

# 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

JAROSLAV RŮŽIČKA

BRNO 2010



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 AUDIO POWER AMPLIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

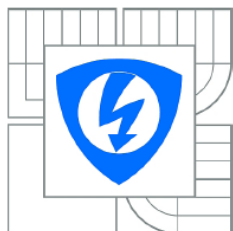
JAROSLAV RŮŽIČKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. LUBOMÍR BRANČÍK, CSc.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Jaroslav Růžička  
**Ročník:** 3

**ID:** 72900  
**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

### Návrh a konstrukce audio výkonového zesilovače

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte ideový návrh audio výkonového zesilovače vybrané třídy, včetně návrhu předzesilovače, s možností ovládání hlasitosti, balance a korekce kmitočtové charakteristiky. K zesilovači navrhnete vhodnou napájecí jednotku. Vlastnosti navržených zapojení ověřte simulacemi v programu PSpice.

Na základě předchozích prací provedte návrhy desek plošných spojů v programu Eagle. Provedte kompletní konstrukci audio výkonového zesilovače předepsaných vlastností, včetně předzesilovače a napájecí jednotky. Zapojení oživte, proměřte jeho základní parametry a srovnajte s parametry obdrženými počítačovou simulací.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

[3] DOUGLAS, D. Audio Power Amplifier Design Handbook. New York: Newnes - ELSEVIER, 2006.

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 28.5.2010

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

**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.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jaroslav Růžička  
Bytem: Blažičkova 868, Nové Město na Moravě, 592 31  
Narozen/a (datum a místo): 31. srpna 1986 v Novém Městě na Moravě  
(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....  
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Návrh a konstrukce audio výkonového zesilovače

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy  
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 28. května 2010

.....

Nabyvatel

.....

Autor

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá třídami zesilovačů, zapojením koncových stupňů, ochrannými obvody zesilovačů a konkrétním návrhem zesilovače ve třídě AB, včetně návrhu předzesilovače a koncového zesilovače. Vlastnosti navržených obvodů byly ověřeny simulacemi v programu PSpice. Návrhy jednotlivých modulů jsou doplněny deskami plošných spojů. Práce obsahuje výsledky měření a fotografie zesilovače.

## **Klíčová slova**

Zesilovač, třídy zesilovačů, třída AB, ochranné obvody, korekční předzesilovač, výkonový zesilovač, napájecí zdroj, simulace.

## **Abstract**

This bachelor's thesis is concerned with amplifier classes, integration end-level, protective circuits and concrete concept of class AB power amplifier, including concept of preamplifier and power amplifier. Features of designed circuits were simulated in PSpice software. These individual concepts of modules are connected with DPS. This thesis contains results of measurement and photos of amplifier.

## **Keywords**

Amplifier, classes of amplifier, AB class, protective circuits, correction amplifier, power amplifier, power supply unit, simulation.

## **Bibliografická citace práce**

RŮŽIČKA, J. *Návrh a konstrukce audio výkonového zesilovače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 60s., 11 příl. Vedoucí semestrální práce prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

## **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 bakalářské 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 .....

.....

(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>1</b> | <b>Úvod .....</b>                                       | <b>10</b> |
| 1.1      | Zesilovač.....                                          | 10        |
| 1.1.1    | Rozdělení zesilovačů:.....                              | 10        |
| 1.1.2    | Nízkofrekvenční přenosový řetězec .....                 | 11        |
| 1.2      | Základní třídy zesilovačů.....                          | 13        |
| 1.2.1    | Výkonový zesilovač ve třídě A .....                     | 13        |
| 1.2.2    | Výkonový zesilovač ve třídě B .....                     | 14        |
| 1.2.3    | Výkonový zesilovač ve třídě AB .....                    | 15        |
| 1.2.4    | Výkonový zesilovač ve třídě C .....                     | 15        |
| 1.2.5    | Výkonový zesilovač ve třídě D .....                     | 16        |
| 1.2.6    | Výkonový zesilovač ve třídě G .....                     | 16        |
| 1.2.7    | Výkonový zesilovač ve třídě H .....                     | 16        |
| 1.2.8    | Výkonový zesilovač ve třídě S.....                      | 16        |
| 1.2.9    | Výkonový zesilovač ve třídě T.....                      | 17        |
| 1.3      | Parametry zesilovačů třídy Hi-Fi.....                   | 17        |
| <b>2</b> | <b>Zesilovač třídy AB.....</b>                          | <b>18</b> |
| 2.1      | Popis třídy AB a její vznik z třídy B .....             | 18        |
| 2.2      | Způsoby zavedení předpětí.....                          | 19        |
| 2.3      | Teplotní stabilizace zesilovače .....                   | 19        |
| 2.4      | Zesilovač ve třídě AB s velkými výstupními výkony ..... | 19        |
| 2.4.1    | Způsoby zapojení koncového zesilovače .....             | 20        |
| 2.5      | Pomocné a indikační obvody zesilovačů .....             | 21        |
| 2.5.1    | Pomocné obvody (ochrany) .....                          | 21        |
| 2.5.2    | Indikační obvody .....                                  | 21        |
| <b>3</b> | <b>Vlastní návrh Zesilovače .....</b>                   | <b>22</b> |
| 3.1      | Úvod .....                                              | 22        |
| 3.2      | Blokové schéma zesilovače .....                         | 22        |
| 3.3      | Korekční předzesilovač .....                            | 23        |
| 3.3.1    | Popis zapojení .....                                    | 23        |
| 3.3.2    | Schéma zapojení v PSpice.....                           | 24        |
| 3.3.3    | Simulace v PSpice .....                                 | 25        |
| 3.3.4    | Schéma zapojení pro návrh DPS .....                     | 27        |
| 3.4      | Napájecí zdroj korekčního zesilovače .....              | 28        |
| 3.4.1    | Popis zapojení .....                                    | 28        |
| 3.4.2    | Schéma zapojení pro návrh DPS .....                     | 28        |
| 3.5      | Koncový zesilovač.....                                  | 29        |
| 3.5.1    | Popis zapojení .....                                    | 29        |
| 3.5.2    | Schéma zapojení v PSpice.....                           | 30        |
| 3.5.3    | Simulace v PSpice .....                                 | 31        |
| 3.5.4    | Schéma zapojení pro návrh DPS .....                     | 33        |
| 3.6      | Napájecí zdroj koncového zesilovače.....                | 34        |

|          |                                           |           |
|----------|-------------------------------------------|-----------|
| 3.6.1    | Popis zapojení .....                      | 34        |
| 3.6.2    | Schéma zapojení pro návrh DPS .....       | 34        |
| 3.7      | Obvod pro opožděné připojení zátěže ..... | 35        |
| 3.7.1    | Popis zapojení .....                      | 35        |
| 3.7.2    | Schéma zapojení.....                      | 35        |
| <b>4</b> | <b>Konkrétní návrhy a výpočty .....</b>   | <b>36</b> |
| 4.1      | Výpočet výkonu zesilovače .....           | 36        |
| 4.2      | Návrh transformátoru .....                | 36        |
| 4.3      | Výpočet chladiče koncového stupně .....   | 37        |
| <b>5</b> | <b>Konstrukční řešení.....</b>            | <b>38</b> |
| 5.1      | Chlazení .....                            | 38        |
| 5.2      | Přístrojová skříň.....                    | 38        |
| 5.3      | Fotky z realizace .....                   | 38        |
| <b>6</b> | <b>Naměřené hodnoty zesilovače .....</b>  | <b>40</b> |
| 6.1      | Korekční předzesilovač .....              | 40        |
| 6.2      | Koncový zesilovač.....                    | 43        |
| <b>7</b> | <b>Závěr .....</b>                        | <b>45</b> |
|          | Seznam použité literatury .....           | 46        |
|          | Seznam obrázků.....                       | 47        |
|          | Seznam tabulek.....                       | 49        |
|          | Seznam symbolů, veličin a zkratk .....    | 50        |
|          | <b>Seznam příloh .....</b>                | <b>51</b> |

# 1 Úvod

## 1.1 Zesilovač

Zesilovače jsou elektronické obvodové systémy, které se používají k zesílení slabých elektronických signálů. Při zesilování se zvětšuje pouze amplituda signálu, tvar a frekvence zůstávají nezměněny. Zesilovač je aktivní nelineární čtyřpól, tvořený zesilovacím prvkem (tranzistor, IO) a pomocnými obvody, které slouží k nastavení a stabilizaci pracovního bodu.

### 1.1.1 Rozdělení zesilovačů:

#### a) *podle frekvence zesilovaných signálů*

- **stejnoseměrné** – kmitočet  $f = 0$  Hz - přenášejí odporovou vazbou ss. signál
- **nízkofrekvenční** – zesilují frekvence od 20 Hz do 20 kHz (pásmo slyšitelnosti)
- **středofrekvenční** – od 20 kHz do jednotek MHz
- **vysokofrekvenční** – nejčastěji k zesílení modulovaných signálů
- **mikrovlnné** – zesilují kmitočty GHz

#### b) *podle velikosti vstupního signálu*

- **předzesilovače** – zesilují signály malé úrovně (anténní zesilovače)
- **výkonové zesilovače** – vyžadujeme velké výkonové zesílení

#### c) *podle šířky přenášeného pásma*

- **úzkopásmové** – šířka přenášeného fr.pásma je malá vzhledem ke střední frekvenci
- **širokopásmové** – vzhledem ke stř.frekvenci zesilují velmi široké pásmo

#### d) *podle pracovních tříd*

- **třída A** – malé zkreslení, určeny pro všeobecné využití, celou periodu zesiluje jeden prvek (tranzistor)
- **třída B** – použití v dvojčinném zapojení, kde každý zesilovací prvek zesiluje jednu polovinu periody signálu
- **třída C** – použití ve vysokofrekvenční technice – tranzistor zesiluje méně než jednu polovinu periody signálu
- **třída AB** - tranzistor zesiluje více než jednu polovinu periody signálu ale méně než celou periodu, výhodou je odstranění přechodového zkreslení

#### e) *podle druhu vazby mezi stupni*

- se stejnosměrnou vazbou
- s vazbou s RC členy
- s transformátorovou vazbou

#### f) *podle použitého zesilovacího prvku*

- elektronkové, tranzistorové, integrované

#### g) *v případě použití tranzistoru jako zesilovacího prvku*

- se společným emitorem SE, společným kolektorem SC, společnouází SB

### 1.1.2 Nízkofrekvenční přenosový řetězec

Nízkofrekvenční přenosový řetězec je tvořen zdrojem signálu, napětovým zesilovačem (předzesilovač, mezifrekvenční a budící předzesilovač), výkonovým (koncovým) zesilovačem a reproduktory.

#### 1.1.2.1 Zdroje signálu

- mikrofon (elektrodynamický, elektrostatický, piezoelektrický,...)
- přenoska (elektromagnetická, magnetodynamická, elektromechanická,...)
- tuner (rozhlasový přijímač)
- magnetofon (kazetový, cívkový, digitální,...)
- přehrávač (CD, SACD, DVD-A,...)
- zvukový výstup (TV přijímače, videorekordéru, záznamník,...)

#### 1.1.2.2 Napětový zesilovač

Napětový zesilovač je tvořen předzesilovačem, mezifrekvenčním a budícím předzesilovačem. Jeho úkolem je zesílit signál zdroje na požadovanou úroveň. Mezi další funkce patří linearizace napětí zdroje, úrovně a impedanční přizpůsobení, volba a směšování signálů z různých zdrojů, frekvenční korekce, úprava dynamiky.

- Korekční předzesilovač – Umožňuje nastavení ovládacích prvků zesilovače, např. hlasitost, hloubky, výšky, stereofonní vyvážení (balance). Předzesilovač může být součástí celého zesilovače, což je levnější nebo může být umístěn samostatně ve zvláštní skřínce.
- Pásmový korektor (equalizér) – Dražší a komfortnější varianta korekčního předzesilovače. Může být řešen odděleně pro oba stereofonní kanály nebo společně. Jako ovládací prvek se používají potenciometry, které slouží k potlačení nebo zdůraznění kmitočtových pásem. Čím větší je počet potenciometrů, tím více kmitočtových pásem lze potlačovat nebo zdůrazňovat. Equalizéry se korigují nedostatky frekvenčního rozsahu přehrávaného signálu, případně ke zdůraznění nebo potlačení některých hudebních nástrojů. Používají se otočné nebo tahové potenciometry.

#### 1.1.2.3 Výkonový zesilovač

Koncové zesilovače se nazývají **výkonové zesilovače** a tvoří poslední stupeň. Zesilují signál přiváděný ze zdroje přes předzesilovač na požadovaný výkon do zátěže (reproduktoru). Nejčastěji se používá jednočinný nebo dvojčinný koncový stupeň. Kvalitní výkonový zesilovač má

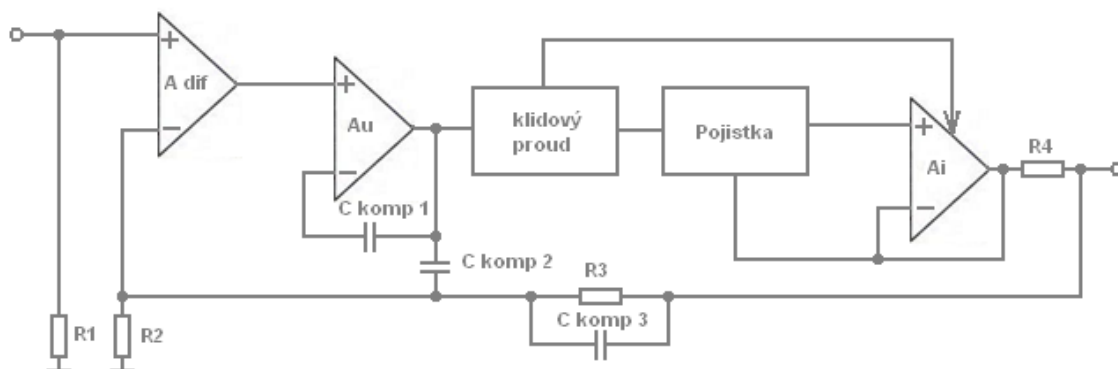
- lineární frekvenční charakteristiku
- konstantní výkon v celém kmitočtovém pásmu
- minimální nelineární zkreslení
- velký odstup cizích napětí

Pro ochranu koncového zesilovače (zejména jeho výkonových prvků) a zátěže (většinou reproduktor, reprosoustava) se koncový zesilovač doplňuje ochrannými obvody, kontrolující zpravidla:

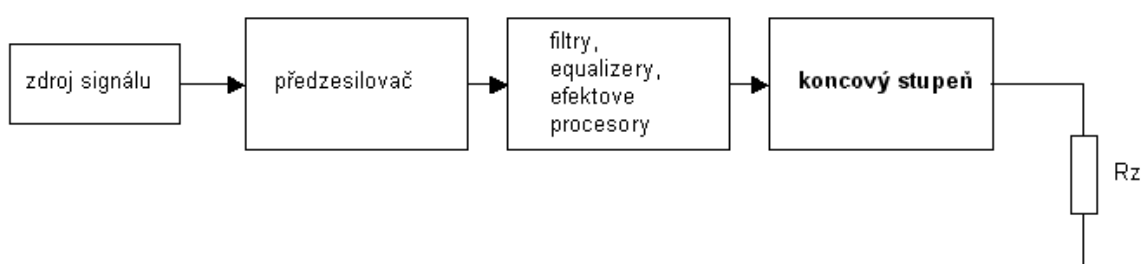
- výskyt stejnosměrného napětí na výstupu
- teplotu výkonových stupňů
- proud protékající zátěží
- velikost napětí na vstupu (toto se obvykle řeší zatočením Zenerových diod na vstup proti zemi, které vysoké napětí sráží)
- správnou polaritu napájecího napětí
- zkrat na výstupu

### Obvodové řešení

Výkonový zesilovač má zpravidla blokové schéma podle **Obr. 1.1**. První stupeň tvoří vstupní zesilovač, v našem případě diferenciální zesilovač. Druhý stupeň je napěťový zesilovač, následující obvod slouží k nastavení a stabilizaci klidového proudu koncového stupně. V obvodu nechybí pojistka pro omezení maximálního výstupního proudu a nakonec vlastní zesilovač proudu. Celý zesilovač bývá svázaný napěťovou nebo proudovou zpětnou vazbou. Schéma zapojení bylo převzato z [5].



**Obr. 1.1** Blokové schéma výkonového zesilovače



**Obr. 1.2** Funkce a umístění výkonového zesilovače v zesilovacím řetězci

#### 1.1.2.4 Reprodukory

Reproduktor je elektroakustický měnič, který převádí elektrické kmity na mechanické, které jsme schopni slyšet. Uvádí se rozsah v kmitočtovém pásmu 20Hz – 16kHz. Jediný reproduktor není schopen dosáhnout tohoto spektra kmitočtů, proto se vyrábí reproduktory pro jednotlivá kmitočtová pásma. Reprodukory hloubkové, středové, výškové.

## 1.2 Základní třídy zesilovačů

Výkonové zesilovače se dělí do tříd, které charakterizují jejich pracovní vlastnosti nebo princip, na kterém zesilovač funguje. Třída zesilovače je dána polohou pracovního bodu na převodní charakteristice tranzistoru, tj. závislostí kolektorového proudu  $I_C$  na proudu báze  $I_B$ .

**Zesilovače jsou z tohoto pohledu děleny do 3 skupin**

|                                  |             |
|----------------------------------|-------------|
| Základní (lineární)              | A, B, AB, C |
| Spínané (impulsní)               | D, E, S, T  |
| Další (s preregulátorem, laděné) | F, G, H     |

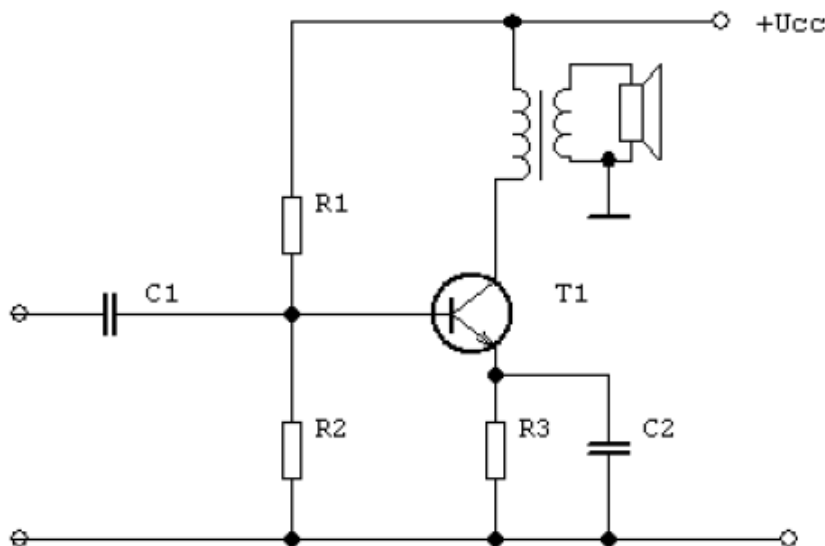
**Tab. 1.1** Základní dělení tříd

### 1.2.1 Výkonový zesilovač ve třídě A

Výkonové součástky (bipolární tranzistory, MOSFET, elektronky,...) se v koncovém stupni třídy A používají obvykle v jednočinném zapojení a mají nastavený klidový proud takové velikosti, aby byly stále ve vodivém (neboli aktivním) stavu.

Díky velkému klidovému proudu pracují výkonové součástky zhruba uprostřed své lineární pracovní oblasti (tranzistorem prochází proud po celou dobu periody vstupního střídavého signálu), a tak mají ze všech tříd nejmenší zkreslení signálu, avšak velký příkon a ztrátový výkon. Další nevýhodou je malá energetická účinnost koncového stupně a vysoké nároky na chlazení zesilovače. To jsou důvody, proč jsou zesilovače třídy A velice drahé a prodávají se velice málo, pouze na trhu High-End zařízení, kde se uvádí podíl zhruba 10 procent ze všech zesilovačů na spotřebitelském trhu. Teoreticky je maximální účinnost tohoto zesilovače 50%, prakticky lze dosáhnout účinnosti kolem 30%.

Schéma zesilovače třídy A znázorňuje **Obr. 1.3**.



**Obr. 1.3** Schéma zapojení jednočinného zesilovače ve třídě A

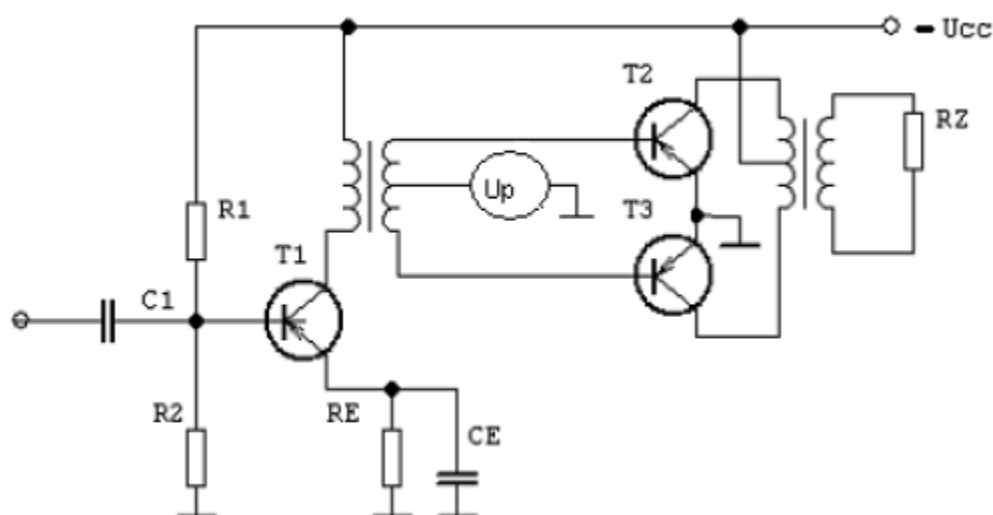
### 1.2.2 Výkonový zesilovač ve třídě B

Výkonové součástky se v koncovém stupni třídy B používají ve dvojčinném zapojení a mají nastavený nulový klidový proud. V jedné polovině koncového stupně jsou výkonové součástky aktivní pouze při kladné polaritě zpracovávaného signálu a při záporné polaritě signálu jsou nevodivé. Obě poloviny koncového stupně se tak v závislosti na polaritě nf signálu střídají v činnosti a vzájemně se doplňují.

Přechod z nevodivého do aktivního stavu je pouze pozvolný, proto jsou v okolí průchodu zpracovávaného signálu nulou výkonové součástky v obou polovinách koncového stupně téměř nevodivé a na průběhu výstupního signálu tak vzniká jakýsi "schod" (viz. **Obr. 1.5**) Vzniklé nelineární zkreslení signálu se nazývá přechodové, je velmi dobře slyšitelné a uplatní se zejména u signálů s malou amplitudou.

Výhodou třídy B oproti třídě A je větší účinnost - bez signálu neodebírá koncový stupeň žádný proud. Při malém signálu se proudový odběr jen pozvolna zvětšuje. Další výhodou oproti třídě A je menší ztrátový výkon a menší nároky na chlazení. Výkonové zesilovače čistě ve třídě B se díky zkreslení v nízkofrekvenční technice téměř nepoužívají. Teoreticky dosažitelná účinnost zesilovače třídy B je 78.5%.

Schéma zesilovače třídy B znázorňuje **Obr. 1.4**.



**Obr. 1.4** Schéma zapojení dvoučinného zesilovače ve třídě B

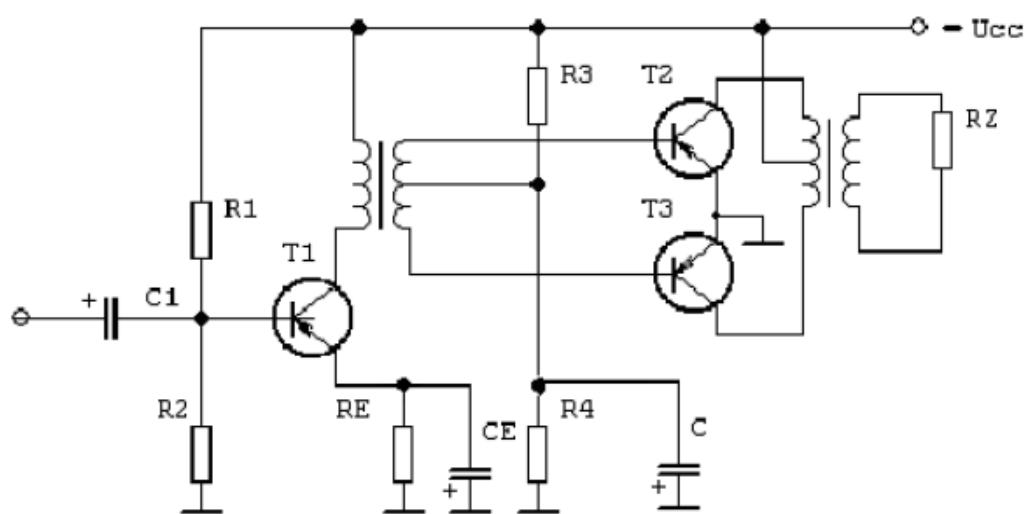


**Obr. 1.5** Vznik nelineárního (přechodového) zkreslení signálu

### 1.2.3 Výkonový zesilovač ve třídě AB

Třída AB - jak již ze samotného označení vyplývá, je kompromisním řešením mezi třídami A a B s tím, že má poněkud blíže ke třídě B. Jedná se v podstatě o zesilovač pracující ve třídě B se zavedeným malým klidovým proudem (řádově desítky až stovky mA), který výrazně zmenšuje přechodové zkreslení. Klidový proud sice nepatrně zvětšuje spotřebu a zmenšuje účinnost, ale zdaleka ne tak, jako u zesilovačů třídy A.

Výhodou je naopak podstatné zmenšení přechodového zkreslení ve srovnání s výkonovými stupni v třídě B. Zjednodušeně lze říci, že při malých signálech pracuje zesilovač třídy AB jako zesilovač ve třídě A a při velkých signálech jako zesilovač ve třídě B se všemi výhodami z toho vyplývajících - dobrou účinností a velmi malým nelineárním zkreslením. Z těchto důvodů se staly výkonové zesilovače pracující ve třídě AB nejoblíbenější a většina lineárních zesilovačů na trhu jsou právě výkonové zesilovače ve třídě AB. Účinnost zesilovače třídy AB se pohybuje mezi účinnostmi třídy A a B, přibližně kolem 70 %. Schéma zesilovače třídy AB znázorňuje **Obr. 1.6**.

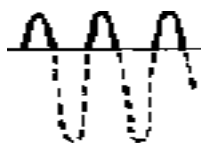


**Obr. 1.6** Schéma zapojení dvoučinného zesilovače ve třídě AB

### 1.2.4 Výkonový zesilovač ve třídě C

Výkonové součástky zesilovače v této třídě mají nulový klidový proud a navíc mají zavedeno předpětí, které je dále zavírá. Proto přecházejí z nevodivého do aktivního stavu až ve špičkách vstupního signálu (viz **Obr. 1.7**) jejichž velikost dosahuje řádu desítek procent napájecího napětí. Zkreslení výstupního signálu je proto ještě mnohem výraznější než ve třídě B.

Z tohoto důvodu jsou výkonové zesilovače ve třídě C v nízkofrekvenční technice nepoužitelné. Používají se však v jednočinném i ve dvojčinném zapojení ve vysokofrekvenční technice ve vysílačích.



**Obr. 1.7** Zkreslení zesilovače ve třídě C

### 1.2.5 Výkonový zesilovač ve třídě D

Zesilovače ve třídě D již nepatří do kategorie lineárních zesilovačů, neboť pro zpracování signálu používají techniku pulsně šířkové modulace PWM (Pulse Width Modulation). Pro tento typ zesilovačů se často užívá označení "digitální zesilovač". Největší výhodou této konstrukce je vysoká účinnost, až 80%. Tato vysoká účinnost vyplývá z principu činnosti výkonových tranzistorů zesilovače. Tyto jsou totiž buď plně sepnuty, nebo úplně vypnuty. Z toho vyplývá ale i nevýhoda - větší zkreslení, než mají zesilovače tříd A a AB. Zesilovače třídy D jsou ale relativně nové a jsou tedy ještě ve vývoji (lze tedy očekávat zlepšení technologie). Výkonové zesilovače ve třídě D zpracovávají analogový signál, s použitím techniky pulsně šířkové modulace PWM, což je klíčem k dosažení extrémně velké účinnosti tohoto typu výkonových zesilovačů. Na výstupu zesilovače jsou pravoúhlé impulsy o vysokém kmitočtu s proměnnou šířkou, která nese informaci o analogovém vstupním signálu.

### 1.2.6 Výkonový zesilovač ve třídě G

Výkonové zesilovače ve třídě G využívají zpravidla koncový stupeň ve třídě AB, takže se neliší v práci samotného koncového stupně. Liší se však ve způsobu napájení koncových tranzistorů, které je dvou nebo i vícestupňové, což zjednodušeně znamená, že se velikost napájecího napětí koncového stupně přizpůsobuje velikosti požadovaného výstupního výkonu. Při menším výkonu pracuje koncový zesilovač s menším napájecím napětím, a když výstupní výkon přesáhne určitou nastavenou velikost, je připojeno větší napájecí napětí, aby koncový stupeň mohl dodat větší výstupní výkon.

Výhodou pracovní třídy G je zvětšená účinnost oproti pracovní třídě AB a z toho odvozená menší hmotnost a rozměry zesilovače. Nevýhodou je složitější návrh zapojení.

### 1.2.7 Výkonový zesilovač ve třídě H

Výkonové zesilovače v této třídě mají stejný základ jako zesilovače ve třídě G, ale velikost napájecího napětí koncového stupně se v tomto případě nemění skokově, nýbrž přesně sleduje velikost vstupního signálu.

Napájecí napětí koncového stupně je tak drženo přesně na takové úrovni, jaká je potřebná pro zachování správné činnosti výkonových součástek s ohledem na aktuální velikost požadovaného výstupního výkonu. Na výkonových součástkách zesilovače je tedy vždy konstantní úbytek napětí.

Výhodou je větší účinnost oproti třídě G, nevýhodou ještě složitější návrh zapojení.

### 1.2.8 Výkonový zesilovač ve třídě S

Jedná se o označení modernějších typů spínaných (neboli digitálních) výkonových zesilovačů, které se od třídy D liší tím, že díky implementaci novějších metod digitálního zpracování signálu již na výstupu nepotřebují filtr LC k potlačení spínacího kmitočtu a dalších produktů spínání - tzv. spínané zesilovače "Filterless".

Výhodou těchto zesilovačů je velká účinnost, pohybující se zpravidla kolem 80 % a více. Nevýhodou je běžně větší zkreslení, než se dosahuje se zesilovači ve třídě A nebo třídě AB.

### 1.2.9 Výkonový zesilovač ve třídě T

Výkonové zesilovače ve třídě T tvoří principem činnosti a z toho vyplývajícími dosaženými parametry průlom v nelineárním, digitálním zpracování signálu. Výkonové zesilovače pracují na podobném principu jako zesilovače třídy D, ale s použitím vylepšeného a velice dobře propracovaného algoritmu řízení. Výsledkem je účinnost výkonového zesilovače kolem 90 % a především to, že zesilovače této třídy dosahují opravdu vynikajících zvukových parametrů.

Firma Tripath Technology vyvinula speciální algoritmus pro modulaci zpracovávaného nízkofrekvenčního vstupního signálu vzorkovacím signálem s vysokým kmitočtem. Technologie kombinuje analogové i digitální zpracování signálů a celý algoritmus byl vyvinut na základě nejnovějších poznatků. Zmiňovaný originální algoritmus je odvozen od algoritmů využívaných zejména v signálových procesorech pro telekomunikace. Nf výkonové zesilovače s těmito obvody dosahují vynikajících kvalitativních parametrů, mezi něž v první řadě patří velmi malé zkreslení a vysoká účinnost při dosažených velkých výstupních výkonech. Z velké účinnosti zesilovačů automaticky vyplývá řada dalších výhod, jako jsou minimální nároky na chlazení a následně i nižší náklady s tím spojené. Potřeba buď žádného, nebo jen velmi malého chladiče přispívá k celkové robustnosti zesilovače a kompaktnosti řešení - odtud vynikající poměr objemu a váhy zesilovače k výstupnímu výkonu. I cena je s ohledem na dosažené vynikající parametry poměrně nízká a celkové řešení svým způsobem jednoduché.

Nevhodný návrh desky s plošnými spoji, rozmístění součástek či odchylky jejich parametrů mohou výrazně ovlivnit parametry celého zesilovače.

## 1.3 Parametry zesilovačů třídy Hi-Fi

**Hi-Fi** (High Fidelity for Music and Voice), což znamená vysoká věrnost hudby a hlasu. Aby bylo možné vzájemně spojovat přístroje různých výrobců, byly stanoveny v průběhu jejich vývoje různé normy. Tak vznikla v roce 1973 německá norma DIN 45 500, která je mezinárodně uznávaným standardem. Přístroje, které tyto normy splňují nebo i překračují, mohou být označovány jako Hi-Fi přístroje.

Norma Hi-Fi je v současnosti už zastaralá - technické možnosti umožňují výrobu mnohem kvalitnějších zařízení. Ty nejkvalitnější zařízení pro opravdu náročné posluchače se označují Hi-End.

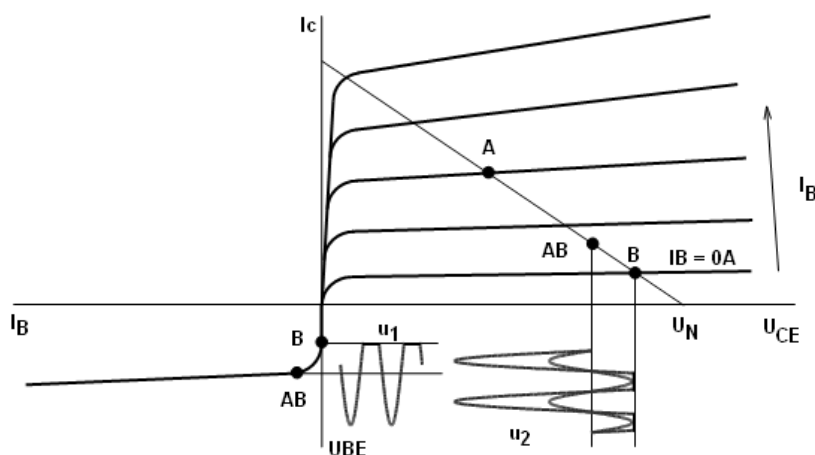
**Dle normy DIN 45 500 je třída Hi-Fi dána parametry:**

- Nejsledovanějším parametrem zesilovače je jeho výstupní výkon. Výkon stereofonních by měl být vyšší než 2x6W
- Hodnota zkreslení je požadována v rozsahu 40Hz – 12,5kHz nižší, než 1%
- Přeslechy mezi kanály by měly dosahovat u výkonových stereofonních zesilovačů 40dB, mezi různými vstupy při signálu 1kHz pak minimálně 50dB
- Odstup rušivých napětí 50dB při výstupním výkonu 50mW, aby bylo možno posoudit odolnost proti brumovým a rušivým napětím

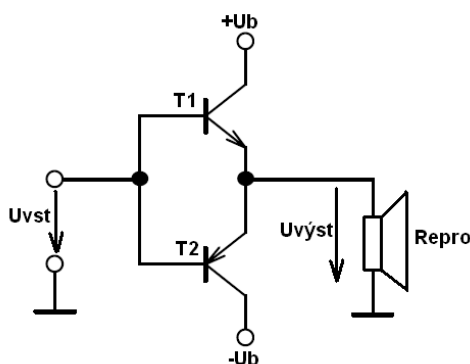
## 2 Zesilovač třídy AB

### 2.1 Popis třídy AB a její vznik z třídy B

Klidový pracovní bod je ve třídě AB (**obr. 2.1**) nastaven velikostí předpětí  $U_{BE} > U_D$  do bodu AB za koleno vstupní charakteristiky. Tím se omezí nelineární zkreslení zesilované kladné půlvlny (u NPN tranzistoru) při malých signálech, které nastává v B třídě vlivem zakřivení vstupní a převodní charakteristiky. Při malých signálech se pracovní bod může pohybovat na obě strany jako ve třídě A, při větších signálech s velkou účinností jako ve třídě B. AB třída je kompromis mezi třídou A a B. V AB třídě pracuje většina výkonových zesilovačů (ale ve dvojčinném zapojení pro zesílení obou půlvln). U obou tříd vzniká přechodové zkreslení, které je již oproti třídě B podstatně menší. Přechodové zkreslení ve třídě B vzniká vlivem chybějícího předpětí, kdy se tranzistory začnou otevírat až od napětí kolem 0,5V mezi bází a emitorem B-E. Aby zesilovač pracoval ve třídě AB, musí tranzistory téct malý klidový proud. Jeho velikost je zpravidla několik desítek mA u bipolárních tranzistorů, až několik stovek mA u tranzistorů řízených polem. Pro snížení přechodového zkreslení zavedeme předpětí přechodu B-E.



Obr. 2.1 Pracovní bod ve třídě AB



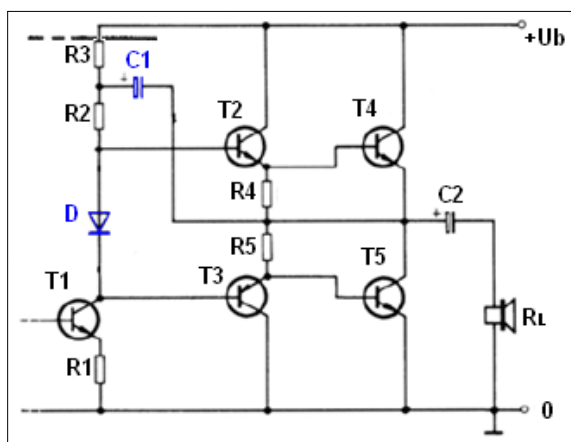
Obr. 2.2 Principiální schéma zesilovače ve třídě B (bez předpětí)

## 2.2 Způsoby zavedení předpětí

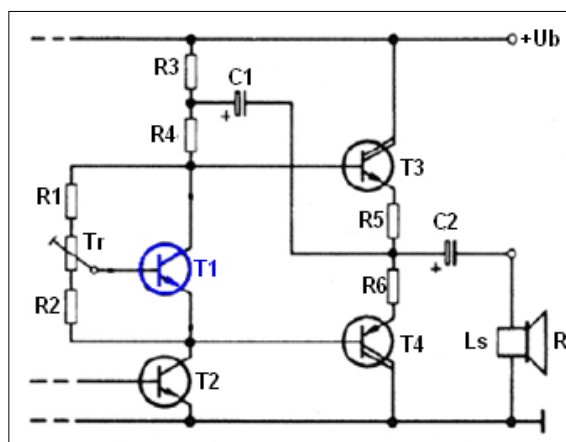
Potřebné předpětí báze lze vytvořit zapojením křemíkové diody (**Obr. 2.3**) do budícího obvodu, která má v propustném směru stejnou hodnotu propustného napětí, a protože má malý diferenciální odpor, tak prakticky neovlivňuje vstupní střídavý signál. Oba koncové tranzistory lze pak budit stejným budičem.

V případě, že by byly použity tranzistory v Darlingtonově zapojení, použijeme více diod v sérii nebo Zenerovu diodu.

Další možností realizace předpětí je použití tranzistoru (**Obr. 2.4**) jako elektronického regulačního odporu. Schémata zapojení byla převzata z [4].



**Obr. 2.3** Nastavení klidového proudu diodou



**Obr. 2.4** Nastavení klidového bodu tranzistorem

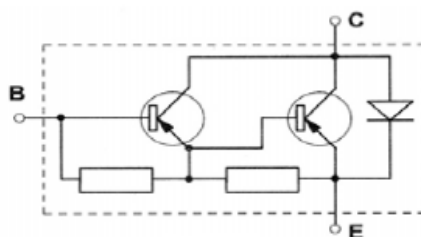
## 2.3 Teplotní stabilizace zesilovače

Pro teplotní stabilizaci zesilovače je třeba zajistit, aby byl v celém teplotním rozsahu konstantní klidový proud. Zahříváním koncových tranzistorů se klidový proud neustále zvětšuje, což způsobuje nárůst teploty a proudu zesilovačů až dojde ke zničení zesilovače. Tento efekt je označován jako termická kladná zpětná vazba (+ZV).

Teplotní stabilizaci zesilovače lze provádět termistorem nebo diodou, které jsou v úzkém teplotním kontaktu s koncovými tranzistory. V případě použití termistoru se společně s trimrem zapojí do děliče k tranzistoru, který řídí předpětí.

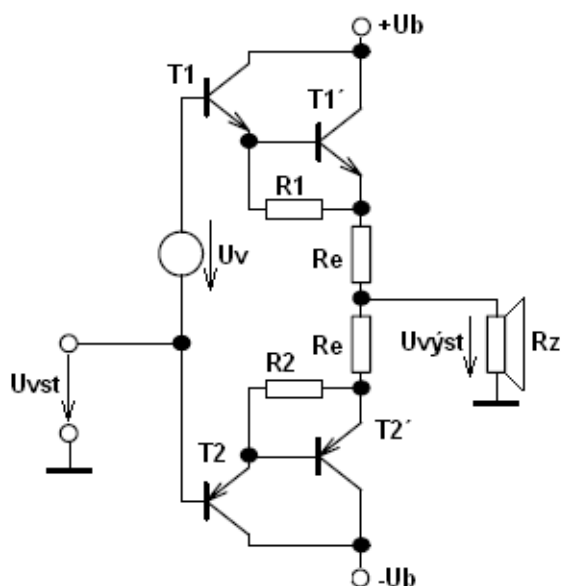
## 2.4 Zesilovač ve třídě AB s velkými výstupními výkony

Pro dosažení velkého zesílení lze použít Darlingtonova zapojení jednotlivých tranzistorů nebo zapouzdřeného provedení, obvykle i s příslušnými rezistory a ochrannými diodami (např. tranzistor BDX66). Tyto tranzistory není třeba párovat.

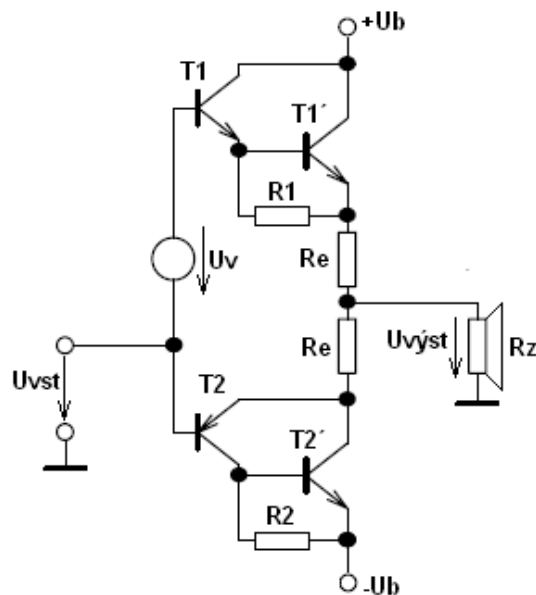


**Obr. 2.5** Vnitřní struktura tranzistorů v Darlingtonově zapojení - tranzistor BDX66

## 2.4.1 Způsoby zapojení koncového zesilovače



**Obr. 2.6** Zapojení komplementární Darlingtonovy dvojice



**Obr. 2.7** Kvazikomplementární Darlingtonovo zapojení

### 2.4.1.1 Komplementární dvojice

Využívají dvou tranzistorů stejných elektrických vlastností, ale opačné polarity. Jeden tranzistor je typu PNP a druhý typu NPN. Tranzistory musí mít stejný výkon, zesílení a zbytkový proud. Toto zapojení se používá pro menší výkony.

### 2.4.1.2 Komplementární Darlingtonova dvojice

Pro dosažení vyššího proudového zesilovacího činitele je nutné použít tranzistory s velkým zesilovacím činitelem, tedy tranzistory v Darlingtonově zapojení. Možné zapojení je znázorněno na **Obr. 2.6**. Jedná se o zapojení dvou dvojic tranzistorů typu PNP a NPN. Komplementární Darlingtonova dvojice se používá pro vyšší výkony.

### 2.4.1.3 Kvazikomplementární Darlingtonovo zapojení

U kvazikomplementárních koncových stupňů se používají výkonové tranzistory téže vodivosti. Jejich báze jsou buzeny sice stejně velkým napětím, avšak v protifázi. Tyto dva budící signály s opačnou fází se vytvoří v budícím stupni s komplementárními párovanými tranzistory malého výkonu. Tento budič v komplementárním zapojení musí dodat dostatečný proud pro buzení kvazikomplementárního koncového stupně. Toto zapojení bylo rozšířené v době, kdy byly výkonové komplementární tranzistory hůře dostupné. Kvazikomplementární zapojení je znázorněno na **Obr. 2.7**.



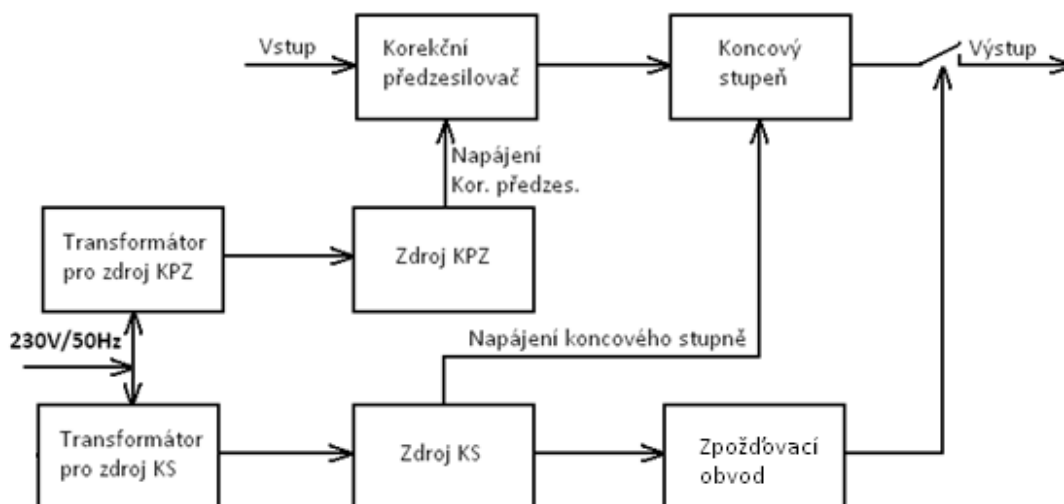
## 3 Vlastní návrh Zesilovače

### 3.1 Úvod

Tato část práce se bude zabývat již konkrétním návrhem zesilovače. Zvolil jsem návrh zesilovače ve třídě AB, neboť vyniká dobrou účinností a velmi malým nelineárním zkreslením. Jeho další výhodou je, že má zavedený klidový proud, tudíž při zapnutí zesilovače naprázdno tolik „nešumí“. Zesilovač bych chtěl uplatnit jako zesilovač hudby v domácím prostředí.

Jednotlivé kapitoly se zabývají návrhem jednotlivých částí zesilovače – korekčního předzesilovače, koncového zesilovače a napájecího zdroje. Pro návrh předzesilovače a koncového zesilovače jsou uvedena simulační schémata v programu PSpice a na závěr výsledky simulací. Dále byly vypočteny parametry transformátoru pro zdroj koncového zesilovače a tepelný odpor chladiče.

### 3.2 Blokové schéma zesilovače



Obr. 3.1 Blokové schéma navrhovaného řešení

#### Popis jednotlivých bloků:

|                                    |                                                                                                            |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Korekční předzesilovač</b>      | Upravuje hlasitost, hloubky, výšky, stereofonní vyvážení                                                   |
| <b>Koncový stupeň</b>              | Zesiluje výkonově signál přivedený z předzesilovače                                                        |
| <b>230V/50Hz</b>                   | Síťové napájení ze zásuvky                                                                                 |
| <b>Transformátor pro zdroj KS</b>  | Transformátor pro zdroj koncového stupně                                                                   |
| <b>Zdroj KS</b>                    | Zdroj pro koncový stupeň                                                                                   |
| <b>Zpoždovací obvod</b>            | Jednoduchý obvod, který zabraňuje „lupání“ reproduktorů, při jejich pozdním zapojení po zapnutí zesilovače |
| <b>Transformátor pro zdroj KPZ</b> | Transformátor pro zdroj korekčního předzesilovače                                                          |
| <b>Zdroj KPZ</b>                   | Zdroj korekčního předzesilovače                                                                            |

## 3.3 Korekční předzesilovač

### 3.3.1 Popis zapojení

Korektor je pasivní a v obvodu jsou použity ultra-nízko-šumové operační zesilovače typu NE5534AN. Pasivní korektory vynikají především nízkým přechodovým zkreslením a vyrovnaným přenosem signálu v celém frekvenčním pásmu. Popis korekčního předzesilovače bude pouze pro jeden kanál. Druhý kanál je totožný. Schéma zapojení korekčního předzesilovače bylo převzato z [7].

Korektor je tvořen vstupním a výstupním zesilovačem a mezi ně jsou zařazeny pasivní korekční obvody (Baxandallův korektor hloubek – 100Hz a výšek – 10kHz), regulátor vyvážení (balance) a regulátor hlasitosti (volume). Vstupní zesilovač (IO1) je zapojen s operačním zesilovačem NE5534AN. Nízkofrekvenční signál přivádíme přes kondenzátor C1 na neinvertující vstup zesilovače (IO1). Velikost vstupního odporu korekčního předzesilovače je dána odporem rezistoru R1. Zpětná vazba je dána děličem s rezistory R2 (1kΩ) / R5 (10kΩ). Dělicím poměrem tohoto děliče je nastaveno napěťové zesílení Au.

$$Au = 1 + R5/R2 = 1 + 10k\Omega/1k\Omega = 11 \quad (3.1)$$

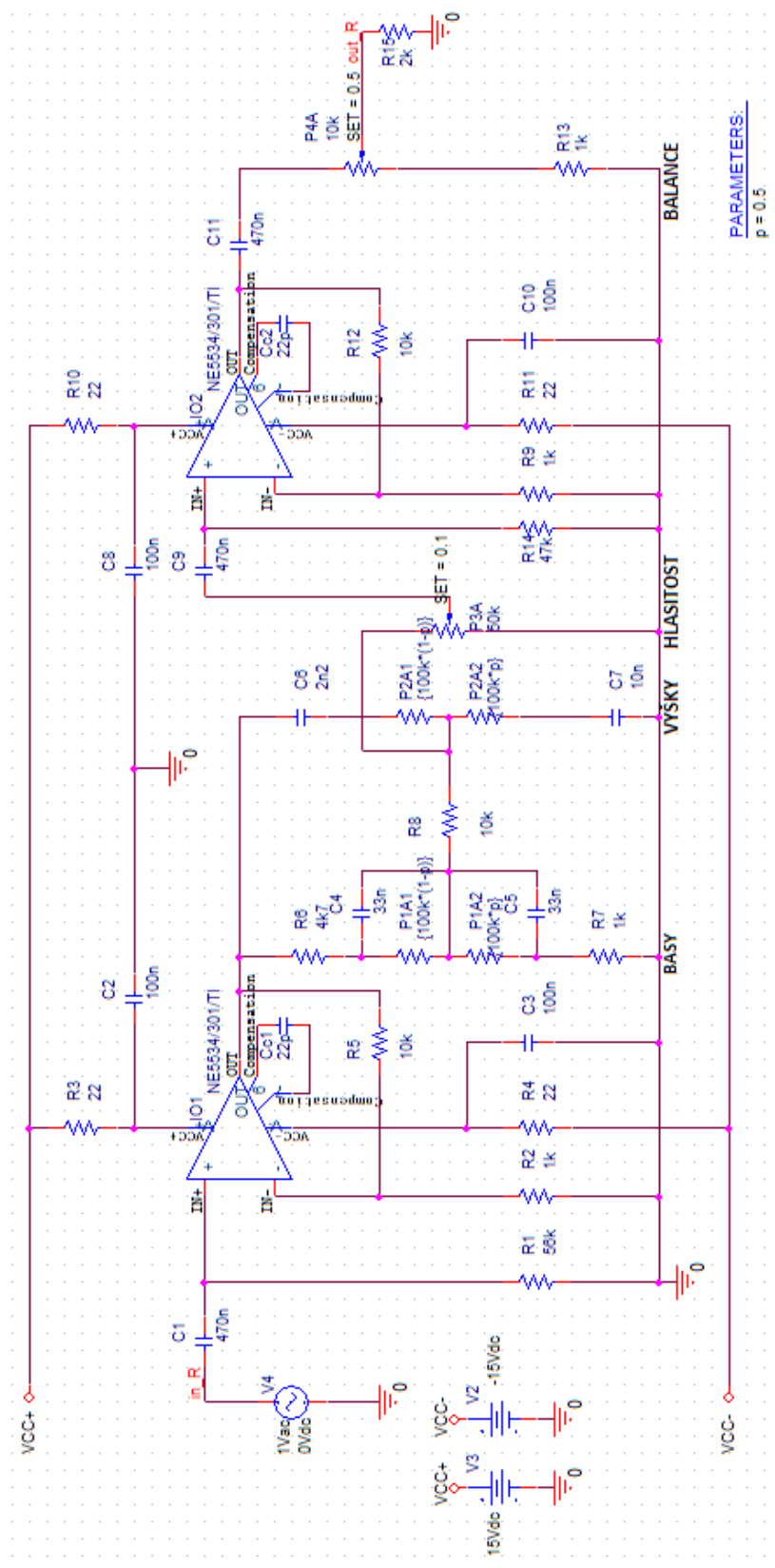
Napájecí vývody operačního zesilovače IO1 jsou zablokovány keramickými kondenzátory C2/C3. Vstupní zesilovač s IO1 má velmi malý výstupní odpor a působí tedy jako převodník impedance.

Za vstupním zesilovačem je zapojení pasivních korekčních obvodů nízkofrekvenčního audio signálu. Obvod s potenciometrem P1A/P1B slouží ke korekci hloubek, obvod s potenciometry P2A/P2B koriguje výšky. Rezistor R8 zabraňuje vzájemnému ovlivňování korekčních obvodů pro basy a pro výšky. Z korekčních obvodů je nízkofrekvenční audio signál veden na regulátor hlasitosti (volume) tvořený logaritmickým potenciometrem P3A/P3B.

Z regulátoru hlasitosti je signál dál veden do výstupního zesilovače (IO2) typu NE5534AN, jehož úkolem je vyrovnávat ztráty zesílení v pasivních korekčních obvodech pro basy a výšky. Jeho napěťové zesílení  $Au = 11$ . Zesílení je dáno zpětnovazebním děličem s rezistory R9 (1kΩ) / R12 (10kΩ). Napájecí vývody jsou zablokovány keramickými kondenzátory C8/C10. Z výstupního zesilovače signál vstupuje do regulátoru vyvážení (balance) s lineárním potenciometrem P4A/P4B.

Výrobce doporučené napájení operačního zesilovače NE5534AN je ±12V až ±18V. Deska plošných spojů a seznam součástek pro realizaci předzesilovače jsou uvedeny v příloze.

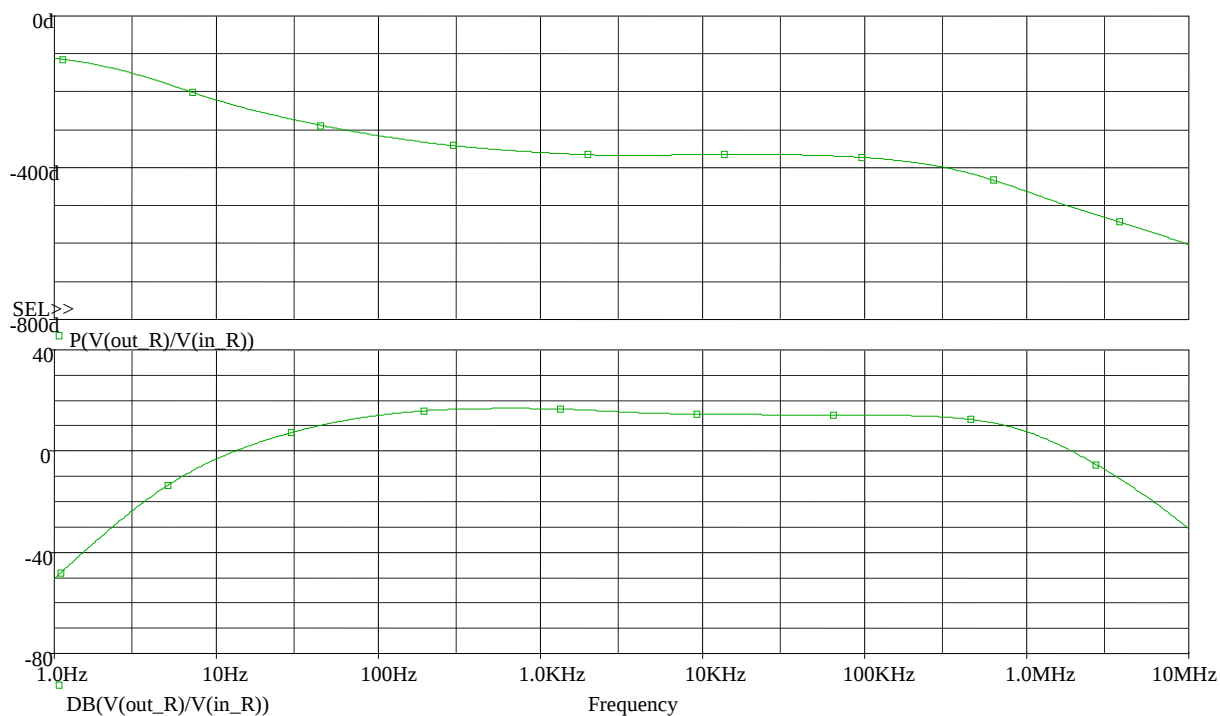
### 3.3.2 Schéma zapojení v PSpice



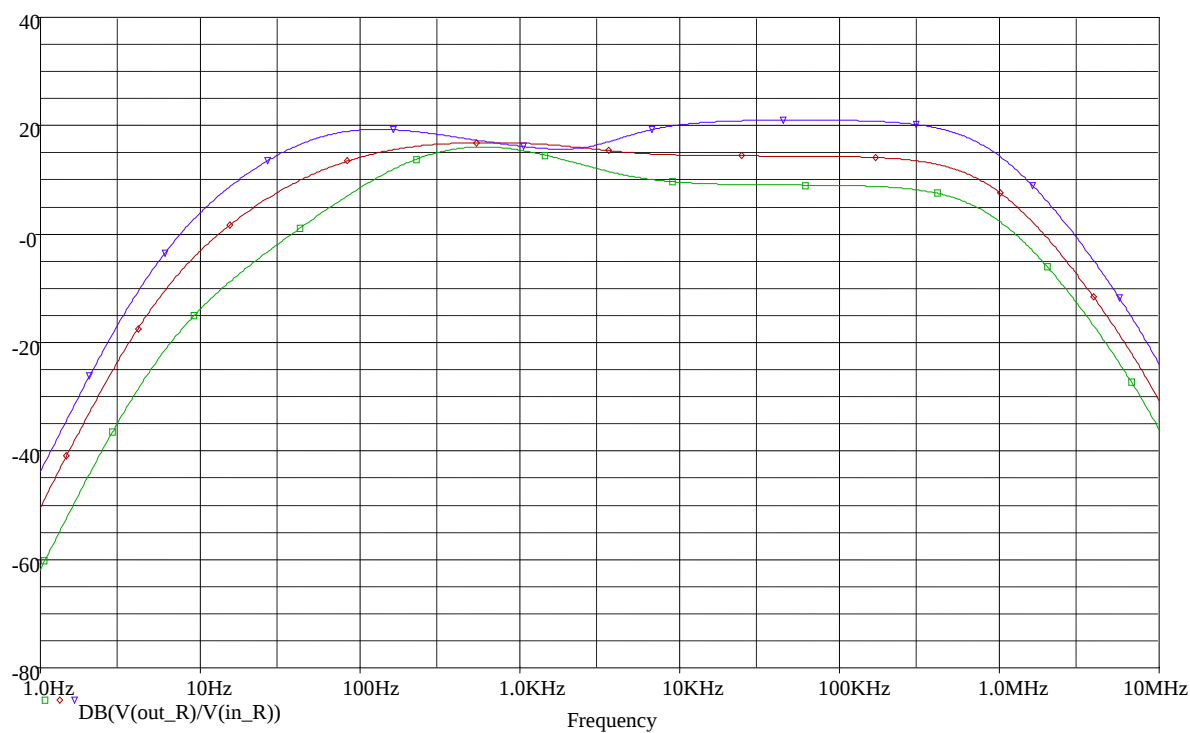
**Obr. 3.2** Schéma zapojení korekčního předzesilovače pro simulace v PSpice

### 3.3.3 Simulace v PSpice

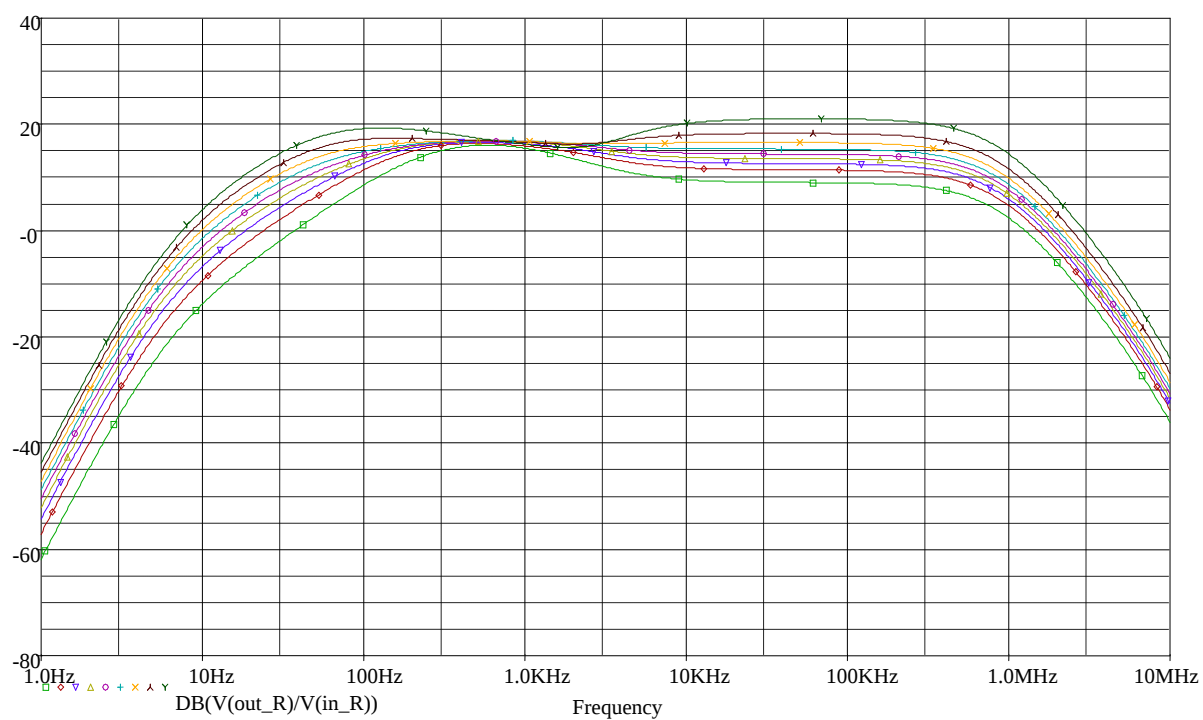
Pro simulace korekčního předzesilovače v programu PSpice, byly použity operační zesilovače typu NE5534/301 od firmy Texas Instruments. Pro kmitočtovou kompenzaci byl na kompenzační vstupy zesilovače připojen kondenzátor  $C_{c1} = C_{c2} = 22\text{pF}$ , jehož hodnota byla zvolena dle doporučení výrobce. Pro Baxandallův korektor hloubek a výšek byl použit náhradní model potenciometru - dvojice rezistorů s možností nastavení parametru  $p$ . Parametr  $p$  představuje relativní natočení potenciometru a lze ho nastavit v rozsahu hodnot  $(0;1)$ . Na **obr. 3.3** je simulace fázové a přenosové frekvenční charakteristiky korekčního předzesilovače pro nastavení parametru  $p = 0.5$ , tzn., že potenciometry byly nastaveny do střední polohy. Na **obr. 3.4** je simulace přenosové frekvenční charakteristiky pro tři různá nastavení parametru  $p$ . Pro  $p = 0.3$  (zelená křivka) dochází ke zvýraznění hloubek. Pro nastavení  $p = 0.5$  (červená křivka) by dle teoretického úvodu měl signál procházet bez úpravy. Při simulaci však došlo k mírnému zvýraznění hloubek. Pro parametr  $p = 0.9$  (modrá křivka) dochází ke zvýraznění výšek. Na **obr. 3.5** je znázorněna přenosová frekvenční charakteristika Baxandallova korektoru pro  $p = 0.1 \div 0.9$ .



**Obr. 3.3** Fázová a přenosová frekvenční charakteristika korekčního předzesilovače

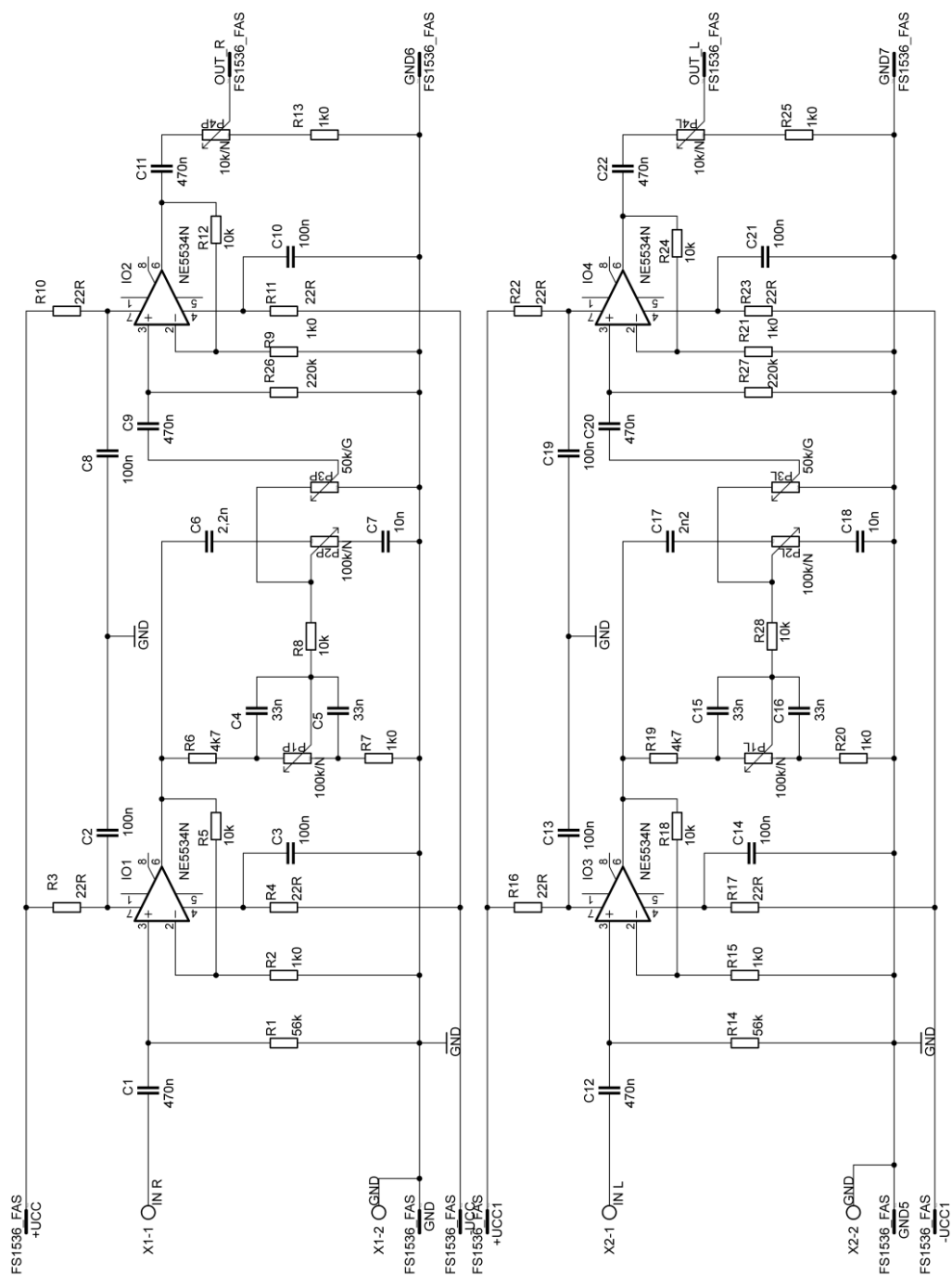


**Obr. 3.4** Přenosová frekvenční charakteristika pro různá nastavení Baxandallova korektoru



**Obr. 3.5** Přenosová frekvenční charakteristika Baxandallova korektoru pro  $p = 0.1 \div 0.9$

### 3.3.4 Schéma zapojení pro návrh DPS



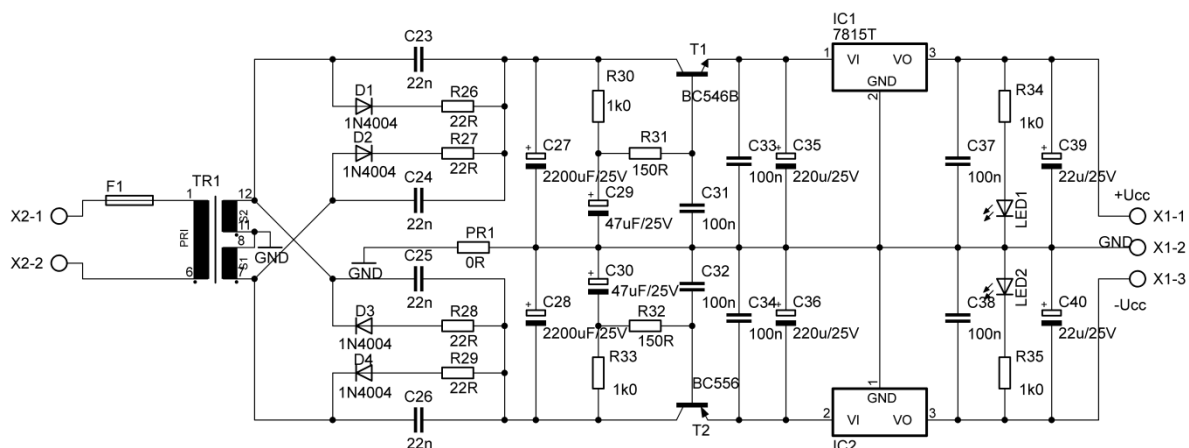
**Obr. 3.6** Schéma zapojení desky korekčního předzesilovače

## 3.4 Napájecí zdroj korekčního zesilovače

### 3.4.1 Popis zapojení

K napájení korekčního zesilovače s operačními zesilovači typu NE5534AN bude použit symetrický napájecí zdroj  $\pm 15V$  dle doporučení výrobce. Zdroj bude umístěn na samostatné DPS, aby nedocházelo k pronikání rušení do signálových obvodů. Schéma zapojení napájecího zdroje korekčního předzesilovače bylo přebráno z [7]. Napájecí zdroj je tvořen transformátorem o výkonu 8,5VA. Za transformátorem je zapojen můstkový usměrňovač složený z usměrňovacích diod D1 – D4 a sériovým zapojením rezistorů R26 – R29 pro zvýšení vnitřního odporu usměrňovače. Pro omezení pronikání parazitního rušení usměrňovačem je navíc ke každé diodě paralelně připojen polyesterový kondenzátor C23 – C26. Takto zapojený můstkový usměrňovač se výrazně podílí na filtraci a odrušení výstupního napájecího napětí. Za můstkovým usměrňovačem jsou zapojeny filtrační elektrolytické kondenzátory C27, C28 s kapacitou 2200 $\mu F$ . Násobič kapacity a tranzistor slouží pro zvýšení účinnosti filtrace a odstranění zvlnění napájecího napětí. V obvodu jsou dále zapojeny dva stabilizátory řady 78xx pro stabilizaci kladného napětí a 79xx pro stabilizaci záporného napětí. Vstup a výstup stabilizátorů je blokován keramickými kondenzátory C33, C34 a C37, C38. Pro indikaci minimálního proudového odběru, jsou na výstupu každé napájecí větve zapojeny LED diody Q1, Q2. Paralelně k nim jsou zapojeny filtrační tantalové kondenzátory C39, C40. Výstup je vyveden na trojitou svorkovnici ARK500/3SV. Deska plošných spojů a seznam součástek pro realizaci zdroje jsou uvedeny v příloze.

### 3.4.2 Schéma zapojení pro návrh DPS

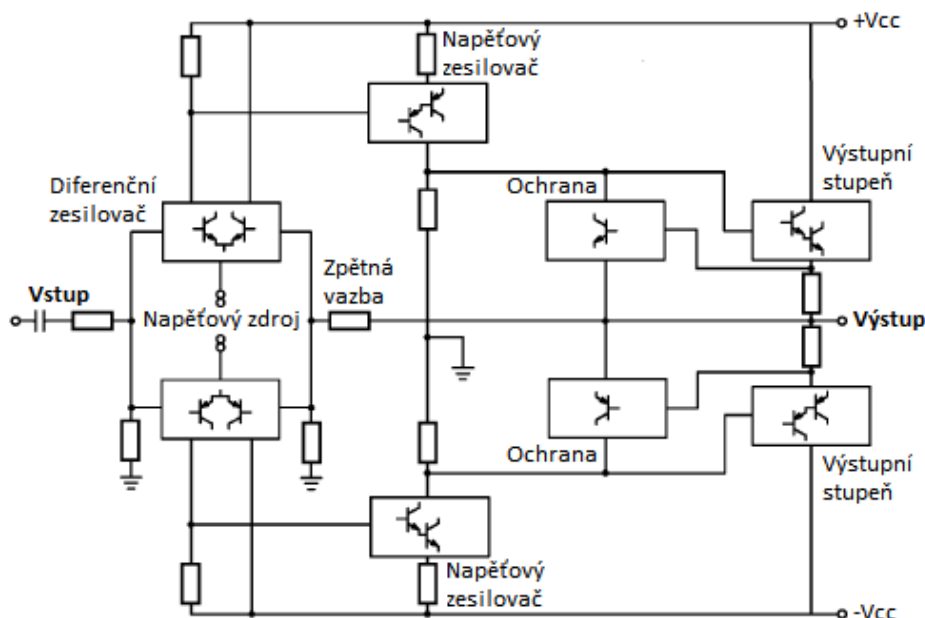


Obr. 3.7 Schéma zapojení desky zdroje pro předzesilovač

## 3.5 Koncový zesilovač

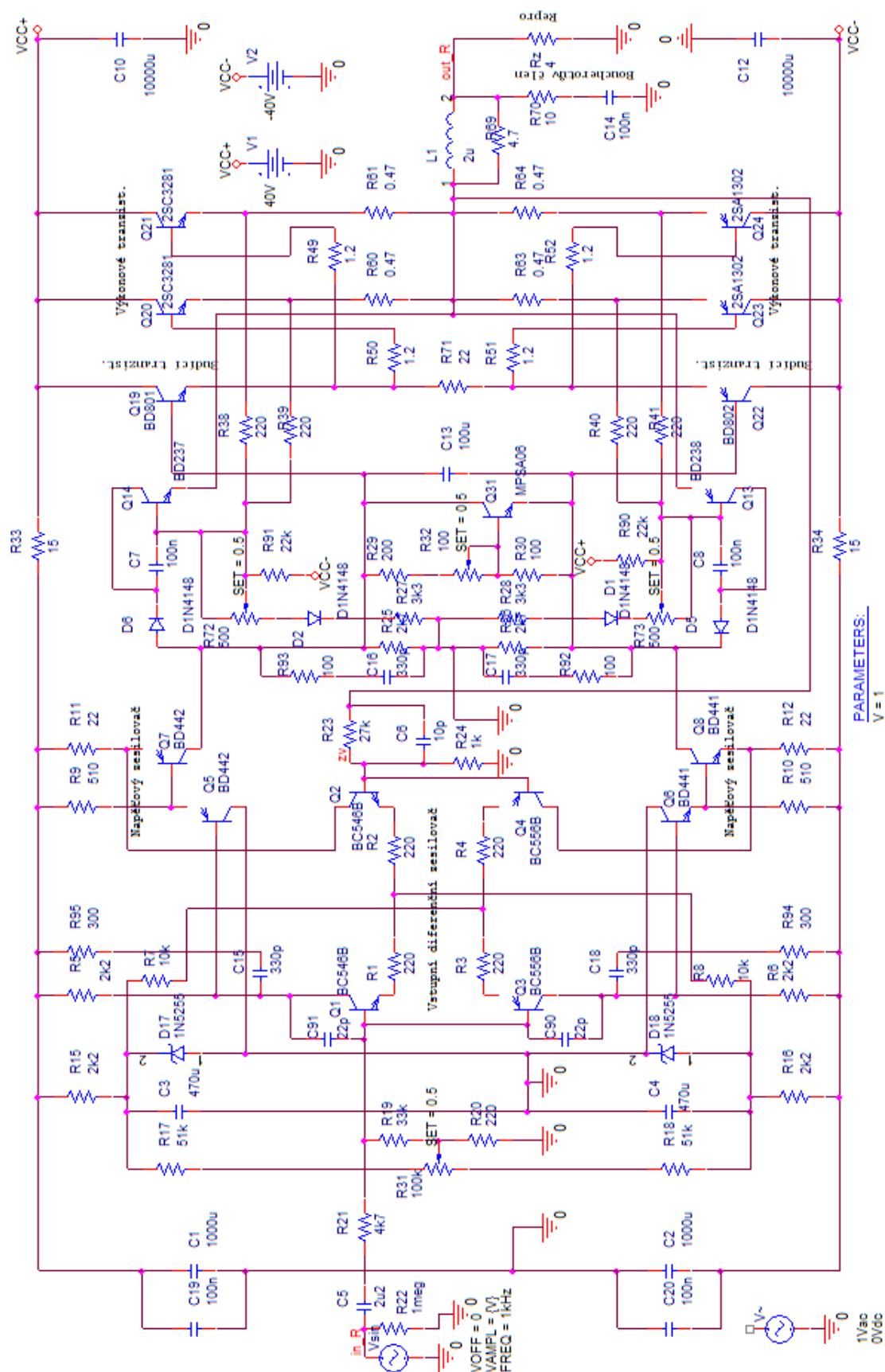
### 3.5.1 Popis zapojení

Zapojení koncového zesilovače a blokové schéma vychází z [6]. Obvod byl zjednodušen o jednu dvojici výkonových tranzistorů a napájecí napětí bylo sníženo na  $\pm 40\text{V}$ . Dále byly zvoleny jiné typy Zenerových diod a tranzistorů. Předpokládaný výkon zesilovače je asi  $2 \times 100\text{W}$  při zátěži  $4\Omega$ . Vstupní část zesilovače tvoří diferenční zesilovač s tranzistory Q1 až Q4 typu BC546B a BC556B. K jejich napájení je použit zdroj napětí  $\pm 24\text{V}$ , tvořený dvěma Zenerovými diodami. Druhým stupněm je napěťový zesilovač s tranzistory Q5, Q6 (BD140-16, BD139-16) se závěrným napětím  $80\text{V}$  v Darlingtonově zapojení. Tento stupeň pracuje v zapojení se společným kolektorem SC, aby se minimalizoval Millerův efekt (=zvětšení vstupní kapacity vlivem zesílení). Klidovým proudem tranzistorů Q5 a Q6 je určena velikost klidového proudu dvojice tranzistorů Q7 a Q8 (BD140-16, BD139-16). Rezistory R25 a R26 určují napěťové zesílení celého stupně. Na výstupech druhého stupně jsou v obou větvích zapojeny členy RC (R93, C16 a R92, C17) pro kmitočtovou kompenzaci při uzavřené smyčce zpětné vazby. K tranzistoru Q31 je připojen trimr, kterým se nastavuje klidový proud a určuje tak požadovanou třídu AB koncového stupně. Základní obvod ochrany zesilovače je tvořen tranzistory Q13 a Q14, které chrání výkonové tranzistory proti proudovému přetížení. Výstupní výkonovou část zesilovače v Darlingtonově zapojení tvoří budící tranzistory Q19 a Q22 (BD911, BD912), doplněné zapojením koncových tranzistorů Q20, Q21 a Q23, Q24 (MJL 3281AG, MJL 1302AG). Na výstupu před výstupními svorkami je zapojena tlumivka L1 k potlačení vf. kmitání a Boucherotův člen (R70, C14), který zabráňuje oscilacím na horním okraji akustického pásma, kde je impedance reproduktoru již dostatečně velká pro vznik oscilací. Deska plošných spojů a seznam součástek pro realizaci koncového zesilovače jsou uvedeny v příloze.



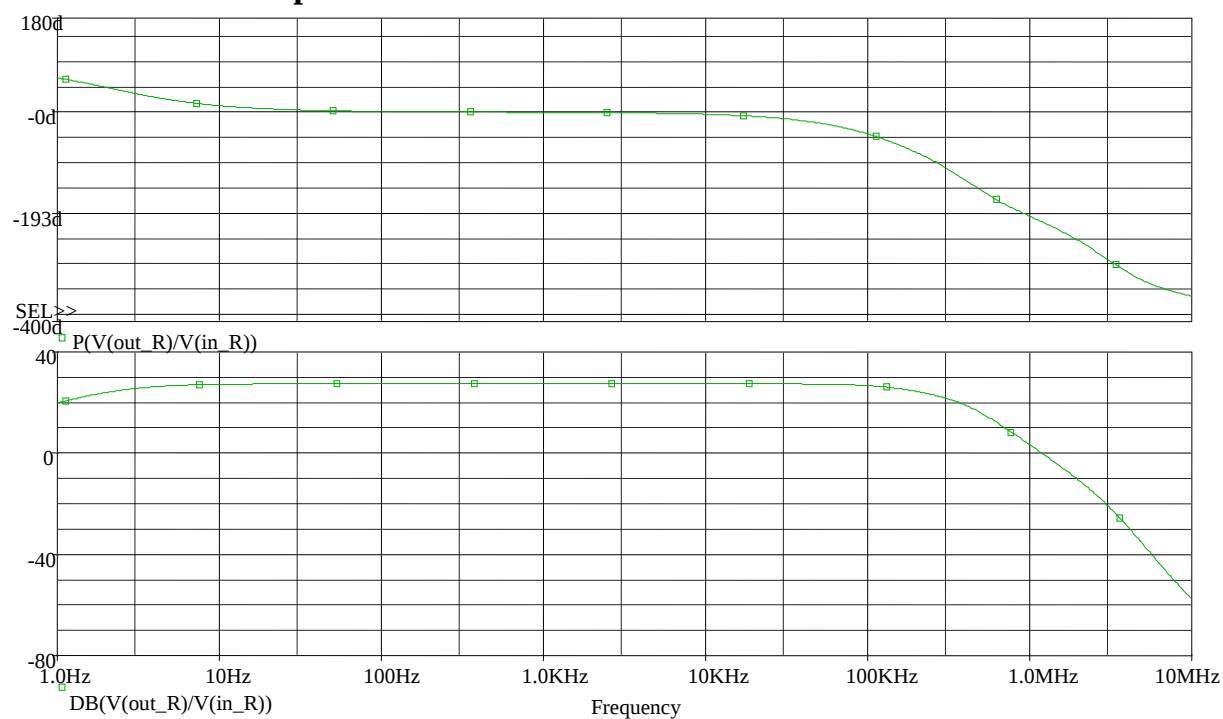
Obr. 3.8 Blokové schéma koncového zesilovače

### 3.5.2 Schéma zapojení v PSpice

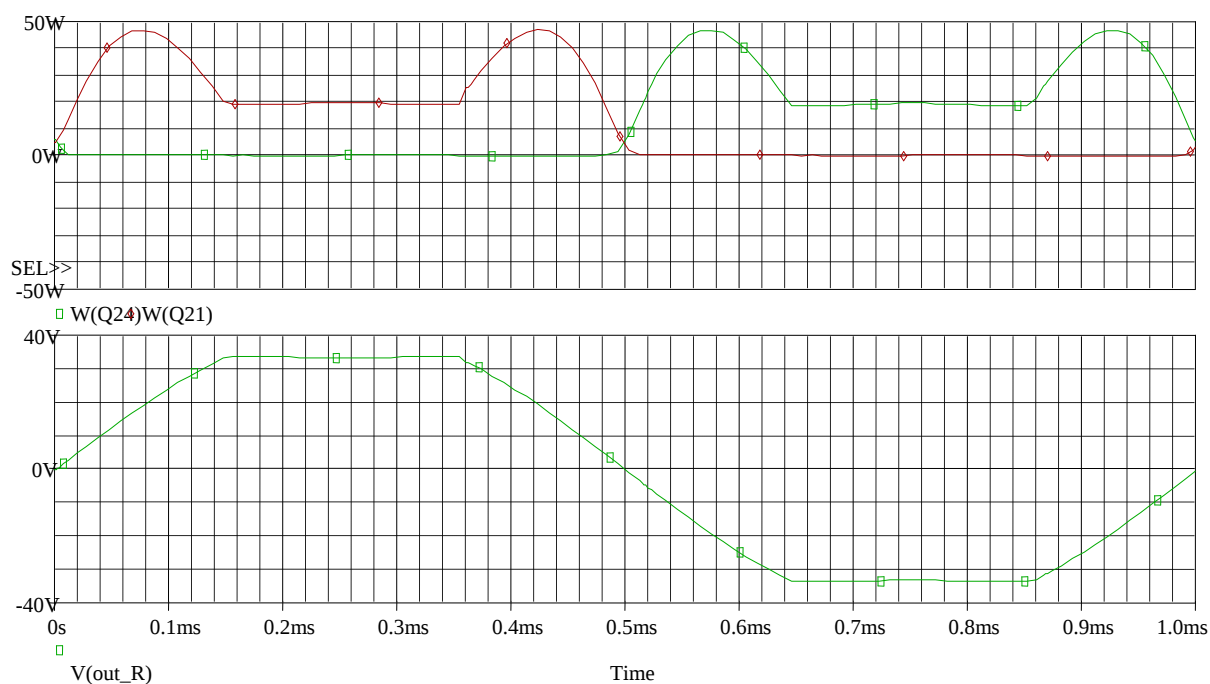


Obr. 3.9 Schéma zapojení koncového zesilovače pro simulace v PSpice

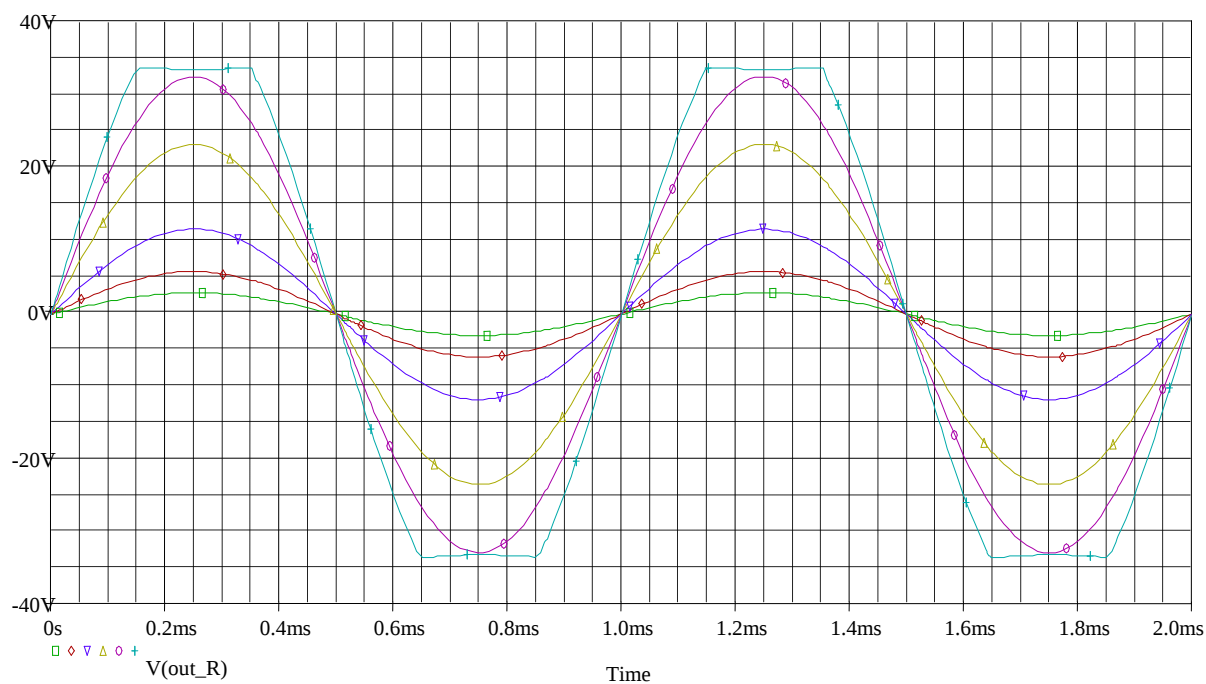
### 3.5.3 Simulace v PSpice



**Obr. 3.10** Fázová a přenosová frekvenční charakteristika koncového zesilovače



**Obr. 3.11** Ztrátový výkon na výkonových tranzistorech a limitovaný signál při  $f = 1\text{kHz}$

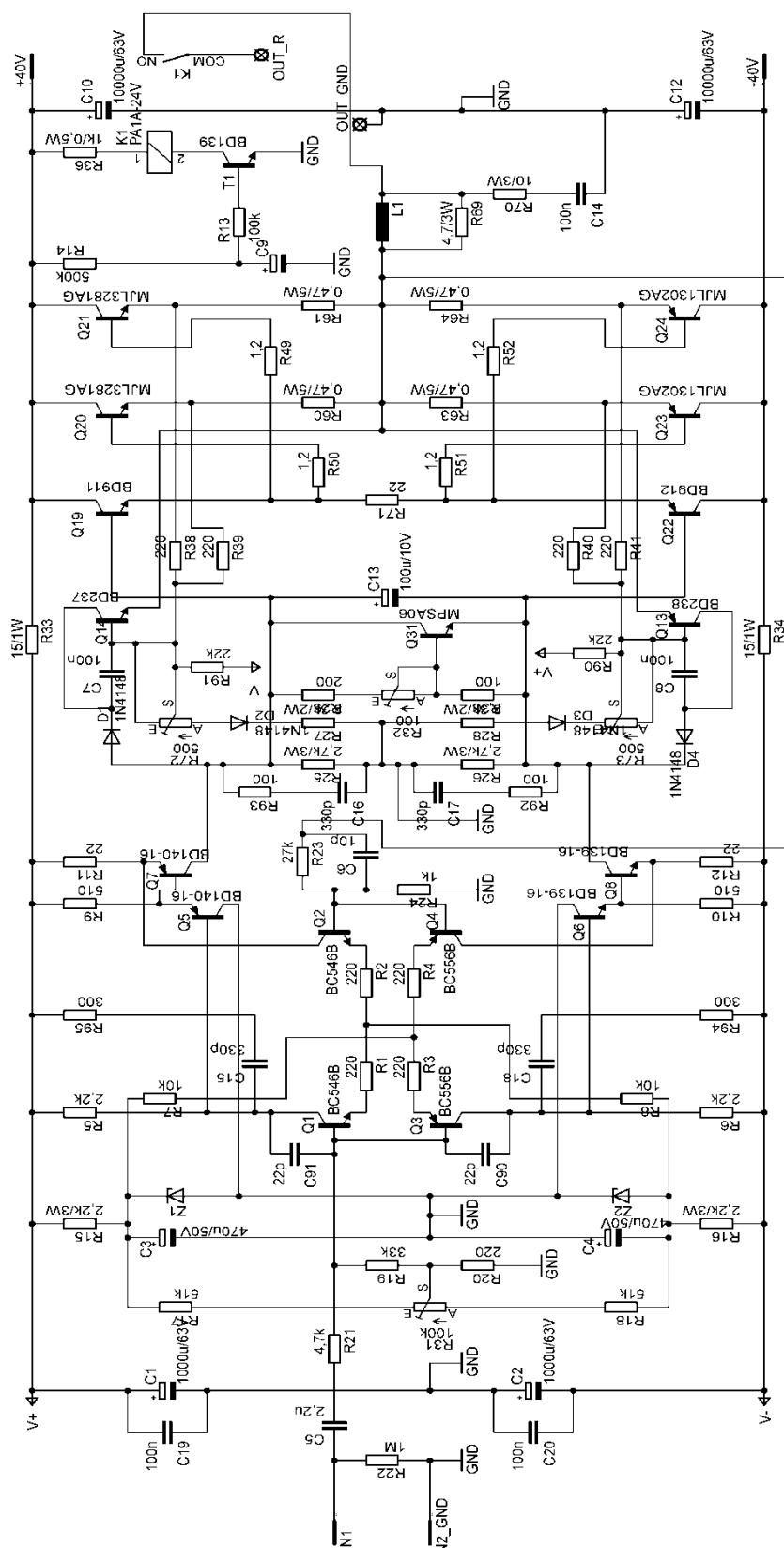


**Obr. 3.12** Limitovaný signál pro  $f = 1\text{kHz}$  pro různé amplitudy vstupního signálu

**Poznámka:**

Na **obr. 3.9** je znázorněna fázová a přenosová kmitočtová charakteristika koncového zesilovače. Pro přenosovou charakteristiku byla změřena šířka kmitočtového pásma pro pokles o 3dB, která vyšla přibližně 201kHz.

### 3.5.4 Schéma zapojení pro návrh DPS



**Obr. 3.13** Schéma zapojení desky koncového stupně včetně obvodu pro opožděné připojení zátěže

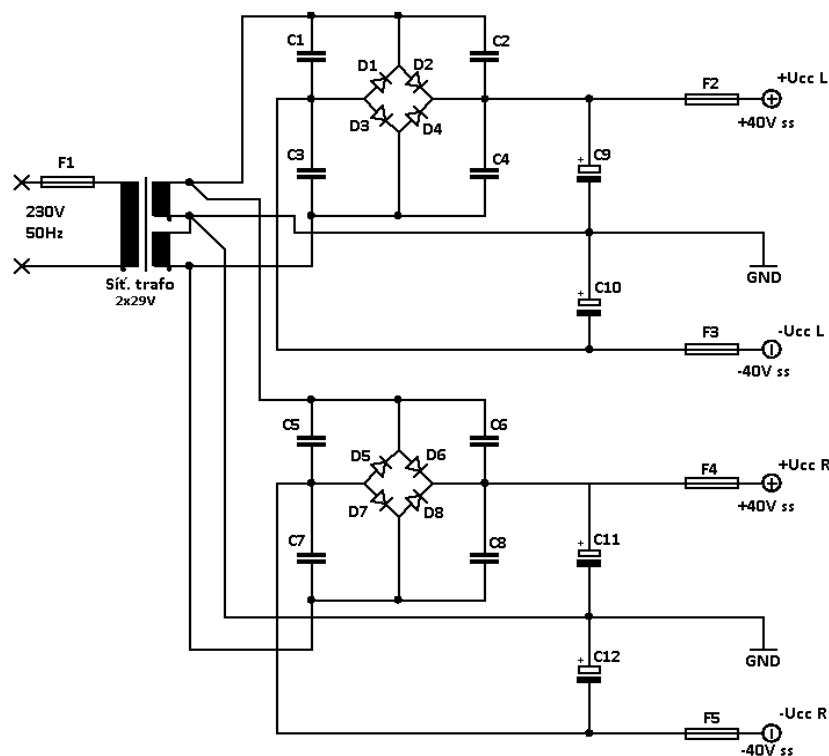
## 3.6 Napájecí zdroj koncového zesilovače

### 3.6.1 Popis zapojení

Součástí každého zesilovače je napájecí zdroj. Zdroje pro předzesilovače musí být dostatečně dimenzovány, aby byly schopny zásobovat zesilovače pro případné špičky audiosignálu. Dynamické špičky se vyskytují především v basových pasážích hudby. Výkon zdroje volíme vždy alespoň o 20% větší než je výkon zesilovače. Žádný zesilovač nepracuje se 100% účinností, proto tuto účinnost kompenzujeme výkonem napájecího zdroje a velikostí chladiče pro odvod tepelných ztrát. Bylo navrženo zapojení symetrického napájecího zdroje s napájením každého kanálu zvlášť.

Pro zesilovače je výhodnější použití toroidního transformátoru z důvodu nižšího magnetického rozptylu, následného rušení a přenosu brumu do užitečného nízkofrekvenčního signálu. Toroidní transformátor je proti typu EI taky lehčí, menší a dává „tvrdší“ napětí. Nevýhodou může být vyšší cena. V napájecím zdroji je použit toroidní transformátor o výkonu 300VA s parametry sekundárního vinutí: 2x29V/2x5A. Dále byly použity usměrňovací diody D1 – D8 zapojené do můstku. Maximální proud jednou větví je 5A. Aby se diodové můstky zbytečně nepřehřívaly, byly zvoleny 10A diody. Paralelně k nim jsou zapojeny kondenzátory C1 – C8 (jejich velikost se volí v rozmezí 22nF – 68nF) pro odstranění různých přechodových jevů při usměrňování napětí o síťovém kmitočtu. V obvodu nesmí chybět ani vyhlazovací filtrační elektrolyty C9 – C12. Kapacita těchto elektrolytů se bude zvyšovat s větším výkonem zesilovače. Na výstupu zdroje jsou zařazeny tavné pojistky (F1 - F4), které chrání zdroj proti přetížení a zkratu. Každý kanál je tak jištěn zvlášť. Deska plošných spojů a seznam součástek pro realizaci zdroje jsou uvedeny v příloze.

### 3.6.2 Schéma zapojení pro návrh DPS



Obr. 3.14 Schéma zapojení desky zdroje pro koncový zesilovač

## 3.7 Obvod pro opožděné připojení zátěže

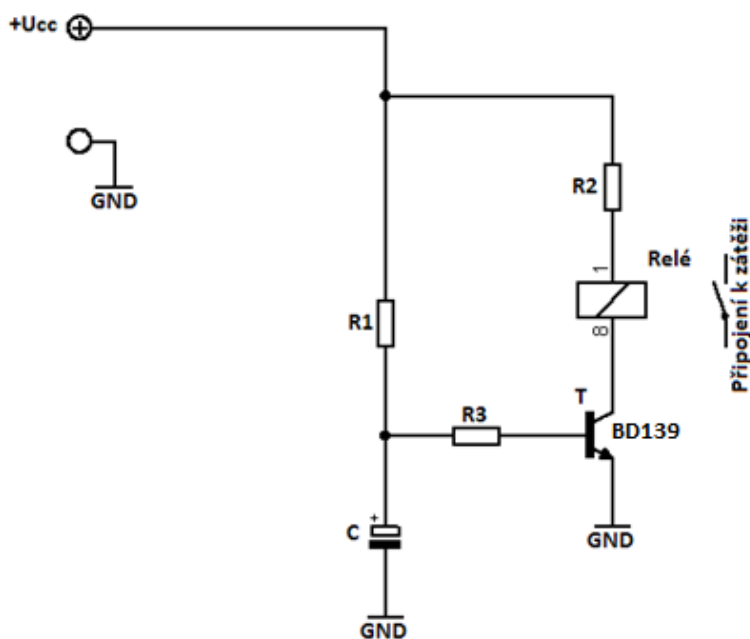
### 3.7.1 Popis zapojení

Aby nedocházelo k nepříjemnému „lupání“ reproduktorů, bylo navrženo jednoduché zapojení pro opožděné připojení zátěže. Schéma zapojení pro jeden kanál je na **obr. 3.13**. Obvod je navržen na společnou DPS koncového zesilovače, kde  $+U_{cc}$  je napájecí napětí koncového zesilovače. Po připojení napájení se elektrolytický kondenzátor C začne nabíjet přes rezistor R1. Doba zpoždění, je dána velikostí rezistoru R1 a velikostí kapacity kondenzátoru C. Časová konstanta  $\tau$  se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$\tau = R1 \cdot C = 510k\Omega \cdot 4,7\mu F = 2,4s \quad (3.2)$$

Za tuto dobu dojde k otevření tranzistoru, který následně sepne relé a dojde tak k připojení zátěže (reproduktoru). Seznam součástek pro realizaci je uveden v příloze.

### 3.7.2 Schéma zapojení



**Obr. 3.15** Schéma zapojení obvodu pro opožděné připojení zátěže

## 4 Konkrétní návrhy a výpočty

### 4.1 Výpočet výkonu zesilovače

$$P = \frac{U_{ef}^2}{R_z} = \frac{(20,5V)^2}{4\Omega} = \underline{105W} \quad \text{při } R_z = 4\Omega \quad (4.1)$$

$$U_{ef} = \frac{U_{\sim}}{\sqrt{2}} = \frac{29V}{\sqrt{2}} = 20,5V \quad (4.2)$$

$U_{\sim}$  je hodnota střídavého napětí na sekundárních svorkách transformátoru (viz. **tab. 4.1**)

### 4.2 Návrh transformátoru

- Výpočet minimálního napájecího napětí koncového stupně:

$$U_{\min} = \sqrt{8 \cdot P_{out} \cdot R_z} + 2 \cdot U_{cesat} = \sqrt{8 \cdot 100W \cdot 4\Omega} + 2 \cdot 1,5V = 60V \quad (4.3)$$

Pro nesymetrické napájení je tedy  $U_N = 60V$

Pro symetrické napájení bude napětí  $U$  poloviční, tj.  $U_s = \underline{\pm 30V}$

Pro napětí transf.  $U_{tr}$  se udává rezerva 5 ÷ 10 % kvůli ztrátám v usměrňovači a v přívodních vodičích.

$$U_{vinutí} = \frac{1,1 \cdot U_s}{\sqrt{2}} = \frac{1,1 \cdot 30V}{\sqrt{2}} = \underline{23,4V} \quad (4.4)$$

- Výpočet proudu:

$$I = \sqrt{P / R_z} = \sqrt{100W / 4\Omega} = \underline{5A} \quad (4.5)$$

- Parametry sekundárního vinutí transformátoru:

$$2 \times 24V / 2 \times 5A$$

- Výpočet výkonu transformátoru:

$$S = (U_{vinutí} \cdot I) + (U_{vinutí} \cdot I) = (23,4V \cdot 5A) + (23,4V \cdot 5A) = \underline{234VA} \quad (4.6)$$

Parametry transformátoru pro konstrukci:

Byl vybrán toroidní transformátor s nejbližším vyšším sekundárním napětím a výkonem.

Napájecí napětí koncového stupně tedy bude:  $U = U_{\sim} \cdot \sqrt{2} = 29V$ .  $\sqrt{2} = \underline{40V}$ . (4.7)

| Typ                                                                                                           | Výkon | Napětí~ | Průměr | Výška |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------|--------|-------|
| TR-T300/2x29V (Toroid)<br> | 300VA | 2x29V   | 142mm  | 50mm  |

**Tab. 4.1** Parametry transformátoru pro realizaci napájecího zdroje

### 4.3 Výpočet chladiče koncového stupně

Výkonové tranzistory je potřeba ve většině případů chladit, protože se větší část zesilovaného výkonu mění na teplo. Pomocí vhodného chladiče z chlazeného polovodiče se teplo odvádí, případně rozptyluje do okolí. Vztahy pro výpočet chladiče jsou z [3].

▪ Výpočet ztrátového výkonu jednoho kanálu:

□ Výkon koncového stupně:  $P = 100W$

□ Příkon koncového stupně:  $P_P = U_s \cdot I_{stř} = 40V \cdot 3,26A = \underline{130,4W}$  (4.8)

□ Střední proud koncovými tranzistory:  $I_{stř} = \frac{kt \cdot U_{ef}}{2 \cdot R_z} = \frac{0,9 \cdot 29V}{2 \cdot 4\Omega} = 3,26A$  (4.9)

□ Účinnost koncového stupně:  $\eta = \frac{P}{P_P} = \frac{100W}{130,4W} = \underline{76,7\%}$  (4.10)

□ Ztrátový výkon:  $P_z = P_P - P = 130,4W - 100W = 30,4W$  (4.11)

□ Maximální ztrátový výkon:  $P_{zmax} = 0,405 \cdot P_z = 0,405 \cdot 100W = \underline{40,5W}$  (4.12)

▪ Výpočet chladiče:

□ Max. teplota přechodu:  $\vartheta_{jmax} = 150^\circ C$

□ Max. teplota okolí:  $\vartheta_{amax} = 60^\circ C$

□ Celkový tepelný odpor:

$$R_{\vartheta} = \frac{\vartheta_{jmax} - \vartheta_{amax}}{P_{zmax}} = \frac{150^\circ C - 60^\circ C}{40,5W} = \underline{2,22^\circ C/W}$$
 (4.13)

□ Tepelný odpor přechodu:  $R_{\vartheta_{jc}} = 0,625^\circ C/W$

□ Tepelný odpor izolační podložky:  $R_{\vartheta_{cs}} = 0,6^\circ C/W$

□ Tepelný odpor chladiče pro 4 koncové tranzistory na jednom chladiči: (4.14)

$$R_{\vartheta_{sa}} = \frac{R_{\vartheta} - R_{\vartheta_{cs}} - R_{\vartheta_{jc}}}{4} = \frac{2,22^\circ C - 0,6^\circ C - 0,625^\circ C}{4} = \underline{0,25^\circ C/W}$$

Výsledný tepelný odpor chladiče bude:

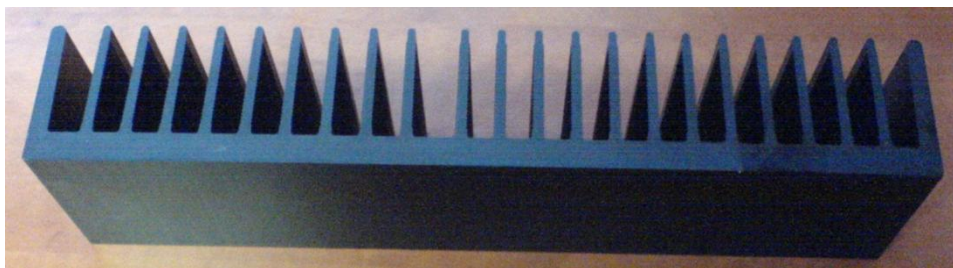
▪  $R_{\vartheta_{ac}} = 0,25^\circ C/W + 0,2^\circ C = 0,45^\circ C/W$  pro neupravený chladič.

▪  $R_{\vartheta_{ac}} = 0,25^\circ C/W + 0,4^\circ C = \underline{0,65^\circ C/W}$  pro černě eloxovaný chladič (vhodnější).

## 5 Konstrukční řešení

### 5.1 Chlazení

Pro pasivní chlazení byl na každý kanál zesilovače použit jednostranný žebrovaný chladič od firmy **fischer elektronik** o rozměrech 50x226,5x40mm a tepelném odporu 1,3K/W. Jako materiál byl použit eloxovaný hliník. [13]



Obr. 5.1 Provedení chladiče

### 5.2 Přístrojová skříň

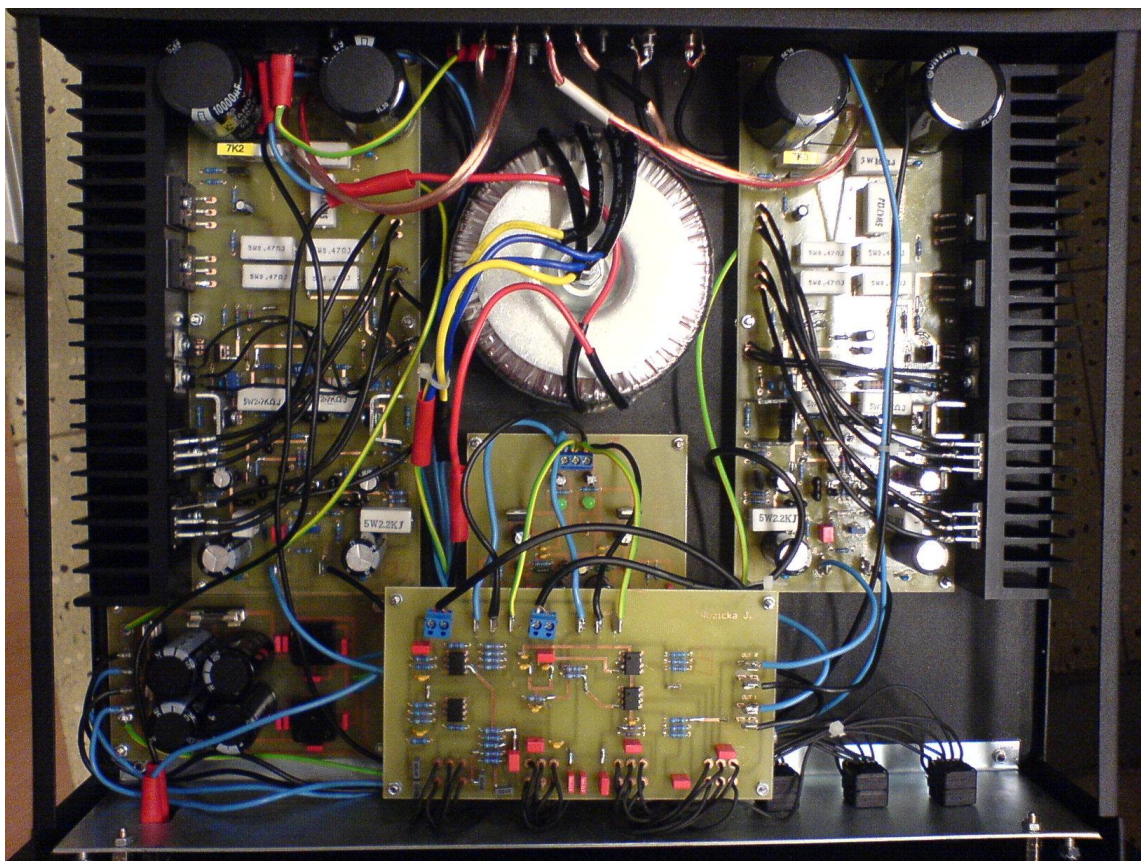
Pro realizaci zesilovače byla použita 19'' normovaná „RACK“ [skříňka 2Ux350](#) černé barvy o výšce 88,1mm, šířce 440mm a délce 350mm. Skládá se ze dvou dílů a je sešroubována pomocí 4 vrutů. Skříňka má větrací otvory pro lepší odvod teplého vzduchu.[12]

Všechny moduly zesilovače (zdroje, korekční předzesilovač, koncové stupně) jsou umístěné na distančních sloupkách a přišroubovány na dno skřínky, včetně chladičů a toroidního transformátoru, který je navíc umístěn na podložce.

### 5.3 Fotky z realizace



Obr. 5.2 Umístění modulu levého kanálu koncového zesilovače na chladič



**Obr. 5.3** Pohled na všechny moduly zesilovače shora



**Obr. 5.4** Přední panel zesilovače



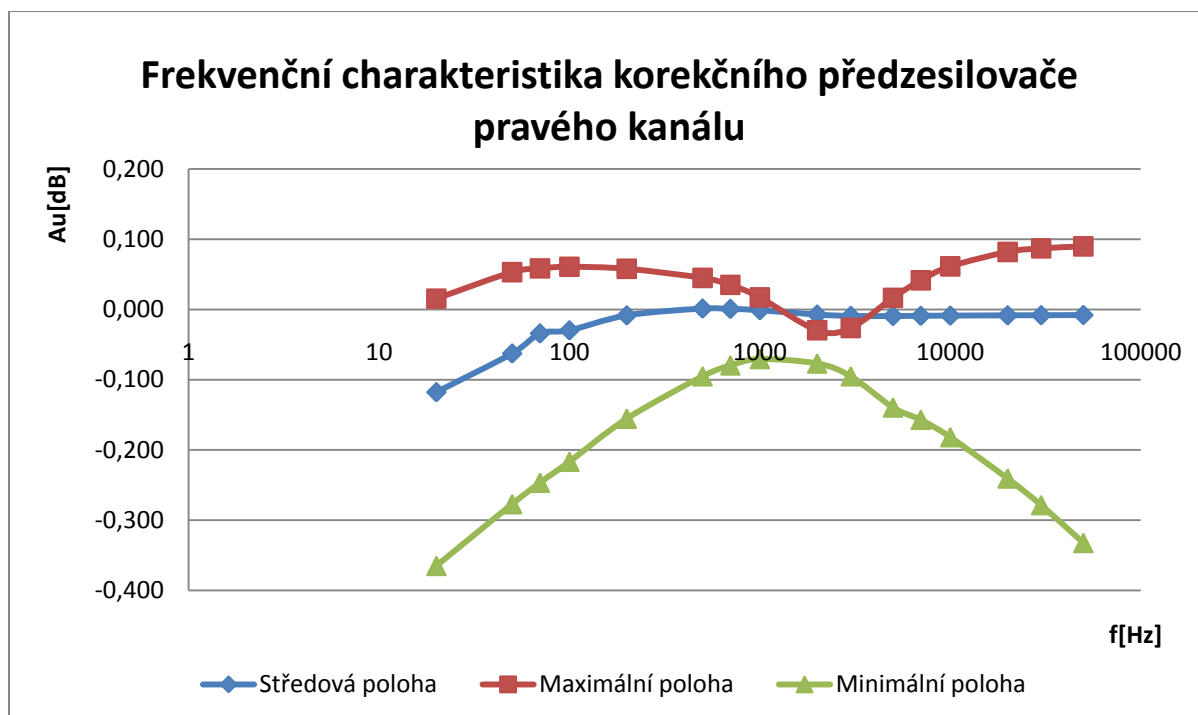
**Obr. 5.5** Zadní panel zesilovače

## 6 Naměřené hodnoty zesilovače

### 6.1 Korekční předzesilovač

| Pravý kanál                              |                                   |                  |                                  |                  |                                   |                  |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------|
| $U_{1ef} = 775\text{mV} = 0,775\text{V}$ |                                   |                  |                                  |                  |                                   |                  |
| f[Hz]                                    | Minimální poloha<br>potenciometrů |                  | Středová poloha<br>potenciometrů |                  | Maximální poloha<br>potenciometrů |                  |
|                                          | $U_{2ef}[\text{V}]$               | $A_u[\text{dB}]$ | $U_{2ef}[\text{V}]$              | $A_u[\text{dB}]$ | $U_{2ef}[\text{V}]$               | $A_u[\text{dB}]$ |
| 20                                       | 0,012                             | -36,497          | 0,200                            | -11,787          | 0,925                             | 1,540            |
| 50                                       | 0,032                             | -27,710          | 0,376                            | -6,273           | 1,430                             | 5,321            |
| 70                                       | 0,045                             | -24,664          | 0,523                            | -3,418           | 1,520                             | 5,851            |
| 100                                      | 0,064                             | -21,676          | 0,550                            | -2,980           | 1,560                             | 6,076            |
| 200                                      | 0,129                             | -15,547          | 0,703                            | -0,847           | 1,510                             | 5,794            |
| 500                                      | 0,259                             | -9,510           | 0,786                            | 0,127            | 1,300                             | 4,493            |
| 700                                      | 0,310                             | -7,962           | 0,782                            | 0,076            | 1,160                             | 3,503            |
| 1000                                     | 0,344                             | -7,057           | 0,765                            | -0,113           | 0,944                             | 1,715            |
| 2000                                     | 0,320                             | -7,691           | 0,712                            | -0,734           | 0,551                             | -2,965           |
| 3000                                     | 0,259                             | -9,510           | 0,697                            | -0,923           | 0,572                             | -2,637           |
| 5000                                     | 0,156                             | -13,946          | 0,696                            | -0,939           | 0,938                             | 1,656            |
| 7000                                     | 0,127                             | -15,703          | 0,698                            | -0,906           | 1,250                             | 4,152            |
| 10000                                    | 0,096                             | -18,177          | 0,700                            | -0,880           | 1,570                             | 6,132            |
| 20000                                    | 0,049                             | -24,053          | 0,704                            | -0,840           | 1,990                             | 8,191            |
| 30000                                    | 0,031                             | -27,847          | 0,705                            | -0,823           | 2,110                             | 8,700            |
| 50000                                    | 0,017                             | -33,228          | 0,707                            | -0,799           | 2,180                             | 8,983            |

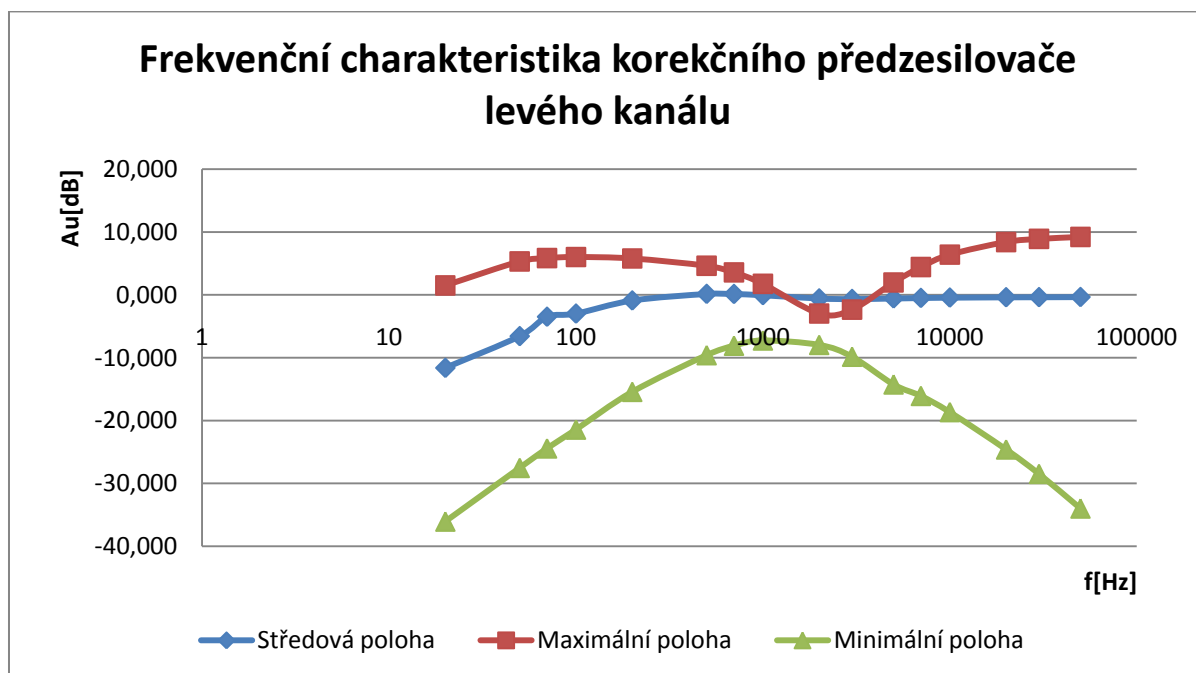
**Tab. 6.1** Frekvenční charakteristika korekčního předzesilovače pro pravý kanál



**Obr. 6.1** Frekvenční charakteristika korekčního předzesilovače pravého kanálu

| Levý kanál                               |                                   |                  |                                  |                  |                                   |                  |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------|
| $U_{1ef} = 775\text{mV} = 0,775\text{V}$ |                                   |                  |                                  |                  |                                   |                  |
| f[Hz]                                    | Minimální poloha<br>potenciometrů |                  | Středová poloha<br>potenciometrů |                  | Maximální poloha<br>potenciometrů |                  |
|                                          | $U_{2ef}[\text{V}]$               | $A_u[\text{dB}]$ | $U_{2ef}[\text{V}]$              | $A_u[\text{dB}]$ | $U_{2ef}[\text{V}]$               | $A_u[\text{dB}]$ |
| 20                                       | 0,012                             | -36,059          | 0,203                            | -11,623          | 0,921                             | 1,496            |
| 50                                       | 0,033                             | -27,522          | 0,364                            | -6,576           | 1,430                             | 5,321            |
| 70                                       | 0,047                             | -24,418          | 0,519                            | -3,491           | 1,520                             | 5,851            |
| 100                                      | 0,066                             | -21,422          | 0,549                            | -2,991           | 1,550                             | 6,021            |
| 200                                      | 0,131                             | -15,421          | 0,698                            | -0,904           | 1,510                             | 5,794            |
| 500                                      | 0,257                             | -9,584           | 0,788                            | 0,143            | 1,320                             | 4,625            |
| 700                                      | 0,306                             | -8,080           | 0,787                            | 0,132            | 1,170                             | 3,578            |
| 1000                                     | 0,337                             | -7,246           | 0,770                            | -0,058           | 0,948                             | 1,754            |
| 2000                                     | 0,310                             | -7,950           | 0,725                            | -0,582           | 0,551                             | -2,966           |
| 3000                                     | 0,250                             | -9,831           | 0,718                            | -0,668           | 0,592                             | -2,338           |
| 5000                                     | 0,150                             | -14,242          | 0,725                            | -0,577           | 0,972                             | 1,968            |
| 7000                                     | 0,122                             | -16,066          | 0,732                            | -0,502           | 1,290                             | 4,426            |
| 10000                                    | 0,091                             | -18,643          | 0,736                            | -0,446           | 1,620                             | 6,404            |
| 20000                                    | 0,046                             | -24,588          | 0,741                            | -0,392           | 2,040                             | 8,407            |
| 30000                                    | 0,029                             | -28,478          | 0,742                            | -0,376           | 2,160                             | 8,903            |
| 50000                                    | 0,016                             | -33,979          | 0,744                            | -0,356           | 2,240                             | 9,219            |

**Tab. 6.2** Frekvenční charakteristika korekčního předzesilovače pro levý kanál



**Obr. 6.2** Frekvenční charakteristika korekčního předzesilovače levého kanálu

| $U_{1ef} = 775\text{mV}$ , $f = 1\text{kHz}$ |           |           |           |           |
|----------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Kanál                                        | $U_2$ [V] | $k_1$ [%] | $k_2$ [%] | THD+N [%] |
| Levý                                         | 1,68      | 0,0059    | 0,0088    | 0,033     |
| Pravý                                        | 1,12      | 0,0053    | 0,0092    | 0,037     |

**Tab. 6.3** Harmonické zkreslení korekčního předzesilovače



**Obr. 6.3** Průběhy na korekčním předzesilovači při obdélníkovém signálu

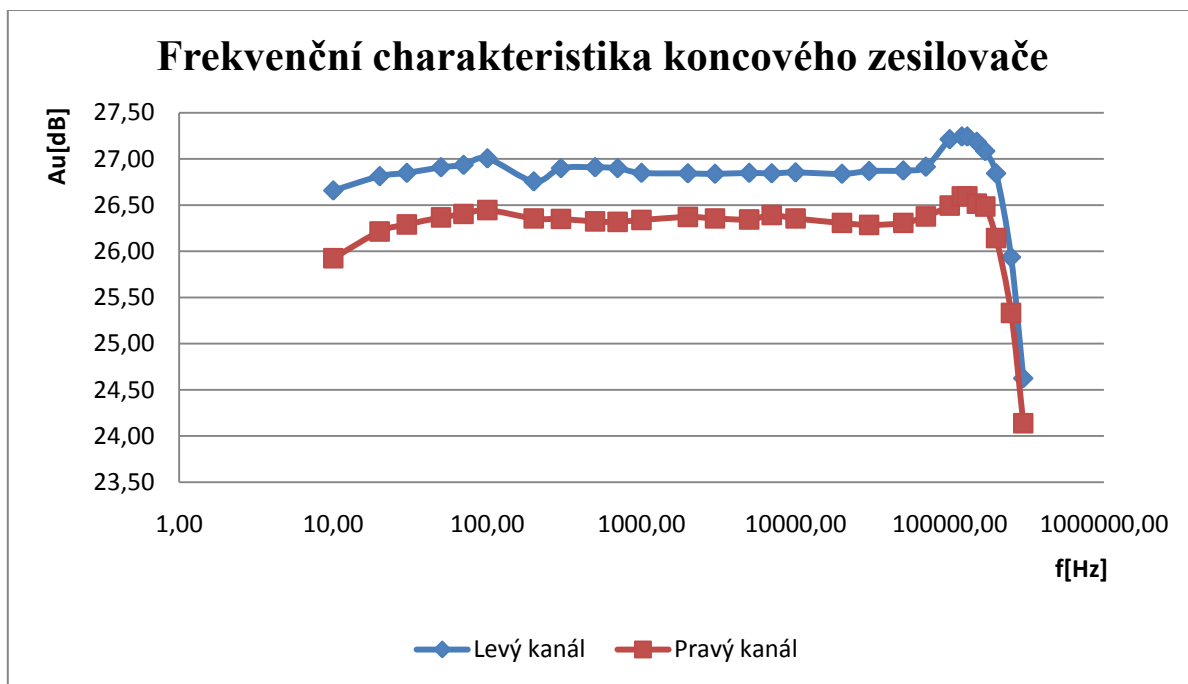
Na **Obr. 6.3** jsou znázorněné průběhy na korekčním předzesilovači při nastavení basů na maximální úroveň a výšek na minimální úroveň. Zobrazené průběhy mají charakter integračního članku (dolní propust), tzn., že propouští dolní kmitočty.

## 6.2 Koncový zesilovač

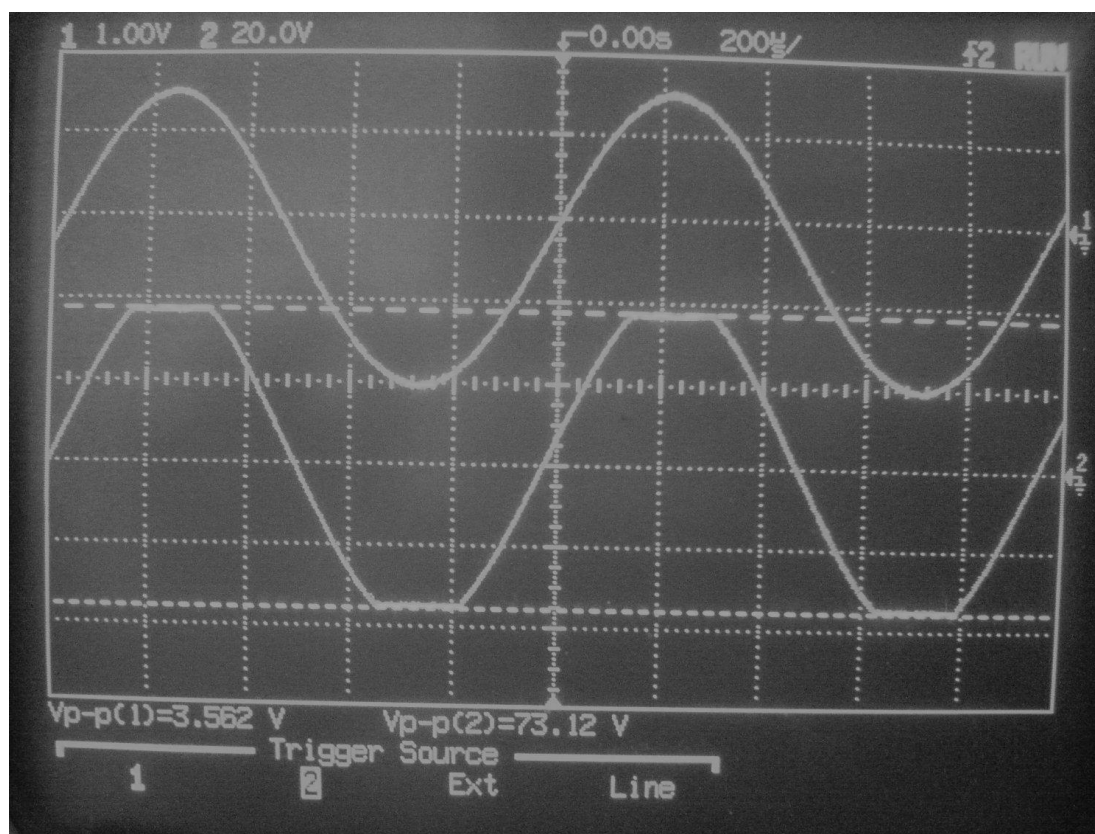
| f[Hz]  | Levý kanál    |        | Pravý kanál   |        |
|--------|---------------|--------|---------------|--------|
|        | $U_{2ef}$ [V] | Au[dB] | $U_{2ef}$ [V] | Au[dB] |
| 10     | 16,680        | 26,658 | 15,330        | 25,925 |
| 20     | 16,980        | 26,813 | 15,850        | 26,215 |
| 30     | 17,050        | 26,848 | 15,990        | 26,291 |
| 50     | 17,170        | 26,909 | 16,130        | 26,367 |
| 70     | 17,220        | 26,935 | 16,200        | 26,404 |
| 100    | 17,360        | 27,005 | 16,280        | 26,447 |
| 200    | 16,870        | 26,756 | 16,110        | 26,356 |
| 300    | 17,150        | 26,899 | 16,100        | 26,350 |
| 500    | 17,170        | 26,909 | 16,050        | 26,323 |
| 700    | 17,150        | 26,899 | 16,040        | 26,318 |
| 1000   | 17,050        | 26,848 | 16,080        | 26,340 |
| 2000   | 17,040        | 26,843 | 16,140        | 26,372 |
| 3000   | 17,030        | 26,838 | 16,110        | 26,356 |
| 5000   | 17,050        | 26,848 | 16,090        | 26,345 |
| 7000   | 17,040        | 26,843 | 16,180        | 26,394 |
| 10000  | 17,060        | 26,854 | 16,110        | 26,356 |
| 20000  | 17,030        | 26,838 | 16,020        | 26,307 |
| 30000  | 17,090        | 26,869 | 15,980        | 26,286 |
| 50000  | 17,100        | 26,874 | 16,020        | 26,307 |
| 70000  | 17,180        | 26,914 | 16,150        | 26,377 |
| 100000 | 17,780        | 27,213 | 16,370        | 26,495 |
| 120000 | 17,840        | 27,242 | 16,560        | 26,595 |
| 130000 | 17,840        | 27,242 | 16,560        | 26,595 |
| 150000 | 17,720        | 27,183 | 16,410        | 26,516 |
| 170000 | 17,520        | 27,085 | 16,350        | 26,484 |
| 200000 | 17,040        | 26,843 | 15,720        | 26,143 |
| 250000 | 15,350        | 25,936 | 14,320        | 25,333 |
| 300000 | 13,200        | 24,625 | 12,480        | 24,138 |

**Tab. 6.4** Frekvenční charakteristika koncového zesilovače

**Poznámka:** Měření bylo provedeno bez připojené zátěže



**Obr. 6.4** Frekvenční charakteristika koncového zesilovače



**Obr. 6.5** Sinusový limitovaný signál v levém kanálu koncového zesilovače

Na **Obr. 6.4** dochází při vstupním napětí 3,562 V k limitaci, tzn., že signál na výstupu je natolik velký, že jej nelze přenést v plném rozsahu a zesilovač jej „ořízne“. Při delším trvání tohoto jevu se mohou zničit reproduktory, neboť na výstupu je v podstatě stejnosměrné napětí.

## 7 Závěr

Tento projekt popisuje návrh audio výkonového zesilovače ve třídě AB. V úvodní kapitole byla popsána definice zesilovače a základní rozdělení zesilovačů. Dále byly popsány vlastnosti jednotlivých tříd zesilovačů. Na základě těchto vlastností jsem zvolil výkonový zesilovač ve třídě AB, neboť vyniká dobrou účinností a velmi malým nelineárním zkreslením. Díky těmto vlastnostem patří zesilovač ve třídě AB mezi nejoblíbenější. Zesilovač bych chtěl uplatnit jako zesilovač hudby v domácím prostředí. V další části práce byly uvedeny základní parametry zesilovačů ve třídě Hi-Fi. Dále byl popsán zesilovač ve třídě AB a vznik této třídy z třídy B. Dále byly uvedeny způsoby zapojení koncového zesilovače, pomocné a indikační obvody zesilovačů. Třetí kapitola se zabývá již konkrétním návrhem zesilovače. Bylo navrženo blokové schéma zesilovače a popsány jeho jednotlivé části. Zesilovač se skládá z pasivního korekčního předzesilovače, koncového zesilovače a obvodu pro opožděné připojení zátěže. Pro předzesilovač i koncový zesilovač byl navržen vlastní napájecí zdroj. U zapojení koncového zesilovače byla provedena změna v zapojení jednoho vodiče, který nyní nevede ze zpětné vazby na tranzistor Q14, ale ze zpětné vazby přímo na vstup tlumivky, jinak by docházelo ke kmitání obvodu. Pro korekční předzesilovač a koncový zesilovač byly navíc provedeny simulace v programu PSpice. Pro frekvenční přenosovou charakteristiku koncového zesilovače (**obr. 3.10**) byla pomocí kurzorů určena šířka přenášeného frekvenčního pásma  $\Delta f = 201\text{kHz}$ . U charakteristiky limitovaného signálu (**obr. 3.11**) dochází při vstupním napětí  $1,8\text{V}$  a  $f = 1\text{kHz}$  k ořezávání výstupního signálu při  $V_{\text{out}_R} = 33\text{V}$ . Simulace v PSpice jsou zkreslené, protože nebyly použity přesné modely, které jsou uvedeny v zapojení. Modely od výrobců mi bohužel nešly importovat do PSpice. Program zahlásil chybu a byl ukončen. Tento problém se mi nepodařilo vyřešit. V zapojení byly použity modely s nejbližšími parametry, které byly již obsažené v knihovnách PSpice. Ve čtvrté kapitole byl na základě výpočtů zvolen toroidní transformátor pro napájecí zdroj koncového zesilovače. Dále byl vypočítán tepelný odpor chladiče. Pátá kapitola se zabývá již konstrukčním řešením zesilovače. Je zde uveden konkrétní typ chladiče a přístrojové skřínky. Vše je doplněno fotkami z realizace. Šestá kapitola je doplněná výsledky měřených vzorků. Pro korekční předzesilovač byla změřena frekvenční charakteristika a harmonické zkreslení, pro koncový stupeň pak frekvenční charakteristika.

Nejvíce času na bakalářské práci mi zabrala úprava přístrojové skříně, DPS, neboť obsahovaly pár chyb a oživování zesilovače. Během oživování jednotlivých modulů zesilovače jsem se nesetkal s výraznějšími problémy. Po úpravě DPS fungovaly takřka okamžitě. Oba zdroje fungovaly ihned po osazení. Největší problém mi dělalo oživení korekčního předzesilovače, kde jsem musel přehodit několik vstupů u potenciometrů a znovu propájet některé součástky. Korektor je napájený symetrickým zdrojem o napětí  $\pm 14,8\text{V}$ . Koncový stupeň je napájený symetrickým zdrojem o napětí  $\pm 43\text{V}$ . Koncový stupeň byl během provozu stabilní, a jeho zesílení výstupního signálu bylo větší než 20-ti násobek vstupního signálu. Klidový proud, určující třídu AB, byl nastaven pomocí trimru na hodnotu  $50\text{mA}$ .

Zesilovač bych chtěl zdokonalit lepšími popisky, neboť ty současné na skřínce moc nedrží. Dále bych asi nahradil malé samostatné chladiče pro tranzistory za výkonnější, neboť se zdá, že při ztrátovém výkonu kolem  $2\text{W}$  nestíhají optimálně chladit.

## Seznam použité literatury

- [1] KOTISA, Zdeněk. NF zesilovače 1. – předzesilovače. Praha: BEN – technická literatura, 2003. 96 s. ISBN 807300030X
- [2] KOTISA, Zdeněk. NF zesilovače 2. – integrované výkonové zesilovače. Praha: BEN – technická literatura, 2002. 96 s. ISBN 8073000539
- [3] KOTISA, Zdeněk. NF zesilovače 3. – tranzistorové výkonové zesilovače. Praha: BEN – technická literatura, 2003. 96 s. ISBN 8073000652
- [4] Přednáška BNFE č. 5. bnfe\_prednaska\_5.pdf. doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, VUT FEKT Brno, 2006
- [5] Moderní výkonové zesilovače řady DPA. Amatérské Rádio řada A 1 /1992. Amaro, 1992
- [6] Zesilovače 100 a 200 W. Amatérské Rádio řada B, ročník L/2001, číslo 1. Amaro, 2001
- [7] SLÁNSKÝ, Michal. Elektronické konstrukční návody a nápady [online]. Dostupný z WWW: <[http://michal.slansky.sweb.cz/data/pasivni\\_korekcni\\_hi-fi\\_predzesilovac/text.pdf](http://michal.slansky.sweb.cz/data/pasivni_korekcni_hi-fi_predzesilovac/text.pdf)>
- [8] SPŠE - slaboproud [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.sweb.cz/moryst/elt2>>
- [9] Elektronika – teoretické základy, praktická zapojení [online]. Dostupný z WWW: <[http://www.sweb.cz/elnika/zesilovace/tridy\\_vykon\\_zes.htm](http://www.sweb.cz/elnika/zesilovace/tridy_vykon_zes.htm)>
- [10] Stránky o elektronice, ozvučování a zesilovačích [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.zesilovace.cz/view.php?cisloclanku=2002122410>>
- [11] School of Electrical and Computer Engineering [online]. Dostupný z WWW: <<http://users.ece.gatech.edu/~mleach/lowtim/graphics/clip.pdf>>
- [12] GM Electronic – elektronický katalog. Dostupný z WWW: <<http://www.gme.cz/cz/>>
- [13] GES Electronics – elektronický katalog. Dostupný z WWW: <<http://www.ges.cz/>>

# Seznam obrázků

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1.1 Blokové schéma výkonového zesilovače.....                                                    | 12 |
| Obr. 1.2 Funkce a umístění výkonového zesilovače v zesilovacím řetězci .....                          | 12 |
| Obr. 1.3 Schéma zapojení jednočinného zesilovače ve třídě A .....                                     | 13 |
| Obr. 1.4 Schéma zapojení dvoučinného zesilovače ve třídě B .....                                      | 14 |
| Obr. 1.5 Vznik nelineárního (přechodového) zkreslení signálu.....                                     | 14 |
| Obr. 1.6 Schéma zapojení dvoučinného zesilovače ve třídě AB .....                                     | 15 |
| Obr. 1.7 Zkreslení zesilovače ve třídě C .....                                                        | 15 |
| Obr. 2.1 Pracovní bod ve třídě AB.....                                                                | 18 |
| Obr. 2.2 Principiální schéma zesilovače ve třídě B (bez předpětí) .....                               | 18 |
| Obr. 2.3 Nastavení klidového proudu diodou.....                                                       | 19 |
| Obr. 2.4 Nastavení klidového bodu tranzistorem.....                                                   | 19 |
| Obr. 2.5 Vnitřní struktura tranzistorů v Darlingtonově zapojení - tranzistor BDX66 .....              | 19 |
| Obr. 2.6 Zapojení komplementární Darlingtonovy dvojice.....                                           | 20 |
| Obr. 2.7 Kvazikomplementární Darlingtonovo zapojení .....                                             | 20 |
| Obr. 2.8 Schéma možného zapojení clip-detektoru .....                                                 | 21 |
| Obr. 3.1 Blokové schéma navrhovaného řešení .....                                                     | 22 |
| Obr. 3.2 Schéma zapojení korekčního předzesilovače pro simulace v PSpice .....                        | 24 |
| Obr. 3.3 Fázová a přenosová frekvenční charakteristika korekčního předzesilovače.....                 | 25 |
| Obr. 3.4 Přenosová frekvenční charakteristika pro různá nastavení Baxandallova korektoru              | 26 |
| Obr. 3.5 Přenosová frekvenční charakteristika Baxandallova korektoru pro $p = 0.1 \div 0.9$ .....     | 26 |
| Obr. 3.6 Schéma zapojení desky korekčního předzesilovače .....                                        | 27 |
| Obr. 3.7 Schéma zapojení desky zdroje pro předzesilovač.....                                          | 28 |
| Obr. 3.8 Blokové schéma koncového zesilovače .....                                                    | 29 |
| Obr. 3.9 Schéma zapojení koncového zesilovače pro simulace v PSpice.....                              | 30 |
| Obr. 3.10 Fázová a přenosová frekvenční charakteristika koncového zesilovače .....                    | 31 |
| Obr. 3.11 Ztrátový výkon na výkonových tranzistorech a limitovaný signál při $f = 1\text{kHz}$ .....  | 31 |
| Obr. 3.12 Limitovaný signál pro $f = 1\text{kHz}$ pro různé amplitudy vstupního signálu .....         | 32 |
| Obr. 3.13 Schéma zapojení desky koncového stupně včetně obvodu pro opožděné připojení<br>zátěže ..... | 33 |
| Obr. 3.14 Schéma zapojení desky zdroje pro koncový zesilovač .....                                    | 34 |
| Obr. 3.15 Schéma zapojení obvodu pro opožděné připojení zátěže .....                                  | 35 |
| Obr. 5.1 Provedení chladiče .....                                                                     | 38 |
| Obr. 5.2 Umístění modulu levého kanálu koncového zesilovače na chladič.....                           | 38 |
| Obr. 5.3 Pohled na všechny moduly zesilovače shora .....                                              | 39 |
| Obr. 5.4 Přední panel zesilovače .....                                                                | 39 |
| Obr. 5.5 Zadní panel zesilovače .....                                                                 | 39 |
| Obr. 6.1 Frekvenční charakteristika korekčního předzesilovače pravého kanálu.....                     | 40 |
| Obr. 6.2 Frekvenční charakteristika korekčního předzesilovače levého kanálu .....                     | 41 |
| Obr. 6.3 Průběhy na korekčním předzesilovači při obdélníkovém signálu .....                           | 42 |
| Obr. 6.4 Frekvenční charakteristika koncového zesilovače .....                                        | 44 |
| Obr. 6.5 Sinusový limitovaný signál v levém kanálu koncového zesilovače .....                         | 44 |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 7.1 Spodní strana desky korekčního předzesilovače.....      | 52 |
| Obr. 7.2 Vrchní strana desky korekčního předzesilovače .....     | 52 |
| Obr. 7.3 Osazovací výkres desky korekčního předzesilovače .....  | 53 |
| Obr. 7.4 Spodní strana desky zdroje pro předzesilovač .....      | 54 |
| Obr. 7.5 Osazovací výkres desky zdroje pro předzesilovač.....    | 54 |
| Obr. 7.6 Spodní strana desky koncového stupně .....              | 54 |
| Obr. 7.7 Vrchní strana desky koncového .....                     | 55 |
| Obr. 7.8 Osazovací výkres desky koncového stupně .....           | 56 |
| Obr. 7.9 Spodní strana desky zdroje pro koncový stupeň.....      | 57 |
| Obr. 7.10 Osazovací výkres desky zdroje pro koncový stupeň ..... | 57 |

## Seznam tabulek

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 1.1 Základní dělení tříd .....                                                 | 13 |
| Tab. 4.1 Parametry transformátoru pro realizaci napájecího zdroje .....             | 36 |
| Tab. 6.1 Frekvenční charakteristika korekčního předzesilovače pro pravý kanál ..... | 40 |
| Tab. 6.2 Frekvenční charakteristika korekčního předzesilovače pro levý kanál .....  | 41 |
| Tab. 6.3 Harmonické zkreslení korekčního předzesilovače.....                        | 42 |
| Tab. 6.4 Frekvenční charakteristika koncového zesilovače .....                      | 43 |
| Tab. 7.1 Seznam součástí korekčního předzesilovače.....                             | 58 |
| Tab. 7.2 Seznam součástí symetrického zdroje předzesilovače .....                   | 59 |
| Tab. 7.3 Seznam součástí koncového zesilovače .....                                 | 61 |
| Tab. 7.4 Seznam součástí symetrického zdroje koncového zesilovače.....              | 61 |
| Tab. 7.5 Seznam součástí obvodu pro opožděné připojení zátěže .....                 | 61 |
| Tab. 7.6 Seznam ostatních součástí .....                                            | 62 |

## Seznam symbolů, veličin a zkratek

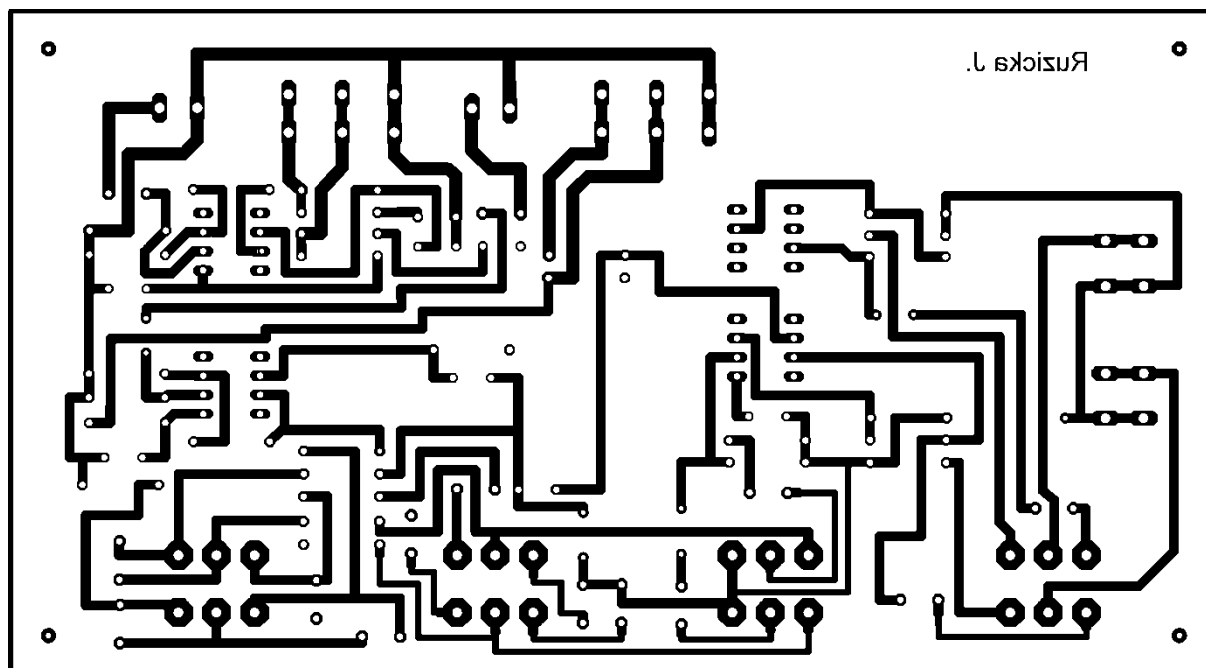
|                         |                                 |
|-------------------------|---------------------------------|
| <b>DPS</b>              | deska plošných spojů            |
| <b>U<sub>vst</sub></b>  | vstupní napětí                  |
| <b>U<sub>výst</sub></b> | výstupní napětí                 |
| <b>U<sub>cc</sub></b>   | napájecí napětí                 |
| <b>Nf</b>               | nízkofrekvenční                 |
| <b>Vf</b>               | vysokofrekvenční                |
| <b>U<sub>n</sub></b>    | nesymetrické napětí             |
| <b>U<sub>s</sub></b>    | symetrické napětí               |
| <b>R<sub>g</sub></b>    | celkový tepelný odpor           |
| <b>R<sub>gsa</sub></b>  | tepelný odpor chladiče          |
| <b>R<sub>gjc</sub></b>  | tepelný odpor přechodu          |
| <b>R<sub>gcs</sub></b>  | tepelný odpor izolační podložky |
| <b>R<sub>gac</sub></b>  | výsledný tepelný odpor chladiče |

# Seznam příloh

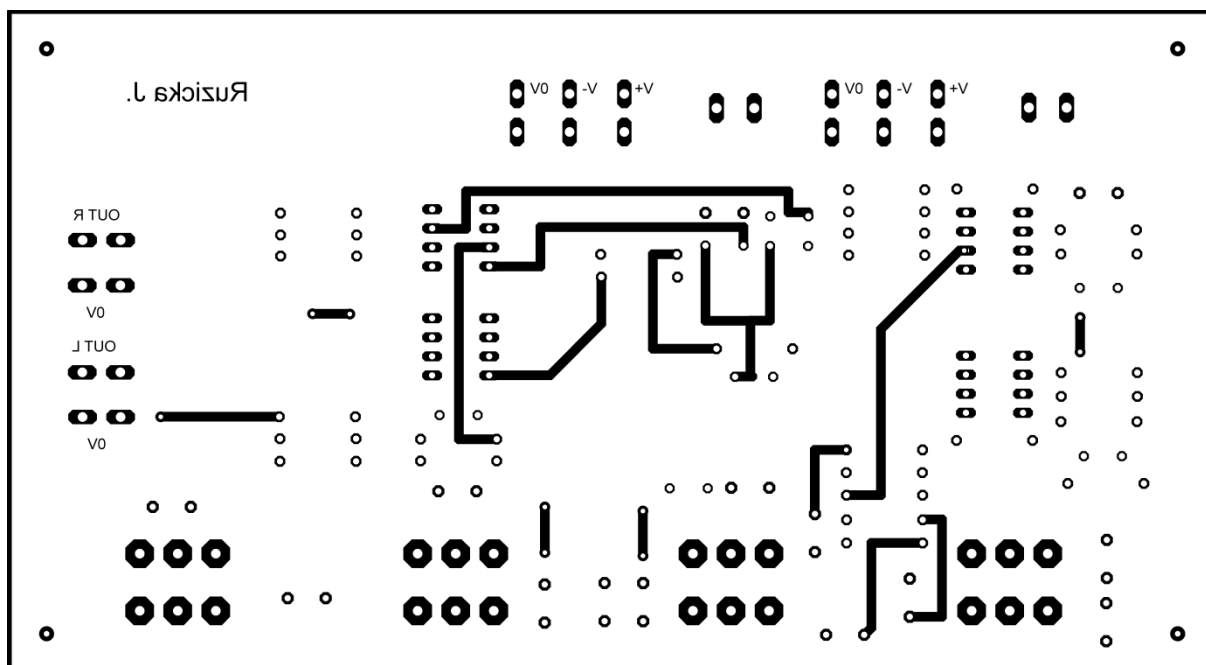
|          |                                                                 |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Desky plošných spojů.....</b>                                | <b>52</b> |
| 1.1      | Deska plošných spojů korekčního předzesilovače .....            | 52        |
| 1.2      | Deska plošných spojů zdroje pro korekční předzesilovač .....    | 54        |
| 1.3      | Deska plošných spojů koncového stupně .....                     | 55        |
| 1.4      | Deska plošných spojů zdroje pro koncový stupeň.....             | 57        |
| <b>2</b> | <b>Seznam součástek.....</b>                                    | <b>58</b> |
| 2.1      | Seznam součástek korekčního předzesilovače .....                | 58        |
| 2.2      | Seznam součástek symetrického zdroje předzesilovače.....        | 59        |
| 2.3      | Seznam součástek koncového zesilovače.....                      | 60        |
| 2.4      | Seznam součástek symetrického zdroje koncového zesilovače ..... | 61        |
| 2.5      | Seznam součástek obvodu pro opožděné připojení zátěže .....     | 61        |
| 2.6      | Seznam ostatních součástek.....                                 | 62        |

# 1 Desky plošných spojů

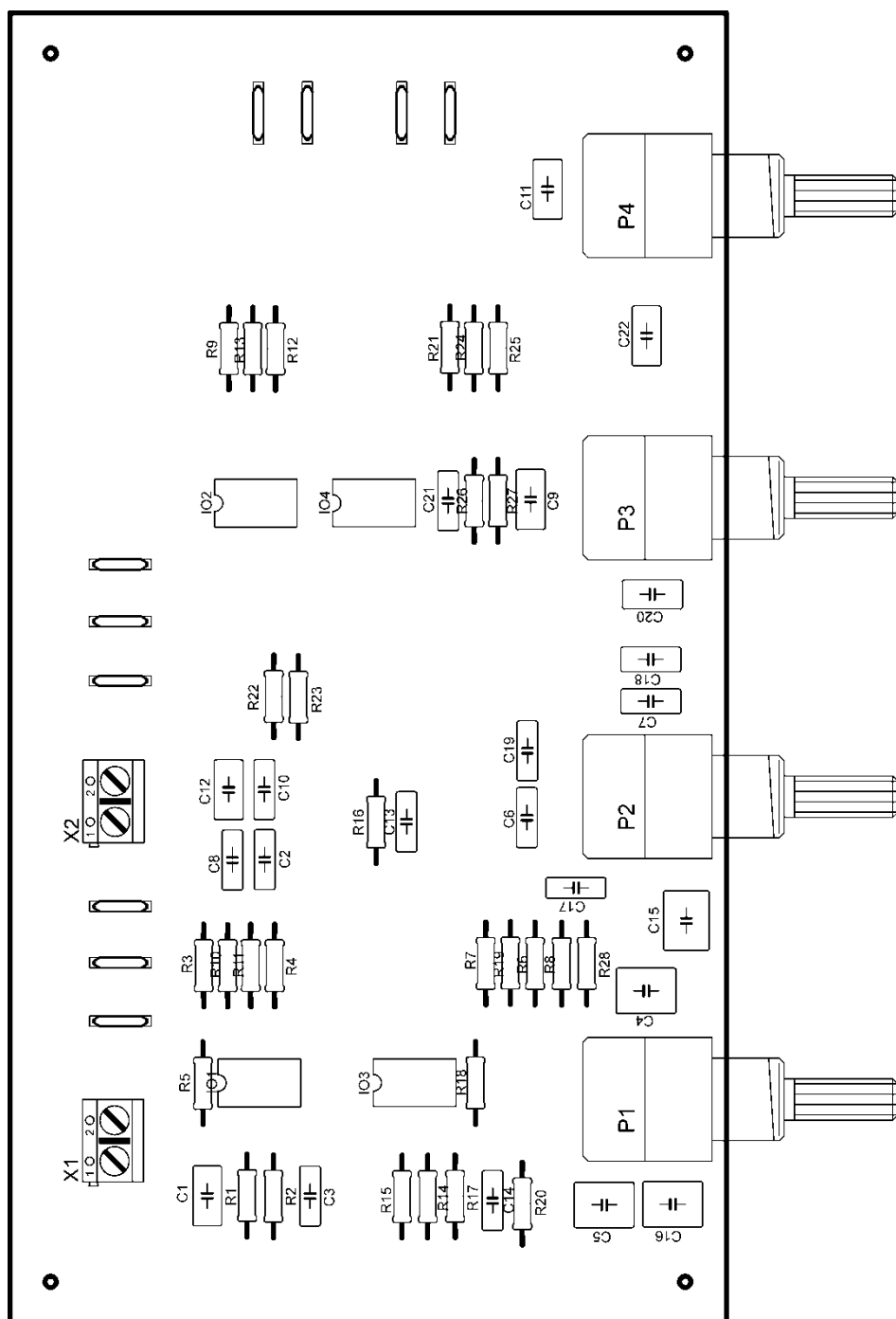
## 1.1 Deska plošných spojů korekčního předzesilovače



Obr. 7.1 Spodní strana desky korekčního předzesilovače

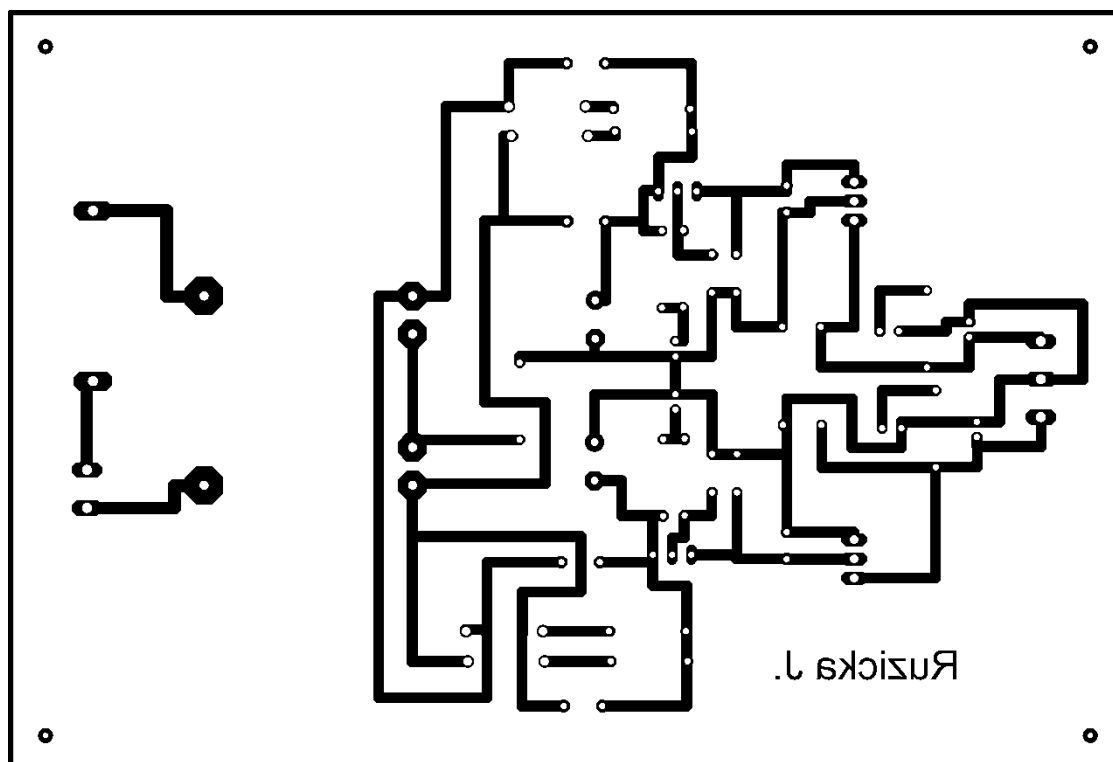


Obr. 7.2 Vrchní strana desky korekčního předzesilovače

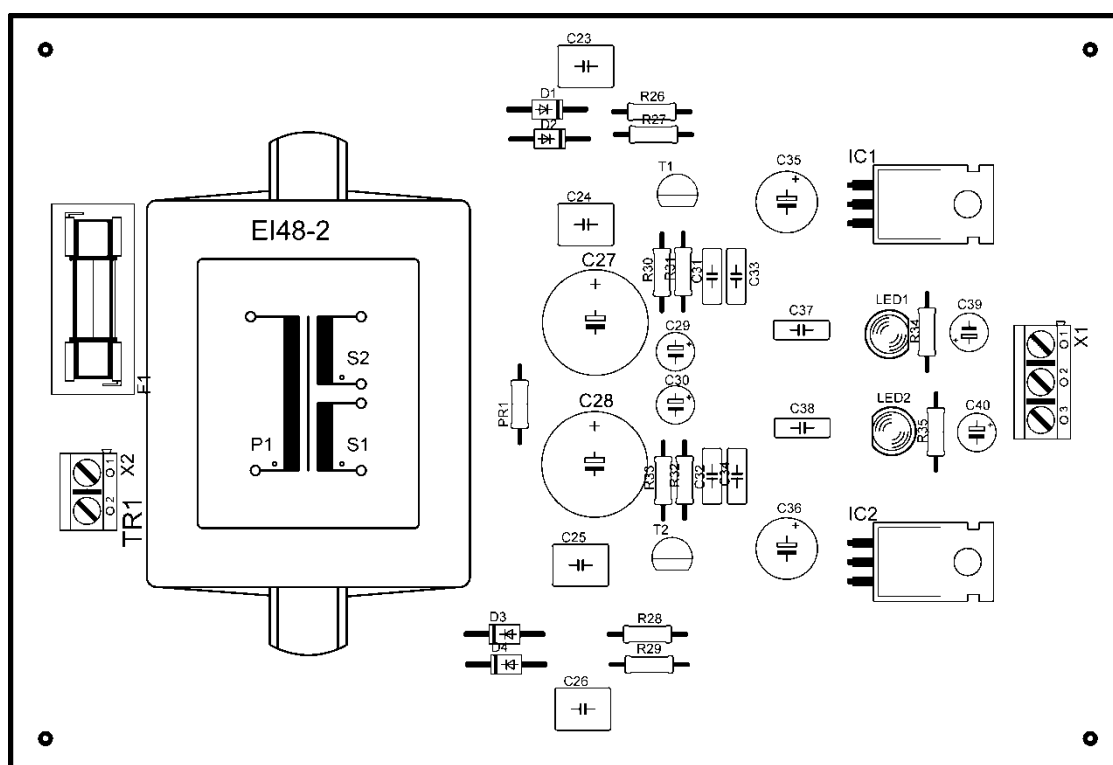


**Obr. 7.3** Osazovací výkres desky korekčního předzesilovače

## 1.2 Deska plošných spojů zdroje pro korekční předzesilovač

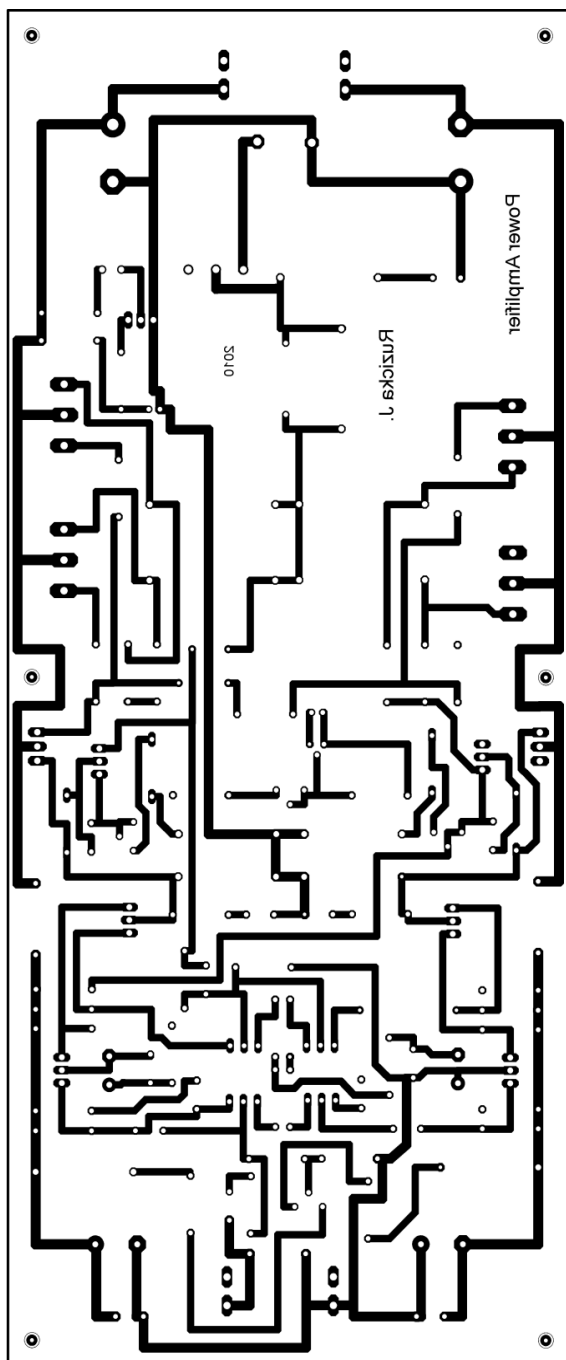


Obr. 7.4 Spodní strana desky zdroje pro předzesilovač

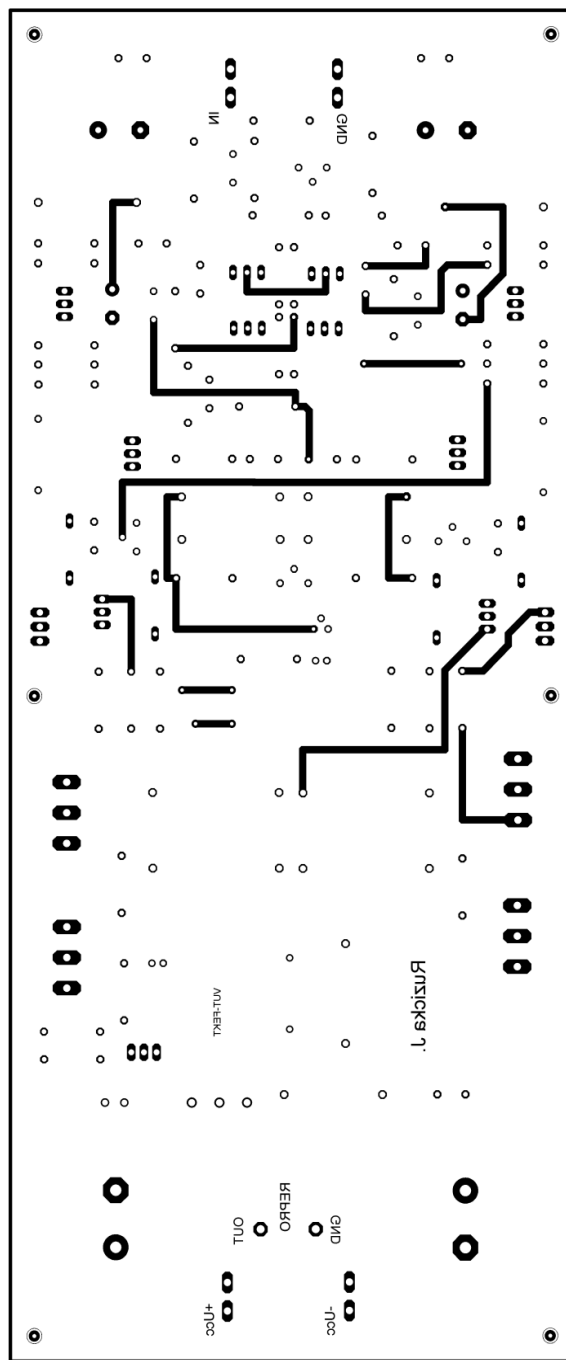


Obr. 7.5 Osazovací výkres desky zdroje pro předzesilovač

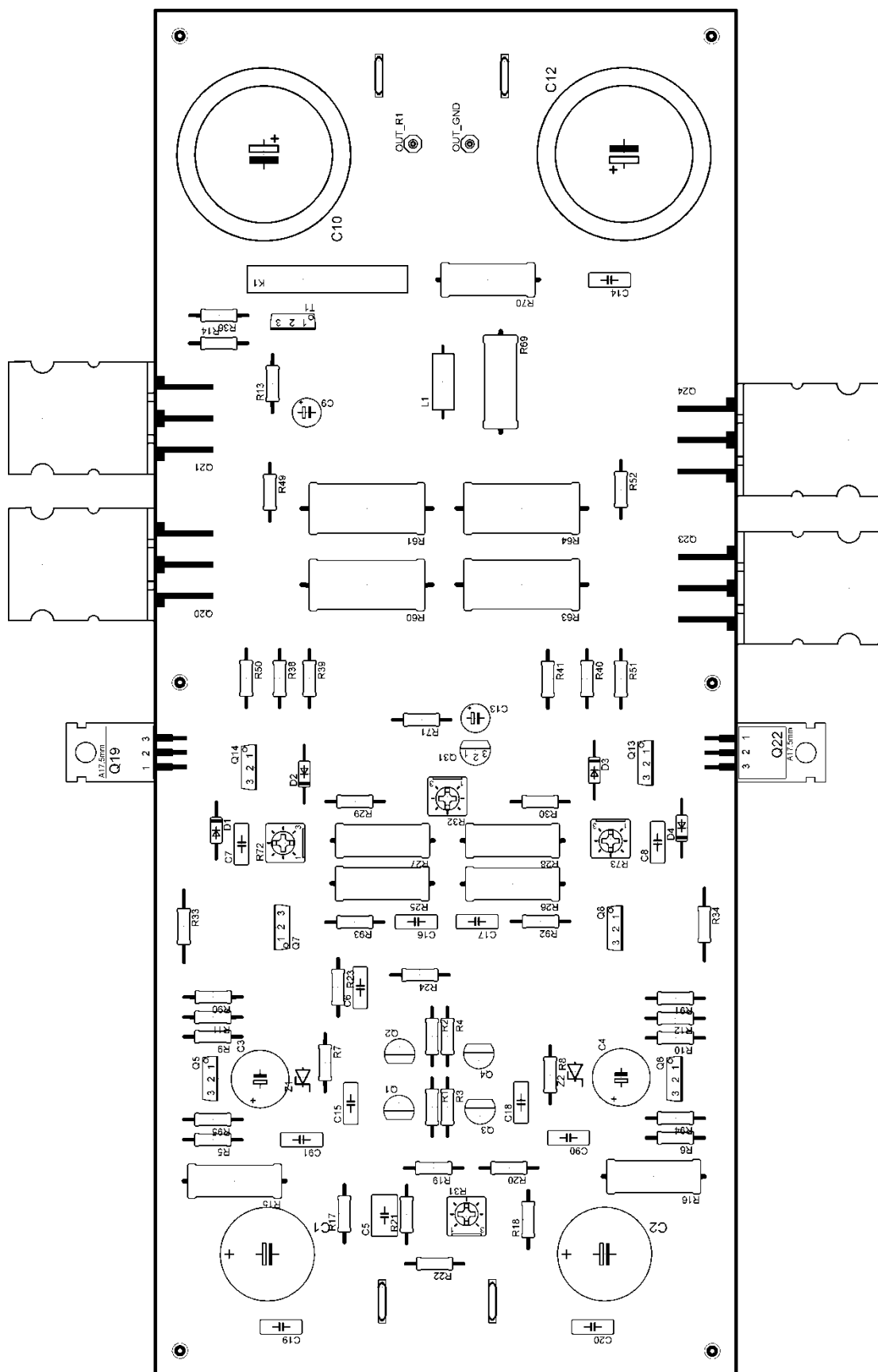
### 1.3 Deska plošných spojů koncového stupně



**Obr. 7.6** Spodní strana desky koncového stupně

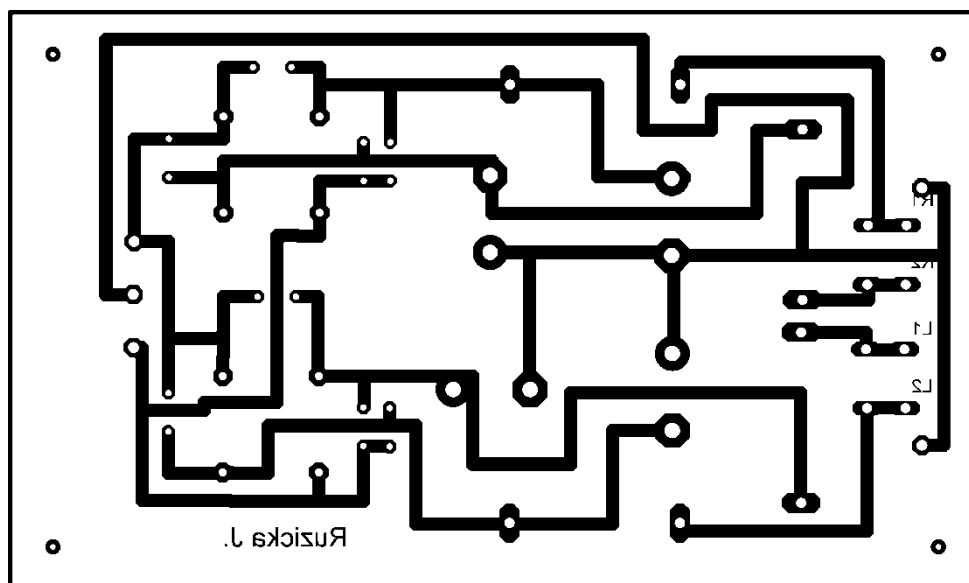


**Obr. 7.7** Vrchní strana desky koncového stupně

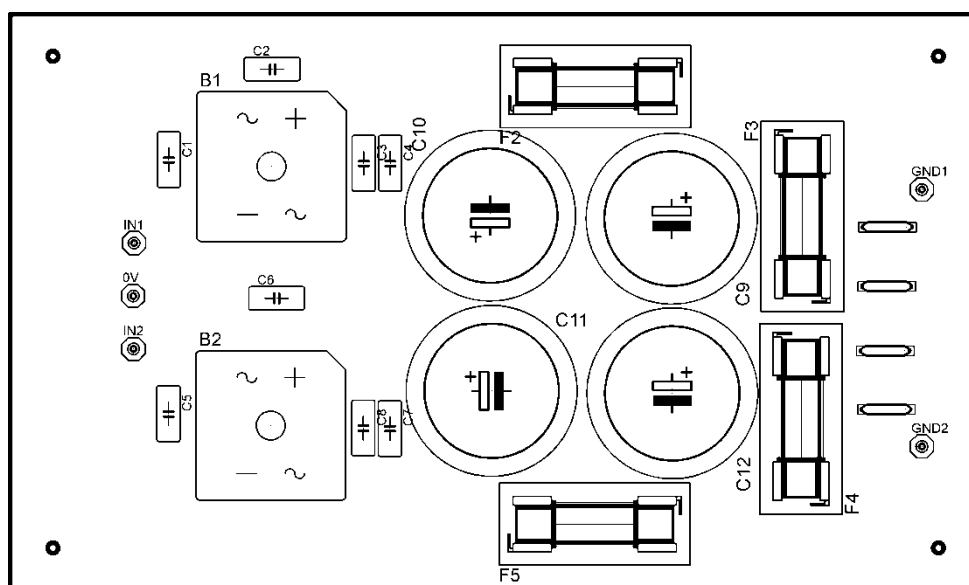


Obr. 7.8 Osazovací výkres desky koncového stupně

## 1.4 Deska plošných spojů zdroje pro koncový stupeň



**Obr. 7.9** Spodní strana desky zdroje pro koncový stupeň



**Obr. 7.10** Osazovací výkres desky zdroje pro koncový stupeň

## 2 Seznam součástek

### 2.1 Seznam součástek korekčního předzesilovače

| Označení součástky                | Hodnota    | Typ součástky         | Dodavatel | Počet (ks) | Cena (Kč) | Celková cena (Kč) |
|-----------------------------------|------------|-----------------------|-----------|------------|-----------|-------------------|
| R1,R14                            | 56k        | rezistor              | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| R2,R7,R9,R13,<br>R15,R20,R21,R25  | 1k         | rezistor              | GM        | 8          | 1,00      | 8,00              |
| R3,R4,R10,R11,<br>R16,R17,R22,R23 | 22R        | rezistor              | GM        | 8          | 1,00      | 8,00              |
| R5,R8,R12,R18,<br>R24,R28         | 10k        | rezistor              | GM        | 6          | 1,00      | 6,00              |
| R6,R19                            | 4,7k       | rezistor              | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| R26,R27                           | 220k       | rezistor              | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| C1,C9,C11,C12,<br>C20,C22         | 470n/63V   | fól. kond. MKS2       | GM        | 6          | 6,00      | 36,00             |
| C2,C3,C8,C10,<br>C13,C14,C19,C21  | 100n/63V   | kond. TK ker.         | GM        | 8          | 2,00      | 16,00             |
| C4,C5,C15,C16                     | 33n/100V   | MKT                   | GM        | 4          | 1,50      | 6,00              |
| C6,C17                            | 2,2n/100V  | FKP                   | GES       | 2          | 3,70      | 7,40              |
| C7,C18                            | 10n/63V    | MKS2                  | GM        | 2          | 4,00      | 8,00              |
| P1P,P1L,P2P,P2L                   | 100k       | lineární potenc.      | GM        | 2          | 55,00     | 110,00            |
| P3P,P3L                           | 50k        | logarit. potenc.      | GM        | 1          | 57,00     | 57,00             |
| P4P,P4L                           | 10k        | lineární potenc.      | GM        | 1          | 55,00     | 55,00             |
| IO1, IO2, IO3, IO4                | NE5534AN   | operační zesil.       | GM        | 4          | 6,80      | 27,20             |
| X1,X2                             | ARK500/2SV | svorkovnice           | GM        | 2          | 3,90      | 7,80              |
| FS                                | 6,3x0,8mm  | Faston do DPS vidlice | GES       | 10         | 1,20      | 12,00             |
| <b>Celková cena (Kč)</b>          |            |                       |           |            |           | <b>370,00</b>     |

**Tab. 7.1** Seznam součástek korekčního předzesilovače

## 2.2 Seznam součástek symetrického zdroje předzesilovače

| Označení součástky          | Hodnota                                 | Typ součástky     | Dodavatel | Počet (ks) | Cena (Kč) | Celková cena (Kč) |
|-----------------------------|-----------------------------------------|-------------------|-----------|------------|-----------|-------------------|
| TR1                         | HAHN<br>EI48/16,8<br>10VA<br>230V/2x15V | transformátor     | GM        | 1          | 132,00    | 132,00            |
| R26,R27,R28,R29             | 22                                      | rezistor          | GM        | 4          | 1,00      | 4,00              |
| R30,R33                     | 1k                                      | rezistor          | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| R31,R32                     | 150                                     | rezistor          | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| R34,R35                     | 5k                                      | rezistor          | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| C23,C24,C25,C26             | 22nF                                    | fól. kond. MKS2   | GM        | 4          | 2,80      | 11,20             |
| C27,C28                     | 2200μ/25V                               | elektrolyt. kond. | GM        | 2          | 10,00     | 20,00             |
| C29,C30                     | 47μ/25V                                 | elektrolyt. kond. | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| C31,C32,C33,C34,<br>C37,C38 | 100n/TK ker.                            | kond. TK ker.     | GM        | 6          | 2,00      | 12,00             |
| C35,C36                     | 220μ/25V                                | elektrolyt. kond. | GM        | 2          | 1,50      | 3,00              |
| C39,C40                     | 22μ/25V                                 | elektrolyt. kond. | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| D1,D2,D3,D4                 | 1N4007                                  | dioda             | GM        | 4          | 1,00      | 4,00              |
| T1                          | BC546B TAP                              | NPN tranzist.     | GM        | 1          | 1,00      | 1,00              |
| T2                          | BC556B                                  | PNP tranzist.     | GM        | 1          | 1,00      | 1,00              |
| IC1                         | 7815                                    | stabilizátor      | GM        | 1          | 7,00      | 7,00              |
| IC2                         | 7915                                    | stabilizátor      | GM        | 1          | 8,00      | 8,00              |
| F1                          | 100mA                                   | pojistka          | GM        | 1          | 5,00      | 5,00              |
| Fd                          | SCHURTER<br>OGN<br>22,5mm               | držák pojistky    | GM        | 1          | 8,00      | 8,00              |
| Q1,Q2                       | LED 5mm                                 | LED dioda         | GM        | 2          | 1,50      | 3,00              |
| X1                          | ARK500/3SV                              | svorkovnice       | GM        | 1          | 5,00      | 5,00              |
| X2                          | ARK500/2SV                              | svorkovnice       | GM        | 1          | 3,90      | 3,90              |
| <b>Celková cena (Kč)</b>    |                                         |                   |           |            |           | <b>238,00</b>     |

**Tab. 7.2** Seznam součástek symetrického zdroje předzesilovače

## 2.3 Seznam součástek koncového zesilovače

| Označení součástky              | Hodnota    | Typ součástky                                                  | Dodavatel | Počet (ks) | Cena (Kč) | Celková cena (Kč) |
|---------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------|-----------|------------|-----------|-------------------|
| R1,R2,R3,R4,<br>R38,R39,R40,R41 | 220        | rezistor                                                       | GM        | 8          | 1,00      | 8,00              |
| R5,R6                           | 2,2k       | rezistor                                                       | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| R7,R8                           | 10k        | rezistor                                                       | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| R9,R10                          | 510        | rezistor                                                       | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| R11,R12,R71                     | 22         | rezistor                                                       | GM        | 3          | 1,00      | 3,00              |
| R15,R16                         | 2,2k/5W    | výkon. rezistor                                                | GES       | 2          | 4,90      | 9,80              |
| R17,R18                         | 51k        | rezistor                                                       | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| R19                             | 33k        | rezistor                                                       | GM        | 1          | 1,00      | 1,00              |
| R20                             | 220        | rezistor                                                       | GM        | 1          | 1,00      | 1,00              |
| R21                             | 4,7k       | rezistor                                                       | GM        | 1          | 1,00      | 1,00              |
| R22                             | 1M         | rezistor                                                       | GM        | 1          | 1,00      | 1,00              |
| R23                             | 27k        | rezistor                                                       | GM        | 1          | 1,00      | 1,00              |
| R24                             | 1k         | rezistor                                                       | GM        | 1          | 1,00      | 1,00              |
| R25,R26                         | 2,7k/5W    | výkon. rezistor                                                | GES       | 2          | 4,90      | 9,80              |
| R27,R28                         | 3,3k/2W    | výkon. rezistor                                                | GES       | 2          | 3,00      | 6,00              |
| R29                             | 200        | rezistor                                                       | GM        | 1          | 1,00      | 1,00              |
| R30,R92,R93                     | 100        | rezistor                                                       | GM        | 3          | 1,00      | 3,00              |
| R31                             | 100k       | trimr                                                          | GM        | 1          | 5,00      | 5,00              |
| R32                             | 100        | trimr                                                          | GES       | 1          | 5,50      | 5,50              |
| R33,R34                         | 15/1W      | výkon. rezistor                                                | GM        | 2          | 1,50      | 3,00              |
| R49,R50,R51,R52                 | 1,2        | rezistor                                                       | GM        | 4          | 1,00      | 4,00              |
| R60,R61,R63,R64                 | 0,47/5W    | výkon. rezistor                                                | GM        | 4          | 5,00      | 20,00             |
| R69                             | 4,7/5W     | výkon. rezistor                                                | GM        | 1          | 4,90      | 4,90              |
| R70                             | 10/5W      | výkon. rezistor                                                | GM        | 1          | 4,90      | 4,90              |
| R72,R73                         | 470        | trimr                                                          | GES       | 2          | 5,50      | 11,00             |
| R90,R91                         | 22k        | rezistor                                                       | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| R94,R95                         | 300        | rezistor                                                       | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| C1,C2                           | 1000μ/63V  | elektrolyt. kond.                                              | GM        | 2          | 11,50     | 23,00             |
| C3,C4                           | 470μ/50V   | elektrolyt. kond.                                              | GM        | 2          | 6,00      | 12,00             |
| C5                              | 2,2μ/50V   | svítkový kond.                                                 | GM        | 1          | 33,00     | 33,00             |
| C6                              | 10p/500V   | slídový kond.                                                  | GES       | 1          | 7,80      | 7,80              |
| C7,C8,C14,C19,C20               | 100n       | ker. kond. X7R                                                 | GM        | 5          | 1,00      | 5,00              |
| C10,C12                         | 10000μ/63V | elektrolyt. kond.                                              | GES       | 2          | 109,00    | 218,00            |
| C13                             | 100μ/10V   | elektrolyt. kond.                                              | GM        | 1          | 1,00      | 1,00              |
| C15,C16,C17,C18                 | 390p/500V  | slídový kond.                                                  | GES       | 4          | 17,90     | 71,60             |
| C90,C91                         | 22p/500V   | slídový kond.                                                  | GES       | 2          | 7,50      | 15,00             |
| L1                              | 2u         | tlumivka (6 závitů<br>Cu drátu 1,5mm <sup>2</sup><br>na Ø41mm) | -         | 2          | -         | -                 |
| D1,D2, D3,D4                    | 1N4148     | dioda                                                          | GM        | 4          | 1,00      | 4,00              |
| Z1,Z2                           | BZX85V024  | Zenerova dioda                                                 | GM        | 2          | 1,50      | 3,00              |
| Q1,Q2                           | BC546B     | NPN tranzist.                                                  | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| Q3,Q4                           | BC556B     | PNP tranzist.                                                  | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| Q5,Q7                           | BD140-16   | PNP tranzist.                                                  | GM        | 2          | 5,00      | 10,00             |

|                          |            |                       |     |   |       |               |
|--------------------------|------------|-----------------------|-----|---|-------|---------------|
| Q6,Q8                    | BD139-16   | NPN tranzist.         | GM  | 2 | 5,00  | 10,00         |
| Q13                      | BD238      | PNP tranzist.         | GM  | 1 | 8,00  | 8,00          |
| Q14                      | BD237      | NPN tranzist.         | GM  | 1 | 4,00  | 4,00          |
| Q19                      | BD911      | NPN tranzist.         | GM  | 1 | 10,00 | 10,00         |
| Q20,Q21                  | MJL 3281AG | NPN výk. tranzist.    | GES | 2 | 88,90 | 177,80        |
| Q22                      | BD912      | PNP tranzist.         | GM  | 1 | 10,00 | 10,00         |
| Q23,Q24                  | MJL 1302AG | PNP výk. tranzist.    | GES | 2 | 88,90 | 177,80        |
| Q31                      | MPSA06     | NPN tranzist.         | GM  | 1 | 2,00  | 2,00          |
| FS                       | 6,3x0,8mm  | Faston do DPS vidlice | GES | 4 | 1,20  | 4,80          |
| <b>Celková cena (Kč)</b> |            |                       |     |   |       | <b>929,00</b> |

**Tab. 7.3** Seznam součástek koncového zesilovače

**Poznámka:** Uvedený seznam součástek je pouze pro jeden kanál zesilovače. Druhý kanál obsahuje stejné součástky se stejnými parametry. Liší se pouze označení (např.: R29→ R129).

## 2.4 Seznam součástek symetrického zdroje koncového zesilovače

| Označení součástky          | Hodnota                   | Typ součástky         | Dodavatel | Počet (ks) | Cena (Kč) | Celková cena (Kč) |
|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------|------------|-----------|-------------------|
| TR                          | Toroid<br>2x29V<br>300VA  | transformátor         | GM        | 1          | 585,00    | 585,00            |
| C1,C2,C3,C4,<br>C5,C6,C7,C8 | 22n/100V                  | fól. kond. MKS2       | GM        | 8          | 3,00      | 24,00             |
| C9,C10,C11,C12              | 4700u/50V                 | elektrolyt. kond.     | GM        | 4          | 55,00     | 220,00            |
| B1,B2                       | KBPC1006W                 | usměrň. můstek        | GM        | 2          | 12,90     | 25,80             |
| F1                          | 2A                        | pojistka              | GM        | 1          | 6,00      | 6,00              |
| F2,F3,F4,F5                 | 6,3A                      | pojistka              | GM        | 4          | 7,00      | 28,00             |
| Fd                          | SCHURTER<br>OGN<br>22,5mm | držák pojistky        | GM        | 5          | 8,00      | 40,00             |
| FS                          | 6,3x0,8mm                 | Faston do DPS vidlice | GES       | 4          | 1,20      | 4,80              |
| <b>Celková cena (Kč)</b>    |                           |                       |           |            |           | <b>934,00</b>     |

**Tab. 7.4** Seznam součástek symetrického zdroje koncového zesilovače

## 2.5 Seznam součástek obvodu pro opožděné připojení zátěže

| Označení součástky       | Hodnota    | Typ součástky     | Dodavatel | Počet (ks) | Cena (Kč) | Celková cena (Kč) |
|--------------------------|------------|-------------------|-----------|------------|-----------|-------------------|
| R13                      | 100k       | rezistor          | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| R14                      | 510k       | rezistor          | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| R36                      | 1k         | rezistor          | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| C9                       | 4,7μ/63V   | elektrolyt. kond. | GM        | 2          | 1,00      | 2,00              |
| T1                       | BD139-16   | NPN tranzist.     | GM        | 2          | 5,00      | 10,00             |
| K1                       | Finder 24V | relé              | -         | 2          | -         | -                 |
| <b>Celková cena (Kč)</b> |            |                   |           |            |           | <b>18,00</b>      |

**Tab. 7.5** Seznam součástek obvodu pro opožděné připojení zátěže

## 2.6 Seznam ostatních součástek

| Označení součástky                            | Hodnota       | Typ součástky             | Dodavatel | Počet (ks) | Cena (Kč) | Celková cena (Kč) |
|-----------------------------------------------|---------------|---------------------------|-----------|------------|-----------|-------------------|
| Přístrojová skříň                             | 19'           | Skříňka 2Ux350            | GM        | 1          | 1035,00   | 1035,00           |
| Přístrojová nožička                           | -             |                           | GES       | 4          | 7,90      | 31,60             |
| Chladič                                       | -             | Chladič na pouzdro TO220  | GM        | 4          | 3,00      | 12,00             |
| Chladič žebrový                               | 50x226,5x40mm |                           | GES       | 2          | 299,00    | 598,00            |
| Konektor Cinch                                | -             | Cinch do panelu - červený | GM        | 1          | 6,00      | 6,00              |
| Konektor Cinch                                | -             | Cinch do panelu - černý   | GM        | 1          | 7,00      | 7,00              |
| Svorkovnice pro reproboxy                     | -             |                           | GES       | 1          | 15,90     | 15,90             |
| Napájecí síťová vidlice + pojistka            | -             |                           | GM        | 1          | 33,00     | 33,00             |
| Kolébkový spínač                              | -             |                           | GM        | 1          | 18,00     | 18,00             |
| Přístroj. knoflík                             | -             |                           | GM        | 1          | 9,50      | 9,50              |
| Přístroj. knoflík                             | -             |                           | GM        | 3          | 15,00     | 45,00             |
| Šroubky+matičky                               | M3            |                           | -         | -          | -         | -                 |
| Izolační podložky a průchodky pro tranzistory | -             |                           | GES       | -          | -         | 17,00             |
| <b>Celková cena (Kč)</b>                      |               |                           |           |            |           | <b>1828,00</b>    |

**Tab. 7.6** Seznam ostatních součástek

### Poznámka:

GM - GM Electronic, s r. o.

GES - GES-ELECTRONICS, a.s.

Celková cena materiálu je cca 5246 Kč