především přepíná mezi linkovým a mikrofoniím vstupem. Zatímco u linkového vstupu není signál potřeba zesilovat, tak u mikrofoniího vstupu je potřeba signál zesílit více než stokrát a musí se nastavit vhodný vstupní odpor zesilovače. Součástí předzesilovače bude i samostatný sluchátkový výstup.

Napájecí zdroj musí být schopen dodávat dostatečný výkon, aby na zátěži mohlo být skutečně $2 \times 75\text{W}$ s určitou rezervou i při uvažování účinnosti zesilovače, možnosti přetížení zesilovače apod. Dále bude potřeba vytvořit samostatné zdroje pro další části zesilovače (předzesilovač, vstupní zesilovač, ovládání relé atd.).

2 NÁVRH ZESILOVAČE

2.1 Blokové schéma

Na následujícím obrázku (Obr. 2.1) je uvedeno blokové schéma zesilovače pro jeden kanál. Stereo zesilovač bude řešen jako dva téměř samostatné jednobandové zesilovače. Propojení obou kanálů je spíše konstrukční záležitostí, takže při návrhu a simulacích se bude pracovat pouze s jedním kanálem. V blokovém schématu, stejně jako v návrhu a simulacích nejsou uvažovány indikační prvky (LED diody u přepínání vstupů a výstupů).



Obr. 2.1: Blokové schéma zesilovače

2.1.1 Popis jednotlivých bloků

Vstupy – Zesilovač je vybaven dvěma samostatnými vstupy pro mikrofon a pro linkový vstup (např. počítač).

Vstupní zesilovače – pro každý vstup je navržen konkrétní zesilovač, u mikrofonního je možnost změny citlivosti a vstupního odporu

Přepínání vstupů – zesilovač umožňuje pracovat pouze s jedním aktivním vstupem, proto je na vstupu zesilovače přepínač k výběru aktivního vstupu (MIC/LINE).

Korekční zesilovač – signál se nejprve přivede na pasivní korekční obvod, který upraví frekvenční charakteristiku podle nastavení potenciometrů. Umožňuje zdůraznění, nebo potlačení výšek a basů. Po této úpravě se signál přivede na jednoduchý zesilovač s možností změny zesílení, který slouží k úpravě hlasitosti a především k napěťovému buzení výkonového stupně.

Nastavení korekce a hlasitosti – jedná se o několik vhodně zapojených logaritmických potenciometrů. Oba kanály se ovládají společně pomocí stereo potenciometrů.

Sluchátkový zesilovač a výstup - slouží k výkonovému zesílení signálu pro sluchátka

Výkonový zesilovač – obsahuje dva integrované výkonové zesilovače, které jsou zapojeny společně na jeden kanál. Integrované zesilovače jsou vybaveny řadou ochran a jsou schopny signál kvalitně zesílit na požadovanou úroveň potřebnou pro daný výstupní výkon.

Ovládání výkonového zesilovače – pomocí několika relé přepínačů se přepíná zapojení integrovaných zesilovačů mezi paralelním pro 4Ω a můtkovým pro 8Ω reproduktor. Dále je pomocí relé a jednoduchého pomocného obvodu vyřešeno opožděné připojování reproduktorů po zapnutí zesilovače. Kromě této zásadní funkce patří k ovládání koncového stupně i tlačítko umlčení (mute), které zatlumí signál, ale na rozdíl od vypnutí zesilovače tento zůstává stále v provozu a odebírá proud ze zdroje.

Síťový transformátor – toroidní transformátor se vstupem 230V/50Hz a symetrickým výstupem o požadovaném napětí s potřebným výkonem. Ve skutečnosti se jedná o dva samostatné transformátory o různých výkonech.

Napájecí zdroj – skládá se ze dvou samostatných zdrojů. Oba dva jsou symetrické s napětím $\pm 15V$ pro předzesilovač a $\pm 35V$ pro koncový stupeň. Napájecí zdroj pro koncový stupeň je navržen bez stabilizátoru pouze s dostatečně velkými kondenzátory.

2.2 Koncový stupeň 2x75W

2.2.1 Popis a vlastnosti použitého integrovaného obvodu

Klíčovou součástí v koncovém stupni je integrovaný zesilovač LM3886 od výrobce National Semiconductor. Ten je svým chováním velmi podobný běžnému operačnímu zesilovači, ale na rozdíl od obyčejného OZ je schopen dodávat výkon několik desítek wattů. Následující popsané parametry vychází z katalogového listu [3].

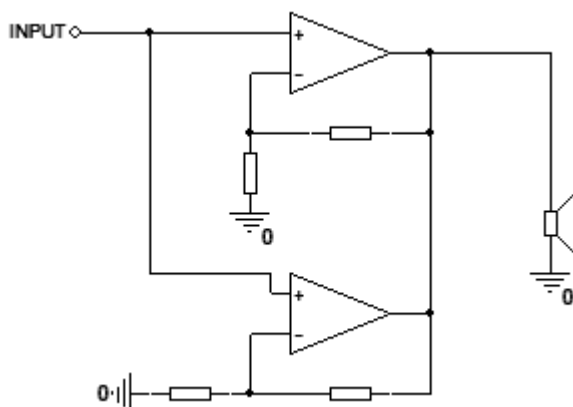
Maximální dodávaný jmenovitý výkon je u 4Ω zátěže 68W, u 8Ω zátěže 38W v pásmu 20Hz-20kHz se zkreslením $THD+N=0,1\%$. Požadovaného výkonu podle zadání bude dosaženo vhodným zapojením dvou zesilovačů na jeden kanál.

Odstup signálu od šumu je větší než 92dB. Vstupní napěťová nesymetrie je maximálně 10mV. Intermodulační zkreslení je řádově v tisícinách procenta. Což jsou hodnoty velmi vhodné pro konstrukci kvalitního zesilovače.

Zesilovač je vybaven ochranou proti přepětí, podpětí, přetížení, zkratu a proti přehřátí. Ochrana proti přehřátí funguje tak že při $165^{\circ}C$ na čipu odpojí napájení zesilovače dokud teplota neklesne pod $155^{\circ}C$. Maximální napěťové zesílení naprázdno je 115dB a šířka pásma je 8MHz. V této práci bude zesilovač pracovat pouze se zesílením přibližně do 26 dB a v NF šířce pásma. Zesilovač je také vybaven funkcí mute, která po přivedení napětí na jeden z pinů zesilovače způsobí útlum přibližně 115dB.

Maximální povolená provozní teplota je 85°C , tepelný odpor bez použití chladiče je $\theta_{JA}=43^{\circ}\text{C/W}$. Při použití chladiče je teplotní odpor mezi křemíkovou strukturou a chladičem $\theta_{JC}=1^{\circ}\text{C/W}$. Zesilovač vyžaduje chladič i když není na vstup přiváděn žádný signál a zesilovač tak není v provozu. Vzhledem k tomu že v této práci budou použity dva zesilovače na jeden kanál, které budou pracovat relativně nízko pod svými limitními možnostmi, tak nebude s chlazením žádný problém.

2.2.2 Paralelní zesilovač pro zátěž 4Ω

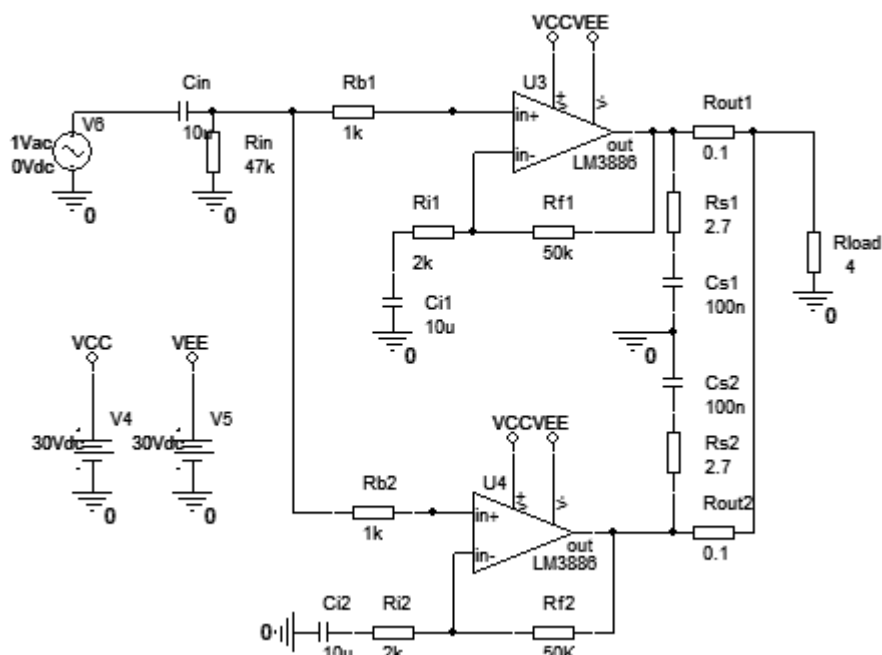


Obr. 2.2: Paralelní zapojení operačního zesilovače

Paralelní zapojení OZ se používá tehdy když je potřeba dodávat vyšší výkon do zátěže o nízké impedanci (4Ω a méně). Na Obr. 2.2 je uvedeno zjednodušené ideové zapojení. Jedná se o dva naprosto shodné zesilovače se zápornou zpětnou vazbou. Výstupní napětí je stejné jako u jednoho samostatného zesilovače, ale výstupní proud z jednotlivých zesilovačů je poloviční. Díky tomu dojde k nižšímu výkonovému a tepelnému zatížení jednotlivých integrovaných obvodů, což je velká výhoda především při konstrukci chladiče.

Na obrázku 2.3 je konkrétní zapojení zesilovače o výstupním výkonu 75W do zátěže 4Ω , schéma je určeno především pro návrh a simulaci, proto není úplně kompletní. Chybí zde například přivedení napájecího napětí na pin mute, u zdrojů nejsou zařazeny filtrační kondenzátory apod. Jedná se o upravené doporučené zapojení výrobce zesilovače LM3886 s katalogového listu součástky LM4780 (což jsou dva LM3886 v jednom pouzdře)[4].

Na vstupu koncového stupně je zařazen kondenzátor C_{IN} blokující stejnosměrné napětí a rezistor R_{IN} , který nastavuje vstupní odpor koncového stupně. Rezistory R_f a R_i zapojené v neinvertujícím vstupu tvoří zápornou zpětnou vazbu a nastavují napěťové zesílení. Dále je ve zpětné vazbě zapojen kondenzátor C_i , který společně s rezistorem R_i určuje dolní mezní kmitočet zesilovače. Na výstupu zesilovače je zapojena seriová kombinace rezistoru R_s a kondenzátoru C_s , které tvoří tzv. Boucherotův člen. Ten má za úkol korigovat kapacitní charakter zátěže aby byl stále přibližně konstantní čímž přispívá k frekvenční stabilitě zesilovače. Ochranné rezistory R_{out} snižují proud mezi výstupy propojených zesilovačů, který by mohl vzniknout v případě stejnosměrného napěťového offsetu, nebo v případě nevyrovnaného zesílení jednotlivých zesilovačů.



Obr. 2.3: Zapojení koncového stupně se zátěží 4Ω

Výpočet některých součástí zesilovače

Protože mezi zesilovačem a zátěží jsou zařazeny ochranné rezistory a několik spínačů, tak bude pro výpočty zátěž zvýšena o 0,35Ω, může se to zdát jako zanedbatelné, ale při simulacích bylo zjištěno že u nízkoohmové zátěže v paralelním zapojení zesilovačů je potřeba při návrhu uvažovat i tyto prvky.

Výstupní napětí (efektivní hodnota) (viz.[7]):

$$P_{out} = \frac{U^2}{R_{load}} \Rightarrow U = \sqrt{P_{out} \cdot R_{load}} = \sqrt{75 \cdot 4,35} = 18,1 \text{ V} \quad (1)$$

Výstupní napětí (amplituda):

$$U_m = 1,414 \cdot U = 1,414 \cdot 18,1 = 25,6 \text{ V} \quad (2)$$

Z praktických důvodů je amplituda zaokrouhlena na 26V čímž se zvýší výstupní výkon přibližně na $P_{out}=78\text{W}$ (jedná se o hodnotu před ztrátou na ochranných prvcích, která činí asi 3W).

Zesílení zesilovače při vstupní citlivosti 1V odpovídá U_m a vypočítá se (viz. [3]):

$$A_U = 1 + \frac{R_f}{R_i}; A_u = 26 \Rightarrow R_f = 50\text{k}\Omega, \quad R_i = 2\text{k}\Omega \quad (3)$$

$$A_{u_{dB}} = 20 \cdot \log A_U = 28,3 \text{ dB} \quad (4)$$

Výpočet dolního mezního kmitočtu:

$$f_D = \frac{1}{2\pi \cdot C_i \cdot R_i} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 2000} = 8\text{Hz} \quad (5)$$

Výpočet napájecího napětí (viz. [3]):

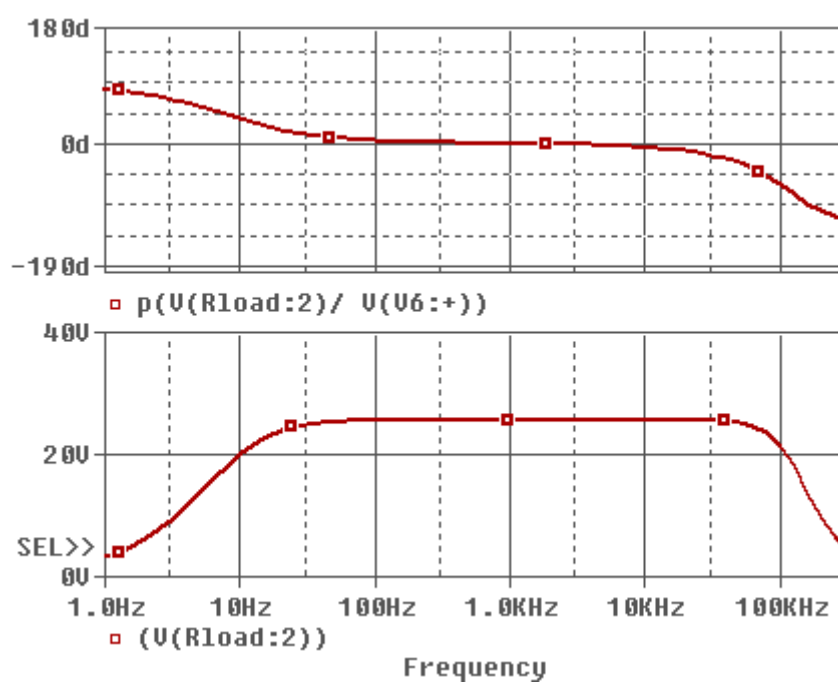
$$U_{CC} = \pm(U_m + V_{od}) = \pm(26 + 4) = \pm 30V \quad (6)$$

Maximální proud do zátěže (viz. [3]):

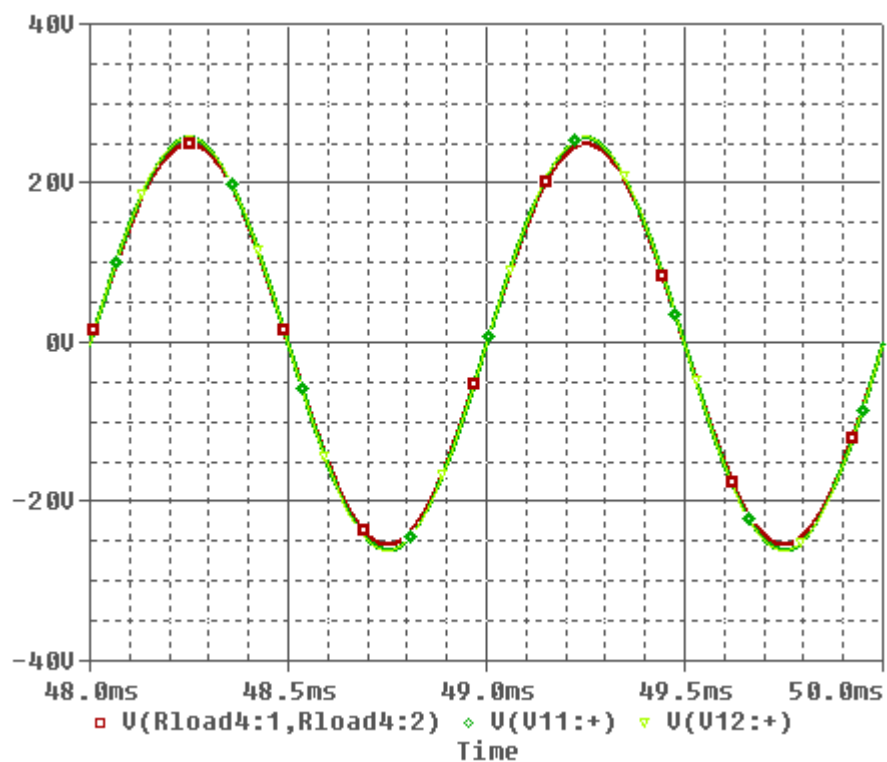
$$I_m = \frac{U_m}{R_{load}} = \frac{26}{4} = 6,5 A \quad (7)$$

Tato hodnota se rozdělí mezi oba zesilovače a každý bude dodávat přibližně 3A.

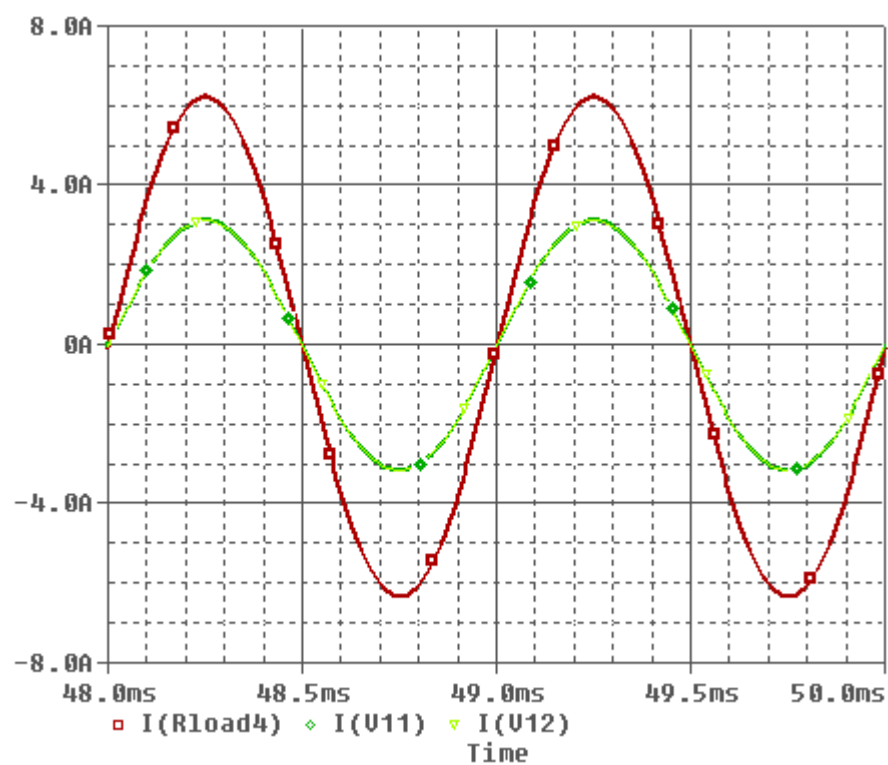
Výsledky simulací v programu Pspice



Obr. 2.4: Frekvenční a fázová charakteristika paralelního koncového stupně



Obr. 2.5: Průběhy napětí na výstupu paralelního zesilovače



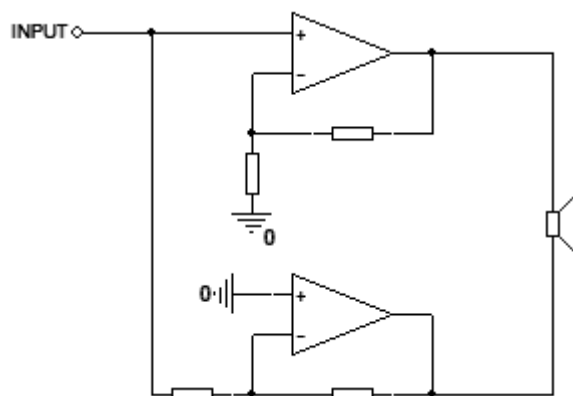
Obr. 2.6: Průběhy proudu na výstupu paralelního zesilovače

Šířka pásma pro pokles o 1dB změřená pomocí kurzorů při simulaci viz. Obr. 2.4 je přibližně 16Hz – 87kHz.

Z Obr. 2.5 je vidět že výstupní napětí zesilovačů je naprosto shodné. Podle vzorců (1) a (2) lze z odečteného napětí vypočítat výstupní jmenovitý výkon zesilovače, který vychází $P_{out}=81W$.

Na Obr. 2.6 jsou zobrazeny průběhy výstupních proudů jednotlivých zesilovačů a jejich součet což je celkový proud zátěží, ten dosahuje amplitudy $I_m=6,3A$.

2.2.3 Můstkový zesilovač pro zátěž 8Ω

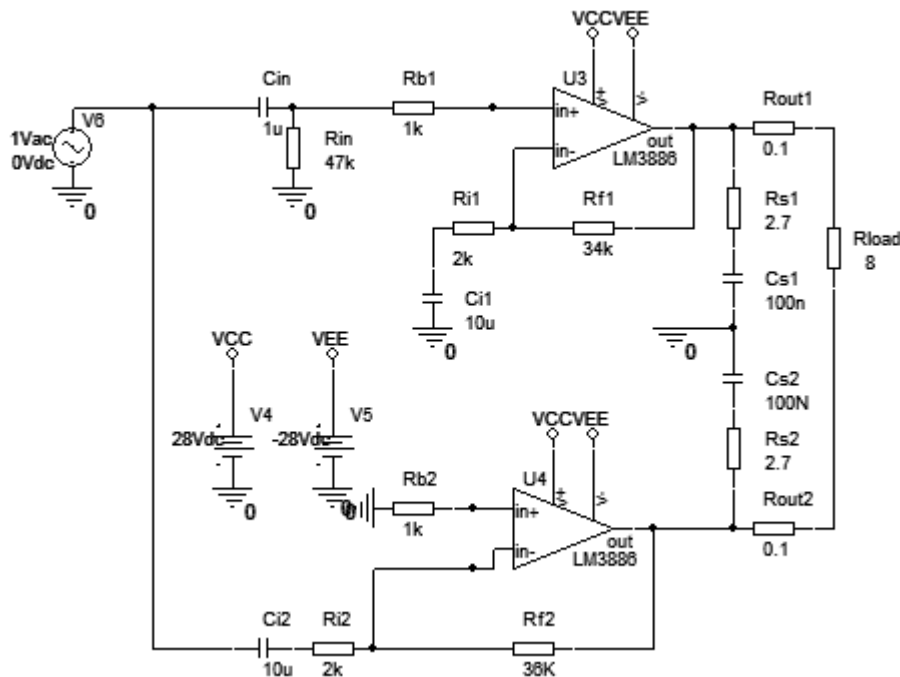


Obr. 2.7: Můstkové zapojení operačního zesilovače

Můstkový zesilovač (obrázek 2.7) se využívá při potřebě dodávat vysoký výkon do zátěže o vyšší impedanci (zde 8Ω , případně více). Oproti paralelnímu zapojení nejsou zesilovače zapojeny úplně stejně, ale první je neinvertující a druhý invertující, takže pracují s opačnou fází. Když se na vstup přivede kladná půlperioda, tak na výstupu prvního zesilovače bude také kladná půlperioda. Naopak na výstupu druhého zesilovače se objeví záporná půlperioda. Výsledný rozdíl potenciálu na zátěži bude odpovídat dvojnásobku výstupního napětí jednotlivých zesilovačů a zátěží bude protékat odpovídající proud (v tomto případě z prvního zesilovače do druhého).

Zjednodušeně se dá říct že zesilovače jsou zapojeny v serii, takže se jejich výstupní napětí sčítají a výstupní proud je u obou stejný. Výsledná výstupní impedance tohoto zesilovače je dvojnásobná oproti jednomu zesilovači. Pokud se na výstup připojí zátěž o nízké impedanci, tak výrazně vzroste výstupní proud a může dojít k výkonovému přetížení zátěže (zničení reproduktoru).

Na Obr. 2.8 je uvedeno konkrétní zapojení koncového stupně v můstkovém provedení, které vychází z doporučení výrobce [4]. Signál je na vstupy neinvertujícího zesilovače přiváděn přes oddělovací kondenzátor C_{in} , který blokuje stejnosměrné napětí a přes vstupní odpor R_{in} . Zápornou zpětnou vazbu nastavují rezistory R_{f1} a R_{i1} podle vzorce (10). Dále je ve zpětné vazbě zapojen kondenzátor C_{i1} , který společně s odporem R_{i1} nastavuje dolní mezní kmitočet zesilovače (5). Stejně jako u paralelního zapojení v odstavci 2.2.2 je na výstupu zapojen tzv. Boucherotův člen a ochranný rezistor R_{out} . Na vstup invertujícího zesilovače přichází signál přes zpětnovazební kondenzátor C_{i2} a rezistor R_{i2} , které nastavují stejný dolní mezní kmitočet jako u neinvertujícího zesilovače. Zpětná vazba rezistorů R_{i2} a R_{f2} určuje zesílení zesilovače podle vzorce (11). Toto zesílení se musí naprosto shodovat se zesílením neinvertujícího zesilovače. Ochranné součástky na vstupu i výstupu jsou shodné jako v předchozím případě.



Obr. 2.8: Schéma zesilovače s výkonem 75W do zátěže 8Ω

Výpočet některých součástí zesilovače

Výstupní napětí (efektivní hodnota) (viz.[7]):

$$P_{out} = \frac{U^2}{R_{load}} \Rightarrow U = \sqrt{P_{out} \cdot R_{load}} = \sqrt{75 \cdot 8} = 24,5 V \quad (8)$$

Výstupní napětí (amplituda):

$$U_m = 1,414 \cdot U = 1,414 \cdot 24,5 = 34,6 V \quad (9)$$

Z praktických důvodů je amplituda zaokrouhlena na $U_m = 36V$ čímž se zvýší výstupní výkon na $P_{out} = 81W$.

Jak bylo popsáno v teoretickém popisu funkce můstkového zesilovače, tak se výstupní napětí na zátěži sčítá z výstupních napětí jednotlivých zesilovačů, takže požadovaná amplituda každého zesilovače je poloviční, tedy $U_{m1} = U_{m2} = 18V$. Zesílení zesilovače $A_{U1,2}$ při vstupní citlivosti 1V odpovídá $U_{m1,2}$ a vypočítá se:

Neinvertující zesilovač (viz. [3]):

$$A_{U1} = 1 + \frac{R_{f1}}{R_{i1}}; A_{U1} = 18 \Rightarrow R_{f1} = 34k \Omega, \quad R_{i1} = 2k \Omega \quad (10)$$

Invertující zesilovač (viz. [3]):

$$A_{U2} = -\frac{R_{f2}}{R_{i2}}; A_{U2} = 18 \Rightarrow R_{f2} = 36k \Omega, \quad R_{i2} = 2k \Omega \quad (11)$$

Celkové zesílení můstkového zesilovače:

$$A_U = 2 \cdot A_{U1} = 2 \cdot 18 = 36 \quad (12)$$

$$A_{UdB} = 20 \cdot \log A_U = 31 \text{ dB} \quad (13)$$

Výpočet napájecího napětí (viz. [3]):

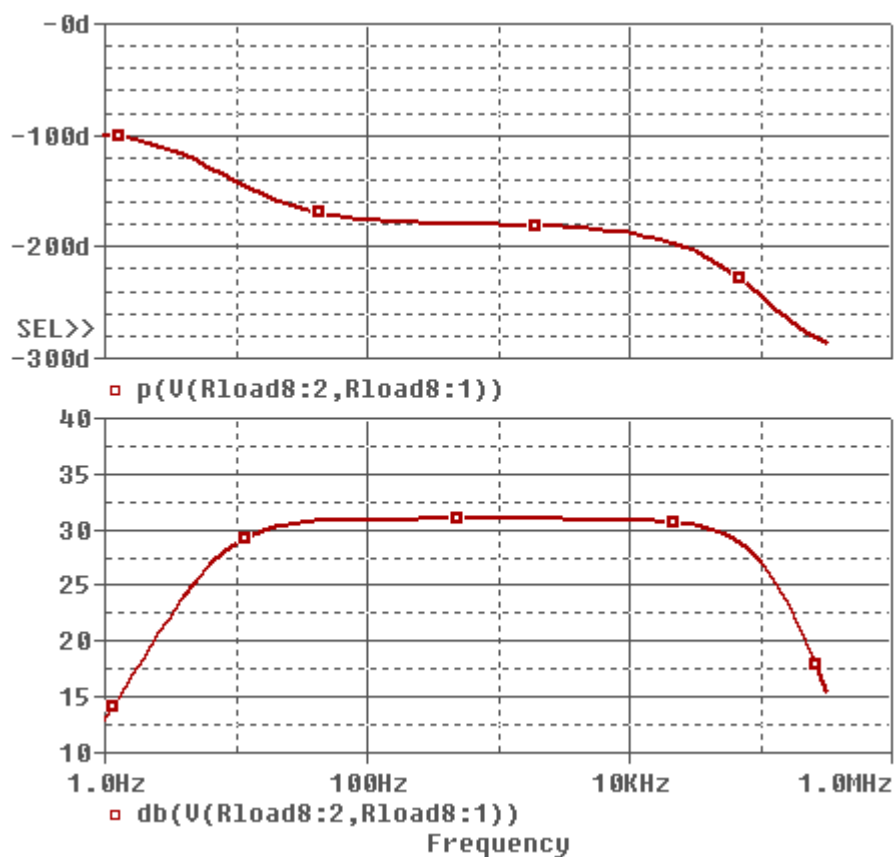
$$U_{CC} = \pm(U_{m1,2} + U_{od}) = \pm(18 + 4) = \pm 22 \text{ V} \quad (14)$$

Napájecí napětí bude nastaveno podle požadavků paralelního zesilovače (vzorec (6)), tedy $\pm 30 \text{ V}$.

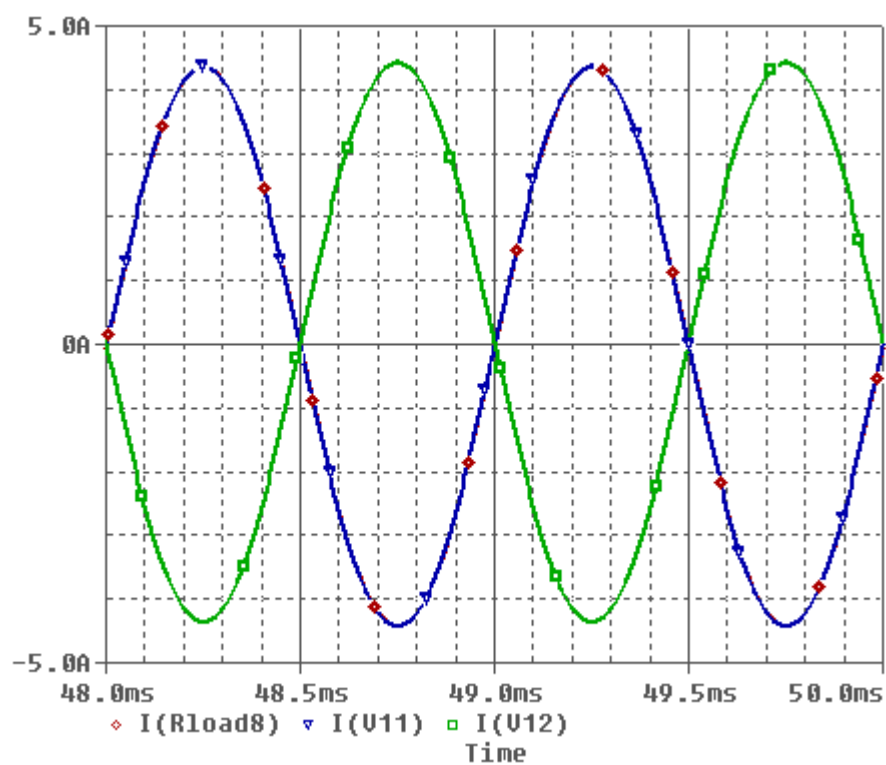
Maximální proud do zátěže (viz. [3]):

$$I_m = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{out}}{R_{load}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 81}{4}} = 4,5 \text{ A} \quad (15)$$

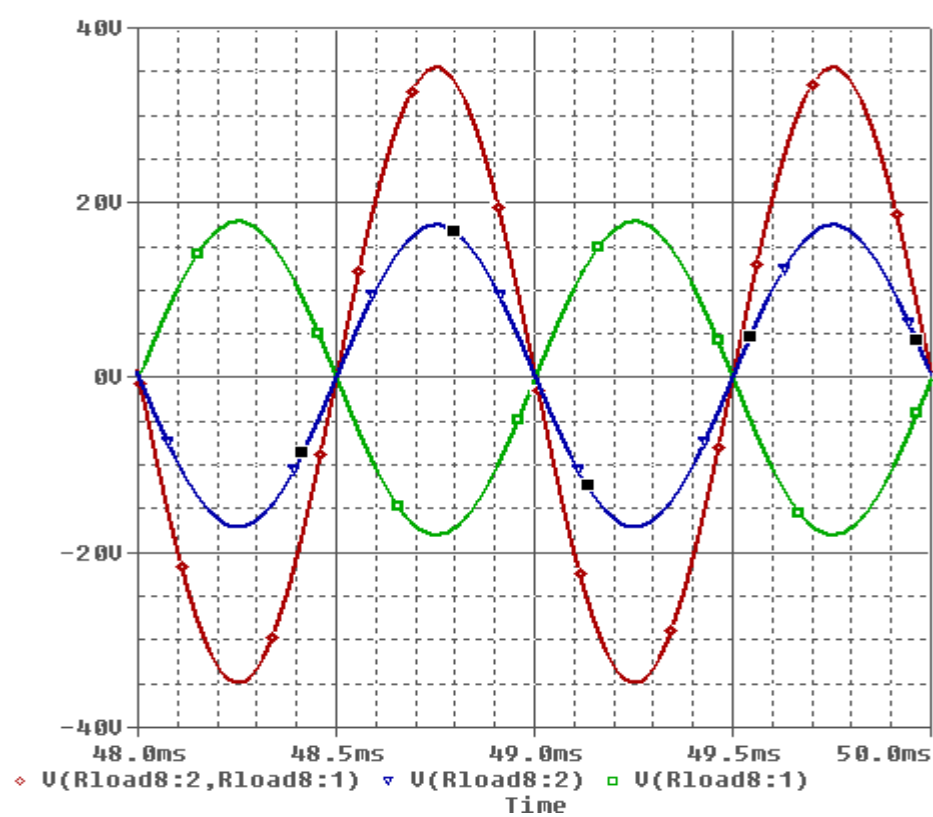
Výsledky simulací v programu Pspice



Obr. 2.9: Frekvenční a fázová charakteristika můstkového zesilovače



Obr. 2.10: Průběhy proudu na výstupu můtkového zesilovače



Obr. 2.11: Průběh napětí na výstupu můtkového zesilovače

Šířka pásma pro pokles napětí o 1dB odečtená kurzory ze simulace na Obr. 2.9 je 16Hz – 46kHz.

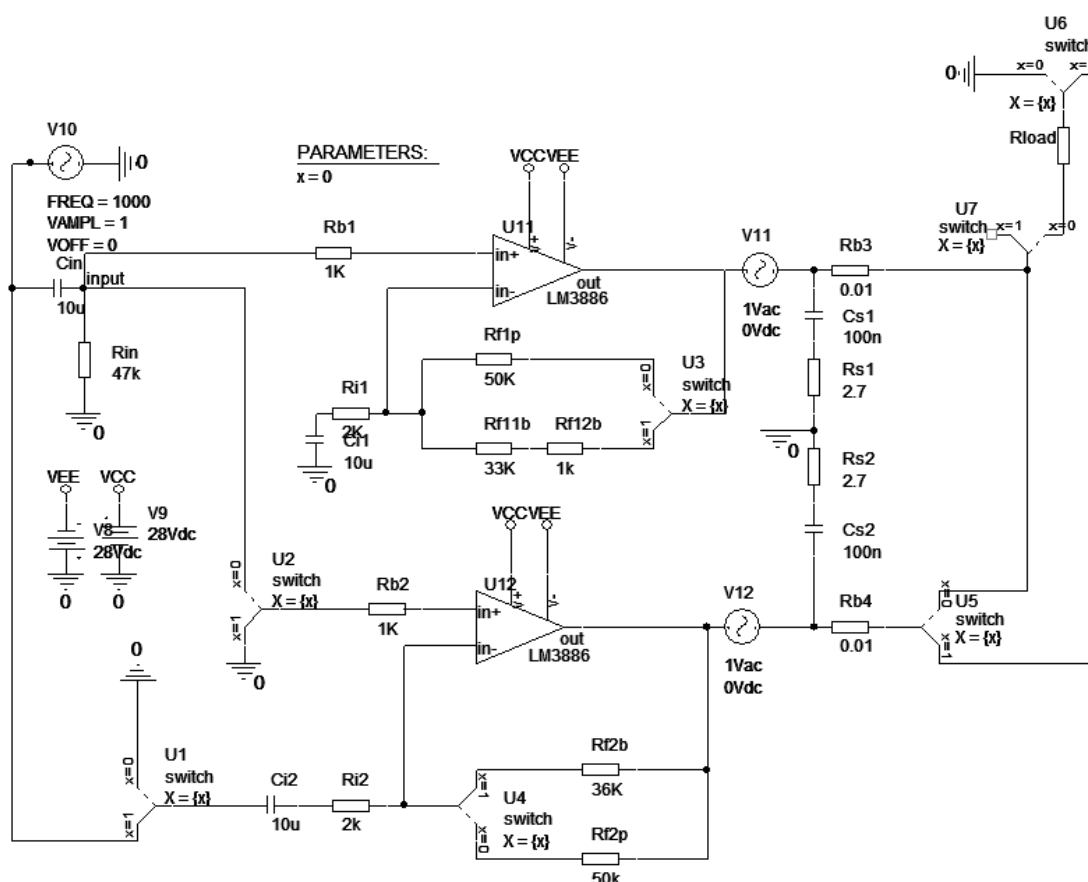
Z Obr. 2.10 je zřejmé že proudy protékající jednotlivými zesilovači i zátěží mají stejnou velikost, $I_m=4,4A$.

Na Obr. 2.11 jsou zobrazeny průběhy napětí na výstupu jednotlivých zesilovačů a jejich rozdíl, který vytváří napětí na zátěži. Z odečtené amplitudy napětí na zátěži se podle vzorců (8) a (9) vypočítá výstupní jmenovitý výkon 78W.

2.2.4 Zapojení přepínatelného zesilovače pro zátěž 4Ω a 8Ω

Vzhledem k nápadné (a záměrné) podobnosti zapojení paralelního a můstkového zesilovače je konstrukčně relativně jednoduché vyřešit přepínání mezi těmito zesilovači při použití stejných součástek, způsob jakým je toho dosaženo je na Obr. 2.9. Celkem je k tomu potřeba 7 přepínačů, řešených pomocí tří relé (4+2+1). Přepínače U1-U4 přepínají vstupy zesilovačů a zpětnou vazbu zesilovačů a tím mění jejich zesílení podle potřeby. Tyto první čtyři přepínače jsou ovládány prvním relé. Přepínače U5 a U7 mění připojení zátěže k zesilovačům a jsou ovládány druhým relé. Přepínač U6 zajišťuje zpožděné připojení reproduktorů.

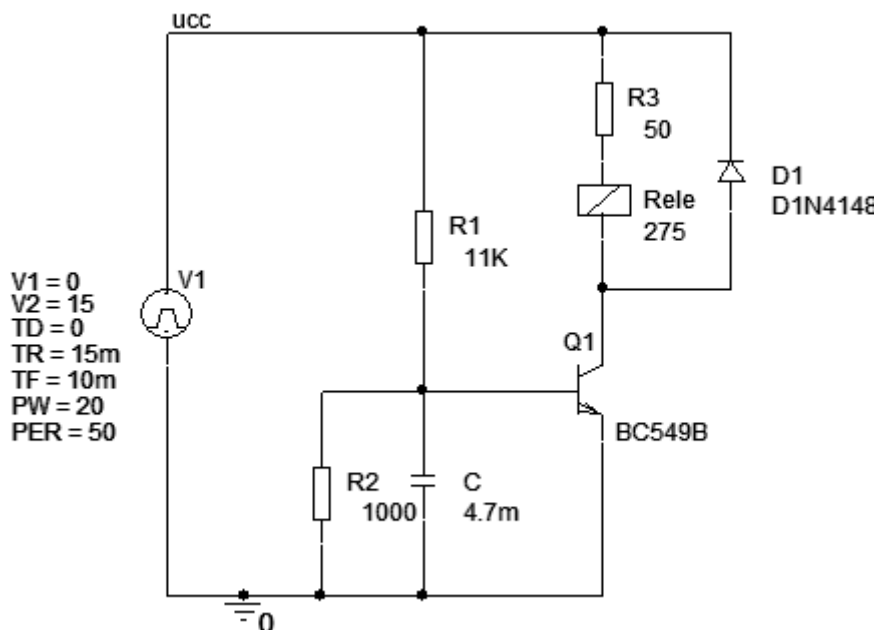
Přepínatelné zpětnovazební odpory jsou označeny indexy p a b podle toho jestli patří k paralelnímu, nebo můstkovému (bridge) zapojení. U přepínačů náleží kontakt x=0 k paralelnímu zapojení a kontakt x=1 k můstkovému zapojení.



Obr. 2.12: Zapojení koncového stupně

2.2.5 Obvod pro zpožděné připojení reproduktorů

Při zapnutí zesilovače dochází v zesilovači k přechodovému jevu (nabíjení kondenzátorů a ustálení pracovního bodu), který se projeví typickým lupnutím reproduktorů, které kromě toho že je nepříjemné může způsobit jejich poškození. K podobnému efektu jako při zapnutí může docházet i při vypnutí zesilovače (vybíjení kondenzátorů) [1]. Proto je reproduktor připojen přes reléový spínač, který se spíná se zpožděním a zároveň umožňuje rychlé odpojení reproduktorů.



Obr. 2.13: Obvod pro zpožděné připojení reproduktorů

Obvod je napájen stabilizovaným napětím $U_{CC}=15V$ (ve schématu na Obr. 2.13 je místo zdroje a spínače použit pro potřeby návrhu a simulace pulsní napájecí zdroj). Přes odporový dělič R_1 R_2 , který snižuje napájecí napětí na $U_0=1,25V$ se nabíjí kondenzátor C . Až se kondenzátor po pěti sekundách nabije na hodnotu napětí U_{BE} , tak se tranzistor otevře a cívkou relé začne protékat proud, napětí a proud relé jsou sníženy pomocí rezistoru R_3 . Při odpojení napájecího napětí se relé okamžitě zavře. Dioda připojená paralelně k cívce relé má za úkol pohltit napěťovou špičku, která vznikne na cívce při odpojení a mohla by poškodit tranzistor.

Výpočet součástek obvodu

$$U_{CC}=15V, U_{REL}=12V, R_{REL}=275\Omega, I_{REL}=44mA, h_{21e}=350, U_{BE}=0,8V$$

Ochranný rezistor R_3 :

$$R_3 = \frac{U_{CC} - (U_{REL} + U_{BE})}{I_{REL}} = \frac{15 - (12 + 0,8)}{0,044} = 50\Omega \quad (16)$$

Proud děličem I_D : (měl by být výrazně větší než proud do báze)

$$I_D > \frac{10 \cdot I_{REL}}{h_{21e}} = \frac{10 \cdot 0,044}{350} = 1,25mA \quad (17)$$

$$R_1 = \frac{(U_{CC} - U_{BE})}{I_D} = 11360 \Rightarrow 11K \Omega \quad (18)$$

$$R_2 > \frac{U_{BE}}{I_D} = 640 \Omega \Rightarrow 1K \Omega \quad (19)$$

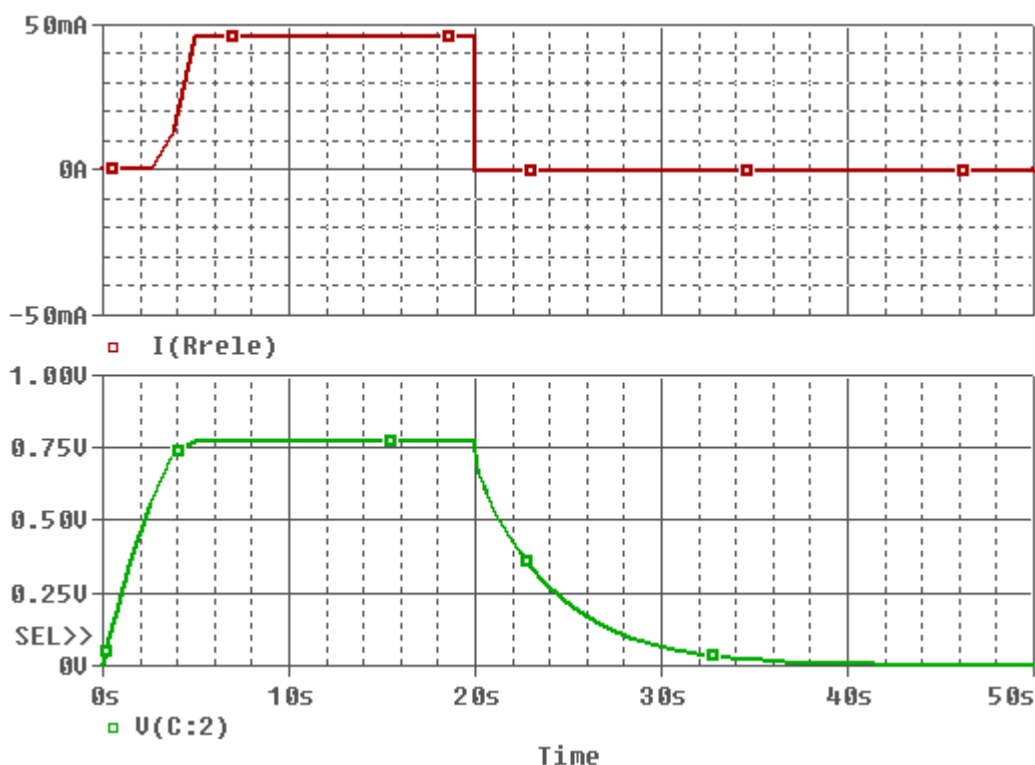
Rezistor R_2 je zvolen tak aby dělič měl výstupní napětí naprázdno $U_0 = 1,25V$ což zaručí dostatečnou rezervu pro otevření tranzistoru.

Výpočet kondenzátoru

$$U_c(t) = U_0 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}\right) \quad (20)$$

$$\tau = \frac{-t}{\ln\left(1 - \frac{U_c(t)}{U_0}\right)} = \frac{-5}{\ln\left(1 - \frac{0,8}{1,25}\right)} = 4,89s \quad (21)$$

$$C = \frac{\tau}{R_2} = \frac{4,89}{1000} = 4,89mF \Rightarrow 4,7mF \quad (22)$$



Obr. 2.14: Časový průběh napětí na kondenzátoru a proudu cívkou relé

Na Obr. 2.14 je zobrazen průběh nabíjení kondenzátoru po připojení napájecího napětí v čase 0s. Je vidět že na napětí U_{BE} se kondenzátor nabije po 5ti sekundách což způsobí otevření tranzistoru a průtok proudu přes cívku relé. Při odpojení napájení v čase 20s se relé okamžitě uzavře a kondenzátor se začne vybíjet přes odpor R_2 , to trvá přibližně 20s.

2.2.6 Návrh chladiče

Chlazení výkonových zesilovačů je velmi důležité pro jejich správnou a bezpečnou funkci. I přesto, že integrované zesilovače LM3886 jsou vybaveny řadou ochranných včasných tepelných, tak není možné chlazení podcenit. Vyrábějí se v provedení s izolovaným i neizolovaným pouzdrem. Izolované má samozřejmě o něco horší tepelné vlastnosti, ale nejedná se o nijak zásadní rozdíl oproti izolačním podložkám, výsledný tepelný odpor je srovnatelný, ale s izolovaným pouzdrem je konstrukce o něco jednodušší.

Maximální výkonová ztráta zesilovačů v můstkovém (resp. paralelním) zapojení dle uvedených zapojení při napájení $U_{CC}=30V$ je za nejhorších podmínek 10W na jedno pouzdro [3], tedy celkem $P_{DMAX} = 40W$ na celý zesilovač.

Dle katalogového listu LM3886TF je maximální povolená teplota na čipu $T_{max}=150^{\circ}C$ při které se zapíná tepelná ochrana. Tepelný odpor přechod – pouzdro je $\Theta_{JC}=1K/W$. K tomu je třeba připočítat tepelný odpor pro pouzdro – chladič $\Theta_{CH}=0.2K/W$ při použití teplovodivé pasty.

Pokud budeme uvažovat okolní teplotu $T_0=40^{\circ}C$, tak lze tepelný odpor chladiče vypočítat:

$$\theta_H = \frac{T_{max} - T_0}{P_{DMAX}} - \theta_{JC} - \theta_{CH} = \frac{110}{40} - 1 - 0,2 = 1,55 K/W \quad (23)$$

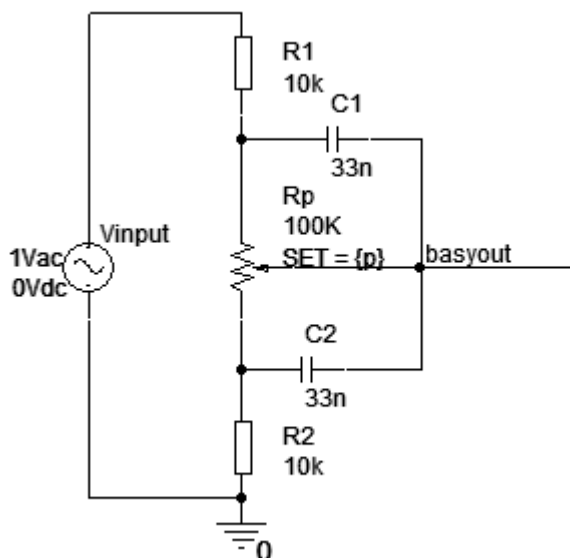
Pro chlazení zesilovače bude použit standardně vyráběný chladič z hliníkového profilu o odpovídajícím tepelném odporu.

2.3 Předzesilovač

Korekční předzesilovač slouží k úpravě signálu před výkonovým zesílením. V předchozím bodu 2.2 byl navržen koncový zesilovač s citlivostí 1V, z toho je zřejmé že jmenovité výstupní napětí předzesilovače bude právě 1V. Předzesilovač se skládá z několika částí, zjednodušeně se dá rozdělit na pasivní a aktivní část. V pasivní části se nachází korekční filtry, které slouží ke zdůraznění, případně potlačení výšek a basů. V aktivní části je zapojen zesilovač sloužící k nastavení hlasitosti a nízkovýkonový koncový stupeň s výstupem na sluchátka.

2.3.1 Korektor hloubek

Na Obr. 2.15 je uvedeno schéma zapojení pasivního obvodu pro zdůraznění nebo potlačení nízkých frekvencí. Schéma je převzato z [5] a následně upraveno.



Obr. 2.15: Korektor hloubek

Na vysokých a středních frekvencích způsobí kondenzátory vyzkratování potenciometru, čímž vznikne jednoduchý odporový dělič. Pomocí odporů R_1 a R_2 se tedy nastavuje přenos filtru na vysokých frekvencích podle vzorce

$$A_U = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (24)$$

Je vhodné nastavit přenos $A_U=0,5$, což znamená $R_1=R_2$. Na nízkých frekvencích se postupně začíná projevovat reaktance kondenzátorů a přenos je určen nastavením potenciometru. Pokud bude potenciometr v první krajní poloze (blíže ke vstupní svorce) bude přenos korektoru pro signál s nulovou nebo velmi nízkou frekvencí

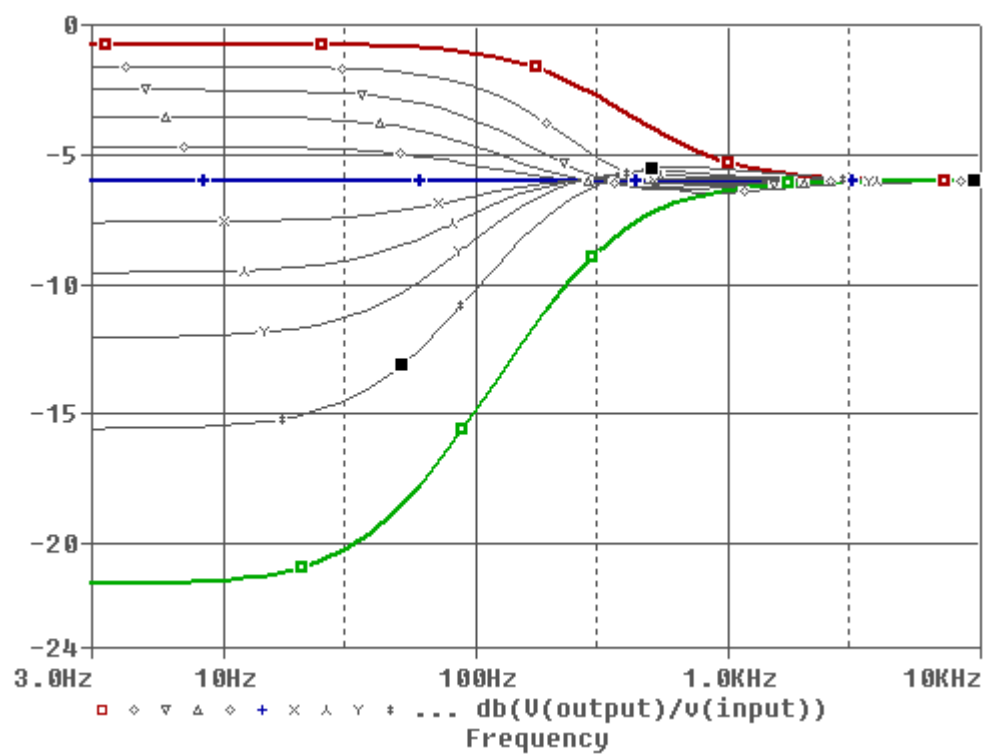
$$A_U = \frac{R_2 + R_p}{R_1 + R_2 + R_p} \quad (25)$$

což při hodnotě potenciometru desetkrát vyšší než je hodnota rezistorů R_1 a R_2 znamená přenos přibližně 0,9. Pokud bude potenciometr v druhé krajní poloze (blíže k zemi), tak se změní přenos korektoru na

$$A_U = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_p} \quad (26)$$

a zde je přenos roven přibližně 0,08.

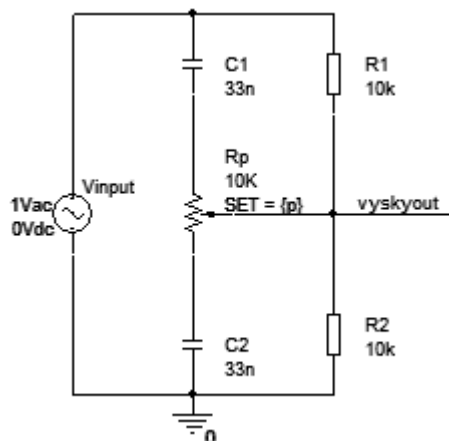
Velikost kondenzátorů závisí na požadované frekvenci filtru, zde byli přibližně vypočítány pomocí vzorce (5) a upraveny při počítačových simulacích. Na Obr. 2.16 je zobrazen výsledek simulace tohoto korektoru. Jedná se o přenosovou charakteristiku v závislosti na nastavení potenciometru R_p .



Obr. 2.16: Přenosová charakteristika hloubkového korektoru

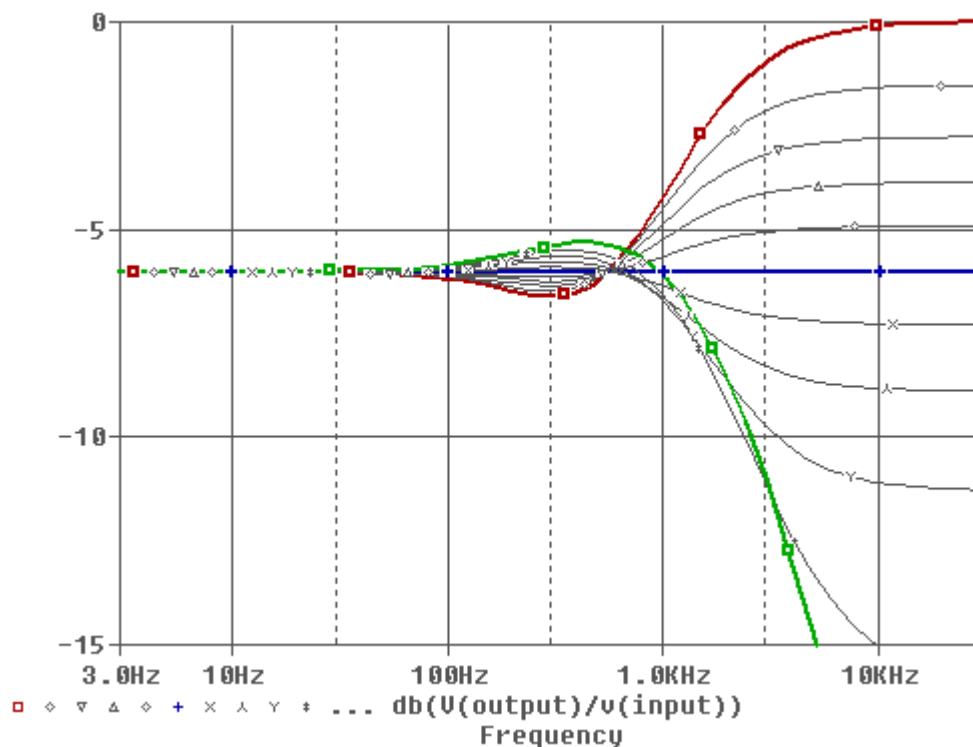
2.3.2 Výškový korektor

Výškový korektor funguje obdobně jako hloubkový korektor, schéma zapojení je uvedeno na Obr. 2.17 a opět principiálně pochází z [5].



Obr. 2.17: Korektor výšek

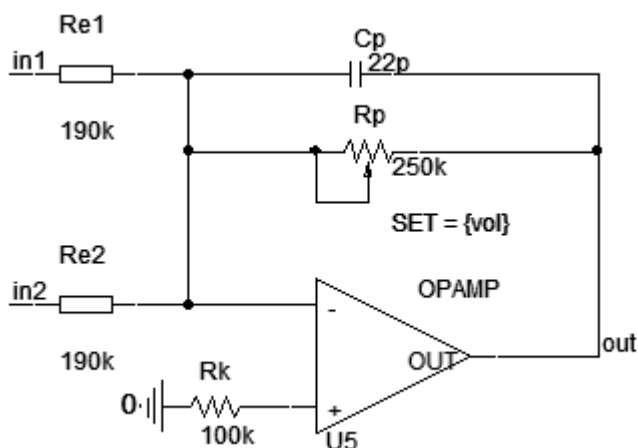
kondenzátory představují pro nízké kmitočty vysokou impedanci čímž „odpojí“ potenciometr, takže vzniká jednoduchý odporový dělič jehož přenos se vypočítá podle vzorce (24). Na vysokých kmitočtech se přes kondenzátory začne signál dostávat i k potenciometru, na kterém postupně bude záviset přenos korektoru. Při plném vytočení potenciometru do první krajní polohy (blíže ke vstupnímu uzlu) dojde k vyzkratování odporu R_1 a přenos bude pro vysoké frekvence přibližně roven $A_U=1$. Při plném vytočení potenciometru do druhé krajní polohy (blíže k zemi) dojde k vyzkratování výstupu a přenos bude roven $A_U=0$. Při simulacích bylo zjištěno že vzhledem k paralelnímu spojení potenciometru a odporů je vhodné aby potenciometr měl podobnou hodnotu jako odpory, protože to má pozitivní vliv na „citlivost“ regulace. Na Obr. 2.18 je zobrazena přenosová charakteristika výškového korektoru v závislosti na poloze jezdce potenciometru. Na výsledku simulace je vidět zvlnění frekvenční charakteristiky na středních kmitočtech, není to ale žádný velký problém. Zprv je toto zvlnění výrazné především v krajních polohách potenciometru a dá se předpokládat že tyto krajní polohy nebudou příliš využívány. A zadruhé tímto potlačením/zdůrazněním středního pásma dojde ke zvýšení efektu potlačení/zdůraznění výšek.



Obr. 2.18: Přenosová charakteristika výškového korektoru

2.3.3 Zesilovač pro úpravu hlasitosti

Jedná se o součtový zesilovač viz. Obr. 2.19 na jehož vstup jsou přivedeny signály z obou dvou korektorů. Kromě součtu těchto signálů zesilovač plní funkci nastavení hlasitosti pomocí potenciometru ve zpětné vazbě. Zapojení součtového zesilovače je převzato z [1] a následně doplněno.



Obr. 2.19: Zesilovač pro úpravu hlasitosti

Vstupní signály jsou na invertující vstup přiváděny přes rezistory R_E , které musí být přibližně 10x vyšší než je výstupní odpor korektorů, aby nedocházelo k zatěžování korektoru a ovlivňování jeho frekvenční charakteristiky. Spolu s rezistory R_E je ve zpětné vazbě zapojen potenciometr R_P , kterým se nastavuje hlasitost celého zesilovače. Paralelně k potenciometru je zapojen kondenzátor C_P , který omezuje

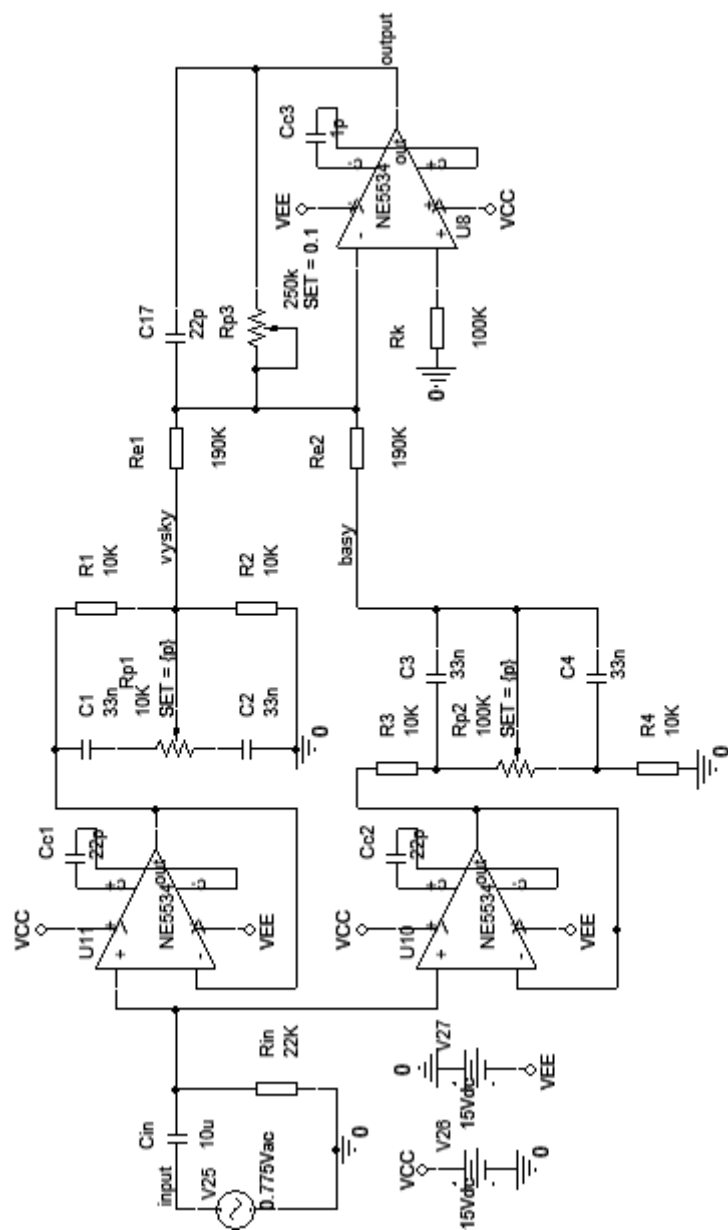
šířku pásma a potlačuje vysokofrekvenční rušení. Rezistor R_K slouží jako proudová kompenzace a jeho hodnota by měla být přibližně stejná jako paralelní kombinace R_E a R_P . Výstupní napětí součtového zesilovače se vypočítá

$$U_{OUT} = -\frac{R_P}{R_E} \cdot (U_{IN1} + U_{IN2}) \quad (27)$$

Kde U_{OUT} je napětí na výstupu zesilovače a má mít hodnotu $U_{OUT}=1V$, vstupní napětí při nulových korekcích je $U_{IN}=2 \times 0,38V$, takže podle vzorce (27) lze snadno vypočítat hodnoty rezistorů a potenciometru. $R_E=190k\Omega$ a $R_P=250k\Omega$.

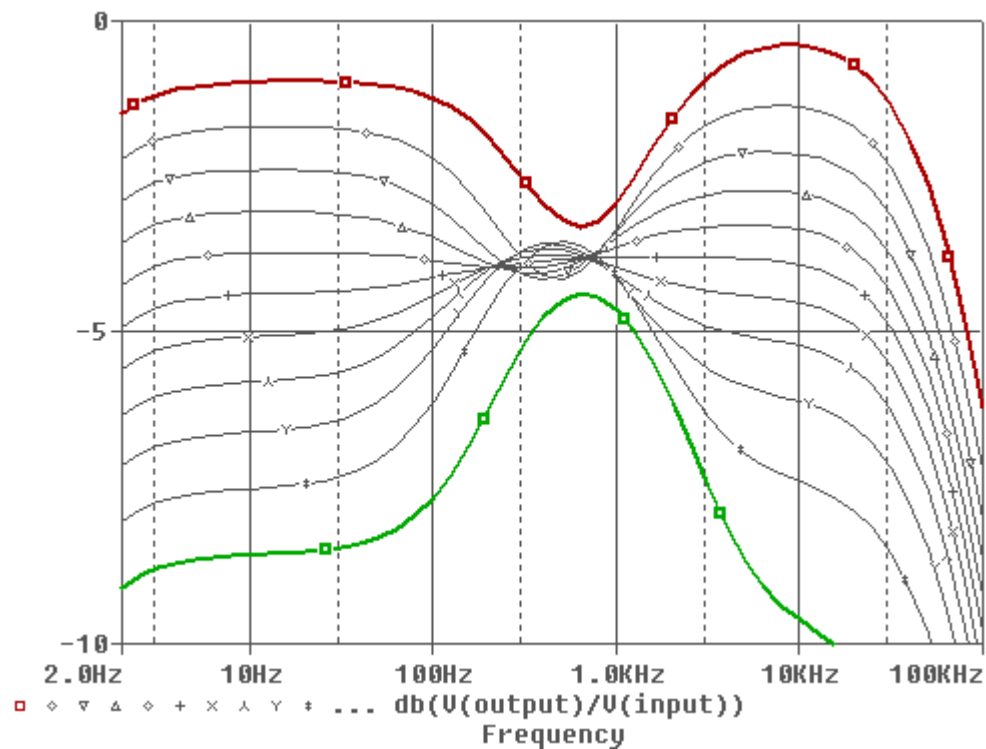
2.3.4 Kompletní zapojení předzesilovače

V zapojení na Obr. 2.20 je kompletní schéma předzesilovače, které kombinuje zapojení na obrázcích 2.15, 2.17 a 2.19. Na vstup předzesilovače je přiváděn signál ze vstupního zesilovače který má linkovou úroveň 0,775V. Na vstupu je zapojen vazební kondenzátor C_{IN} , který zabraňuje pronikání případné stejnosměrné složky. Na vstupy korektorů je signál přiváděn přes napěťové sledovače, které slouží jako impedanční přizpůsobení a oddělení obou korektorů, které by se jinak vzájemně ovlivňovaly. K realizaci předzesilovače jsou použity kvalitní nízkošumové operační zesilovače NE5534 od Texas Instruments, podle doporučení výrobce jsou na kompenzačních svorkách těchto OZ zapojeny kompenzační kondenzátory o hodnotě $C_c=22pF$. [2]

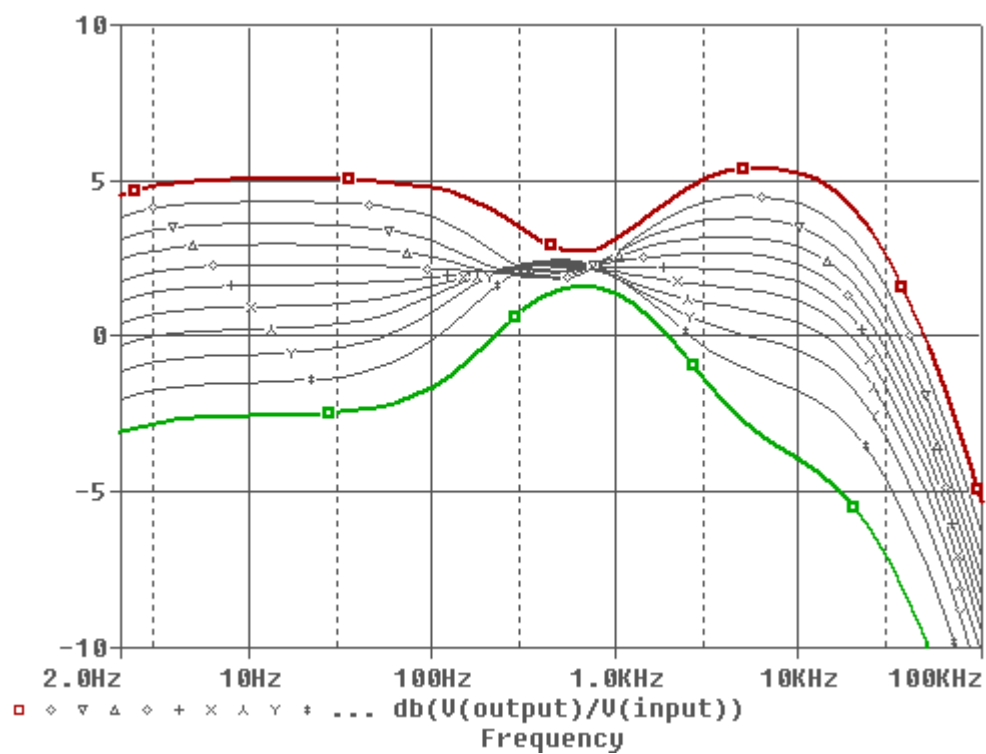


Obr. 2.20: Předsilovač

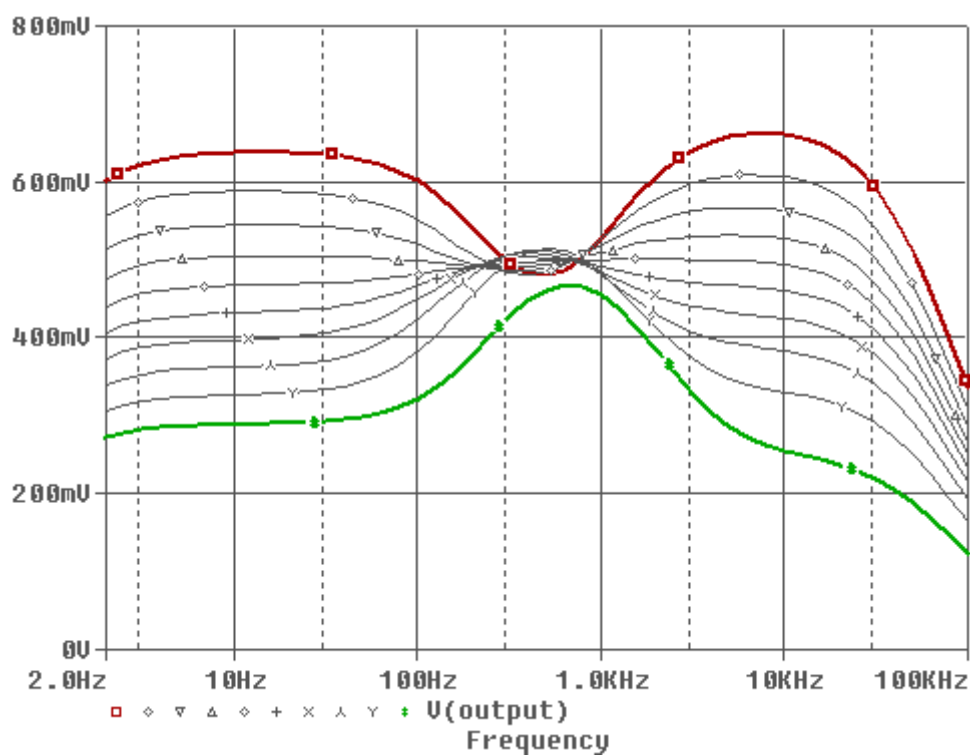
2.3.5 Simulace předzesilovače v Pspice



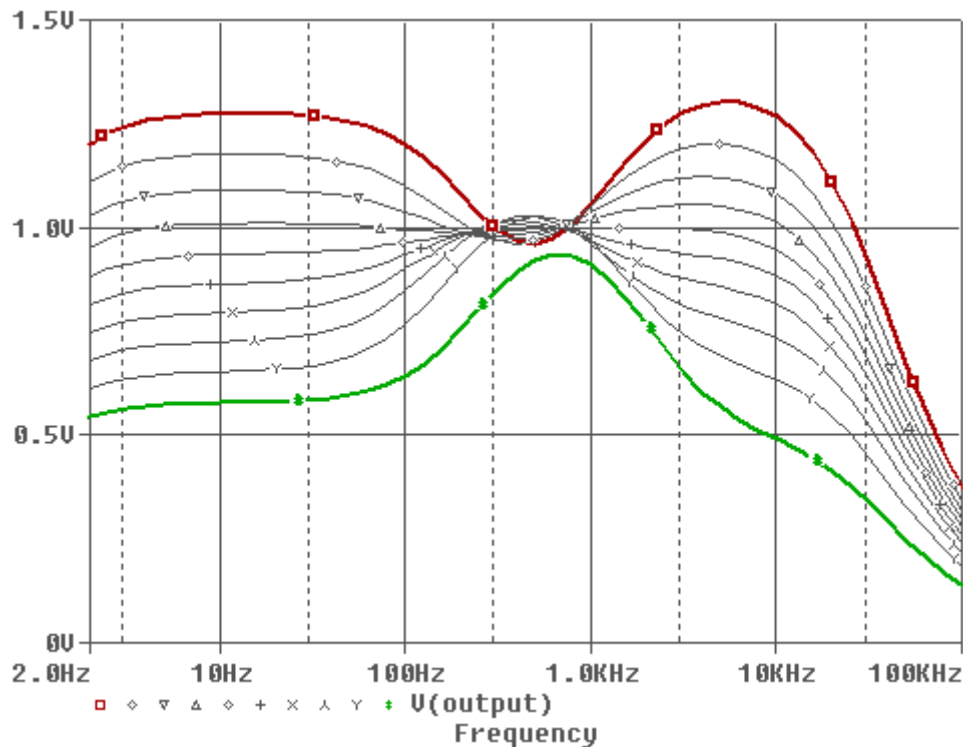
Obr. 2.21: Frek. char. předzesilovače v závislosti na korekcích, hlasitost=50%



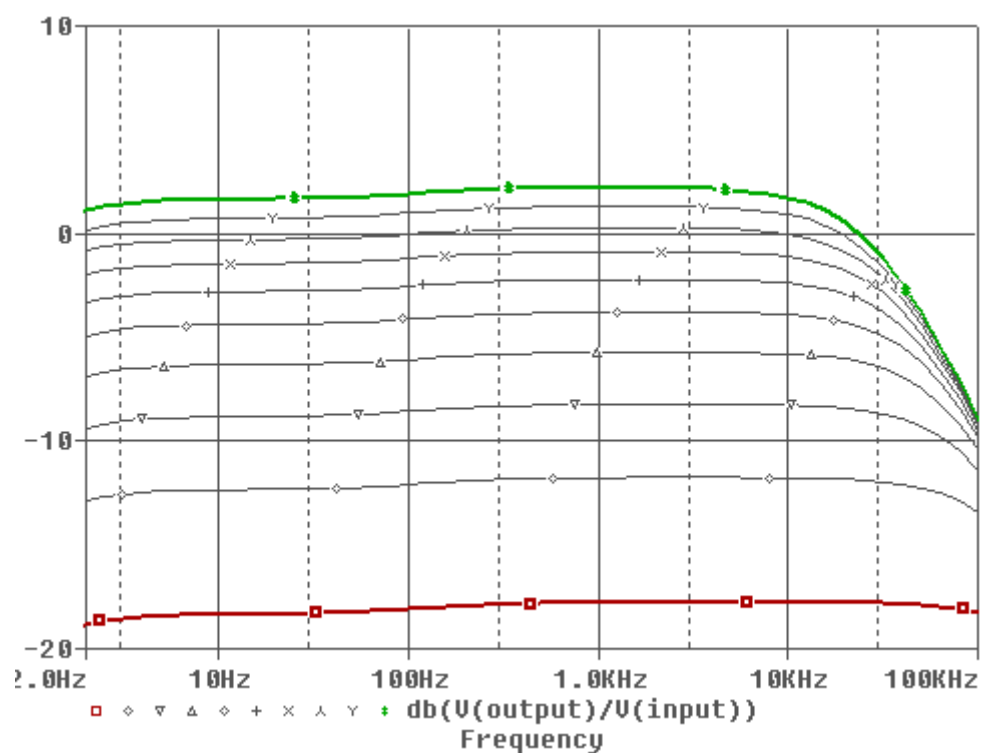
Obr. 2.22: Frek. char. předzes. v závislosti na korekcích, hlasitost=100%



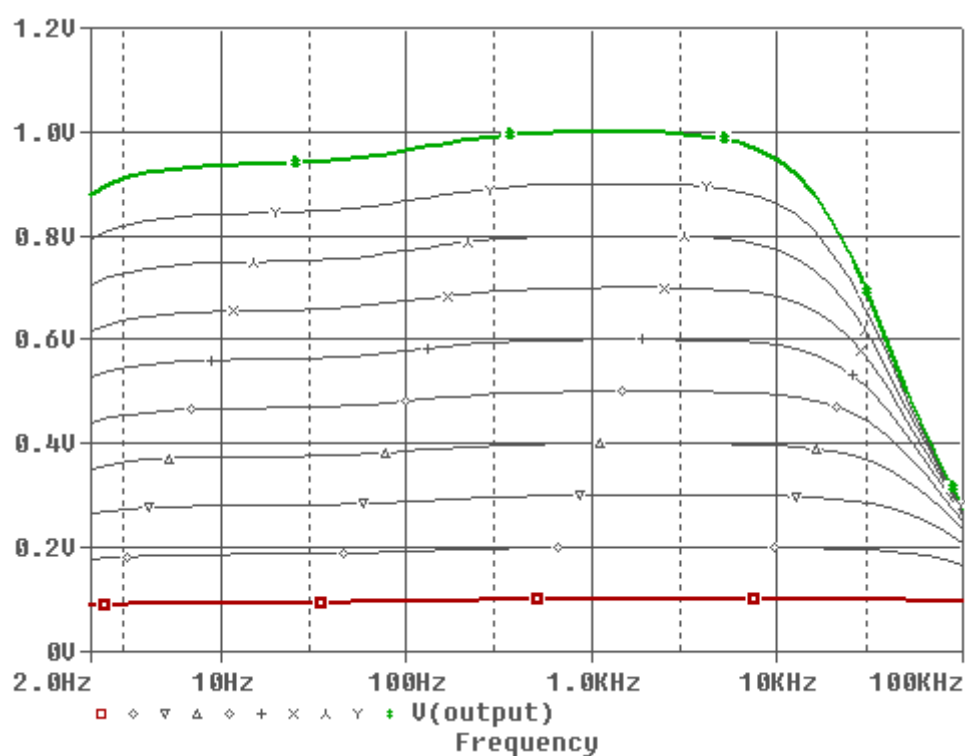
Obr. 2.23: Výstupní napětí předzes. v závislosti na korekcích, hlasitost=50%



Obr. 2.24: Výstupní napětí předzes. v závislosti na korekcích, hlasitost=100%



Obr. 2.25: Frek. char. předzes. v závislosti na hlasitosti,
korekce=0%



Obr. 2.26: Výstupní napětí na předzes. v závislosti na hlasitosti,
korekce=0%

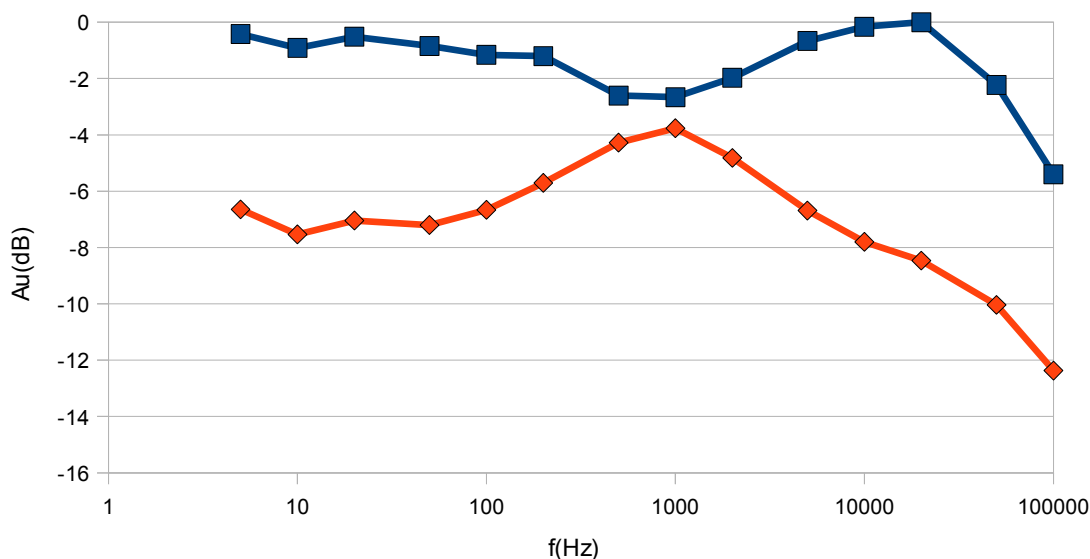
Na Obr. 2.21 a 2.22 jsou zobrazeny přenosové charakteristiky korekčního zesilovače v decibelech. Při obou simulacích byla měněna hodnota potenciometrů ovládajících korekční obvody. Na Obr. 2.21 je přenosová charakteristika při 50% hlasitosti a na Obr. 2.22 je hlasitost nastavena na 100%.

Stejně simulace jsou zobrazeny na obrázcích 2.23 a 2.24, zde je ale pro názornost vyneseno napětí ve voltech. Je vidět že při plné hlasitosti je ve středovém pásmu napětí 1V což je citlivost koncového stupně pro výstupní výkon 75W. Pokud budou při plné hlasitosti zároveň maximálně zdůrazněny výšky a basy (červená křivka a obrázku 2.24) dojde k přetížení zesilovače a výstupní výkon stoupne až přes 100W. Zesilovač i zdroj budou umožňovat určité přetížení, ale při této hodnotě už dojde k limitaci a zkreslení signálu. Takovéto používání zesilovače se ale nepředpokládá, protože korekce slouží především k vyrovnání frekvenční charakteristiky u slabších hlasitostí.

Na obrázcích 2.25 a 2.26 je zobrazena přenosová charakteristika předzesilovače bez využití korekcí (přáslušné potenciometry jsou ve střední poloze) v závislosti na nastavení hlasitosti.

Všechny potenciometry byli z praktických důvodů v simulacích rozmítány lineárně, v praxi budou použity logaritmické potenciometry, které více odpovídají vlastnostem lidského ucha.

2.3.6 Měření korekčního zesilovače

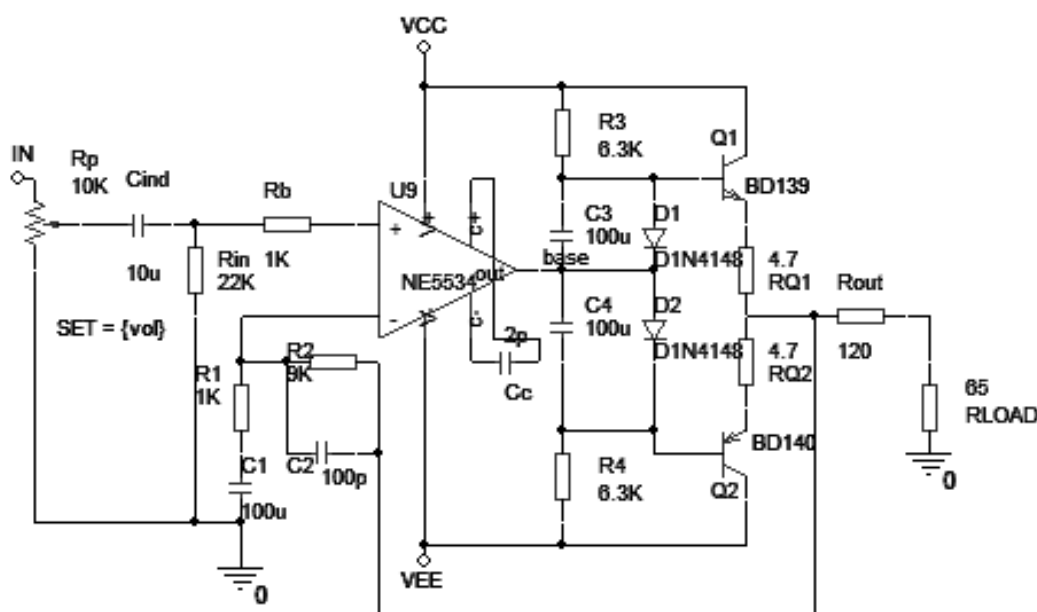


Obr. 2.27: Frek. char. předzesilovače pro krajní polohy potenciometrů při hlasitosti 50%

Při měření frekvenčních charakteristik byly korekční potenciometry vždy v krajních polohách a hlasitost byla nastavena přibližně na 50%. Vstupní signál byl 1V. Výsledný průběh přibližně odpovídá simulaci na Obr. 2.21.

2.3.7 Výstup na sluchátka

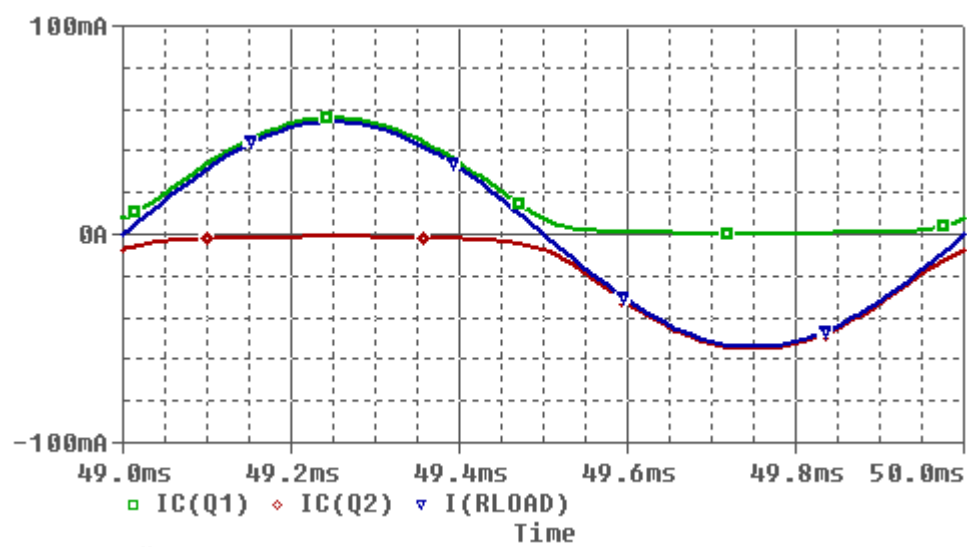
V zadání je požadováno aby byl zesilovač vybaven samostatným výstupem na sluchátka, tento výstup se dá v zásadě realizovat dvěma způsoby. První často používaný způsob u levných zesilovačů je ten že se sluchátka jednoduše připojí na koncový stupeň zesilovače přes odporový dělič, což sice funguje, ale není to příliš výhodné. Druhá a lepší možnost je vytvoření samostatného koncového stupně pro sluchátka o odpovídajícím výkonu, který bude vyveden z výstupu předzesilovače. Tímto způsobem je řešen i sluchátkový výstup v tomto zesilovači.



Obr. 2.28: Sluchátkový zesilovač

Schéma zapojení na Obr. 2.28 je z větší části převzato z [6]. Vstup sluchátkového zesilovače je připojen na výstup korekčního předzesilovače (Obr. 2.20). Pomocí trimru R_P může být snížena hodnota vstupního napětí na vhodnou velikost podle potřeby. Za trimrem je zařazen oddělovací kondenzátor C_{IN} spolu s rezistorem R_{IN} , který určuje vstupní odpor zesilovače. Zesilovač se skládá z OZ v neinvertujícím zapojení, který má za úkol napěťové zesílení vstupního signálu (v tomto případě 10x). Protože by operační zesilovač sám o sobě nebyl schopen dodávat potřebný proud, tak je za ním zařazen výkonový zesilovač ve třídě AB. Tento zesilovač se skládá ze dvou tranzistorů v komplementárním zapojení kde každý z tranzistorů zesiluje jednu půlperiodu (viz. Obr. 2.29). Tranzistory zvládají bez problémů provoz při plné hlasitosti zatíženy běžnými sluchátky i bez chladiče, ale pro jistotu jsou malé chladiče použity. Na výstupu zesilovače je zařazen seriový odpor R_{OUT} o hodnotě 120Ω , který slouží k nastavení výstupní impedance na hodnotu kterou doporučují výrobci sluchátek. Šířka pásma zesilovače je omezena pomocí kondenzátorů C_1 a C_2 ve zpětné vazbě zesilovače. Maximální výstupní výkon je do 65Ω zátěže 10mW. V případě přemostění rezistoru R_{OUT} by tento zesilovač mohl být vhodný i pro slabší reproduktor.

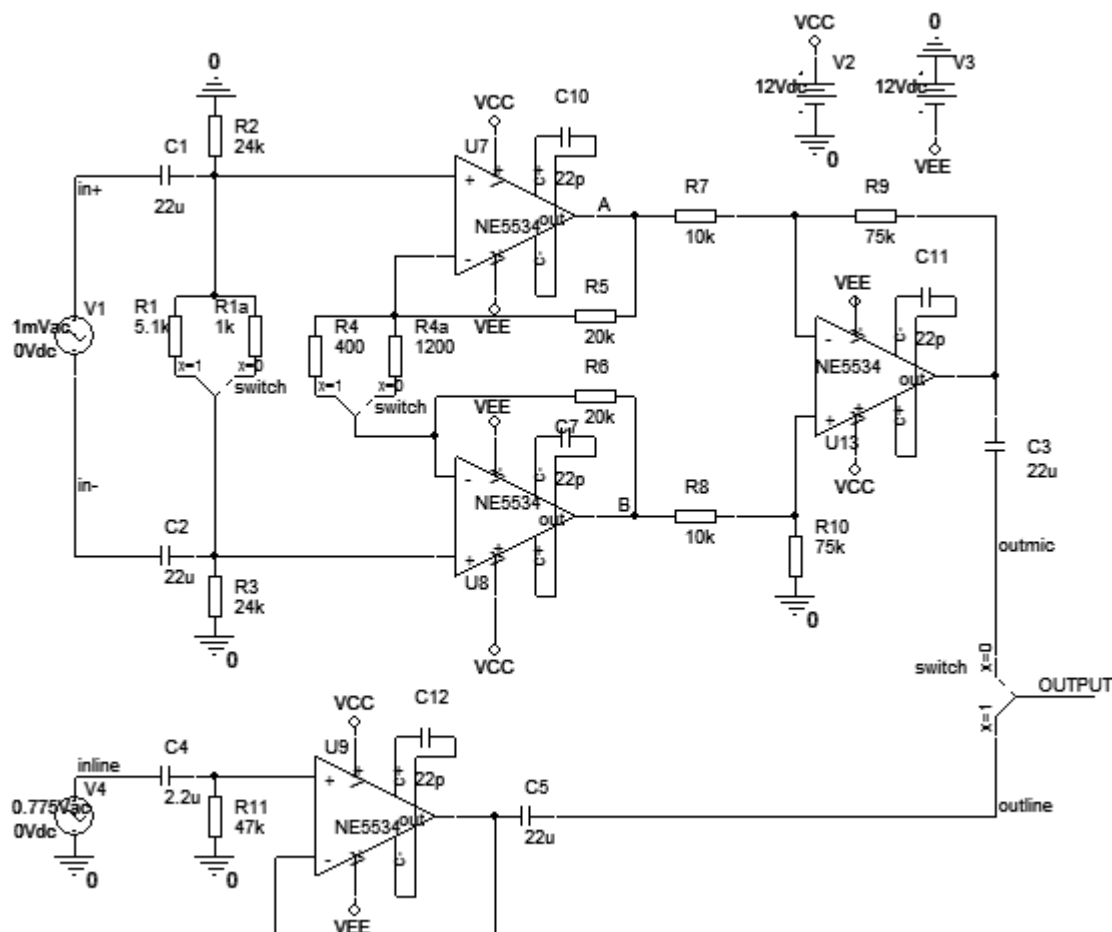
Původně byl tento zesilovač navržen s tranzistory BC639 (BC640) a bez ochranných rezistorů R_Q . Při oživení zesilovače se to ukázalo jako nevhodné řešení kvůli výkonové ztrátě na tranzistorech (v pouzdře TO-92) a proto bylo zapojení upraveno nahrazením tranzistorů výkonovými BD139 a BD140.



Obr. 2.29: Časový průběh proudu na výstupu komplementárního zesilovače

2.4 Vstupní zesilovač

Navrhovaný zesilovač umožňuje zesilování signálů z mikrofonů i z počítače (CD/MP3 přehrávače apod.). Vzhledem k naprosto rozdílným požadavkům na vstupní zesilovač pro mikrofon a pro PC se bude jednat o dva samostatné vstupní zesilovače mezi kterými se bude přepínat. Oba dva jsou navrženy na jmenovité výstupní napětí o maximální hodnotě 0,775V.



Obr. 2.30: Vstupní zesilovač

2.4.1 Mikrofonní vstup

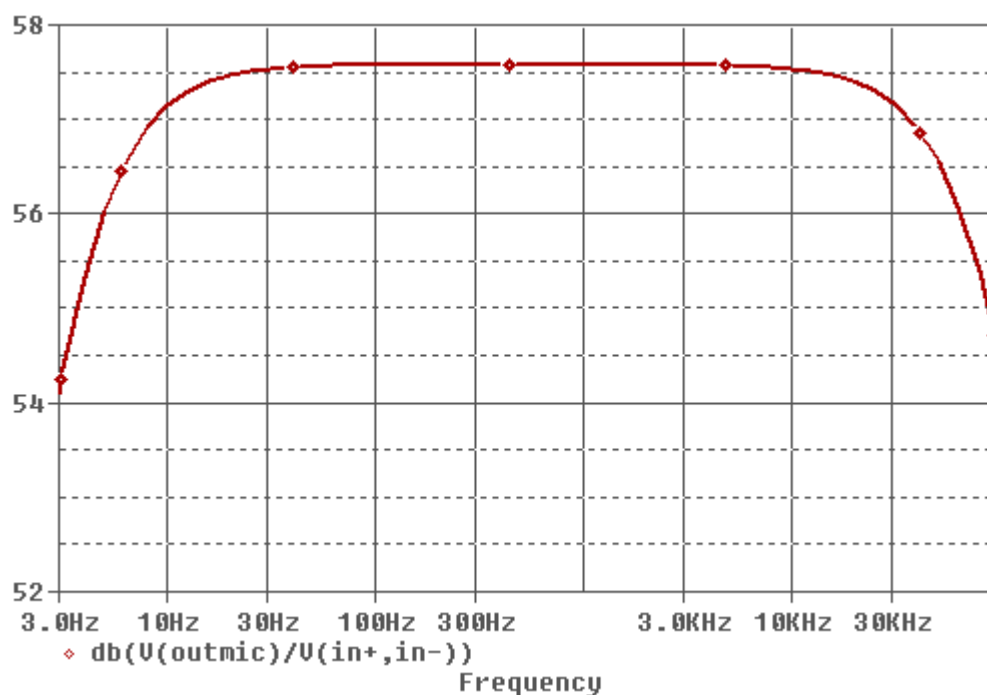
Schéma zapojení na Obr. 2.30 je převzato z [1] a následně upraveno. Jedná se o zapojení tzv. přístrojového zesilovače se třemi nízkošumovými operačními zesilovači NE5534. Vstupní signál je na kladné vstupy operačních zesilovačů přiváděn přes vazební kondenzátory C_1 a C_2 a přes rezistory určující vstupní impedanci R_1 , R_2 a R_3 , rezistor R_1 je přepínatelný mezi hodnotami $5,1k\Omega$ a $1k\Omega$ pro mikrofony o střední a nízké impedanci. Ve zpětné vazbě OZ jsou zapojeny rezistory R_4 , R_5 a R_6 kde R_4 je přepínatelný podle požadované vstupní citlivosti. Zesílení je pro $R_5=R_6=R_f$ rovno

$$A_U = 1 + \frac{R_4}{R_f} \quad (28)$$

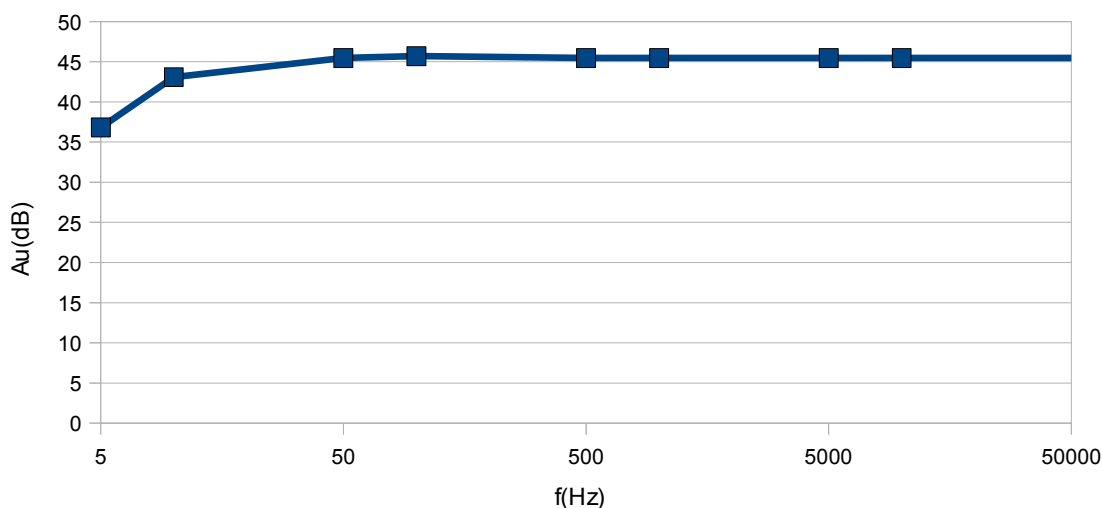
Za první dvojicí zesilovačů následuje třetí operační zesilovač v diferenčním zapojení. Hodnoty rezistorů v obou větvích musí být shodné, jestliže $R_7=R_8=R_A$ a $R_9=R_{10}=R_B$, pak platí

$$A_U = \frac{R_B}{R_A} \quad (29)$$

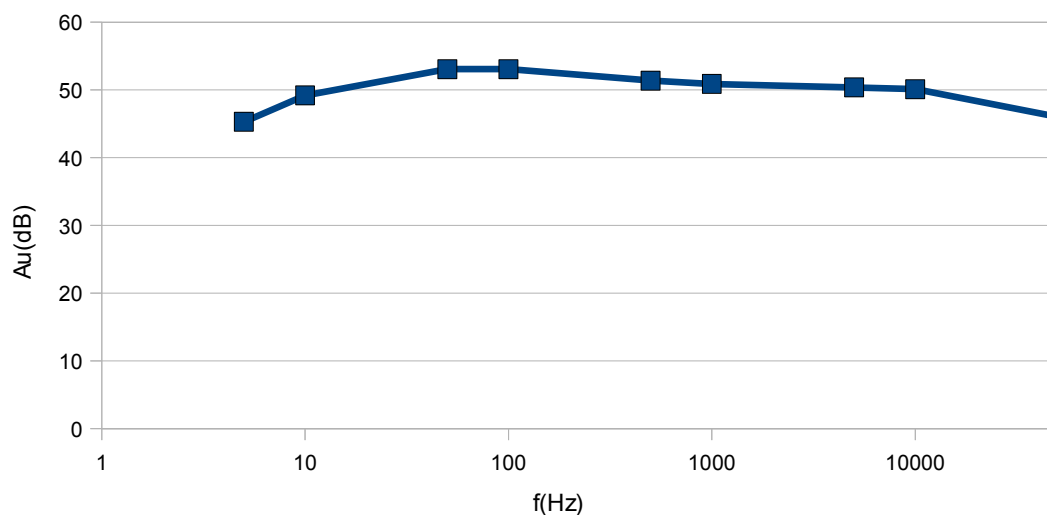
Požadované výstupní napětí je 0,750V při citlivosti 1mV. To znamená že zesilovač celkem musí zesilovat 750x. Toto vysoké zesílení je rozděleno mezi dvě části přístrojového zesilovače na 100x a 7,5x. Podle vzorců (28) a (29) se vypočítají hodnoty rezistorů $R_4=400\Omega$, $R_5=R_6=20k\Omega$, $R_7=R_8=10k\Omega$ a $R_9=R_{10}=75k\Omega$. Pro citlivost 3mV se změní pouze hodnota $R_4=1200\Omega$.



Obr. 2.31: Frekvenční charakteristika mikrofonního zesilovače (simulace)



Obr. 2.32: Frekvenční charakteristika mikrofonního zesilovače pro citlivost 3mV (měření)



Obr. 2.33: Frekvenční charakteristika mikrofonního zesilovače pro citlivost 1mV (měření)

Změřená frekvenční charakteristika mikrofonního zesilovače má podstatně větší šířku pásma než je velikost audio pásma. Při návrhu se dle katalogového listu počítalo s nižším přenosem operačního zesilovače na vyšších kmitočtech, ale ve skutečnosti nemají použité operační při daném zesílení problém ani u signálů nas 100kHz. Pokud by měl zesilovač tendenci se rozkmitávat, tak by se musela šířka pásma omezit, ale k ničemu podobnému nedochází a mikrofonní zesilovač funguje bez problémů.

2.4.2 Linkový vstup

Vstupní signál z počítače má maximální hodnotu 0,775V, takže není potřeba ho zesilovat. Vstupní zesilovač je tedy v tomto případě tvořen pouze napěťovým sledovačem sloužícím k impedančnímu přizpůsobení tohoto vstupu.

3 NAPÁJECÍ ZDROJ

3.1 Transformátor

Zesilovač vyžaduje symetrické napájení, proto je použitý transformátor se dvěma sekundárními vinutími. Nejlépe se pro NF výkonový zesilovač hodí kvalitní toroidní transformátor, který má vyšší účinnost, nižší hmotnost a nižší pronikání rušivých signálů než obyčejné transformátory s EI plechy. Sekundární napětí musí mít minimálně takovou hodnotu aby po usměrnutí a filtraci bylo na vstupu zesilovače požadované napájecí napětí, které je 1,414x vyšší než efektivní hodnota sekundárního napětí. Zároveň ale nesmí být vyšší než je maximální povolené napětí integrovaných zesilovačů.

Požadované napájecí napětí $U_{CC}=+30V$ (6), úbytek napětí na usměrňovacím můstku $U_D=1,5V$ [8], maximální povolené napájecí napětí $U_{CCmax}+40V$ [3]

$$U_{SEK}=0,707 \cdot U_{CC} + U_D = 0,707 \cdot 30 + 1,5 = 22,7 V \quad (30)$$

Běžně se vyrábí transformátory s napětím 2x24V, které budou přesně vyhovovat požadavkům. Díky vyššímu sekundárnímu napětí se zvýší napájecí napětí zdroje na:

$$U_{CC}=U_{SEK} \cdot 1,414 - U_D = 24 \cdot 1,414 - 1,5 = 32,5 V \quad (31)$$

Maximální výkon transformátoru musí zvládnout pokrýt potřeby koncového stupně i ostatních prvků zesilovače. Koncový stupeň je navržen na 2x80W, ale pokud by došlo k jeho přetížení, tak vzhledem ke zvýšenému napájecímu napětí (31) $U_{CC}=32,5V$ může být podle (1) a (2) výstupní výkon až 2x100W (bez limitace). K tomu je potřeba připočíst doporučenou rezervu asi 30% [7] a několik wattů pro ostatní obvody zesilovače. Takže transformátor musí být schopen dodávat alespoň 300VA. Vzhledem k ceně nových transformátorů bylo pro napájení zesilovače použito trafo, které bylo k dispozici s parametry 2x28,5V / 5,17A. Protože je výstupní napětí tohoto transformátoru vyšší než navržené, tak je v napájecím zdroji zařazeno do serie několik výkonových diod v propustné směru, které sníží napětí asi o 6V.

3.2 Usměrňovač

Za transformátorem se musí nacházet usměrňovač který vytvoří pulzující stejnosměrné napětí. Skládá se ze čtyř diod zapojených do gratzova můstku, které jsou navíc přemostěny kondenzátory o malé kapacitě, ty mají zabránit vzniku a šíření rušivých signálů které vznikají při spínání diod. [10] Diody musí být schopny odolávat vysokému proudu, minimálně takovému jaký je jmenovitý výstupní proud zesilovače. Pro tento zdroj byly zvoleny diody MUR1560, přes které může protékat proud až 15A, což je asi dvojnásobek jmenovitého výstupního proudu.

3.3 Filtrace

Na výstupu usměrňovače je pulzující napětí které se musí vyfiltrovat na stejnosměrné napětí s minimálním zvlněním. K tomu slouží elektrolytické kondenzátory o velké kapacitě, zde byli konkrétně zvoleny kondenzátory o celkové kapacitě 20mF. Navíc jsou k nim paralelně připojeny kondenzátory o malé kapacitě,

které potlačují rušivé signály.

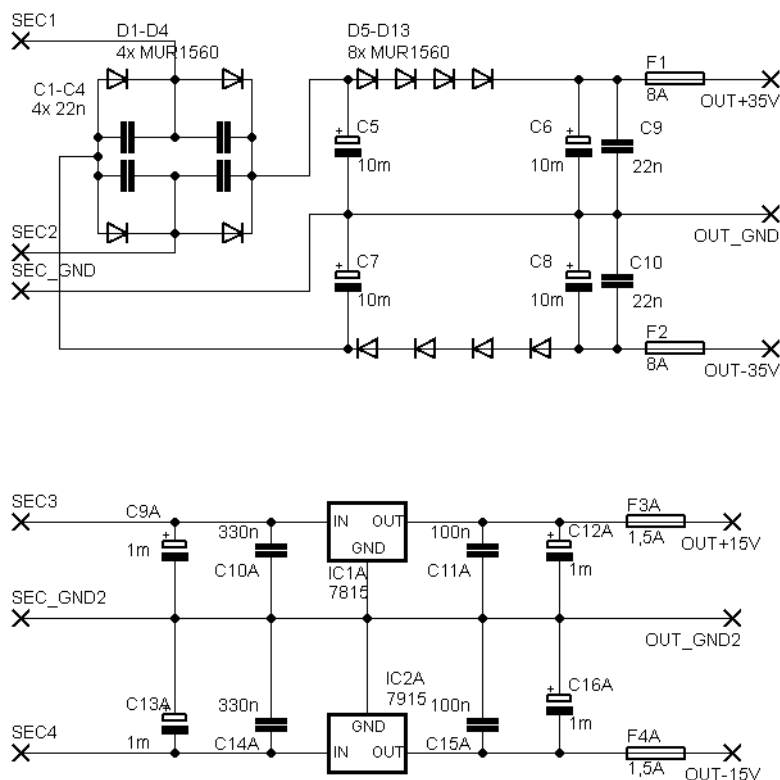
3.4 Napájecí zdroj pro předzesilovač

Předzesilovač je napájen samostatným zdrojem. Jedná se o symetrický zdroj zapojený dle katalogového listu stabilizátoru 7815 (resp. 7915) [9]. Skládá se z toroidního transformátoru 2x12V / 1A, integrovaného usměrňovacího můstku, filtračních a blokovacích kondenzátorů a integrovaného stabilizátoru. Maximální výstupní proud je 1A což je plně dostatečné, protože předzesilovač pracuje prakticky naprázdno a má odběr jen asi 200mA.

3.5 Bezpečnost a konstrukce

S ohledem na ochranu zesilovače před rušením musí být silnější transformátor umístěn co nejdál především od mikrofonního zesilovače, to je samozřejmě problém pokud by měl být celý zesilovač včetně obou zdrojů v jedné přístrojové skříni. Proto bude předzesilovač s vlastním napájecím zdrojem umístěn v samostatné krabici. Zapínání obou zdrojů je řešeno síťovým vypínačem, který bezpečně odpojí oba přívodní vodiče. Zdroj je jištěn tavnými pojistkami.

Původně byl napájecí zdroj navržen pouze s jedním transformátorem pro obě samostatné části. Tomu odpovídá i deska plošných spojů v příloze A.7. Toto řešení se ukázalo jako velmi nepraktické z důvodu přehřívání součástek ve slabším napájecím zdroji. Proto byl nakonec zdroj pro předzesilovač zkonstruován samostatně a nevyužité části původní DPS nejsou osazeny. Z časových důvodů nebyla pro zdroj předzesilovače vyrobena vlastní DPS, ale byla použita univerzální deska na kterou není problém podobně jednoduché zapojení umístit.



Obr. 3.1: Schéma zapojení napájecích zdrojů

4 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout, odsimulovat a zkonstruovat kompletní audiozesilovač včetně napájecího zdroje. Jako základní prvek zesilovače byl vybrán obvod LM3886 což je jeden z nejvýkonějších integrovaných audio zesilovačů. Pro dosažení nejvyššího výkonu byl koncový stupeň navržen jako přepínatelný mezi můstkovým a paralelním zapojením. Toto přepínání je řešeno pomocí relé přepínačů a „zdvojeného“ zapojení součástek okolo zesilovače. Tím se sice značně zkomplikovala a zvětšila deska plošného spoje, ale možnost dosažení optimálního výkonového přizpůsobení je určitě výhodou. Bohužel se koncový stupeň před odevzdáním práce nepodařilo zprovoznit, zřejmě právě pro svoji, možná zbytečnou, komplikovanost. Nejprve se objevil problém s neodpovídajícím modelem jednoho relé přepínače, který při špatném zapojení způsoboval zkrat výstupu. Tato chyba byla odstraněna, ale ani nadále zesilovač nefungoval ani po několika úpravách desky a jejím značném zjednodušení. Na výstupu zesilovače je stále nulové napětí což ukazuje buď na aktivovanou vnitřní ochranu výstupu, nebo na poškození integrovaného obvodu. Nadále uvažuji o výměně integrovaných obvodů a dalším pokusu o oživení zesilovače.

Předzesilovač skládající se ze vstupních zesilovačů, korekcí, nastavení hlasitosti a sluchátkového výstupu je zkonstruován z nízkošumových operačních zesilovačů v různých zapojeních (přístrojový zesilovač, napěťový sledovač, invertující zesilovač a součtový zesilovač). Umožňuje přepínání mezi linkovým a mikrofonním vstupem, přepínání je společné pro levý i pravý kanál. Mikrofonní vstup je určen pouze pro elektrodynamické mikrofony ke kterým je přizpůsoben vnitřním odporem i citlivostí. Sluchátkový výstup je zesilovač ve třídě AB s výkonovými tranzistory, jeho výstup je zapojen dle obecných doporučení výrobců sluchátek a umožňuje po jednoduché úpravě používat i několika wattový reproduktor. Při ožívování předzesilovače napájeného z laboratorního zdroje docházelo k pronikání síťového rušení což bylo velmi nepříjemně slyšet na výstupu. Toto rušení bylo odstraněno dodatečným přidáním filtračních kondenzátorů o kapacitě 1mF na napájecí svorky obvodu. Funkce korekcí a vůbec celého předzesilovače byla testována především poslechem harmonických signálů i běžné hudby. Při tomto testování se zesilovač choval velmi dobře, zvuk byl nezkreslený a bez šumu. Jediný problém způsobovaly použité sluchátka které byly zdrojem přeslechů. Samotný zesilovač má přeslechy mezi kanály prakticky neměřitelné, ale u sluchátek pravděpodobně v konektoru k přeslechům dochází.

Napájecí zdroj pro koncový stupeň byl navržen dle napěťových a proudových požadavků zesilovače, ale z finančních důvodů bylo použito jiné trafo než navržené. Zdroj nyní dodává napětí které je přesně na hranici maximální povolené hodnoty pro integrované obvody LM3886 (+-40V), což samozřejmě není příliš vhodné. Před vlastním oživením koncového stupně jsem tuto záležitost nepovažoval za důležitou, protože zdroj v podstatě funguje, jen je potřeba pořídit transformátor s nižším výstupním napětím. Dle prvotního návrhu měl být na společné desce zdroj pro koncový stupeň i pro ostatní obvody zesilovače. Toto řešení se ale po osazení desky ukázalo jako nevýhodné a proto byly okrajové části desky odstraněny. Napájecí zdroj +-15V je nyní umístěn na samostatné univerzální desce s vlastním transformátorem a je schopen dodávat proud 1A což stačí pro všechny připojené obvody.

5 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] WIRSUN, Siegfried. *Abeceda nf techniky*. Praha : BEN - technická literatura, 1998. 192 s. ISBN 80-86056-26-0
- [2] Texas Instruments. *Datasheet NE5534* [online]. 2011 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne5534.pdf>>.
- [3] National Semiconductor. *Datasheet LM3886* [online]. 2003 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.national.com/ds/LM/LM3886.pdf>>.
- [4] National Semiconductor. *Datasheet LM4780* [online]. 2010 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.national.com/ds/LM/LM4780.pdf>>.
- [5] KOTISA, Zdeněk. *NF Zesilovače : Předzesilovače*. Praha : BEN - technická literatura, 2002. 85 s. ISBN 80-7300-030-X.
- [6] ELLIOTT, Rod . *Elliott Sound Products* [online]. 2005 [cit. 2011-12-12]. Headphone Amplifier. Dostupné z WWW: <<http://sound.westhost.com/project113.htm>>.
- [7] KOTISA, Zdeněk. *NF Zesilovače : Integrované výkonové zesilovače*. Praha : BEN - technická literatura, 2002. 85 s. ISBN 80-7300-053-9.
- [8] ON Semiconductor. *Datasheet MUR 1560* [online]. 2008 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z WWW: <http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MUR1520-D.PDF>.
- [9] STMicroelectronics. *Datasheet 78xx* [online]. 2011 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z WWW: <http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00000444.pdf>.
- [10] HROTEK, Daniel. *Domovské stránky Daniela Hrotka* [online]. [cit. 2011-12-12]. LM3886. Dostupné z WWW: <<http://www.starhill.org/dan/hifi/lm3886/lm3886.html>>.

6 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

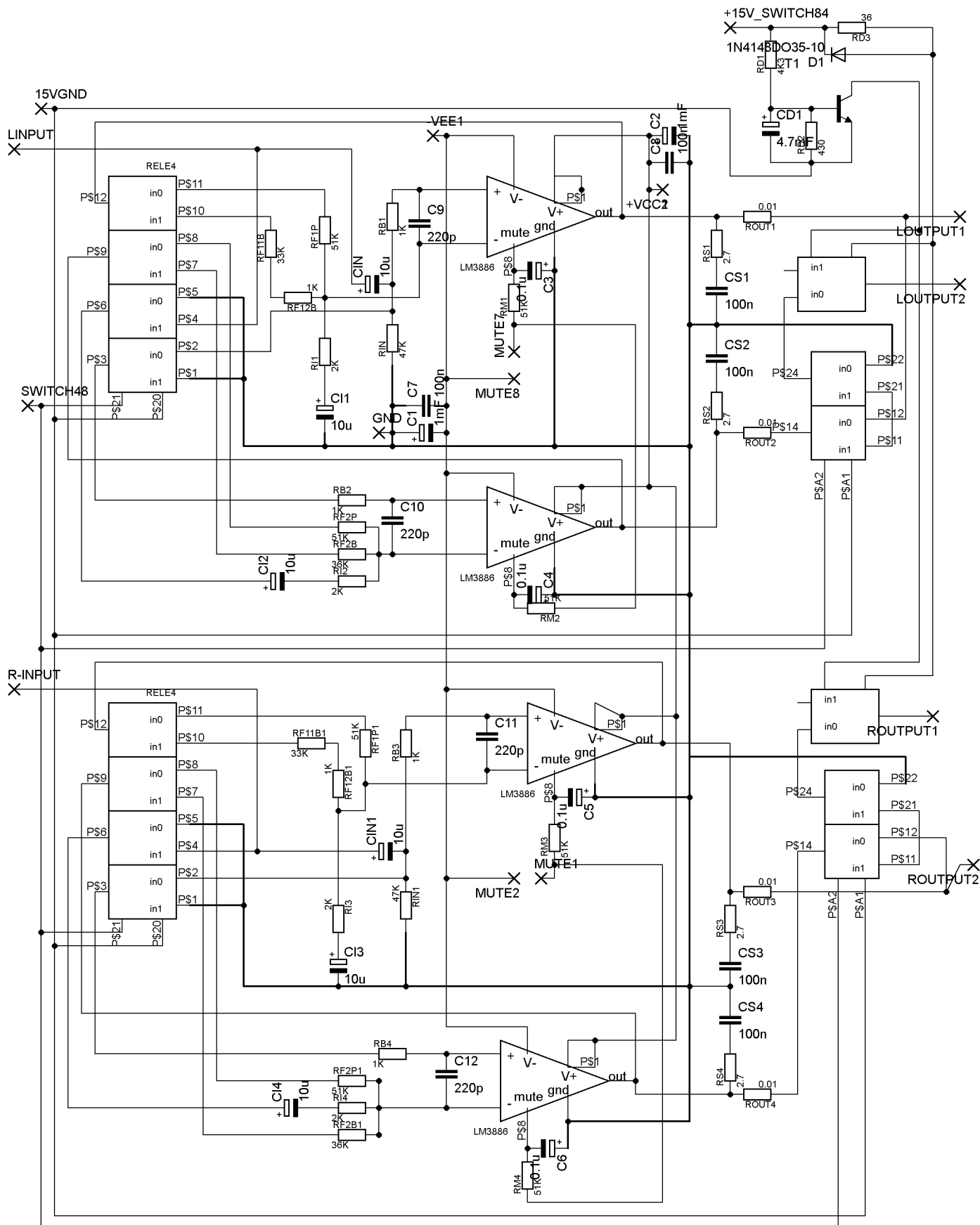
A_U	.....	napěťové zesílení
A_{UdB}	.....	napěťové zesílení v decibelech
C	.....	kondenzátor
f_D	.....	dolní mezní kmitočet
frek.char	.....	frekvenční charakteristika
h_{21e}	.....	proudový zesilovací činitel tranzistoru
I_m	.....	amplituda proudu
I_{REL}	.....	proud cívky relé
LINE	.....	linkový vstup
MIC	.....	mikrofonní vstup
NF	.....	nízkofrekvenční
OZ	.....	operační zesilovač
P_{OUT}	.....	výstupní výkon
P_{DMAX}	.....	výkonová ztráta na zesilovači
předzes	.....	předzesilovač
R	.....	rezistor
R_P	.....	potenciometr
R_{load}	.....	odpor zátěže
R_{REL}	.....	odpor cívky relé
t	.....	čas
THD+N	.....	harmonické zkreslení + šum
U	.....	efektivní hodnota napětí
U_C	.....	napětí na kondenzátoru
U_{CC}	.....	napájecí napětí
U_m	.....	amplituda napětí
U_{OUT}	.....	výstupní napětí
U_{REL}	.....	napětí na cívce relé
Θ_{JA}	.....	tepelný odpor, křemíková struktura → vzuch
Θ_{JC}	.....	tepelný odpor, křemíková struktura → chladič
τ	.....	časová konstanta

Seznam příloh

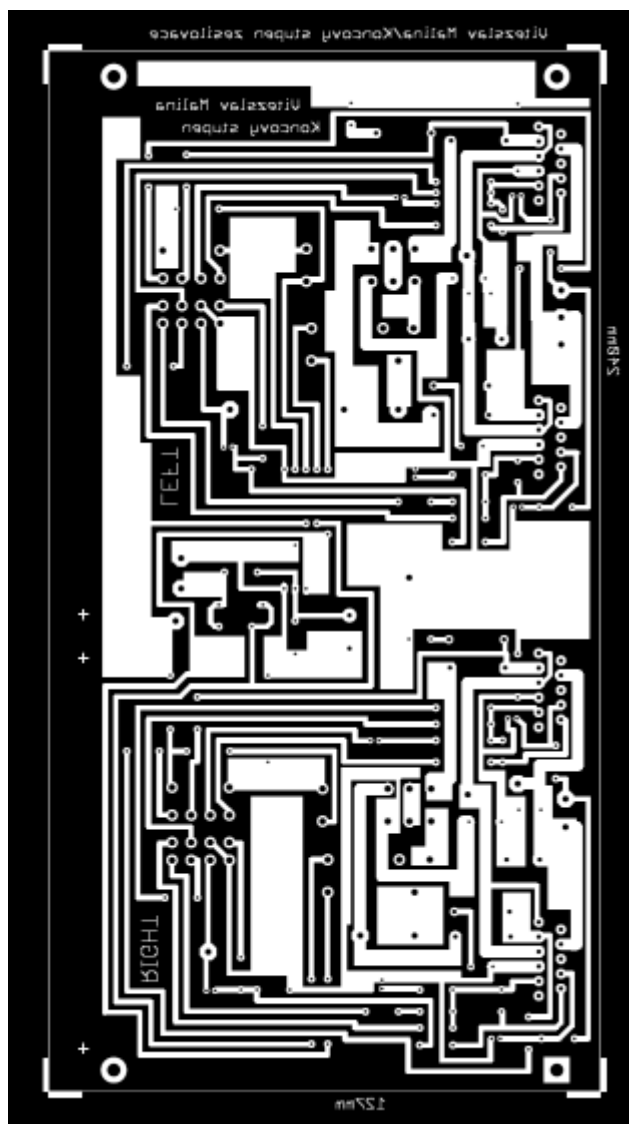
A Přílohy	46
A.1 Koncový stupeň – schéma zapojení	46
A.2 Koncový stupeň – deska plošného spoje	47
A.3 Koncový stupeň – rozmístění součástek	48
A.4 Předzesilovač – schéma zapojení	49
A.5 Předzesilovač – deska plošného spoje	50
A.6 Předzesilovač – rozmístění součástek	51
A.7 Napájecí zdroj – deska plošného spoje	52
A.8 Napájecí zdroj – rozmístění součástek	53
A.9 Předzesilovač a napájecí zdroj +15V	54

A PŘÍLOHY

A.1 Koncový stupeň – schéma zapojení

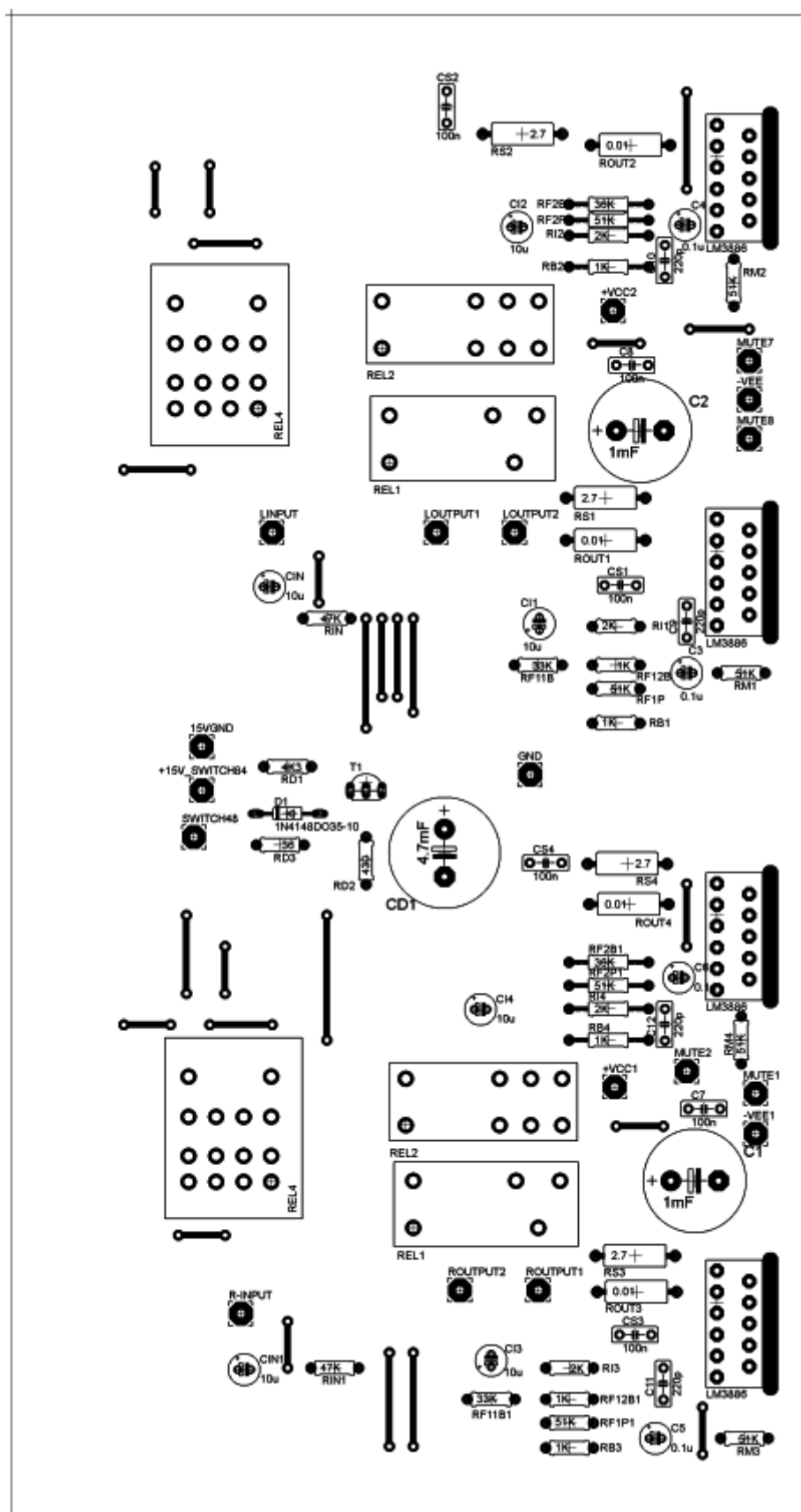


A.2 Koncový stupeň – deska plošného spoje

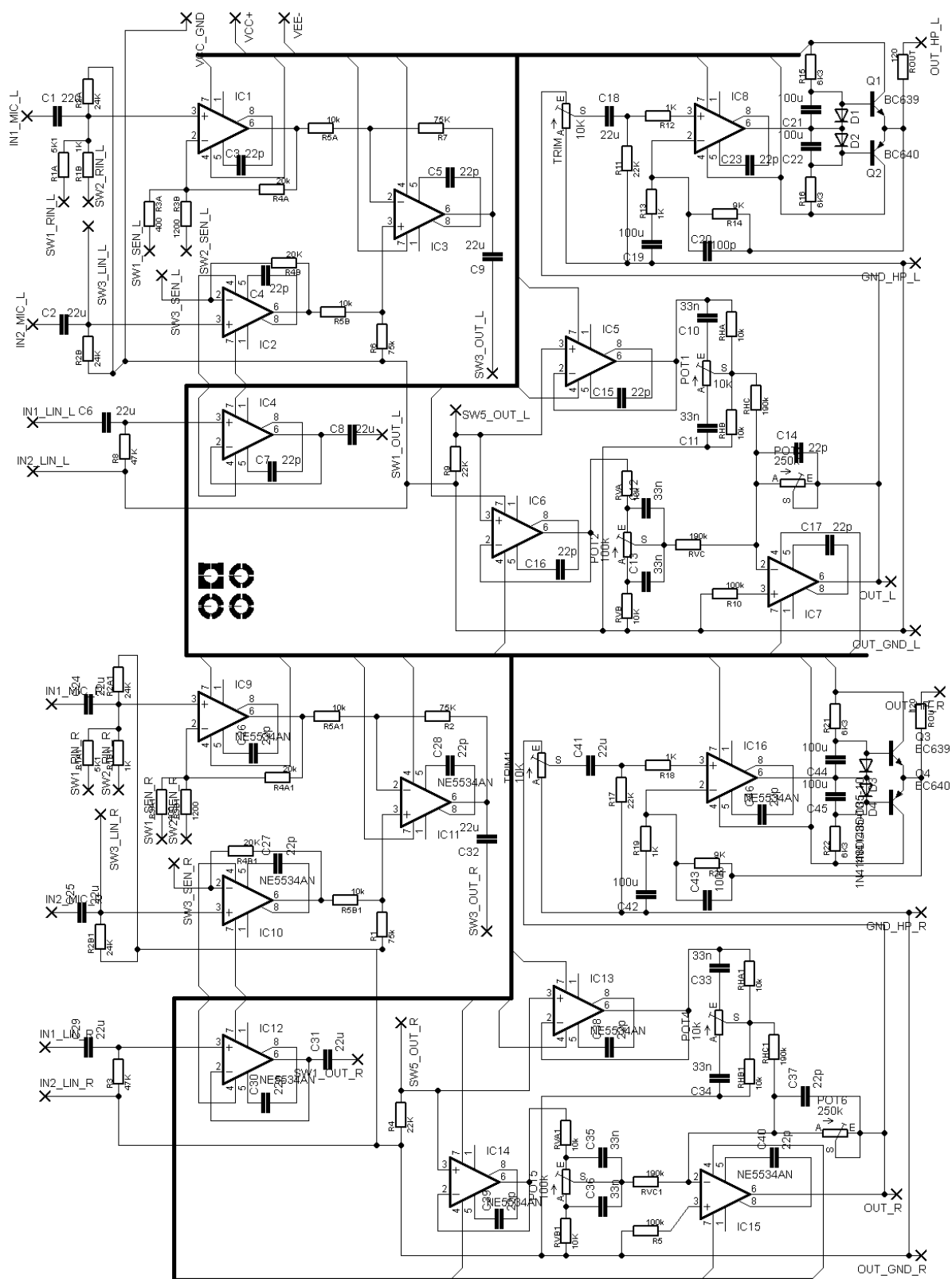


Měřítko 1:2, rozměry 172x240mm.

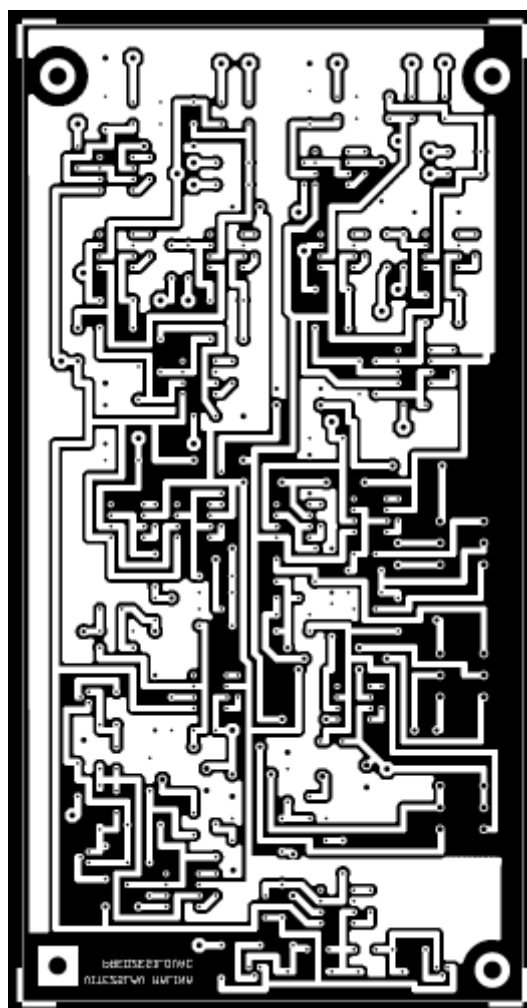
A.3 Koncový stupeň – rozmístění součástek



A.4 Předzesilovač – schéma zapojení

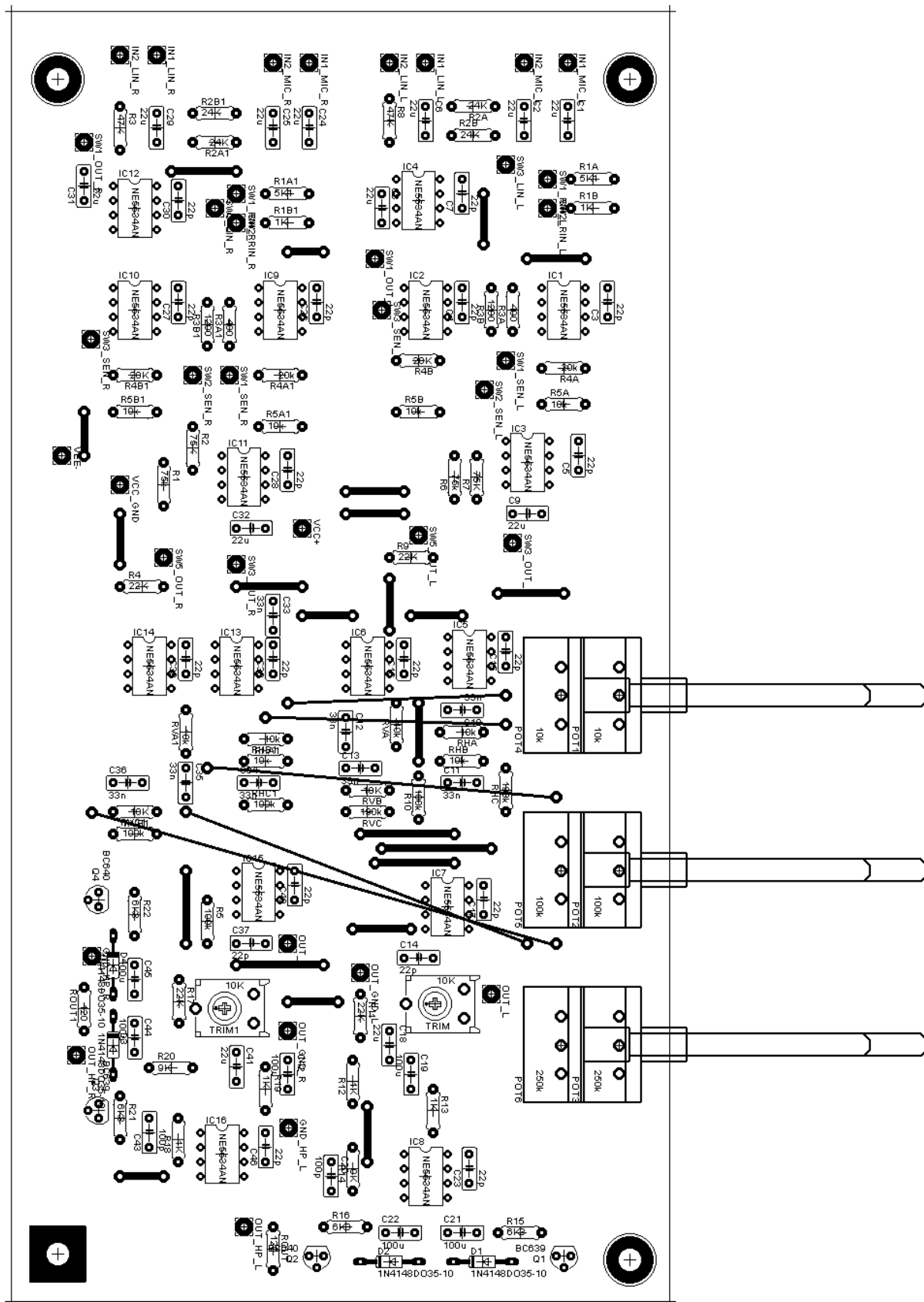


A.5 Předzesilovač – deska plošného spoje

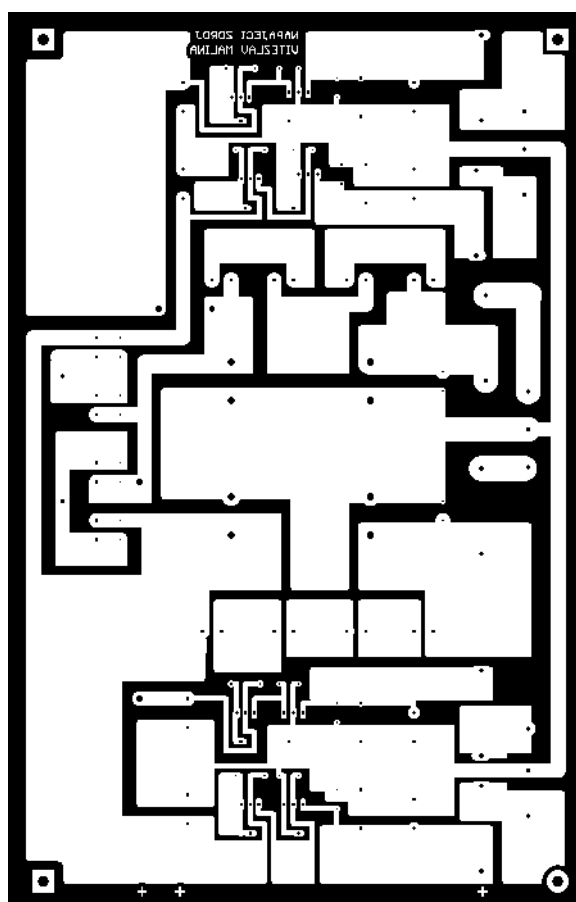


Měřítko 1:2, rozměry 115x225mm

A.6 Předzesilovač – rozmístění součástek

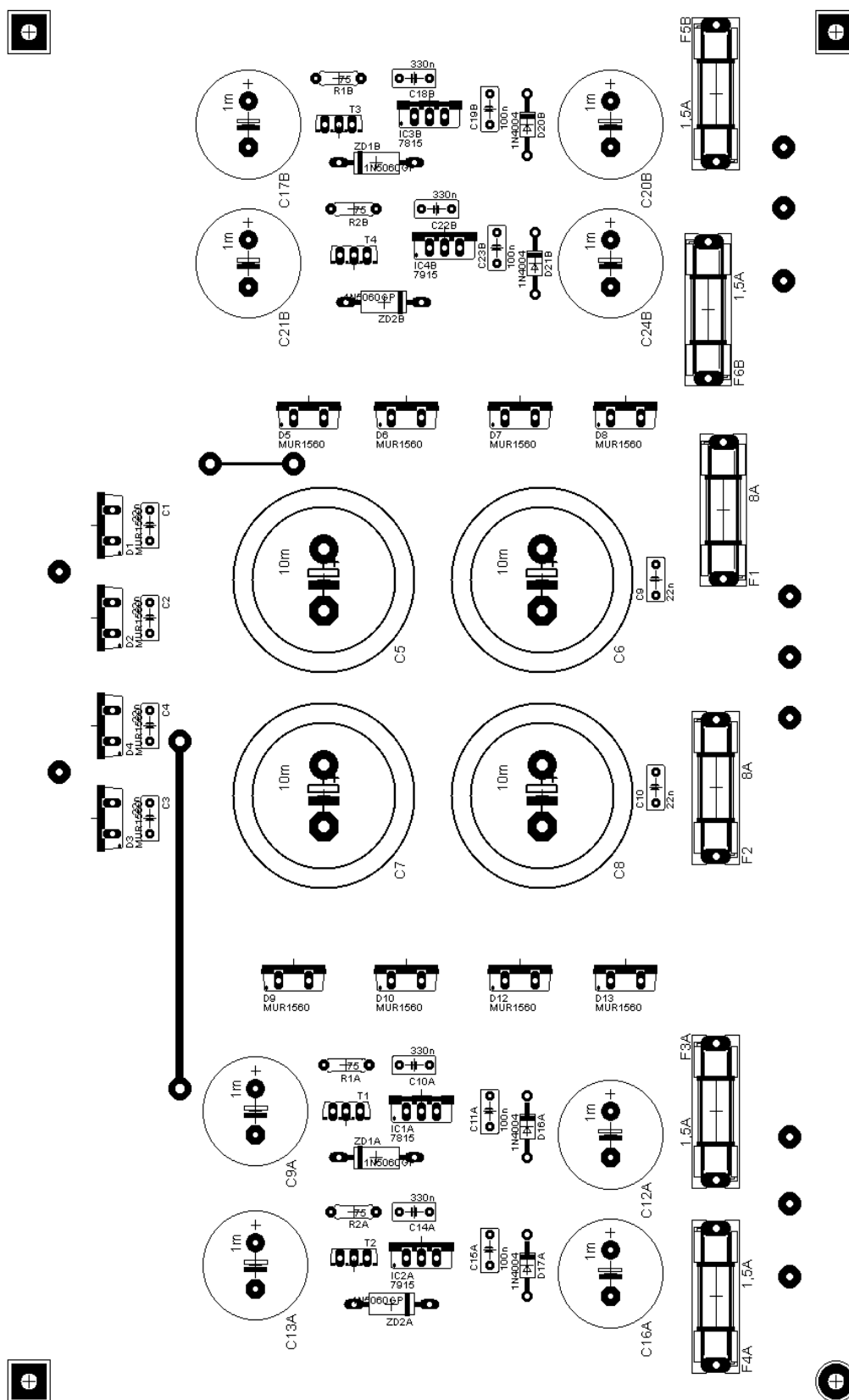


A.7 Napájecí zdroj – deska plošného spoje



Měřítko 1:2, rozměr

A.8 Napájecí zdroj – rozmístění součástek



A.9 Předzesilovač a napájecí zdroj $\pm 15V$

