

# Nízko-frekvenční elektronkový předzesilovač RF tube preamplifier

Lukáš Chobot

---

Bakalářská práce  
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav aplikované informatiky  
akademický rok: 2007/2008

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Lukáš CHOBOT  
Studijní program: B 3902 Inženýrská informatika  
Studijní obor: Informační technologie  
Téma práce: Elektronkový nízkofrekvenční zesilovač

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s principy a různými variantami zapojení nf zesilovačů.
2. Modifikujte vybrané schéma zesilovače pro dnes dostupnou součástkovou elektronkovou základnu.
3. Ověřte princip zesilovače v dostupném simulačním programu (MicroCap).
4. Zesilovač realizujte včetně ověření jeho správné funkce.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. LÁNIČEK, R.: Elektronika, obvody, součástky a děje. Praha, BEN, 1998.
2. katalog EZK Rožnov pod Radhoštěm, 2005.
3. SIEGFRIED, W.: Abeceda nf techniky. Praha, BEN, 2002.
4. KOTISA, Z.: NF zesilovače I, II. Praha, BEN, 2002.
5. VLACH, J.: Lampárna – aneb co to zkusit s elektronkami. Praha, BEN, 2004.
6. HRABOVSKÝ, M.: Eagle pro začátečníky. Praha, BEN, 2007.
7. [www.auravos.cz](http://www.auravos.cz)
8. [www.aldax.cz](http://www.aldax.cz)
9. [www.dogstar.dantimax.dk](http://www.dogstar.dantimax.dk)

Vedoucí bakalářské práce:

**Mgr. Milan Adámek, Ph.D.**

Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

**20. února 2008**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**5. května 2008**

Ve Zlíně dne 20. února 2008

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Ivan Zelinka, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Úkolem této bakalářské práce bylo seznámit se s různými variantami NF zesilovačů a následně modifikovat vybrané schéma s dostupnou součástkovou základnou. Poté funkci zesilovače nasimulovat v programu MicroCap a prakticky realizovat.

Předzesilovač je realizován jako dvoukanalový, pro stereofonní poslech a primárně je určen k připojení ke koncovému stupni zesilovače autora.

Klíčová slova: nf zesilovač, elektronky, Micro Cap, korekce

## **ABSTRACT**

The aim of this bachelor thesis was to familiarize with various principles and variants of RF amplifiers and furthermore modify choosen schematics with todays aviable parts. Then simulate it's characteristics in MicroCap simulation application (or simmilar) and accomplish the amplifier practicaly.

Preamplifier is designed as a stereo unit, primarily designed to be combned with autor's power amplifier.

Keywords: RF ampilifier, tubes, valves, Micro Cap

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce kterým je doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. za odborné vedení, rady, připomínky a pomoc v průběhu řešení této bakalářské práce. Taktéž děkuji za pomoc svému otci, za cenné připomínky ke konstrukčnímu řešení.

*Motto:*

*"The only thing we have to fear is fear itself."*

*“Jediné, z čeho bychom měli mít strach, je strach samotný“*

Franklin D. Roosevelt

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 PROBLEMATIKA NÍZKOFREKVENČNÍCH ZESILOVAČŮ</b> .....	<b>11</b>
1.1 PRINCIP ELEKTRONKY .....	11
1.2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI ELEKTRONKY.....	12
1.3 PRINCIP ZESILOVAČE.....	15
1.4 TŘÍDY NF ZESILOVAČŮ.....	16
<b>2 PRINCIPY TŘÍD ZESILOVAČŮ</b> .....	<b>17</b>
2.1 PRINCIP TŘÍDY A.....	17
2.2 PRINCIP TŘÍDY AB.....	18
2.3 PRINCIP TŘÍDY B.....	19
<b>3 ZKRESLENÍ</b> .....	<b>21</b>
3.1 HARMONICKÉ ZKRESLENÍ THD .....	21
3.2 INTERMODULAČNÍ ZKRESLENÍ TID .....	21
3.3 ZKRESLENÍ TIM.....	22
3.4 ZKRESLENÍ SID .....	23
3.5 ZKRESLENÍ V LIMITACI.....	23
<b>4 PROBLEMATIKA ELEKTRONKOVÝCH ZESILOVAČŮ</b> .....	<b>24</b>
4.1 SÍŤOVÝ TRANSFORMÁTOR.....	24
4.2 VÝSTUPNÍ TRANSFORMÁTOR .....	24
4.3 ŽHAVENÍ ELEKTRONEK .....	25
4.4 BRUM V OBVODECH ELEKTRONEK .....	26
4.5 PRODLOUŽENÍ ŽIVOTNOSTI ELEKTRONEK.....	26
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>28</b>
<b>5 DNEŠNÍ TRENDY A ODŮVODNĚNÍ VOLBY ZAPOJENÍ PRO MODIFIKACI</b> .....	<b>29</b>
<b>6 OBVOD PŘEDZESILOVAČE</b> .....	<b>30</b>
6.1 STUPEŇ DIFERENCIÁLNÍCH VSTUPŮ .....	30
6.2 STUPEŇ VÝSTUPU ZESILOVAČE .....	31
6.3 ČÁST DC OBVODU ZPĚTNÉ VAZBY ZESILOVAČE.....	32
6.4 KOREKČNÍ OBVODY VE ZPĚTNOVAZEBNÍ SMYČCE ZESILOVAČE .....	33
6.5 ÚPRAVA PŘENÁŠENÉHO PÁSMO ZESILOVAČE .....	34
<b>7 SIMULACE PŘEDZESILOVAČE V PROSTŘEDÍ MICRO-CAP 7</b> .....	<b>36</b>

7.1	SIMULACE AMPLITUDOVÉ CHARAKTERISTIKY PŘEDZESILOVAČE.....	36
7.2	SIMULACE FREKVENČNÍ A FÁZOVÉ CHARAKTERISTIKY PŘEDZESILOVAČE .....	37
7.3	NAPĚŤOVÉ POMĚRY V OBVODU .....	39
7.4	VLIV ZMĚNY KAPACITY NA PŘENÁŠENÉ PÁSMO ZESILOVAČE .....	40
<b>8</b>	<b>REALIZACE ELEKTRONKOVÉHO NF PŘEDZESILOVAČE.....</b>	<b>41</b>
8.1	POSTUP PŘI VÝROBĚ DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ .....	41
8.2	NAPÁJECÍ ZDROJ .....	42
8.2.1	Schéma zapojení a desky plošných spojů .....	42
8.2.2	Rozpiska součástek napájecího zdroje .....	44
8.2.3	Popis zapojení.....	44
8.2.4	Kontrola funkce .....	44
8.3	MODUL STABILIZÁTORU NAPĚTÍ PRO ŽHAVENÍ A ČASOVAČE.....	45
8.3.1	Schéma zapojení a deska plošných spojů .....	45
8.3.2	Rozpiska součástek stabilizovaného zdroje a časovače .....	47
8.3.3	Popis zapojení.....	47
8.3.4	Osazování desek plošných spojů zdrojů .....	48
8.3.5	Kontrola funkce .....	48
8.4	MODUL KOREKČÍ .....	48
8.4.1	Schéma zapojení a deska plošného spoje .....	49
8.4.2	Rozpiska součástek obvodu korekcí.....	50
8.4.3	Popis zapojení.....	50
8.5	KONCOVÝ STUPEŇ, JEHO SESTAVENÍ A OŽIVENÍ.....	51
8.5.1	Rozpiska součástek hlavní desky .....	52
8.5.2	Osazování hlavní desky plošného spoje předzesilovače .....	53
8.5.3	Postup před oživením zesilovače.....	53
8.5.4	Oživení nf předzesilovače .....	54
<b>9</b>	<b>MECHANICKÁ KONSTRUKCE .....</b>	<b>56</b>
<b>10</b>	<b>PROVOZNÍ DOPORUČENÍ TOHOTO ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>58</b>
10.1	ÚČEL ZAŘÍZENÍ .....	58
10.2	NÁVOD K POUŽITÍ .....	58
10.3	DŮLEŽITÁ BEZPEČNOSTNÍ UPOZORNĚNÍ.....	59
10.4	VÝMĚNA POJISTEK.....	60
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>67</b>

## ÚVOD

Je zřejmé že v poslední době je poznat zvýšený zájem o vakuové elektronky, technologii která už před více než dvěma dekádami byla považována za přežitou. Nyní se trend obrací a mnoho výrobců zvučných jmen znovu nabízejí elektronková zařízení svým zákazníkům které tvoří skupina audiofilů, muzikantů a v neposlední řadě hobbyistů. V mnoha případech jde pouze o ověřené konstrukce staré několik desítek let v novém hávu. Jiné produkty nabízejí nový přístup k elektronce jako elektronickému prvku, přidávající to, co jsme se za tu dobu naučili. Tato práce by se měla řadit k té druhé skupině.

Hlavními argumenty elektronkových zastánců jsou, že papírové specifikace jsou bezcenné a co se naopak počítá je, jaký hudební požitek má samotný posluchač. Proto se často vyskytují velice subjektivní popisy namísto technicky přesných informací. Tábor odpůrců si stojí za tím že čísla nelžou a nelze vylepšit něco, čemu přidáme více zkreslení jakéhokoliv druhu.

Obě strany ovšem mají svým způsobem pravdu. Ti vyvolení z nás již slyšeli drahá zařízení za desítky tisíc korun, ale byli nakonec zaplněni vlažným pocitem z jeho zvukového podání. Stejně tak spousta lidí bude souhlasit že už jen proto, že se v něčem nachází elektronky, nestojí za to ani za poslech. Jen si zkuste zapnout staré zaprášené rádio vašeho dědy jako demonstraci jak *špatně* elektronkový přístroj může znít.

Možná usmiřujícím pohledem těchto dvou stran bude zvážení rozdílu mezi nástrojem a reprodukčním zařízením. Pro nástroj, jeho individuální frekvence, tvar křivky a fázový posun jsou to, co definuje jeho zvuk - třeba jako elektronkový nástrojový zesilovač Fender. Stejně tak jako se nikdo nebude pokoušet definovat specifikace a zkreslení Stradivárek, by bylo nesmyslné hádat se že určitý elektronkový nástrojový zesilovač má více než 12% THD (celkového harmonického zkreslení) při 35 wattech.

Od reprodukčního zařízení na druhou stranu očekává přesné ztvárnění signálu, který do něj přivádíme. To zní v principu dobře. Kdyby ovšem takový zesilovač existoval, bychom schopní naprosto přesně reprodukovat vše od garážové kapely, až po Pražskou filharmonii tak, že bychom vytvořili reprodukcii nepoznatelnou od originálního vystoupení.



A tady je háček. Celkové podání stereo systému velkou mírou záleží na poslechové místnosti, reproduktorech, hlasitostí produkce, osobními preferencemi a mnoha dalšími ošemetnými faktory. Ani v dnešní době tedy nemůžeme říct že dokonalý reprodukční systém existuje, a pravděpodobně nikdy nebude. A s přihlédnutím k faktu, že drtivá většina nahrávek jsou do jisté míry elektronicky upraveny tak, aby „zněly dobře“ (což už se v podstatě vylučuje s představou dokonalé reprodukce), ztrácí myšlenka naprosté přesnosti reprodukce svoji váhu.

Přeneseno do extrému, „ideální“ reprodukční systém by nesměl mít žádné ovládací prvky, snad kromě přepínače vstupu. Pokud se nad tímto zamyslíme, osobní preference jsou jediným důvodem proč zesilovače mají ovladače hlasitosti, ekvalizéry a jiné ovladače k tomu, abychom zvuk přizpůsobili našim uším.

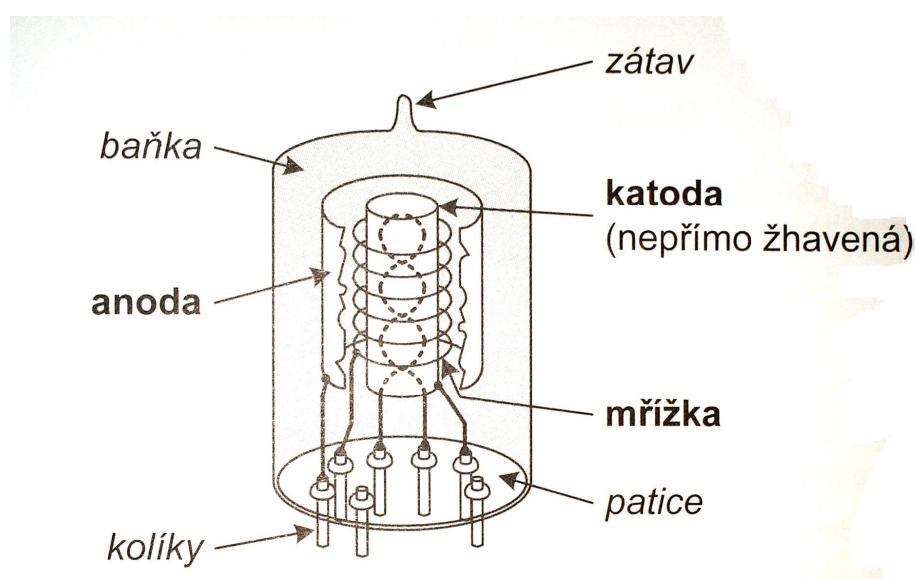
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 PROBLEMATIKA NÍZKOFREKVENČNÍCH ZESILOVAČŮ

Tato kapitola se zabývá nejdůležitějšími poznatky pro pochopení základních pojmů a funkce NF zesilovačů.

## 1.1 Princip elektronky

Elektronka je elektronický aktivní prvek, pracující na principu řízení toku elektronů, vytvořeného tepelnou emisí ve vakuu. Nízkou úrovní napětí přivedeného na řídicí mřížku řídíme výstupní napětí na výstupu (anodě). Výsledná frekvence se tedy zachová, ale proměnné napětí je na výstupu mnohonásobně vyšší. Původní název "lampa", který se používá občas i dnes, byl odvozen od samotného vzhledu prvku a také zkratkou plného označení elektronová lampa - první elektronky byly totiž jen upravenými žárovkami a vypadaly velmi podobně. Moderní označení "elektronka", hovorově "lampa" které se udrželo až dodnes, lépe vystihuje jak samotnou funkci prvku, tak i princip činnosti. Podle druhu a funkce má elektronka dvě a více elektrod (nepočítaje žhavicí přívody), umístěných ve vyčerpané (s případnou příměsí netečných plynů nebo rtuti) skleněné či kovové baňce. Ta je základem každé elektronky. Elektrody jsou katoda, anoda a podle druhu elektronky také několik mřížek. Katoda je nejdůležitější částí elektronky. Katodou může být v podstatě každý kov, který je po rozžhavení schopen emise elektronů.



Obr.č. 1 - Elektronka –triody; principiální náčrt konstrukce triody

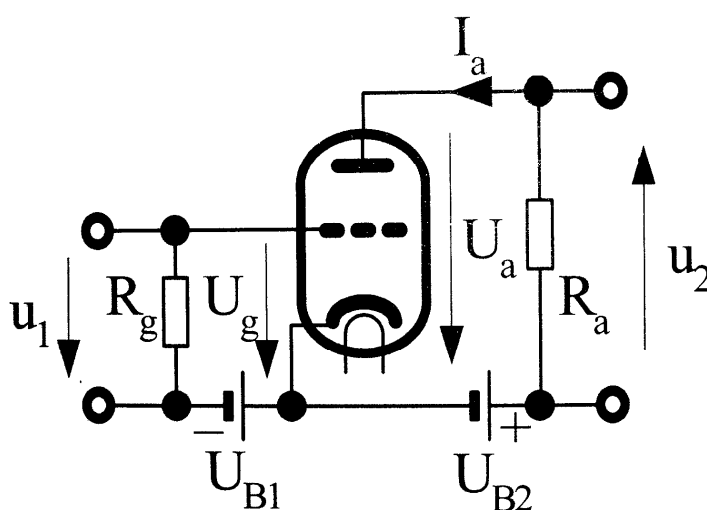
Podle počtu elektrod dělíme elektronky na diody (nejjednodušší elektronka, pouze 2 elektrody), triody, tetrody, pentody a vícemřížkové systémy. Tyto elektrody jsou přes zátavy ve skle vyvedeny mimo baňku a podle druhu provedení jsou buď přímo kontaktními kolíky, případně (u starších nebo výkonnějších typů) připájeny k různým druhům patič. Elektronky jsou také prvky v praxi velmi odolnými proti nešetrnému zacházení (z elektrického hlediska) a krátkodobě odolávají i značným přetížením. V audiotechnice se nejčastěji můžeme setkat s triodami, pentodami a svazkovými pentodami.

## 1.2 Základní vlastnosti elektronky

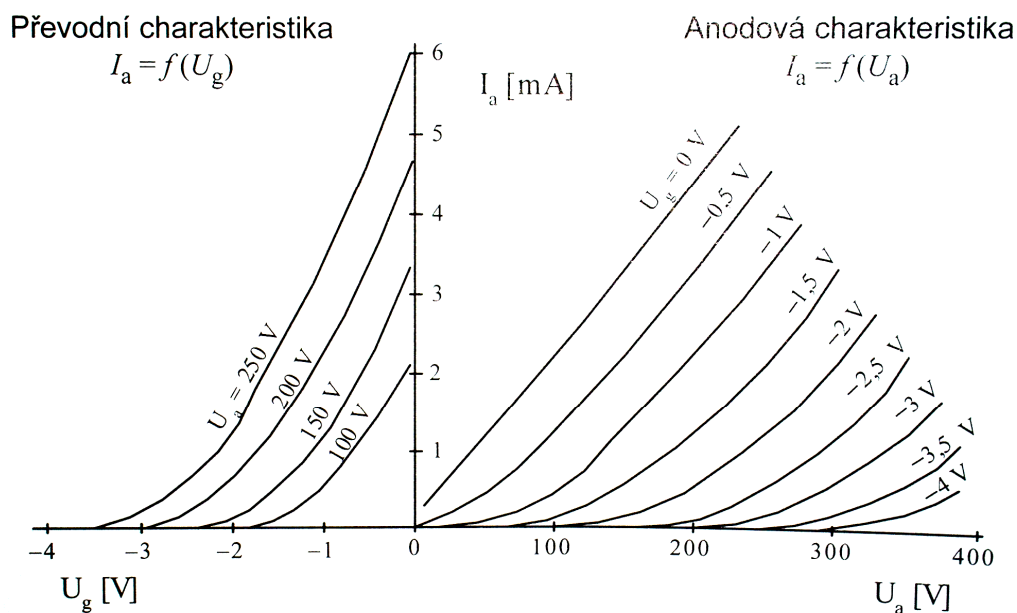
Na Obr.č.2 je znázorněno základní zapojení triody v elektrickém obvodu. Pracovní bod triody je určen anodovým napětím  $U_a$ , anodovým proudem  $I_a$  a mřížkovým napětím  $U_g$  (mřížka je vzhledem ke katodě záporná, mřížkový proud nulový). S rostoucím napětím  $u_1$  na mřížkovém odporu  $R_g$  se zvětšuje anodový proud  $I_a$ , zmenšuje se anodové napětí  $U_a$  a zvětšuje výstupní napětí  $u_2$  na odporu  $R_a$ .

Napěťové zesílení elektronky  $A_u$  je dáno vztahem:

$$A_u = \frac{u_2}{u_1} \quad [-] \quad (1)$$



Obr.č. 2 - Základní zapojení triody



Obr.č. 3 – Modelová charakteristika elektronky - triody

Vlastnosti elektronky se popisují statickými charakteristikami. Na Obr.č.3 je znázorněna modelová charakteristika elektronky – triody. V levé části je znázorněna parametrická závislost anodového proudu  $I_a$  na mřížkovém napětí  $U_g$  pro různá anodová napětí  $U_a$ , která se nazývá převodní charakteristikou elektronky (angl. transfer characteristic), v pravé části je znázorněna parametrická závislost anodového proudu  $I_a$  na anodovém napětí  $U_a$  pro různá mřížková napětí  $U_g$ , která se nazývá anodovou charakteristikou elektronky (angl. plate characteristic) [4]

Dynamické vlastnosti elektronky pro malé změny signálu popisují diferenciální parametry pro daný pracovní bod:

Strmost  $S$  (angl. transconductance) je poměr přírůstku anodového proudu  $\Delta I_a$  k přírůstku mřížkového napětí  $\Delta U_g$  při konstantním anodovém napětí  $U_a$  a udává se obvykle v [mA/V]:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \text{ při } U_a = \text{konst.} \quad (2)$$

Vnitřní odpor **Ri** (angl. plate impedance) je poměr přírůstku anodového proudu  $\Delta I_a$  k přírůstku anodového napětí  $\Delta U_a$  při konstantním mřížkovém napětí  $U_g$  a udává se obvykle v [k $\Omega$ ]:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}, \text{ při } U_g = \text{konst.} \quad (3)$$

Zesilovací činitel  **$\mu$**  (angl. amplification factor) je poměr přírůstku anodového napětí  $\Delta U_a$  k přírůstku mřížkového napětí  $\Delta U_g$  při konstantním anodovém proudu  $I_a$ :

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}, \text{ při } I_a = \text{konst.} \quad (4)$$

Průnik **D** (angl. penetrance) je převrácenou hodnotou zesilovacího činitele:

$$D = \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

Mezi diferenciálními parametry elektronky v daném pracovním bodě platí tzv. Barkhausenův vztah:

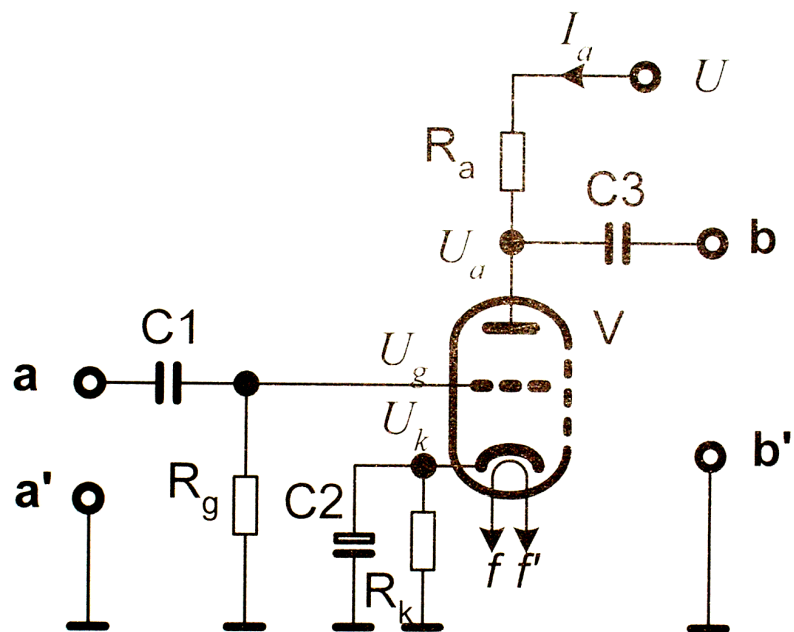
$$S \cdot R_i \cdot D = 1 \quad (6)$$

Pracovní bod elektronky je jednoznačně určen trojicí odpovídajících hodnot  $U_a$ ,  $I_a$  a  $U_g$  (obvykle tyto údaje zjistíme z katalogu pro konkrétní elektronku). Pro tento pracovní bod definujeme anodový odpor v pracovním bodě vztahem:

$$R_p = \frac{U_a}{I_a}, \text{ pro } U_g = \text{konst.} \quad (7)$$

### 1.3 Princip zesilovače

Z charakteristiky vyplývá, že poměrně malá změna napětí  $U_g$  vyvolá změnu anodového proudu  $I_a$ . To není u všech elektronek stejné, je to dáno druhem elektronky, vnitřním uspořádáním i pracovním bodem. Změnou mřížkového napětí  $U_g$  můžeme tedy měnit anodový proud  $I_a$ . Necháme-li anodový proud procházet vhodně zvoleným anodovým odporem  $R_a$ , vyvoláme malou změnou mřížkového napětí velkou změnu anodového napětí  $U_a$ , a tak dostaneme nejjednodušší zesilovač. [4]



Obr.č. 4 – Základní zapojení elektronky jako zesilovače

## 1.4 Třídy NF zesilovačů

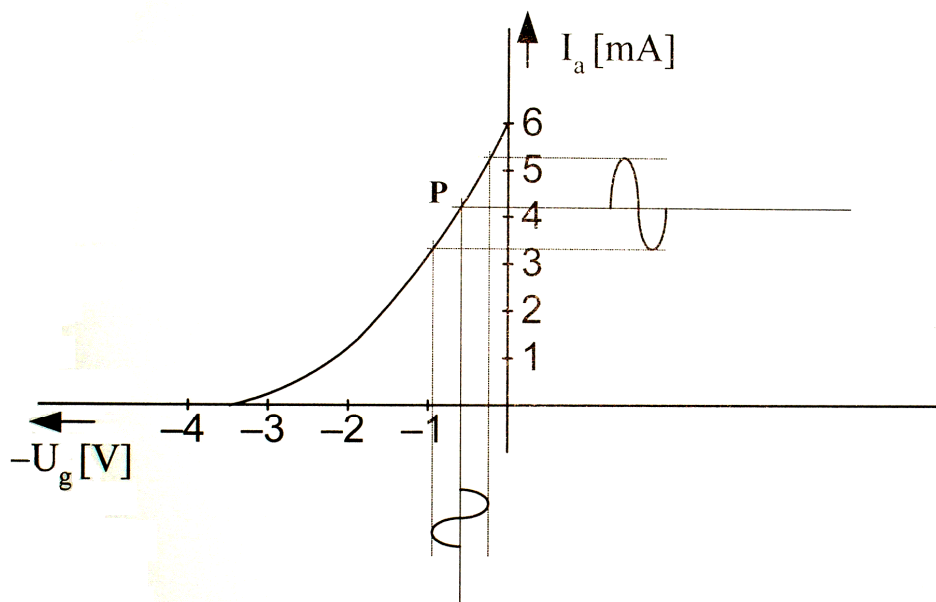
Hodnotou zvoleného předpětí na mřížce se zesilovač zařadí do jedné z tříd zesilovačů; A, AB nebo B. Kromě výše zmíněných tříd se můžeme setkat i s dalšími třídami (C, D a případně i jinými), které se však v oblasti nízkofrekvenčních zesilovačů používají zřídka. Při volbě třídy zesílení se musí brát v úvahu určení zesilovače. Například pro zesilovač napětí se nejvíce používá zesilovačů pracujících ve třídě A, neboť zesilovaná napětí jsou obvykle malá a záleží více na malém zkreslení než na velké účinnosti. Toho využíváme hlavně při konstrukci předzesilovačů, kde výkonové nároky nejsou nijak veliké, avšak je kladen důraz na zesílení malých hodnot signálu při jeho malém zkreslení. Při zesílení výkonu se dá s úspěchem použít zesilovačů všech tříd zesílení. Je opět třeba zohlednit velikost zkreslení, účinnost a samozřejmě výkonové zesílení. [4]



## 2 PRINCIPY TŘÍD ZESILOVAČŮ

Vysvětlíme si principy jednotlivých tříd zesilovačů. Na pomoc si vezmeme převodní charakteristiku elektronky (viz. Obr.č.3), tedy funkční závislost  $I_a = f(U_a)$  pro konkrétní hodnoty  $U_g$ . [4]

### 2.1 Princip třídy A

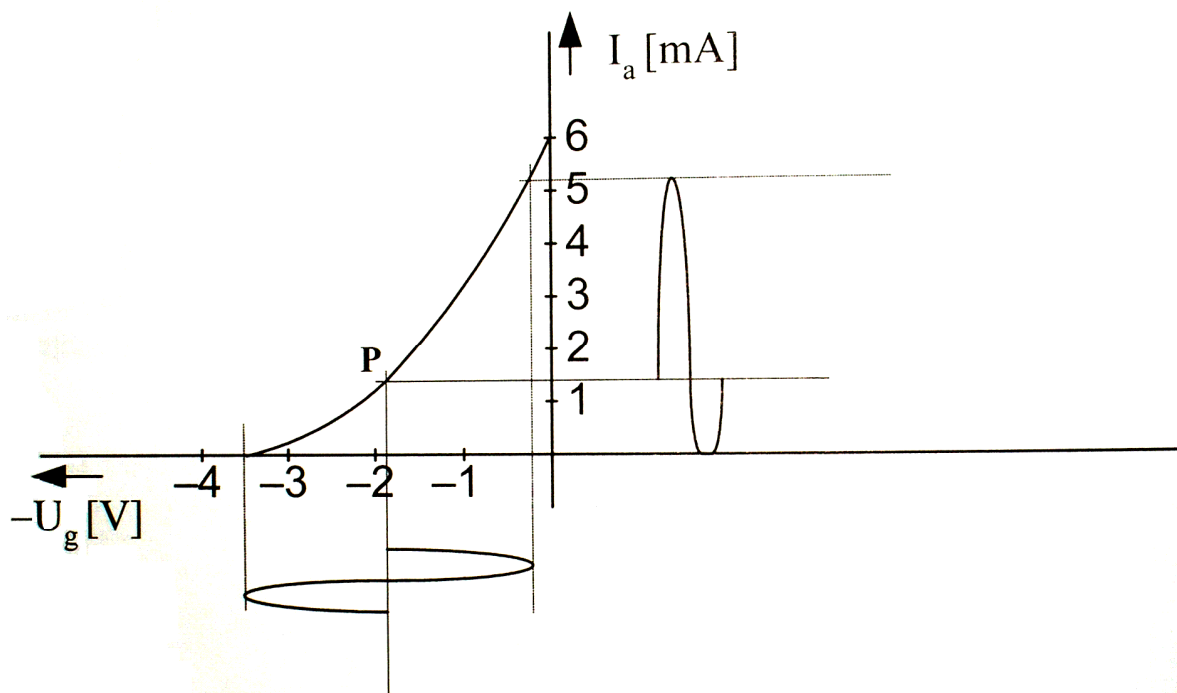


Obr.č. 5 – třída A

Zvolíme-li klidový pracovní bod P (tedy mřížkové předpětí) tak, aby při rozkmitu vstupního napětí  $U_g$  se výstupní  $U_a$  pohybovalo v celém rozsahu v lineární části převodní charakteristiky (Obr.č.3), bude průběh výstupního napětí bez patrného zkreslení. Této vlastnosti se využívá zejména pro nízkofrekvenční zesilovače, u nichž je požadováno malé zkreslení. Je patrné, že kladnou i zápornou půlvlnu vstupního signálu zpracuje jedna elektronka. Nevýhodou tohoto řešení je skutečnost, že v klidovém stavu (bez signálu) koncovým stupněm protéká proud (odpovídající nastavenému klidovému pracovnímu bodu P). Tato skutečnost snižuje účinnost zesilovače, což může být při větších výkonech nepříznivé. Zesilovače (koncové) tříd A mají účinnost nepřevyšující 20% u triod a 40% u tetrod a pentod. Výhodou je však dosažení velmi dobré linearity a nízkého zkreslení. Toho se dnes využívá zejména v oblasti konstrukce kvalitních zesilovačů třídy hi-fi. [4] [7]

Můžeme se setkat s rozlišením třídy A na A1 a A2. Třídou A1 se rozumí zesilovač, u něhož mřížkou neteče proud (mřížkové předpětí je vždy záporné), a třídou A2 zesilovač, u něhož při části periody signálu teče mřížkový proud.

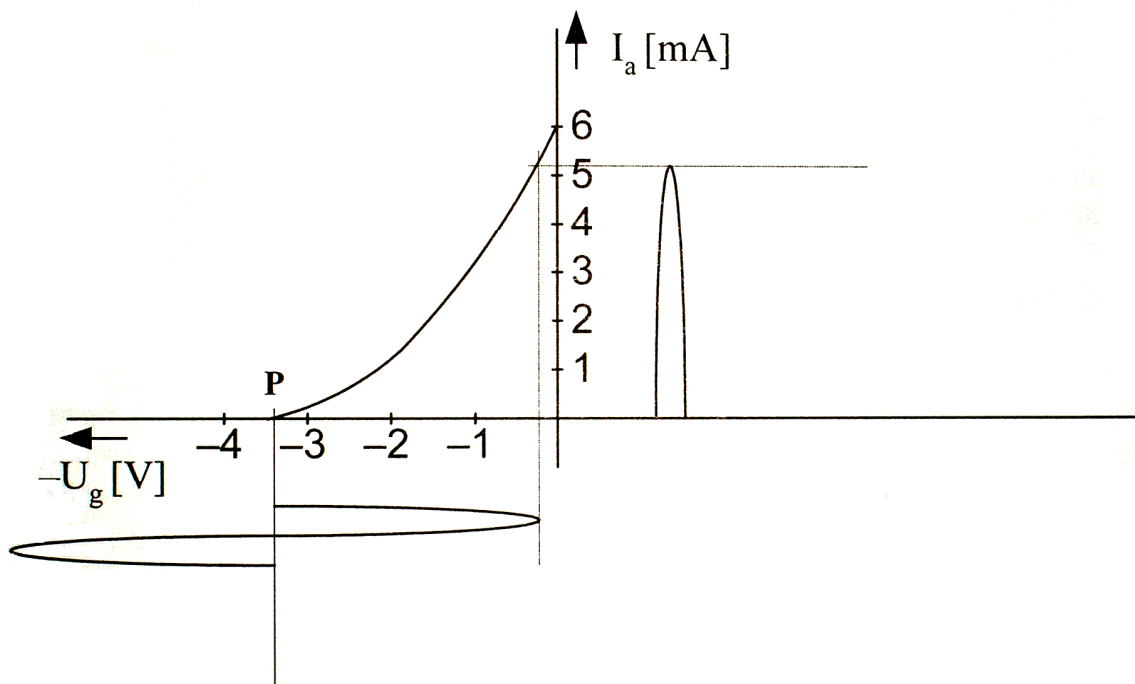
## 2.2 Princip třídy AB



Obr.č. 6 – třída AB

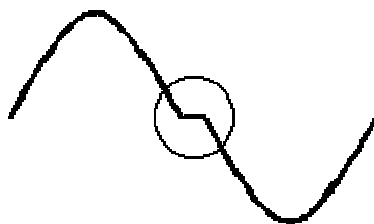
Posuneme-li (záporným předpětím řídicí mřížky) pracovní body elektronek dvojitě-činného stupně těsně nad dolní ohyb charakteristiky, bude bez budicího signálu elektronkami protékat jistý klidový proud, který sice účinnost tohoto zapojení mírně zhorší, ale odstraní přechodové zkreslení (*viz.* 2.3), protože elektronky ani bez signálu nezůstanou zcela uzavřeny, při malých signálech pracují vlastně ve třídě A a teprve při vyšším vybuze- ní přecházejí do třídy B. Pak hovoříme o pracovní třídě AB. [4] [7]

### 2.3 Princip třídy B



Obr.č. 7 – třída B

Při nastavení klidového pracovního bodu P, kdy elektronkami neprotéká bez signálu téměř žádný, nebo jen minimální proud, zesilovač zesílí jen jednu půlvlnu vstupního napětí  $U_g$  (Obr.č.7). Z toho vyplývá nutnost použití dvou prvků do „push-pull“ zapojení. Protože se ale při průchodu sinusovky nulou každá z elektronek střídavě zcela uzavírá, nastává velké a slyšitelné zkreslení, které nazýváme přechodové zkreslení (Obr.č.8). Účinnost dvojitých stupňů třídy B či AB s triodami je proti třídě A poměrně vysoká, teoreticky 50%, prakticky cca 40%. Aby byla zachována možnost velkého rozkmitu výstupního signálu a špiček, jsou nároky na tvrdost zdroje anodového napětí, stálost záporného mřížkového předpětí a malý vnitřní odpor výstupního transformátoru značně vysoké. Protože např. s pentodami dosahuje dvojitě zapojení ve třídě B teoretické účinnosti až 78,5%, používalo se a používá všude tam, kde nevádí zkreslení při malých amplitudách, využívá se spíše plného výkonu a naopak se požaduje malý odběr (a tím i malé tepelné zatížení) bez buzení. [4] [7]



*Obr.č. 8 - Přechodové zkrslení*

### 3 ZKRESLENÍ

Zkreslení udáváme pomocí tzv. činitele harmonického zkreslení THD. Tento by měl být co možná nejmenší a vyjadřuje procentní podíl vyšších harmonických k celému signálu (napětově). Vysvětlíme si zde druhy zkreslení se kterými se můžeme setkat. [8]

#### 3.1 Harmonické zkreslení THD

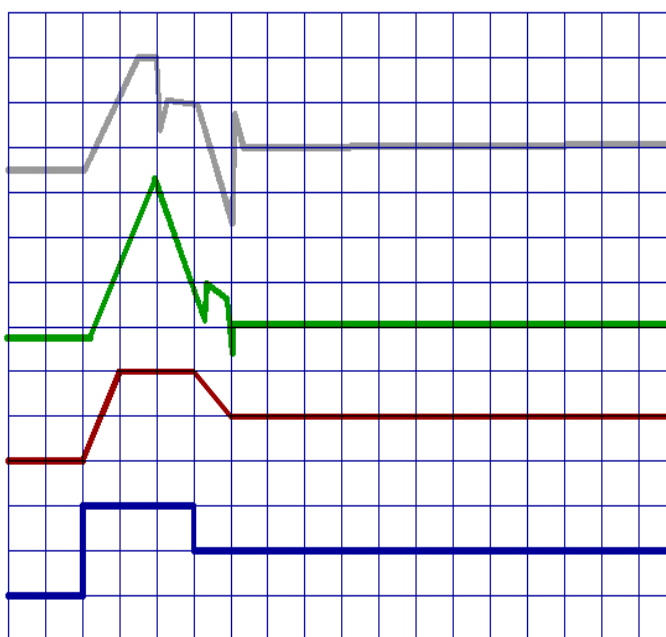
Jeho vznik je způsoben nelinearitou aktivních součástek tj. diody, tranzistorů, elektronek. Nelinearity způsobují vznik vyšších harmonických složek vstupního signálu. Harmonické složky obsahují celistvé násobky frekvence vstupního signálu. Sudé harmonické složky nepůsobí tak rušivě jako liché. Nejnepříjemněji zní zkreslení třetí harmonickou - přechodové zkreslení (*viz. 2.3*), navíc se projevuje při velmi malých hlasitostech, a tak není ani maskováno signálem. Vznik zkreslení je nežádoucí, i když u elektronkových zesilovačů to jednoznačně říci nelze. V jistých případech je zkreslení naopak dokonce vyžadováno - např. kytarové (nástrojové) zesilovače, lze se setkat dokonce možnostmi zkreslení regulovat např. řízením žhavení vstupních elektronek. Rozlišujeme tedy pojmy věrná reprodukce a reprodukce, která se nám subjektivně líbí. Tranzistorové zesilovače běžně dosahují hodnot menších než 0.05 %, zatímco reproduktory se zkreslením pod 2% je velký problém vyrobit. Zesilovače elektronkové mají běžně zkreslení udávané okolo 1%. [8]

#### 3.2 Intermodulační zkreslení TID

Je opět způsobeno nelinearitou převodních charakteristik. Přivedeme-li na vstup zesilovače dva sinusové signály o frekvencích  $f_1$  a  $f_2$  objeví se na výstupu zesilovače kromě těchto sinusových signálů ještě jejich kombinace  $f_1+f_2$ ,  $f_1-f_2$ ,  $2f_1+f_1$ ,  $2f_1+2f_2$ , atd. Bylo definováno několik standardních kombinací dvou signálů používaných pro měření. Jde o signály vzdálené (např. 700 Hz + 10000 Hz) i blízké (např. 13000 Hz + 14000 Hz). Toto zkreslení vytváří nepříjemně umělý zvuk. [8]

### 3.3 Zkreslení TIM

Zkreslení TIM způsobí přítomnost záporné zpětné vazby a je svázáno se zkreslením SID - nízká rychlost přeběhu. Projevuje se neschopností zesilovače sledovat vstupní signál. Nastává hlavně při buzení výškami do směrem k maximálním úrovním výstupního výkonu. Jev snadno zpozorujeme při přenosu řeči na sykavkách s,š,ž., které zesilovač doslova "roz-bije" ("televizní výšky"). Projevuje se nejvíce při silném signálu o vysokém kmitočtu, a má za následek značně poslechově nepříjemné zkreslení.



Obr.č. 9 – zkreslení TIM

Při rychlé změně vyjádřené modrým průběhem- ta je pro jednoduchost naznačena obdélníkovým signálem superponovaným na stejnosměrné složce, by došlo na výstupu zesilovače s pouze omezenou rychlostí přeběhu ke zkreslení vyjádřeném červenou křivkou. Záporná zpětná vazba způsobí vznik překmitu, viz zelený průběh. Překmit vznikne díky snaze zpětné vazby "dotáhnout" výstup na obdélníkový tvar. Protože je ale frekvenčně kompenzovaná, dojde vinou kompenzace k neadekvátnímu přebuzení koncového stupně k výskytu špičky. Ta by na zvuk neměla ještě katastrofální následky, kdyby nedošlo k její limitaci a "protažení" díky špatně navrženému budiči. Protažení - viz horní šedivý průběh znamená katastrofální vliv na zvuk. Doba setrvání v limitaci může dosáhnout hodnot kolem 100us, a "odtrh" zvuk silně degraduje.

V případě elektronek hraje v jejich prospěch fakt, že zřídka jsou použity silné zpětné vazby které by eliminovaly zkreslení. Převodní charakteristiky elektronek totiž nevykazují silné nelinearity kvůli kterým by byl důvod zavedení silných zpětných vazeb. [8]

### 3.4 Zkreslení SID

Pokud na vstup zesilovače přivedeme skokovou změnu napětí, na výstupu dostaneme napětí se zpožděním, úměrným rychlosti přeběhu SR zesilovače (zkreslení SID).

Zpětná vazba snižuje zkreslení ale jen do strmosti signálu SS menší než je SR zesilovače, pak se zkreslení prudce zvyšuje. Větší záporná ZV vyžaduje větší kompenzační kapacity z důvodu zajištění stability, aby nedošlo k nepříznivým fázovým poměrům a k rozkmitání zesilovače. Tím ještě více zmenšíme SR. Je možno sice konstrukčně problém obejít minimální nebo žádnou zpětnou vazbou, zhorší se ale silně zkreslení a šum. Lepší je ale dát si práci s návrhem koncového stupně tak, aby ke zmíněnému zkreslení nedošlo. Zkreslení lze eliminovat použitím vyššího napájecího napětí nebo ještě lépe uděláme, zajistíme-li pro koncový stupeň ve špičce krátkodobě zvýšenou úroveň napětí, pak nedojde k limitaci špičky, opět jsme u větších výkonů.

Omezit zkreslení SID a tím i TIM můžeme zařazením RC filtr pro omezení strmosti vstupního signálu. [8]

### 3.5 Zkreslení v limitaci

Tak jak zesilovaný signál postupně dosahuje svého maximálního potenciálu, elektronka postupně začíná na originální vstupní signál reagovat menší změnou anodového proudu. To se projevuje kompresí signálu - dochází k limitaci. Na vzrůstající úroveň signálu již nemůže elektronka reagovat jeho zesílením a tak je na výstupu „ořezán“. Tranzistory reagují přesně dle vstupního signálu až do chvíle, kdy tento nedosáhne své maximální hodnoty. V tu chvíli tranzistor přestává reagovat a vzniká ostrá limitace. Tyto dva rozdílné způsoby zkreslení limitací jsou zároveň zdrojem odlišných harmonických kmitočtů. Zatímco tranzistor produkuje liché harmonické násobky, elektronkové zkreslení je zdrojem násobků sudých. Toto elektronkové zkreslení všeobecně zní „tepleji“ a přirozeněji než tranzistorové. [5]

## 4 PROBLEMATIKA ELEKTRONKOVÝCH ZESILOVAČŮ

Ačkoliv tato práce ve svém rozsahu si neklade za cíl ozřejmit komplexní problematiku nízkofrekvenčních elektronkový zesilovačů v celém svém rozsahu, pokusím se zde shrnout a poukázat na některá jeho úskalí. Pokud pomineme zásadní otázky financí, jisté dávky nadšení a také zkušeností, je třeba si uvědomit pár zásad při stavbě elektronkového zesilovače. Elektronky jako takové jsou tu s námi téměř století, zůstaly jim však všechny své ctnosti i neduhy.

### 4.1 Síťový transformátor

Zdroj výkonového zesilovače je srdcem zesilovače, čím lepší a kvalitnější zdroj použijete (všimněte si, že nepíšu větší nebo výkonnější), tím lepší zvuk ze zesilovače dostanete a ušetříte si starostí při oživování zesilovače (brumy, šumy, aj.).

Pozor, nikdy nezapomínat na to, že elektronky ke svému provozu potřebují vysoká napětí na svých anodách a to v řádech stovek voltů. Takováto napětí dokáží při nepozornosti i zabít. Z důvodu vysokých napětí je kladen důraz na kvalitu transformátoru – hlavně tedy jeho izolace. V dnešní době si transformátory již sám navijí málokdo, je lepší svěřit to profesionálním navijárnám. Je vhodné při EI transformátorech požadovat impregnaci která zamezí možným problémům jako je drnčení zesilovače, což je slyšet zejména při tichém poslechu. Platí to i pro toroidní transformátory – ty mívají totiž často dlouhé závity, které můžou „vrnět“.

### 4.2 Výstupní transformátor

U elektronkových NF zesilovačů je důležitou součástí výstupní transformátor, kterým se přizpůsobuje výstupní impedance anodového obvodu k nízké impedanci reproduktoru. Kromě správného převodního poměru jsou na výstupní transformátor kladeny především požadavky na frekvenční přenosovou charakteristiku. Amatérská výroba tudíž není snadnou záležitostí.

Z hlediska přenosu relativně širokého spektra akustických kmitočtů představuje výstupní transformátor komplexní obvod zahrnující jak základní, tak parazitní vlastnosti primárního a sekundárního vinutí. Hlavními určujícími parametry jsou indukčnost primárního vinutí (má vliv na dolní mezní kmitočet) a kapacita vinutí (ovlivňuje horní mezní kmitočet



a horní rezonanční kmitočty transformátoru, které musí ležet mimo slyšitelné pásmo). Z těchto důvodů se vinutí primáru i sekundáru výstupního transformátoru obvykle rozloží do více vrstev, které se vzájemně propojí. Je také nutné dodržovat při navíjení vzduchovou mezeru mezi vinutími kvůli sycení. [4]

### 4.3 Žhavení elektronek

Již z principu funkce elektronek víme, že je nutné je pro svou funkci žhavit. Každá elektronka má své jmenovité napájecí napětí nebo proud, který je pro dosažení stálých parametrů nutné dodržet v toleranci  $\pm 5\%$ .

Při podžhavení elektronek dochází k „otravě katody“. Otrávení katody je pochod, probíhající vně i uvnitř vrstvy a způsobuje zvětšení výstupní práce a tím pokles emise. Což je případ, kdy jsou emise namáhána jen místa, která mají nejmenší výstupní práci, nebo ta, kde je elektrické pole nejsilnější (vrchy, vzniklé nerovností pasty), což má za následek jejich brzké zničení. Krátkým podžhavením se katoda jenom unaví a mírným přežhavením lze ji opět rekreovat. Při plném zatížení katody (maximální  $U_a$ ,  $I_a$ ) platí, že trvalé podžhavení škodí emisní vrstvě víc než trvalé přežhavení. Často také otravu způsobuje plyn, který v elektronce zbyl po nedostatečném vyčerpání, nebo se uvolnil při přetížení elektrod.

Při přežhavení naopak dochází k nadměrnému přetěžování emisní schopnosti katody, což se ve výsledku projeví zkrácenou životností elektronky. Životnost elektronky (zejména tedy její emisní schopnosti) je při optimálních podmínkách udávána v rozmezí 2000 – 5000 hodin, často ale při správném zacházení vydrží i déle.

Dnes běžně dostupné elektronky je možné žhavit jak střídavým, tak stejnosměrným napětím. Vhodnější v audio aplikacích je použití stejnosměrného, a nejlépe stabilizovaného žhavení. Takto zajistíme optimální pracovní podmínky elektronky, navíc předejdeme možným problémům jako je indukce střídavé složky ze žhavení do signálu zpracovávaného elektronkou.

V neposlední řadě je také doslova nutné elektronky před provozem nechat nažhavit dostatečnou dobu (dle typu). Kvůli dnes běžnějšímu využití polovodičových diod v usměrňovačích se totiž vysoké napětí objeví na anodách elektronek ihned po zapnutí. To zapříčiňuje „násilné“ vytrhávání elektronů z nenažhavené katody vlivem silného el. pole, přičemž dochází k poškození struktury katody.

#### 4.4 Brum v obvodech elektronek

Vysoká vstupní impedance elektronkových zesilovačů je častou příčinou pronikání síťového kmitočtu (50Hz) do užitečného signálu, které se projevuje rušivým brumem. Zdrojů tohoto brumu a jeho omezení je několik.

Jednou z hlavních zásad při stavbě elektronkových zesilovačů je použití krátkých, nebo stíněných vodičů, v případě žhavicích vodičů je nutné tyto zkroutit.

Zajistit dostatečnou filtraci anodového napětí RLC členy.

Pokud je to možné, použít stejnosměrného žhavení

Může se stát že elektromagnetické pole síťového transformátoru „zanáší“ střídavou složku do výstupního transformátoru. Zásadou je, aby byly transformátory dostatečně vzdáleny od sebe, v případě provedení EI plechů, je vhodné je vzájemně otočit o  $180^\circ$ . V případě použití toroidních transformátorů jejich otáčením zjistit polohu, ve které je slyšitelný brum minimální nebo žádný.

#### 4.5 Prodloužení životnosti elektronek

Elektronka je elektronická součástka, jejíž vlastnosti se během provozu mění (tzv. drift) a její životnost je (bohužel) omezena. Rovněž způsob mechanického zacházení (upevnění, otřesy apod.) ovlivňuje vlastnosti elektronky (tzv. mikrofoničnost). Důvodem je především změna teplotních parametrů systému (teplotní drift) a zejména pak postupně klesající schopnost emise katody. Životnost elektronek lze prodloužit dodržením těchto zásad:

- Zabezpečit elektronkám v provozu dostatečný přívod vzduchu a zamezit tak jejich zbytečnému přehřívání, elektronky mívají na skle běžně teplotu až  $150^\circ\text{C}$
- Při transportu zesilovače se, pokud možno, vyvarovat dlouhotrvajícím vibracím
- Nenamáhat elektronky zbytečným zapínáním a vypínáním, pokud možno, používat vypínač „Standby“
- Před použitím (hraním) nechat elektronky dostatečně dlouhou dobu nažhavit a stabilizovat.

- 
- Povrch elektronek udržovat v čistotě. Mastné skvrny od prstů na skle elektronky způsobuje její zbytečné přehřívání a zkracují životnost.
  - Nepoužívat vadnou kabeláž, která by mohla způsobit zkrat.
  - Pozor na správné zapojení reproduktorů na odpovídající impedanci
  - Nehrát na zesilovač pokud není připojen reproduktor.
  - Dodržovat žhavicí napětí nebo proud a nepřekračovat jej o  $\pm 5\%$  jmenovité hodnoty

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 DNEŠNÍ TRENDY A ODŮVODNĚNÍ VOLBY ZAPOJENÍ PRO MODIFIKACI

Jak již bylo řečeno v úvodu, zapojení NF zesilovačů, využívajících jako aktivního prvku elektronky, dnes zažívá renesanci. V mnoha případech jde pouze o ověřené konstrukce staré několik desítek let v novém hávu. Jiné produkty nabízejí nový přístup k elektronce jako elektronickému prvku, přidávající to, co jsme se za tu dobu naučili. Tato práce by se měla řadit k té druhé skupině.

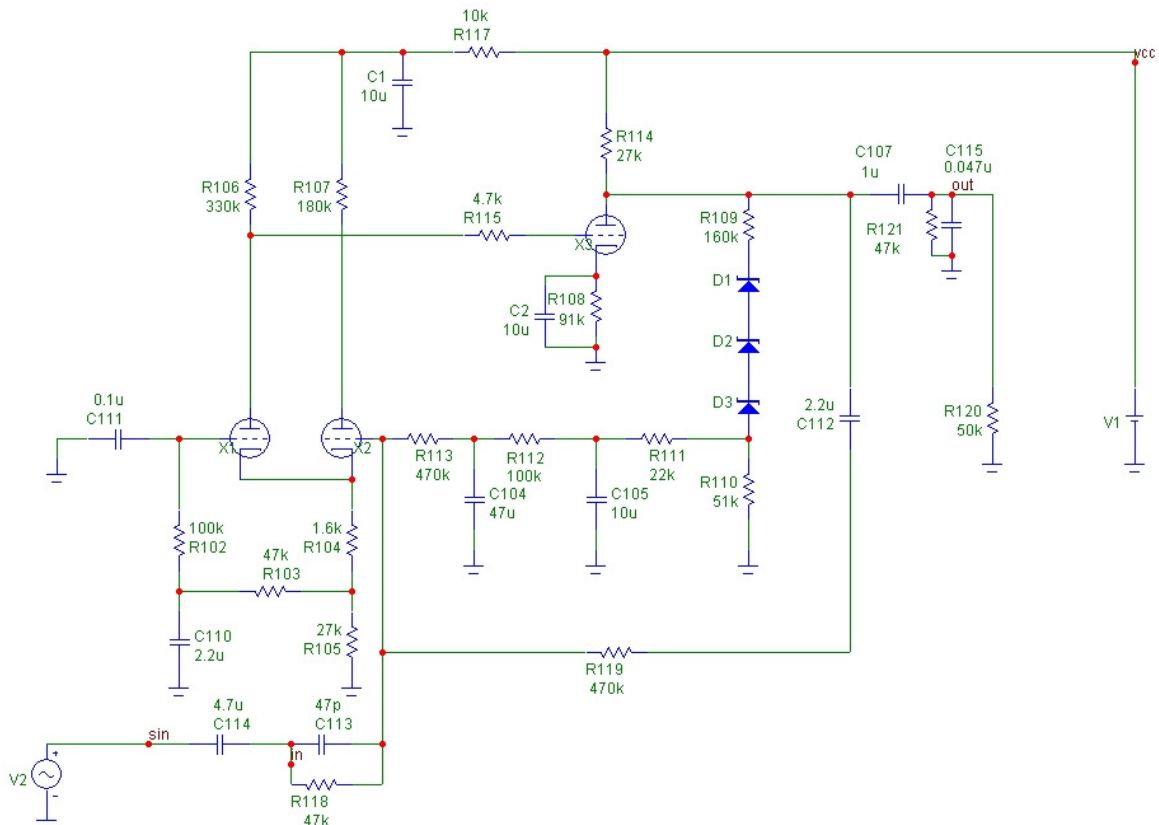
Zvolené zapojení NF elektronkového předzesilovače bylo vybráno s ohledem na bezproblémovou dostupnost součástek, ale také kvůli jeho značné univerzálnosti. Filozofie návrhu byla vylepšit původní (zastaralý) návrh elektronkového zesilovače o začlenění „fint“, které normálně známe z polovodičových zařízení. Základním prvkem je použití diferenciálních vstupů, kdy invertující vstup je vyhrazen pro zpětnou vazbu. Dále je to použití přímých vazeb mezi jednotlivými stupni (technika svého času obvyklá v osciloskopech, ale zřídka kdy použita v audiotechnice). Výsledný obvod je tedy v lecčem podobný operačnímu zesilovači.

Klíčovými vlastnostmi tohoto zapojení jsou:

- Použití dnes dostupných součástek. Z toho důvodu jsou použity dnes běžně vyráběné a zakoupitelné elektronky typu ECC83 a ECC81
- Použití přímých vazeb
- Univerzálnost obvodu je klíčovou vlastností tohoto zapojení. Tato práce ukazuje využití jako korekčního předzesilovače (ekvalizéru), není však problém změnou obvodu ve zpětné vazbě docílit použití jako předzesilovače pro gramofónovou magnetickou (RIAA) a keramickou vložku, mikrofónu, pružinového reverbu atd. Použití dnes dostupných součástek. Z toho důvodu jsou použity dnes běžně vyráběné a zakoupitelné elektronky typu ECC83 a ECC81

## 6 OBVOD PŘEDZESILOVAČE

Každý z možných modulů předzesilovače (gramo / mikrofon, korekce, ...) využívá diferenciálních vstupů, které nám dávají možnost invertujícího i neinvertujícího vstupu se všemi svými výhodami i nevýhodami. V textu dále je rozebrána funkce korekčního předzesilovače, i když základní obvod předzesilovače je stejný i pro ostatní moduly.



Obr.č. 10 – schéma zapojení – zvolen „bypass“ (bez korekci)

### 6.1 Stupeň diferenciálních vstupů

Neinvertující vstup je pro střídavou složku uzemněn skrze kondenzátor C1, a signál i zpětná vazba je přivedena na invertující vstup. To umožňuje zjednodušení zpětnovazební části. Je zřejmé, že takto zapojený zesilovač obrací na výstupu fázi. Vzhledem ale k faktu, že koncový zesilovač na který bude tento předzesilovač připojen obrací fázi také, bude výstupní signál ve fázi se vstupním.

Vstupní signál je od cinch konektoru skrze blokovací kondenzátor C17 přiveden na řídicí mřížku elektronky V1 (ECC83). Obě triody elektronky V1 jsou použity jako diferenciální zesilovač. Katody jsou společnou elektrodou, a jsou uzemněny relativně vysokým katodovým odporem skládající se z odporů R104 a R105. To slouží jako základní zdroj proudu. Jestliže proud v jedné z triod stoupne, porovnatelný proud ubude na triodě druhé. Z toho vyplývá, že pokud napětí na signálovém vstupu vzroste (stane se kladnějším), anodový proud se zvýší a anodové napětí dané triody klesne, zatímco napětí na druhé triodě vzroste o stejný rozdíl. Pokud ale vzroste napětí na zpětnovazebním vstupu, způsobí zvýšení proudu na dané triodě, anodové napětí první triody vzroste a zároveň na druhé anodě klesne.

Odporem R103 a kondenzátorem C102 (tvořící dolní propust') je filtrován úbytek napětí na R104, a poskytuje mřížkové předpětí první triody elektronky V1. Zkušený elektronik jistě odhalí, že jednoduchý katodový odpor není ideálním zdrojem proudu. Značným vylepšením by bylo použití aktivního prvku jako zdroje proudu v diferenciálním obvodu katod zesilovače. Co místo toho uděláme je, že „ošídíme“ systém a pečlivě nastavíme pracovní body obou triod tak, aby byly rozdílné, což nám pomůže snížit offset. Je třeba si uvědomit, že ačkoliv anodami obou triod prochází zhruba stejný proud (asi 500uA), anodové napětí druhé triody je značně vyšší (o zhruba 90V) než anodové napětí první triody. To je způsobeno použitím nižší hodnoty anodového odporu R107 v porovnání s R106. Tento „trik“ zajistí, že parametry obou systémů elektronky zůstanou v rozumných hodnotách i s jejich stárnutím.

## 6.2 Stupeň výstupu zesilovače

Výstup diferenciálního zesilovače je přímo-vazebně spojen s mřížkou dalšího stupně elektronky V2, dvojité triody ECC81. Tato elektronka je vybrána namísto běžnější (i levnější) elektronky ECC82 z toho důvodu, že dokáže na výstupu poskytnout stejný proud, při trojnásobném zesílení.

Odpor R115 je v sérii s řídicí mřížkou elektronky V2 a představuje spolu s kapacitou mřížka – anoda filtr, omezující odezvu na vysoké frekvence. To nám dovoluje provozovat předzesilovač s poměrně silnou zpětnou vazbou (malé zesílení), bez obav o oscilace způ-

sobené fázovými posuvy. V tomto případě by se dalo použít termínu jako „vnitřní kompenzace“.

Složitost s přímo-vazebním vázání elektronkových stupňů je, že mřížka druhé elektronky leží podstatně vysoko nad potenciálem země (asi 200V v našem případě). Proto potřebujeme relativně vysoké anodové napětí, abychom zajistili že anodový obvod druhého stupně má dostatečnou „rezervu“. Proč tedy přímo-vazební vázání stupňů? Elektronkové obvody byly konec konců přes půl století vázány RC členy. Odpověď má co k dočinění s dynamickou stabilitou zesilovače tak, jak elektronky stárnou. Na rozdíl od konvenčních více-stupňových zesilovačů, je tento obvod do jisté míry samo-udržovací, a to díky jeho DC biasu v uzavřené zpětnovazební smyčce. Dalším důvodem pro použití přímých vazeb je relativně velký napěťový výkyv v obvodu na tomto místě. Kondenzátory totiž (a to i ty kvalitní) mohou vykazovat nelinearitu v kapacitě vs. napětí, fakt který je často opomíjen v návrhu zesilovače. Přímé vazby eliminují nutnost použití kondenzátoru a také nás zbavují jednoho pólu v přenosové funkci, která by mohla zkomplikovat použití záporné zpětné vazby k ovládní zesílení a frekvenční odezvy.

Abychom předpětí mřížky V2 nastavili na správnou hodnotu (okolo -1V oproti katodě), použijeme vysoké hodnoty odporu R108. Abychom však neztratili velkou část střídavé složky, je tento přemostěn kondenzátorem C106

### 6.3 Část DC obvodu zpětné vazby zesilovače

Zbytek obvodu kompletuje naši DC zpětně-vazebnou smyčku. Přítomnost tří doutnavek je vlastně ekvivalentem použitím zenerových diod. Úbytek napětí na doutnavce (typicky 65V) je téměř nezávislý na procházejícím proudu. To nám dovoluje použít menšího dělicího poměru (zhruba 4:1) v naší DC smyčce (pokud by zde doutnavky nebyly, musel by být dělicí poměr asi 12:1, což by znamenalo 13V změnu na výstupu způsobenou 1V změnou na vstupu). Výsledkem je asi 3-násobně vyšší stabilita stejnosměrného pracovního bodu.

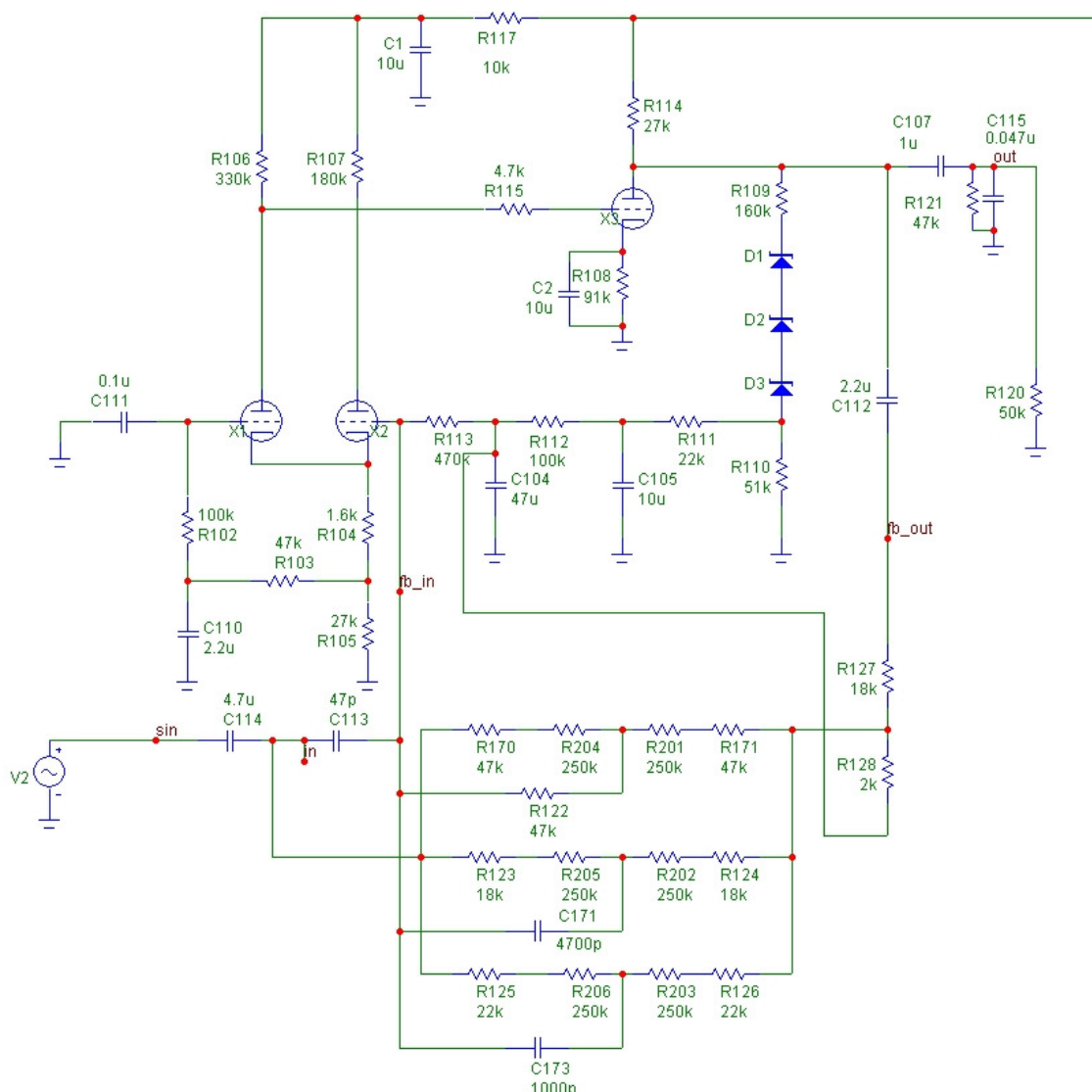
Napěťově posunutý výstup prochází skrz dvou-stupňovou dolní propustí skládající se z R111, C105, R112 a C104. Toto „ořeže“ střídavý signál od naší DC zpětnovazební smyčky tak, abychom zajistili že zesilovač bude stále mít celý zisk střídavé složky



v otevřené smyčce. Výsledné DC napětí je přivedeno na invertující vstup našeho diferenciálního zesilovače skrze R113. Uzel mezi R113 a C104 také tvoří vyhovující „AC zem“ pro náš signál ve zpětnovazebním obvodu.

Odpor R114 představuje anodovou zátěž elektronky V2, kondenzátor C107 pak odděluje na výstupu stejnosměrnou složku od střídavé.

### 6.4 Korekční obvody ve zpětnovazební smyčce zesilovače



Obr.č. 11 – schéma zapojení – zvoleny korekce

Pokud je zesilovač přepnut na „bypass“ (viz. 6, Obr.č.10), nevyužíváme korekci, ve zpětné vazbě se nachází pouze R119. Napětový zisk je 10 (20dB) skrz přenášené spektrum.

Ve funkci přepnuté na korekce je zisk zhruba stejný s potenciometry (500k lin.) vytočenými uprostřed své dráhy. Jejich otáčením získáme až 12dB zvýraznění nebo útlumu požadovaného pásma skrze obvody T-filtrů.

Zpětnovazební část obvodu je na tištěném spoji mimo hlavní desku, a ovládání funkce (bypass – korekce) je zajištěno dvojitým relé, které v případě potřeby přepneme ovladačem na přední straně panelu do požadované pozice.

## 6.5 Úprava přenášeného pásma zesilovače

Ve schématu se dále nachází kondenzátor C113. Účelem tohoto kondenzátoru je vyrušit paralelní kapacitu přívodní kabeláže. Přibližnou hodnotu nejlépe určíme experimentálně, a to nejlépe připojením sinusového generátoru na vstup, a měřením výstupního signálu na kondenzátoru C107 osciloskopem, nebo AC voltmetrem. Nastavíme osciloskop na plný rozsah při 1kHz, potom zvyšujeme frekvenci až do chvíle, kdy výstup nedosáhne 71% plného rozsahu. Pokud budeme uvažovat frekvenci v kilohertzích [kHz], požadovaná kapacita kondenzátoru v pikofaradech [pF], můžeme jeho hodnotu spočítat pomocí tohoto vzorce:

$$C_{113} = 159000 \frac{159000}{(F_o \cdot 47)} \text{ [pF]} \quad (8)$$

V prototypu, frekvence  $F_o$  byla asi 7,5kHz, a přidáním 470pF kondenzátoru posunula tuto frekvenci za 30kHz.

Díky tomu, že zesilovač je konstruován do značné míry jako OZ, tímto jednoduchým trikem můžeme předejít problému, který se jinak v mnohých elektronkových návrzích zesilovačů složitě odstraňuje.

Pokud se bavíme o frekvenčním přenosu zesilovače, je spodní hranice přenášeného spektra leží při poklesu o 3db stále hluboko pod slyšitelnou hranicí. To by mohlo zapříčinit

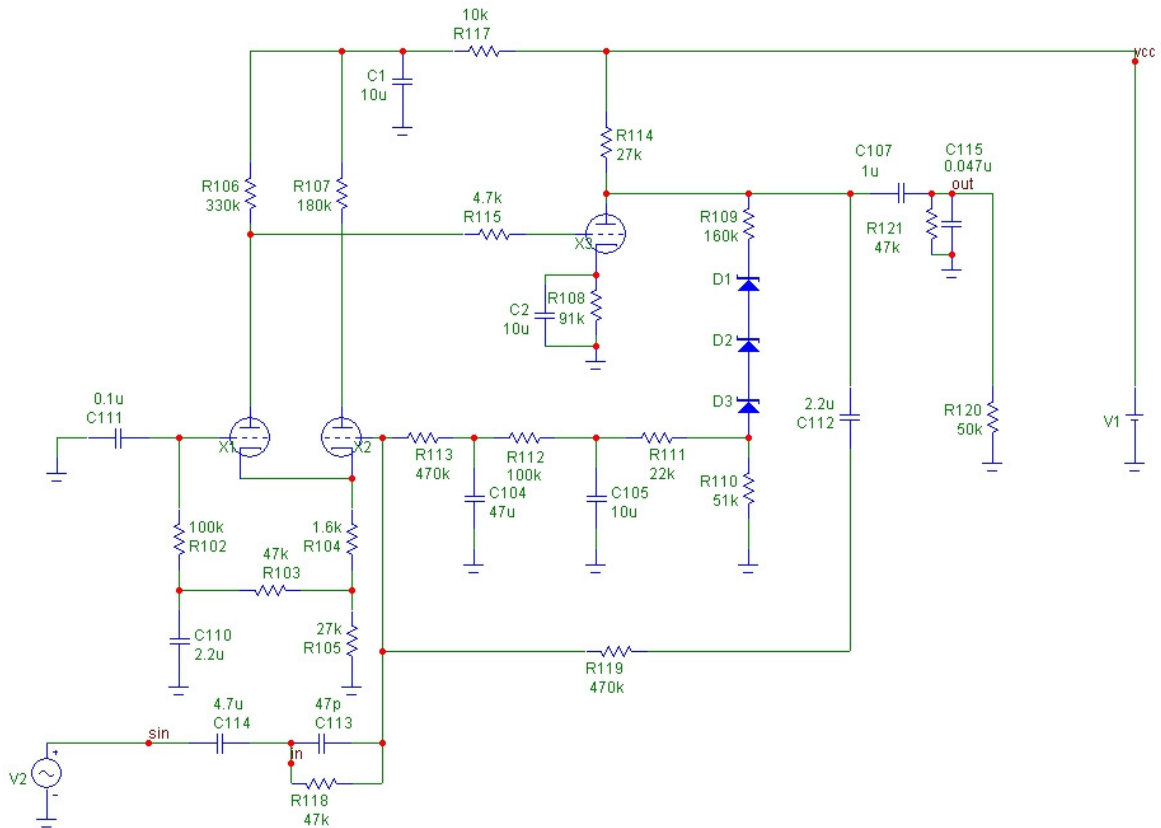
problémy výkonovému stupni tím, že by tento způsoboval „dýchání“ reproduktoru, výsledkem by byla zbytečná ztráta výkonu potřebná pro slyšitelné pásmo. Jednoduchým přidáním 0.1uF kondenzátoru za cinch vstup zesilovače posune spodní přenášenou hranici na zhruba 30Hz.

Horní mezní frekvenci naopak ovlivníme kapacitou kondenzátoru C115. V simulaci (7.4) si ukážeme jaký má vliv na přenosové pásmo.

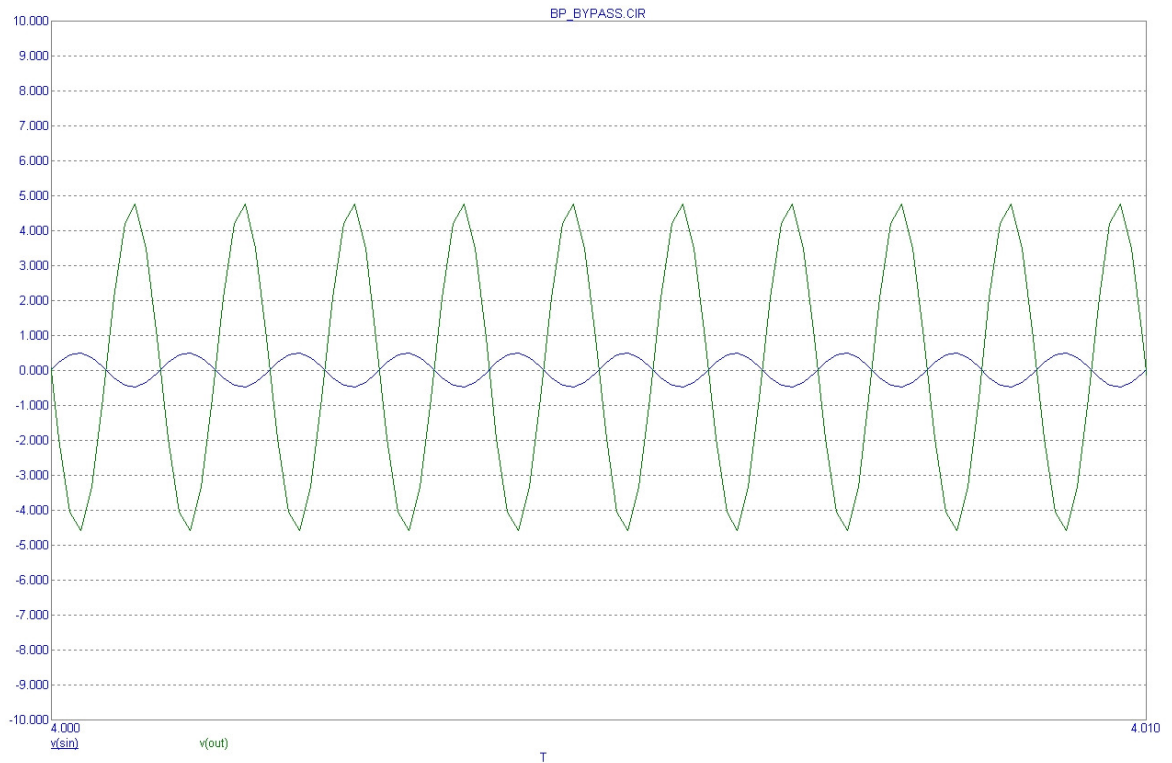
## 7 SIMULACE PŘEDZESILOVAČE V PROSTŘEDÍ MICRO-CAP 7

Všechny simulace byly provedeny v simulačním programu Micro-Cap 7

### 7.1 Simulace amplitudové charakteristiky předzesilovače



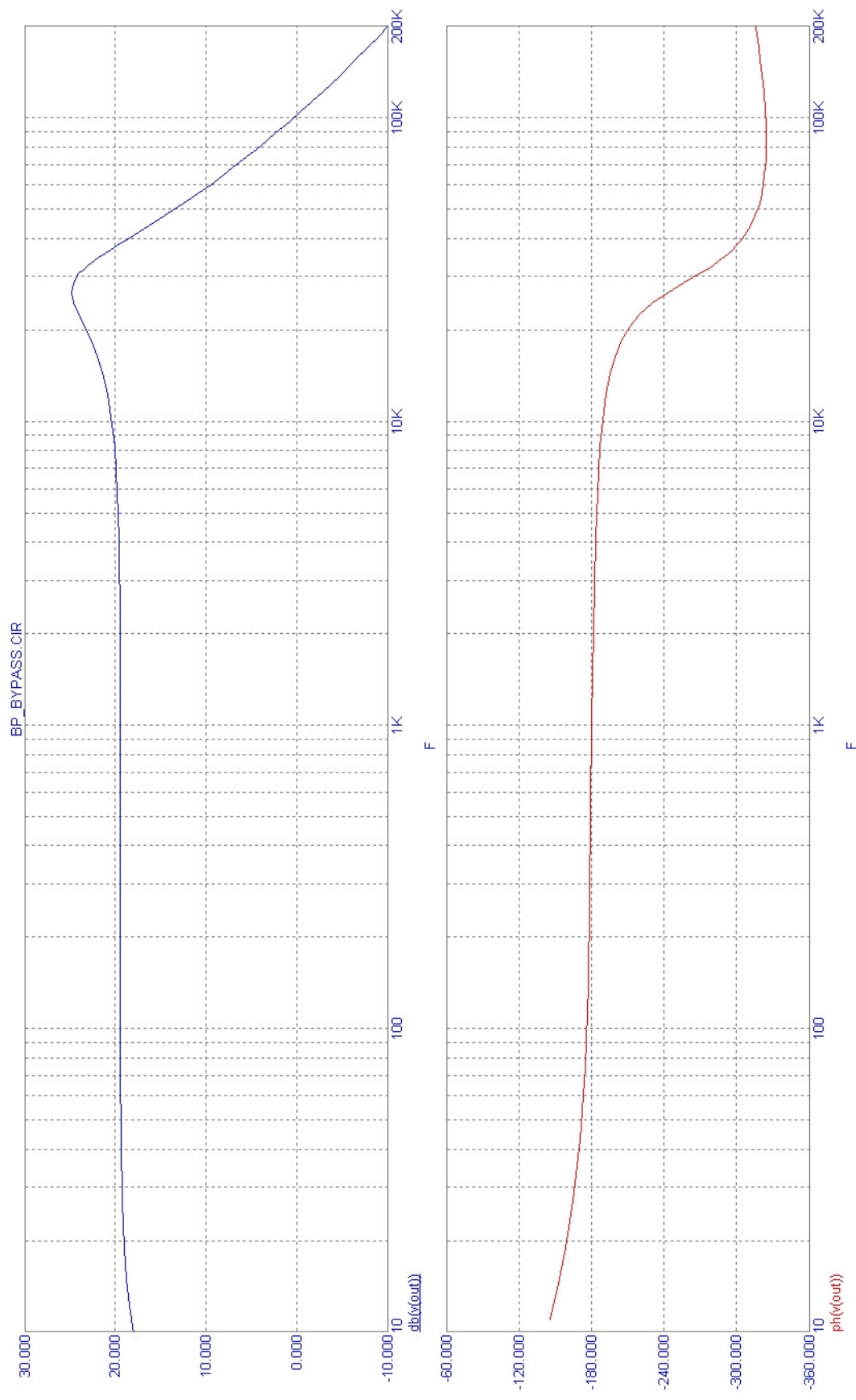
Obr.č. 12 – schéma zapojení – zvolen „bypass“ (bez korekci)



Obr.č. 13 - Simulace amplitudové charakteristiky

Z charakteristiky je patrné napěťové zesílení signálu 10x (20db). Vstupní signál představuje modrá sinusoida s amplitudou 0.5V a frekvencí 1kHz, výstupem je pak zelená sinusoida s amplitudou téměř 5V. Jak lze pozorovat, vzhledem k tomu, že signál přivádíme na invertující vstup, je jeho výstupem signál s obrácenou fází oproti vstupu. Graf je posunut do času  $t=4s$  kvůli ustálení přechodového jevu, který Micro-Cap simuloval také, ovšem výsledný graf ve svém měřítku by byl nic-neříkající.

## 7.2 Simulace frekvenční a fázové charakteristiky předzesilovače

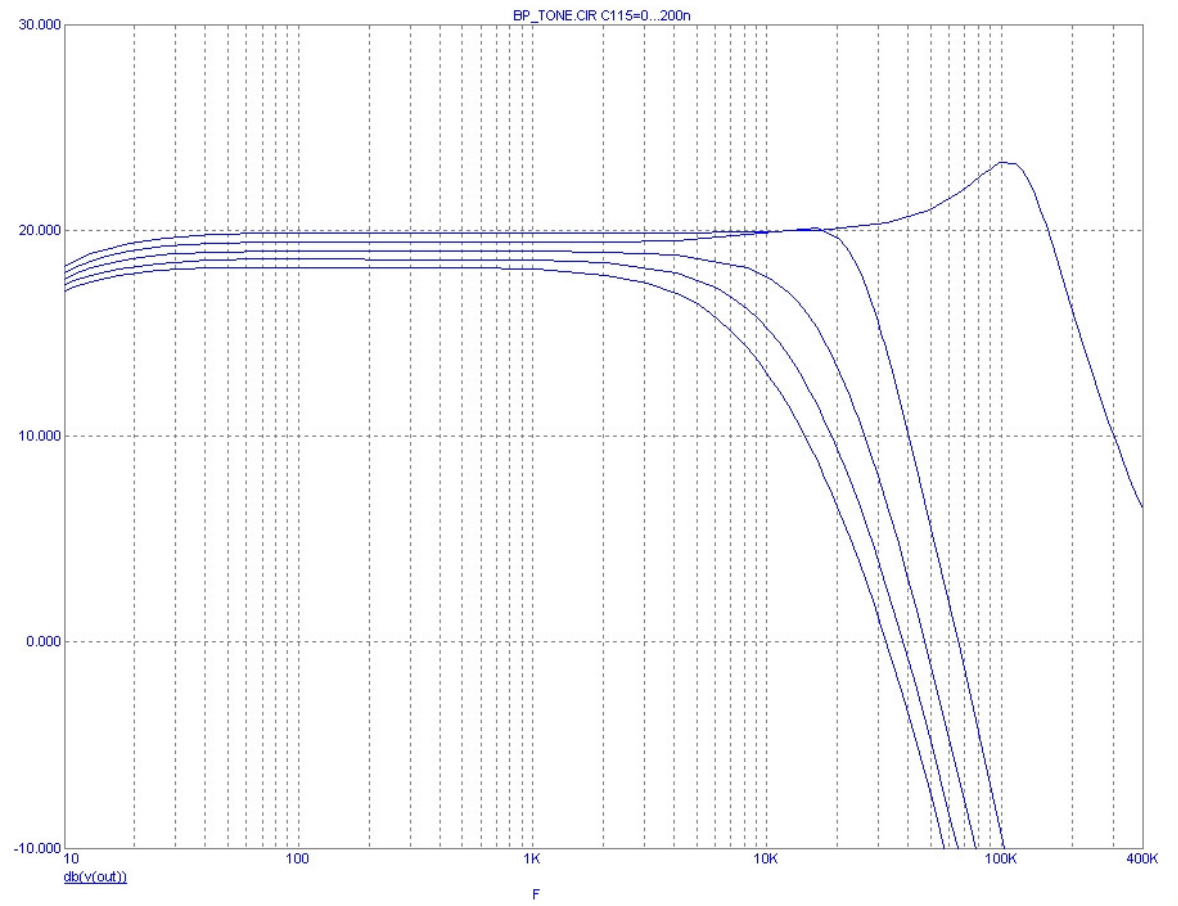


Obr.č. 14 – Simulace frekvenční a fázové charakteristiky



## 7.4 Vliv změny kapacity na přenášené pásmo zesilovače

V simulaci je zde ukázáno jaký vliv má změna kapacity kondenzátoru C115 na horní mezní přenášený kmitočet. C115 byl krokovan od 0uF do 0,2uF.



Obr.č. 16 – vliv změny kapacity C115 na přenosové pásmo zesilovače

Z grafu vyplývá, že nejvhodnější kapacitou se jeví 0,05uF, z dostupné řady lze tedy vybrat 0,047uF.



## 8 REALIZACE ELEKTRONKOVÉHO NF PŘEDZESILOVAČE

Plošné spoje jsou nakresleny pomocí programu Eagle 4.16, celkově jsou to 4 desky – část zdroje pro vysoké napětí, stabilizátor pro žhvení, hlavní deska zesilovače a deska s korekcemi.

Konstrukce je posazena do chassis z 2mm duralového plechu vlastního návrhu, který je ankreslen v programu AutoCAD 2004 .

### 8.1 Postup při výrobě desek plošných spojů

1. Deska plošného spoje se ořízne na potřebný rozměr zvětšený na každé straně minimálně s 3mm rezervou(z důvodu podleptání leptací emulzí).
2. Destička se dokonale očistí a odmastí.
3. Destička se vysuší a nanese se štětcem přímými tahy rovnoměrná vrstvička fotocitlivé emulze.
4. Pozor! Pracuje se při sníženém osvětlení!
5. Destička musí být vysušena při teplotě asi 60°C.
6. Přiloží se správně orientované klišé (vytištěný obrazec plošných spojů na průsvitné folii) a zajistí se společně s deskou v osvětlovacím rámu.
7. Je exponovaná UV zářením po dobu cca 8 minut.
8. Vyvolá se v 0,5% roztoku Na OH.
9. Opláchne se pod vlažnou vodou.
10. Leptá se v leptací bázi.
11. Důkladně se omyje a musí být opatřena antioxidačním lakem.
12. Vyleptaná DPS je ostřížena a opilována na čistý rozměr s vyvrtanými otvory.
13. Jsou osazeny všechny součástky od nejmenších rozměrů po největší

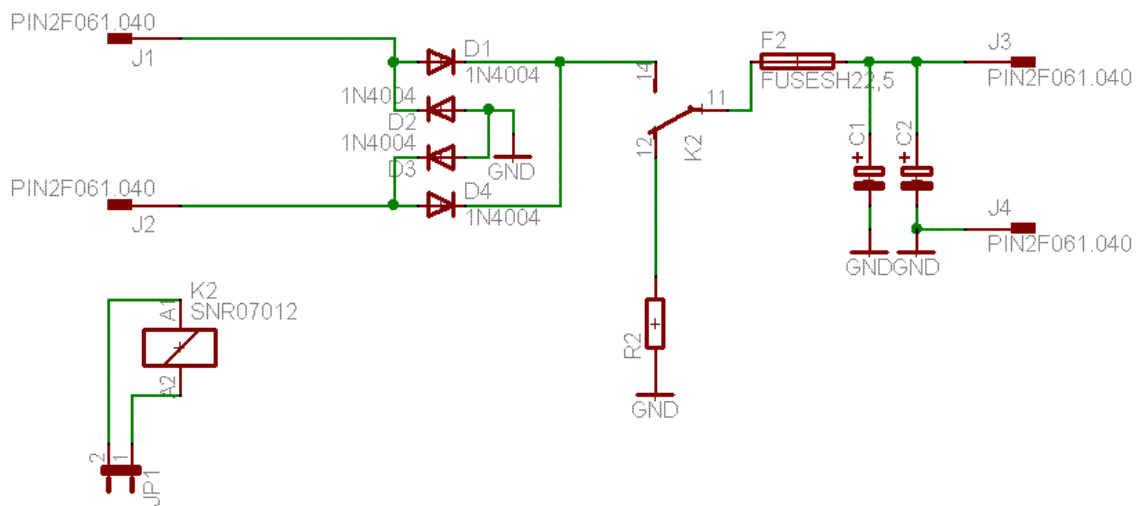
## 8.2 Napájecí zdroj

Jde o nestabilizovaný zdroj nesymetrického napětí s dostačující filtrační kapacitou 100uF. Deska obsahuje držák pojistky a relé, kterým spínám vysoké napětí za pomoci časovače.

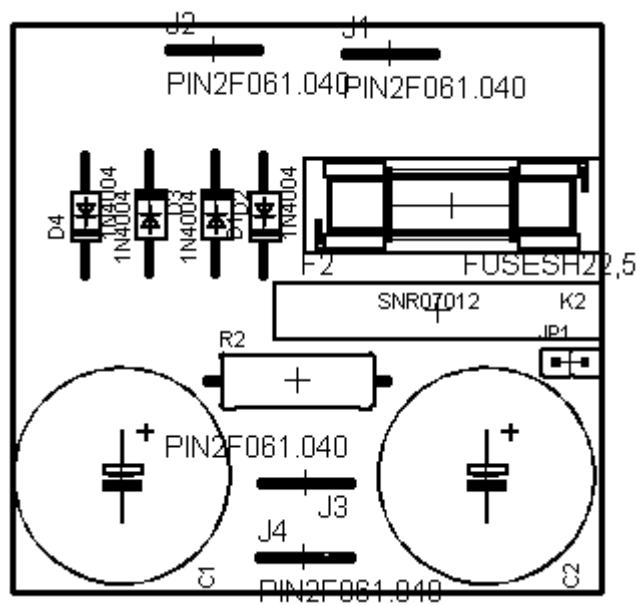
Tab.č. 1 - Parametry napájecího zdroje

Rozsah napájecího napětí $U_{max}$	+430V
Proud $I_{o\ max}$ :	Omezen TR.1
Rozměry	50 x 48 mm

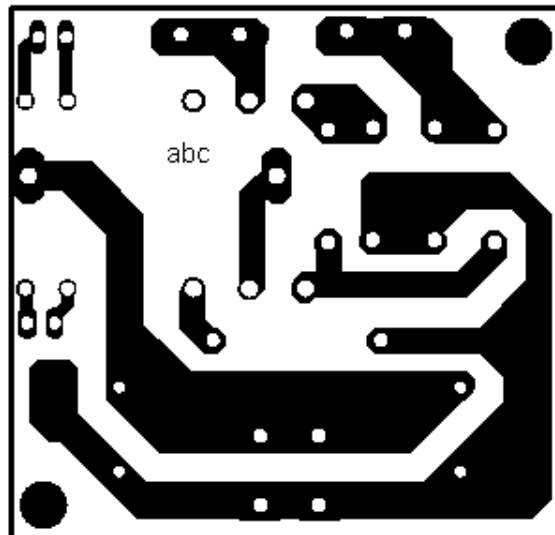
### 8.2.1 Schéma zapojení a desky plošných spojů



Obr.č. 17 - Schéma zapojení zdroje



Obr.č. 18 - Pohled na osazený plošný spoj zdroje



Obr.č. 19 - Plošný spoj zdroje-strana spojů

### 8.2.2 Rozpiska součástek napájecího zdroje

Tab.č. 2 - Rozpiska součástek pro napájecí zdroj

D1-D4	1N4007
C1,C2	47uF/450V
R2	10k / 4W
FUSESH	držák pojistek
K2	relé Finder 3451-12
JP1	2-pin konektor

Tab.č. 3 - Popis vývodů modulu

J1, J2	přívod ~U
J3	zem GND
J4	Uo +

### 8.2.3 Popis zapojení

Jedná se o jednoduché zapojení nestabilizovaného zdroje s Graetzovým můstkem tvořeným 4-mi diodami, držák pojistek se nachází na plošném spoji. Usměrněné napětí je dále spínáno pomocí relé z obvodu časovače. Filtrační kapacita je tvořena dvěma kondenzátory o celkové kapacitě 100uF. Rezistor R2 slouží jako vybíjecí pro kondenzátory C1 a C2, jelikož na nich zůstává i po vypnutí vysoké napětí.

### 8.2.4 Kontrola funkce

Při aplikaci nesmí dojít k překročení jmenovitých napětí použitých elektrolytických kondenzátorů (při zapojení bez zátěže) a k dlouhodobému překračování maximálního zatěžovacího proudu. Napětí naprázdno by se mělo pohybovat okolo 460V. Toto malé překročení jmenovité hodnoty kondenzátoru by nemělo způsobit žádný problém.

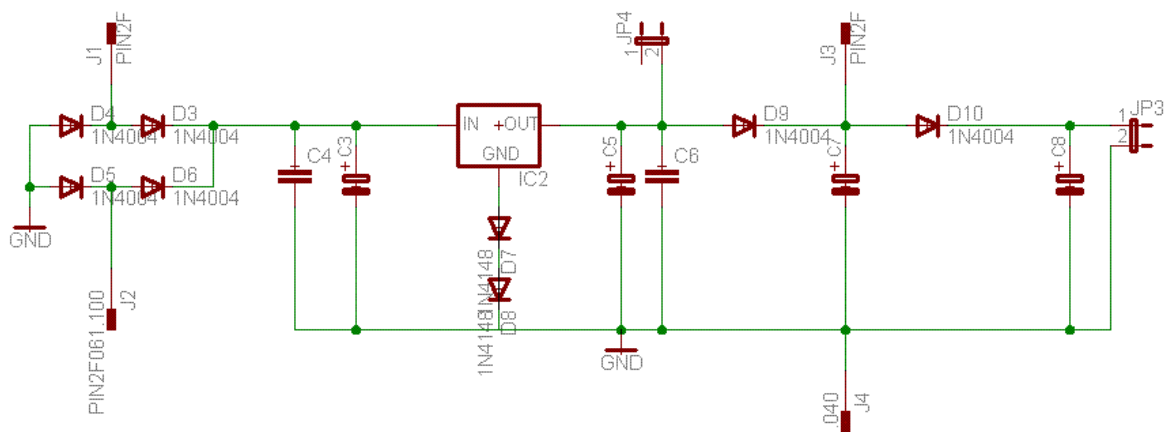
### 8.3 Modul stabilizátoru napětí pro žhavení a časovače

Na tomto plošném spoji se nacházejí část pro usměrnění a stabilizaci žhavicího napětí, a také obvod časovače pro zpožděné ovládání relé

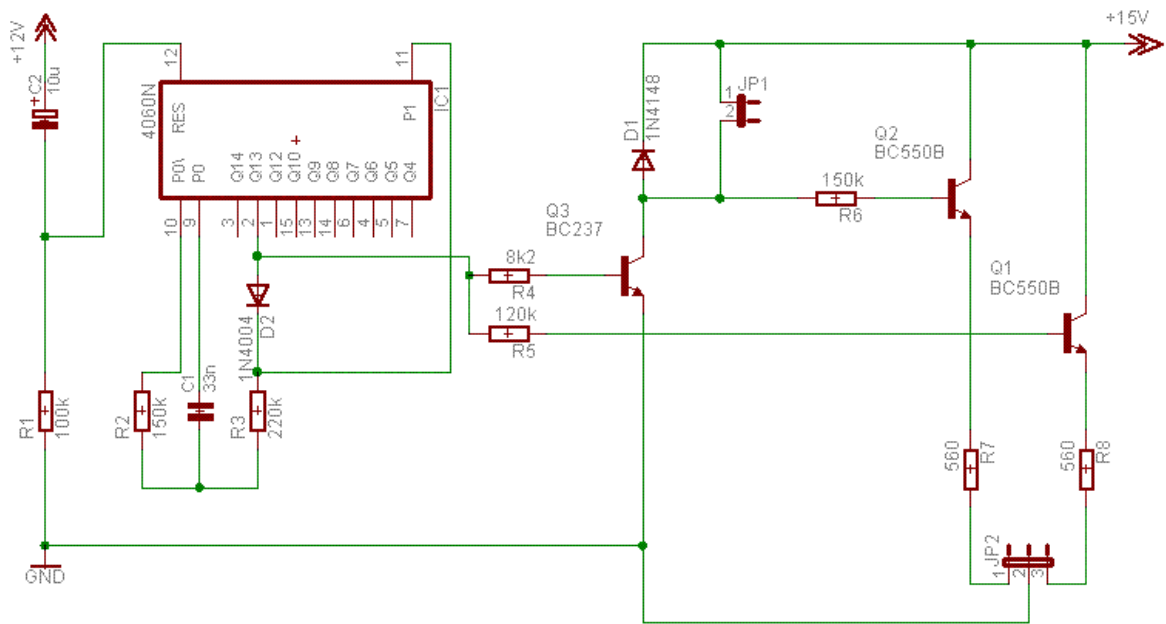
Tab.č. 4 - Parametry stabilizovaného napájecího zdroje

Rozsah stabilizovaného napájecího napětí $U_{max}$	+13,2V
Proud $I_o$ max:	Omezen TR.2
Rozměry	130 x 30 mm

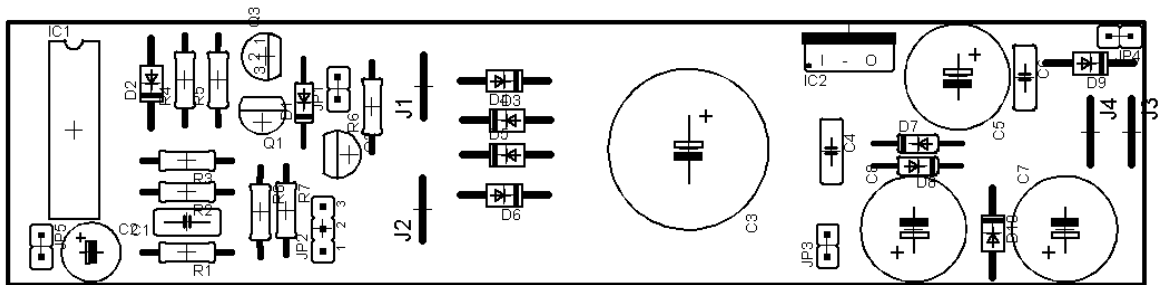
#### 8.3.1 Schéma zapojení a deska plošných spojů



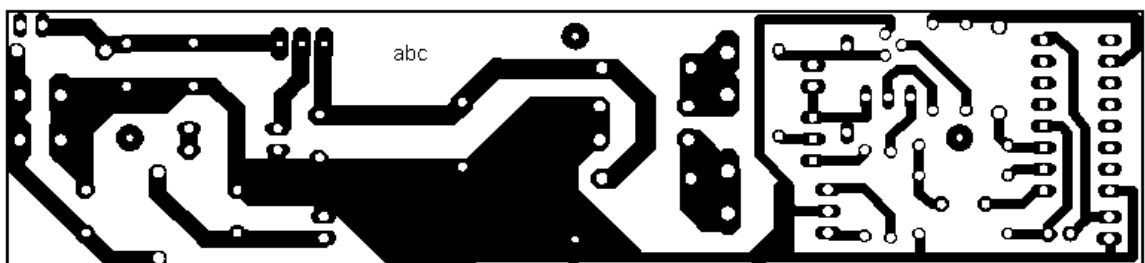
Obr.č. 20 - Schéma zapojení stabilizovaného zdroje



Obr.č. 21 - Schéma zapojení časovače



Obr.č. 22 - Pohled na osazený plošný spoj stabilizátoru a časovače



Obr.č. 23 - Pohled na stranu spojů stabilizátoru a časovače

### 8.3.2 Rozpiska součástek stabilizovaného zdroje a časovače

Tab.č. 5 - Rozpiska součástek pro stabilizovaný zdroj a časovač

C1	33n	J1	PIN2F061.10
C2	10u	J2	PIN2F061.10
C3	6800u / 50V	J3	PIN2F061.04
C4	100n	J4	PIN2F061.04
C5	1000u / 16V	JP1	2-pin
C6	100n	JP2	3-pin
C7	1000u / 16V	JP3	2-pin
C8	1000u / 16V	JP4	2-pin
D1	1N4148	Q1	BC557B
D2	1N4007	Q2	BC557B
D3	1N4007	Q3	BC140
D4	1N4007	R1	100k
D5	1N4007	R2	150k
D6	1N4007	R3	220k
D7	1N4148	R4	8k2
D8	1N4148	R5	120k
D9	1N4007	R6	150k
D10	1N4007	R7	560
IC1	4060N	R8	560
IC2	7812		

### 8.3.3 Popis zapojení

Jedná se o stabilizovaný zdroj napětí 12,6V pro žhavení elektronek. Je použit standardní monolitický stabilizátor 7812 se zatížením 1A. Filtrační kondenzátor je značné kapacity 6800uF za usměrňovačem, a doplněn 3x 1000uF za stabilizátorem. Ten je navíc blokován doporučenými keramickými kondenzátory 100n.

Obvod časovače tvoří IO4060 posílený tranzistory, kterým po uplynutí cca.45s zapínáme relé ve zdrojové části (8.2).

### 8.3.4 Osazování desek plošných spojů zdrojů

1. Desku je třeba mít dokonale čistou a opatřenou zasklou vrstvou rozpuštěné kalafuny v lihu, což je předpoklad pro dokonalé pájení!!!
2. Desku se osazuje od neměších součástek po největší. Pro všechny součástky platí, že se osazují s co nejkratšími vývody, kromě výkonových rezistorů.
3. Je nutné provést důkladnou optickou kontrolu osazeného plošného spoje a případné chyby opravit. Obzvlášť je kladen důraz na důkladnou optickou kontrolu polarity elektrolytických kondenzátorů.
4. Stabilizátor pro stabilizované napětí žhavení elektronek je nutné umístit na chladič!

### 8.3.5 Kontrola funkce

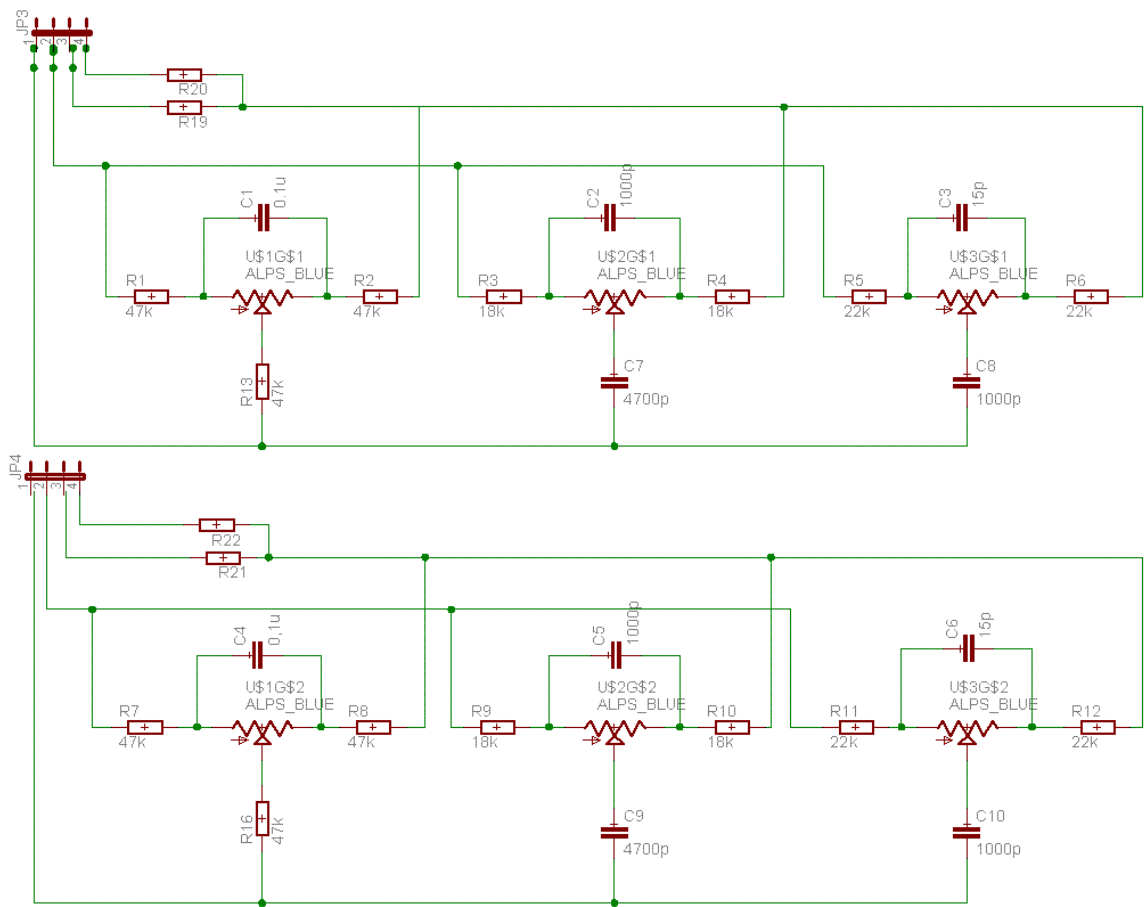
Na výstupu zdroje stabilizovaného napětí (konektory J3 – J4) bychom měli naměřit napětí v rozsahu 12,2 – 13V. Konektory JP1-JP4 složí k vyvedení napětí pro potřeby LED diod a relé.

## 8.4 Modul korekcí

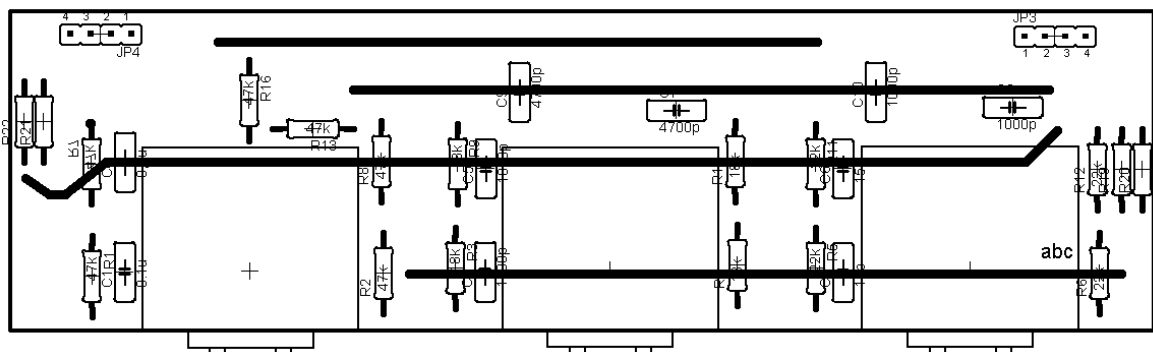
Tento plošný spoj tvoří síť ve zpětné vazbě zesilovače. Pro větší univerzálnost je tento umístěn mimo hlavní desku zesilovače se kterou je následně spojen vodiči.



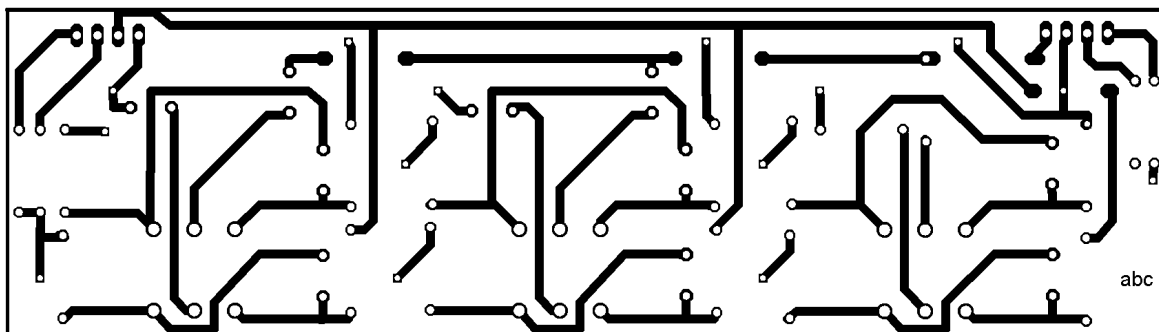
8.4.1 Schéma zapojení a deska plošného spoje



Obr.č. 24 - Schéma zapojení korekcí



Obr.č. 25 - Pohled na osazený plošný spoj korekcí



Obr.č. 26 - Pohled na stranu spojů obvodu korekcí

#### 8.4.2 Rozpiska součástek obvodu korekcí

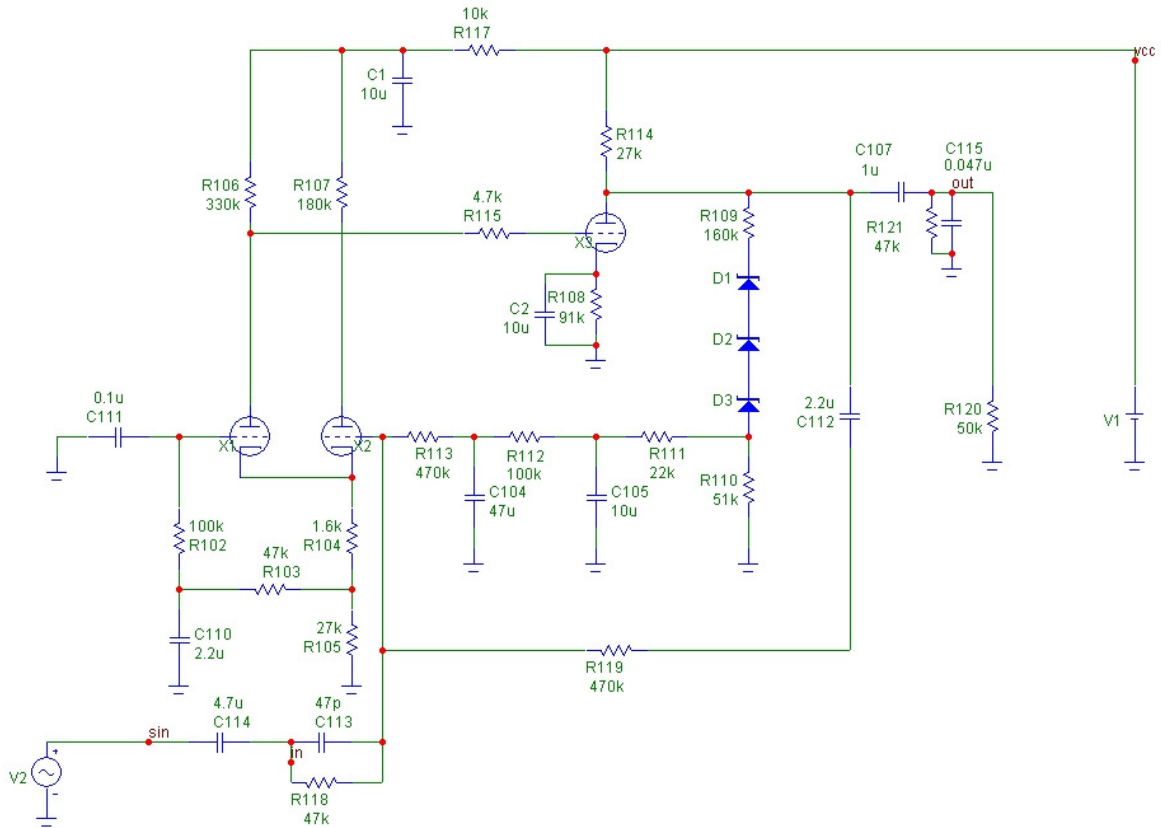
Tab.č. 6 - Rozpiska součástek pro korekční obvod

C1	0.1u	R6	22k
C2	1000p	R7	47k
C3	15p	R8	47k
C4	0,1u	R9	18k
C5	1000p	R10	18k
C6	15p	R11	22k
C7	4700p	R12	22k
C8	1000p	R13	47k
C9	4700p	R16	47k
C10	1000p	R19	18k
JP3	4-pin	R20	2k
JP4	4-pin	R21	18k
R1	47k	R22	2k
R2	47k	U\$1	ALPS 500k Lin.
R3	18k	U\$2	ALPS 500k Lin.
R4	18k	U\$3	ALPS 500k Lin.
R5	22k		

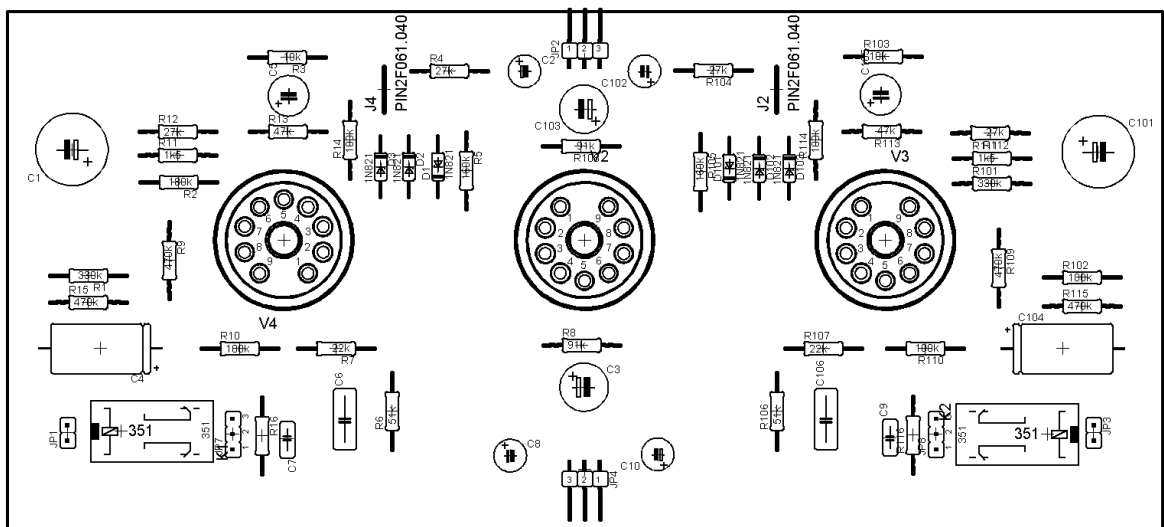
#### 8.4.3 Popis zapojení

Tento modul se nachází ve zpětné vazbě zesilovače a obsahuje korekční obvody. S hlavní deskou zesilovače je spojen vodiči. Plošný spoj byl navržen jako dvouvrstvý, ale vzhledem ke složitosti a nákladnosti výroby je jednostranný a spoje jsou nataženy vodiči ze spodní strany desky.

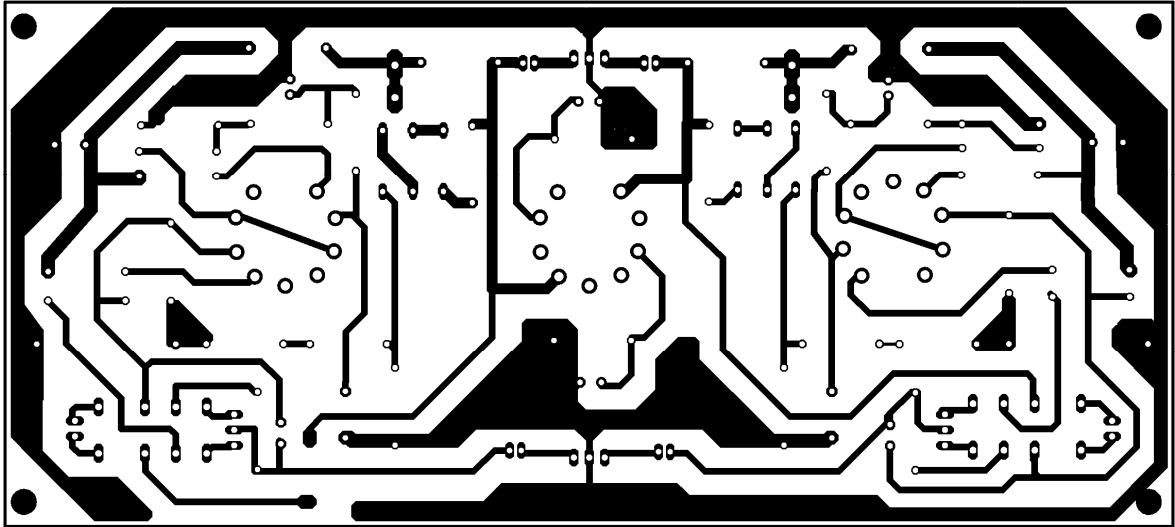
### 8.5 Koncový stupeň, jeho sestavení a oživení



Obr.č. 27 - Schéma zapojení realizovaného zesilovače – vyobrazen pouze jeden kanál, druhý je totožný



Obr.č. 28 - Pohled na osazený plošný spoj hlavní desky zesilovače (oba kanály na jedné desce)



Obr.č. 29 - Pohled na stranu spojů hlavní desky zesilovače

### 8.5.1 Rozpiska součástek hlavní desky

Tab.č. 7 - Rozpiska součástek pro hlavní desku zesilovače

C1	10u / 450V	J4	FASTON	R15	470k
C2	1u / 450V	JP1	2-pin	R16	470k
C3	22u / 250V	JP2	3-pin	R101	330k
C4	47u / 50V	JP3	2-pin	R102	180k
C5	2.2u / 50V	JP4	3-pin	R103	10k
C6	0.1u / 50V	JP7	4-pin	R104	27k
C7	470p	JP8	4-pin	R105	160k
C8	4.7u / 50V	K1	G5V-2	R106	51k
C9	470p	K2	G5V-2	R107	22k
C10	4.7u / 50V	R1	330k	R108	91k
C101	10u / 450V	R2	180k	R109	470k
C102	1u / 450V	R3	10k	R110	100k
C103	22u / 250V	R4	27k	R111	1k5
C104	47u / 50V	R5	160k	R112	27k
C105	2.2u / 50V	R6	51k	R113	47k
C106	0.1u / 50V	R7	22k	R114	100k
D1	DOUT-2	R8	91k	R115	470k
D2	DOUT-2	R9	470k	R116	470k
D3	DOUT-2	R10	100k	V1	NOVAL
D101	DOUT-2	R11	1k5	V2	NOVAL
D102	DOUT-2	R12	27k	V3	NOVAL
D103	DOUT-2	R13	47k		
J2	FASTON	R14	100k		

### 8.5.2 Osazování hlavní desky plošného spoje předzesilovače

1. Desku je třeba mít dokonale čistou a opatřenou zasklou vrstvou rozpuštěné kalafuny v lihu, což je předpoklad pro dokonalé pájení!!!
2. Desku se osazuje od nemenších součástek po největší. Pro všechny součástky platí, že se osazují s co nejkratšími vývody.
3. Jako poslední osazujeme patice elektronek. Kondenzátory C1 , C101, C5 a C105 vzhledem k jejich velikosti položíme na desku naležato.
4. Kondenzátory C3 a C103 připájíme k desce na stranu spojů, jelikož nám jejich velikost brání dát je naležato na stranu součástek.
5. Na patice elektronek V1 – V3 na piny 4 a 5 si přichystáme přívody žhavení, kabely jsou zakončeny Faeton konektory. Žhavení se připojuje k paticím paralelně.
6. Je nutné provést důkladnou optickou kontrolu osazeného plošného spoje a případné chyby opravit. Obzvlášť je kladen důraz na důkladnou optickou kontrolu polarity elektrolytických kondenzátorů a hodnot rezistorů.

### 8.5.3 Postup před oživením zesilovače

1. Je nutné být velice opatrný, napětí a proudy v tomto obvodu Vás můžou zranit, nebo dokonce zabít. Je nutné uvědomit si tento fakt. Spálenou součástku je možné vyměnit, Vás ne!
2. Je vhodné začít s mechanickou částí, vyvrtáním všech potřebných děr v chassis pro šrouby, vypínače, konektory atd.
3. Chassis by měla být z nemagnetického materiálu, proto je vhodný hliník, nerezový plech atd. Pro tuto práci byl zvolen dural (hliník), chassis má rozměry 255 x 220 x 50 mm a je profesionálně vyrobena, výřezy jsou vypáleny laserem.
4. Dále je na řadě příprava zdrojové část. Osazené tištěné spoje je třeba správně propojit. (na modulu 8.3 propojíme JP4 s JP5 – napájení IC), ovládání relé z modulu 8.3 z konektoru JP1 na modul 8.2 konektor JP1.
5. Všechny silové rozvody je nutné vést jako zkroucené, což znamená přívod 220V, přívody žhavení a vysoké anodové napětí.

6. Zemní smyčky by se měly zemnit „hvězdicově“ do jednoho bodu. Chassis jako zemní bod není vhodný. Špatné zemní smyčky mohou zapříčinit špatně odstranitelný síťový 50Hz brum, nebo jiné artefakty.
7. Znovu zkontrolujeme všechnu kabeláž, soustředíme se znovu na to, zda je všechno správně uzemněno.
8. Zkusíme naprázdno zdroj vysokého napětí. Voltmetrem přepnutým na měření DC napětí v dostatečném rozsahu (závisí na přístroji) bychom měli naprázdno naměřit hodnotu napětí 450-470V. Nyní zdroj vypneme, a nezapomeneme vybit vybíjecím rezistorem R2.
9. Všechny signálové rozvody provedeme kvalitními stíněnými kabely, jejich stínění uzemníme pouze jedním koncem.
10. Všechnu kabeláž se snažíme udělat co nejkratší, signálové cesty by měly vést co nejvzdáleněji od napěťových.
11. Zajistíme, že všechna kabeláž s vysokým napětím je dostatečně izolována.

#### 8.5.4 Oživení nf předzesilovače

Za předpokladu, že všechno je v pořádku, nemusí se v podstatě nic oživovat. Zapneme zesilovač a počkáme až se nám sepne relé s anodovým napětím. Nyní počkáme na ustálení hodnot napětí po nažhavení elektronek. Nyní změříme a ověříme napěťové poměry v následujících bodech tabulky (hodnoty vztaženy k zemi GND). Odchyłka naměřených hodnot o zhruba 10% není na závadu, vyšším odchylkám je třeba věnovat pozornost. Porovnáme hodnoty na obou stranách (kanálech) předzesilovače.

Tab.č. 8 – orientační hodnoty napětí

<b>Anoda V1A</b>	<b>190-210 V</b>
<b>Anoda V1B</b>	<b>270-290 V</b>
<b>Katody V1</b>	<b>26-32 V</b>
<b>Mřížkové předpětí V1A</b>	<b>1.5 V méně než katody</b>
<b>Mřížkové předpětí V1B (ACG)</b>	<b>2V méně než katody</b>
<b>Mřížka V2</b>	<b>Stejně jako anoda V1A</b>
<b>Katoda V2</b>	<b>1.5V více než mřížka V2</b>
<b>Anoda V2 (OUT)</b>	<b>290-310 V</b>

---

<b>Vstup, Výstup</b>	<b>0V</b>
<b>Žhavení</b>	<b>+12 až +13V</b>

Pokud se objeví značné nesrovnalosti v naměřených napětích, musíme prověřit celý obvod. Musíme mít na paměti, že jakýkoliv problém v DC smyčce způsobí, že všechna napětí nebudou odpovídat. V tom případě je třeba pečlivě zkontrolovat všechny spoje, součástky atd. Můžeme také zkusit vyměnit elektronky.

Ideálně by se mělo nakonec měli testovat pomocí osciloskopu a zdroje sinusového signálu.

## 9 MECHANICKÁ KONSTRUKCE

Chassis je tvořena ze dvou "U" profilů z 2mm duralového plechu, které se na sebe nasadí. Venkovní rozměry jsou 255 x 220 x 50 mm. Chassis je profesionálně vyrobena, výřezy jsou vypáleny laserem. Většinu děr pro uchycení (distanční sloupky, konektory) pak bylo nutné navrtat dle požadovaných rozměrů.

Síťový transformátor a transformátor pro žhavení jsou klasicky umístěny v levé části chassis, tak jako zásuvka pro přívod síťového napětí. Transformátory jsou vzájemně otočeny o 180° spíše z konstrukčního hlediska. Tištěné spoje a transformátory jsou až na obvod korekcí připevněny k chassis kokovými distančními sloupky.

Z hlediska odvodu tepla je v přední části spodního profilu značné žebrování pro přívod vzduchu, ve vrchním profilu chassis pak v zadní části nad transformátory a chladičem stabilizátoru. Elektronky jak známo při svém provozu topí, proto je jejich značná část nad úrovní chassis. Tak zajistíme přirozené proudění vzduchu. Navíc zesilovač (dle mého názoru) vypadá estetičtěji.

Rozmístění zbytku součástí je zvoleno s ohledem na co nejkratší cesty vodičů a omezení vzájemných možných interferencí.

Zemnění celého zesilovače je provedeno do jednoho společného bodu a stínění signálových vodičů odizoloval izolovanými vstupními cinch konektory, které zajišťují zemnění stínění jen v jednom bodě a to u zdroje. Jedině tak lze totiž zamezit případnému výskytu zemních smyček, které vznikají při nesprávném či vícenásobném zemnění jednotlivých částí zesilovače. Zem celého zesilovače je totiž společná.

Chod zesilovače je indikován LED diodou umístěnou nad síťovým vypínačem. Druhým vypínačem volíme funkci zesilovače, tedy zapnuté korekce, a nebo „bypass“. Stav je opět indikován LED diodou.



Tab.č. 9 - Rozpiska součástí pro mechanickou konstrukci

Přístrojová krabička 255 x 220 x 50	1ks
Distanční sloupky kovové 5mm	4ks
Distanční sloupky kovové 10mm	6ks
Distanční sloupky kovové 35mm	4ks
Flexo šňůra přívodní	1ks
Izolační průchodka flexo šňůry	1ks
Síťový vypínač	2ks
Výstupní odizolované CINCH konektory	2ks
Vstupní odizolované CINCH konektory	2ks
Chladič	1ks
Euro zásuvka s pojistkou	1ks
Vodič červený 1,5mm <sup>2</sup>	2m
Vodič černý 1,5mm <sup>2</sup>	2m
Vodič stíněný	0,6m
Šroubky M3 x 0,8	20ks
Matice M3	20ks
Podložky M3	20ks
LED 3mm, zelená, červená	2ks

## 10 PROVOZNÍ DOPORUČENÍ TOHOTO ZAŘÍZENÍ

### 10.1 Účel zařízení

Tento předzesilovač je primárně určen k připojení ke koncovému stupni mého domácího elektronkového zesilovače. Jeho provedení však spíše připomíná stolní předzesilovač připojitelný ke každému typu koncového zesilovače. To je možné, avšak musíme mít na paměti, že zesilovač má zesílení 10x (20dB), v praxi to tedy znamená, že pokud má výstup CD přehrávače standardně 2V<sub>ef</sub>, na výstupu předzesilovače se při plném vybuzení objeví 20V. Z toho důvodu je nutná obezřetnost při připojení k jinému koncovému stupni. Tento „nedostatek“ lze řešit změnou v návrhu zesilovače, i použitím jiného typu elektronky na místo ECC81. Nabízí se přímo typ ECC82, což bude předmětem mého dalšího zájmu.

Připojení přístroje je provedeno klasickými cinch konektory, které dnes nalezneme na drtivé většině audio – zařízení.

### 10.2 Návod k použití

1. Vstup pro předzesilovač připojíme cinch konektory na zadní straně chassis do označených konektorů. Výstup pak opět cinch konektory spojíme s koncovým.
2. Signálové kabely se snažíme použít co nejkvalitnější, s ohledem na jejich cenu a reálný rozdíl v jejich zvuku (tj. elektrických vlastnostech kabelu)
3. Připojí se zesilovač k síti.
4. Zapne se zesilovač síťovým spínačem POWER, po rozsvícení LED diody nad síťovým vypínačem, je zesilovač připraven k provozu..
5. Regulace hlasitosti se provádí prvním potenciometrem zleva, následují korekce pro basy – středy – výšky.
6. Pokud je zesilovač přepnut do režimu „bypass“ , můžeme regulovat pouze hlasitost potenciometrem VOLUME

### 10.3 Důležitá bezpečnostní upozornění

1. Zesilovač používá napájení ze standardní zásuvky el. sítě 220 V!!! Použití elektrické sítě s vyšším napětím, jako např. pro klimatizační zařízení, je velmi nebezpečné. Připojení k takovému zdroji by mohlo způsobit vznik požáru.
2. Při odpojování síťového přívodu se vytahuje přívod za síťovou vidlici. Vždy se dbá na to, abyste byla manipulace se síťovým přívodem prováděna suchými rukama. Při dotýkání se síťového přívodu mokřkýma rukama hrozí úraz elektrickým proudem.
3. Síťový přívod musí být chráněn před mechanickým poškozením, nepokládají se na něj těžké předměty, násilně jej není dobré neohýbat apod.
4. Přístroj se umísťuje tak, aby byla zajištěna dostatečná ventilace, aby byl kolem něj prostor nejméně 20 cm a nic na něm nebylo odloženo!!

Přístroj se neumísťuje:

- na místa vystavená přímému slunečnímu záření ani na jiná
- místa s vysokou teplotou
- na místa s nadměrnou vlhkostí nebo vibracemi

Nedodržení výše uvedených pokynů může mít za následek poškození skříňky přístroje a nebo jeho vnitřních součástí. Zkracuje se tak též délka životnosti přístroje.

5. Přístroj se nikdy nerozebírá! Není vhodné odstraňovat vnější kryt přístroje, nepokoušet se jej opravovat a dotýkat se jeho vnitřních součástí. Hrozí úraz elektrickým proudem! Případnou oprava musí být provedena pouze znalým odborníkem. V případě nutnosti sejmutí krytu musí být nejprve vytažena vidlice síťového přívodu ze zásuvky.
6. Na obzvláštní opatrnost se dbá, jsou-li i přítomny děti. Je nepřípustné, aby děti cokoliv zasunovaly do přístroje (např. skrz ventilační otvory), zvláště kovové předměty, jako jsou mince, jehly, šroubovák apod. Mohlo by dojít nejen k poruše přístroje, ale i k životu nebezpečnému úrazu elektrickým proudem.
7. Jestliže do přístroje vnikne voda, hrozí vážné nebezpečí požáru či úrazu elektrickým proudem. V takovém případě okamžitě musí být okamžitě vytažena vidlice síťového přívodu ze zásuvky el. sítě!!!

8. Pokud nebude přístroj delší dobu používán, je dobré, aby byl odpojen síťový přívod! Pokud by přístroj zůstal po dlouhou dobu zapnutý, zkracovala by se tím nejen jeho životnost, ale mohlo by docházet k různým poruchám.

#### **10.4 Výměna pojistek**

Při výpadku pojistky (pojistka je umístěna v pojistkovém pouzdře na euro zásuvce) se odpojí přístroj od elektrické sítě a vytáhne se zásuvka s pojistkou. Propálená pojistka se vyjme a do zásuvky vloží nová. Poté se zásuvka vloží zpět do přístroje a zesilovač může být opět připojen k síťovému rozvodu.

## ZÁVĚR

Tento stolní předzesilovač využívá moderního přístupu, kdy jsou techniky známé z návrhů zapojení s operačními zesilovači skombinovány s klasickým návrhem elektronkového zesilovače. Výsledkem je obvod, který oproti běžným audiofilským zapojením přináší nezanedbatelné výhody. Jak již bylo zmíněno, obvod se může pochlubit značnou variabilitou pouhou změnou obvodu zapojeného ve zpětné smyčce. V této práci bylo ukázáno zapojení jako korekčního obvodu – ekvalizéru. Prakticky lze ale jednoduše dosáhnout využití jako předzesilovače pro gramofon, mikrofon, pružinový revers ke kytarě a mnoho dalších.

Uvedené zapojení se v podstatě chová jako operační zesilovač, i když ne jako dokonalý. Zesílení otevřené smyčky, i když je poměrně vysoké, nedá se považovat jako nekonečné jako u ideálního operačního zesilovače.

Zapojení také vykazuje vysoký offset výstupního napětí ke vstupnímu. Prakticky 290V. Z toho důvodu, jakékoliv prvky v AC smyčce je nutné blokovat proti DC kondenzátory. Alternativou by bylo použití děličů napětí, což by ovšem vedlo k dalším komplikacím (a zvýšení ceny) bez zjevného přínosu v konečném důsledku

DC napětí ve zpětné smyčce je nenulové (okolo 27V prakticky), takže je nutné jej opět blokovat kondenzátory. Virtuální AC zem tvoří uzel mezi R113 a C104 při stejném potenciálu jako DC napětí na invertujícím vstupu.

Jak již bylo zmíněno v úvodu, dokonalý reprodukční řetězec v podstatě neexistuje. Stále jsme omezeni technickými možnostmi, které činí dokonalou reprodukci neuskutečnitelnou. Poslech oblíbené nahrávky v oblíbené místnosti by se dal nazvat experimentem. Výsledek experimentu je hodnocen člověkem. Stejně tak, jako bude výsledek hodnocen každým člověkem jinak, změna místnosti rovná se změně vstupních hodnot v experimentu. Poslech hudby je tedy značně subjektivní záležitostí a nedá se dost dobře analyticky vyjádřit matematickou rovnicí. Možná i z toho důvodu papírově daleko zaostalejší a horší zapojení využívající elektronek může znít lépe.

## CONCLUSION

This stand-alone preamplifier design uses a novel design approach, in which modern op-amp design techniques are combined with classic vacuum-tube knowledge. Producing a circuit that represents a significant improvement over most classic audiophile tube designs. As mentioned before, this circuit provides us with great variability of its utilization. By simply changing the circuit in the feedback, we can achieve this preamplifier to be used as phono – ceramic, microphone or spring reverb preamp to name a few.

As hinted already, this circuit behaves very much like an operational amplifier (op-amp). But we'll point out the ways here in which it is like an op-amp. Open loop gain, although quite high, cannot be considered infinite as in many solid state op-amp device.

The circuit exhibits a large output-to-input voltage offset (on the order of 290 volts). Any AC feedback elements between output and input therefore have to include DC blocking capacitors. The alternative would be level-shifters, which would result in additional complication (and expense) without commensurate rewards in terms of performance.

The DC voltage at the feedback input is non-zero (about 27 volts in practise), so again there is a need for DC blocking capacitors. Virtual AC ground between R113 and C104 is provided for convenience, acting as a virtual ground for AC, at the same DC voltage as the inverting input.

As mentioned in the Introduction, the perfect audio Chain doesn't exist. Mankind is still limited by its technical capabilities, which makes the perfect reproduction impossible. Listening to the favourite tune in our listening room can be called an experiment in a technical way. The output of our "experiment" is judged, again, by a man. The same experiment will be viewed from a different point by another man. If we changed the listening room, it equals to different input conditions. Listening to music of all kind is strictly subjective perception and cannot be analytically described using math equations. In the same manner, technically unadvanced and fairly imperfect design using vacuum tubes can in the conclusion sound better to the human ear.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Láníček,R.: Elektronika,obvody,součástky a děje. Praha,BEN,1998.
- [2] katalog EZK Rožnov pod Radhoštěm,2007.
- [3] Příruční katalog TESLA, Rožnov pod Radhoštěm,1977.
- [4] VLACH, J. : Lampárna, aneb co to zkusit s elektronkami? Praha,BEN,2004.
- [5] Muzikus 05/2003, CHROBÁK,M.: Elektronky v kytarových zesilovačích
- [6] [www.dogstar.dantimax.dk](http://www.dogstar.dantimax.dk)
- [7] [www.aldax.cz](http://www.aldax.cz)
- [8] [www.zesilovace.cz](http://www.zesilovace.cz)
- [9] HRABOVSKÝ,M.: Eagle pro začátečníky, Praha,BEN,2002.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

NF	nízkofrekvenční
AC	střídavý
DC	stejnoseměrný
MC7	Micro Cap 7
TIM	zkreslení způsobené silnou zápornou zpětnou vazbou
SID	zkreslení způsobené malou rychlostí přeběhu



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr.č. 1 - Elektronka –trioda; principiální náčrt konstrukce triody .....</i>	11
<i>Obr.č. 2 - Základní zapojení triody.....</i>	12
<i>Obr.č. 3 – Modelová charakteristika elektronky - triody .....</i>	13
<i>Obr.č. 4 – Základní zapojení elektronky jako zesilovače .....</i>	15
<i>Obr.č. 5 – třída A .....</i>	17
<i>Obr.č. 6 – třída AB .....</i>	18
<i>Obr.č. 7 – třída B .....</i>	19
<i>Obr.č. 8 - Přechodové zkreslení .....</i>	20
<i>Obr.č. 9 – zkreslení TIM .....</i>	22
<i>Obr.č. 10 – schéma zapojení – zvolen „bypass“ (bez korekcí).....</i>	30
<i>Obr.č. 12 – schéma zapojení – zvolen „bypass“ (bez korekcí).....</i>	36
<i>Obr.č. 13 - Simulace amplitudové charakteristiky .....</i>	37
<i>Obr.č. 14 – Simulace frekvenční a fázové charakteristiky .....</i>	38
<i>Obr.č. 15 – napěťové poměry v uzlech obvodu .....</i>	39
<i>Obr.č. 16 – vliv změny kapacity C115 na přenosové pásmo zesilovače .....</i>	40
<i>Obr.č. 17 - Schéma zapojení zdroje .....</i>	42
<i>Obr.č. 18 - Pohled na osazený plošný spoj zdroje .....</i>	43
<i>Obr.č. 19 - Plošný spoj zdroje-strana spojů .....</i>	43
<i>Obr.č. 20 - Schéma zapojení stabilizovaného zdroje .....</i>	45
<i>Obr.č. 21 - Schéma zapojení časovače.....</i>	46
<i>Obr.č. 22 - Pohled na osazený plošný spoj stabilizátoru a časovače .....</i>	46
<i>Obr.č. 23 - Pohled na stranu spojů stabilizátoru a časovače .....</i>	46
<i>Obr.č. 24 - Schéma zapojení korekcí.....</i>	49
<i>Obr.č. 25 - Pohled na osazený plošný spoj korekcí .....</i>	49
<i>Obr.č. 26 - Pohled na stranu spojů obvodu korekcí.....</i>	50
<i>Obr.č. 27 - Schéma zapojení realizovaného zesilovače – vyobrazen pouze jeden kanál, druhý je totožný.....</i>	51
<i>Obr.č. 28 - Pohled na osazený plošný spoj hlavní desky zesilovače (oba kanály na jedné desce).....</i>	51
<i>Obr.č. 29 - Pohled na stranu spojů hlavní desky zesilovače.....</i>	52

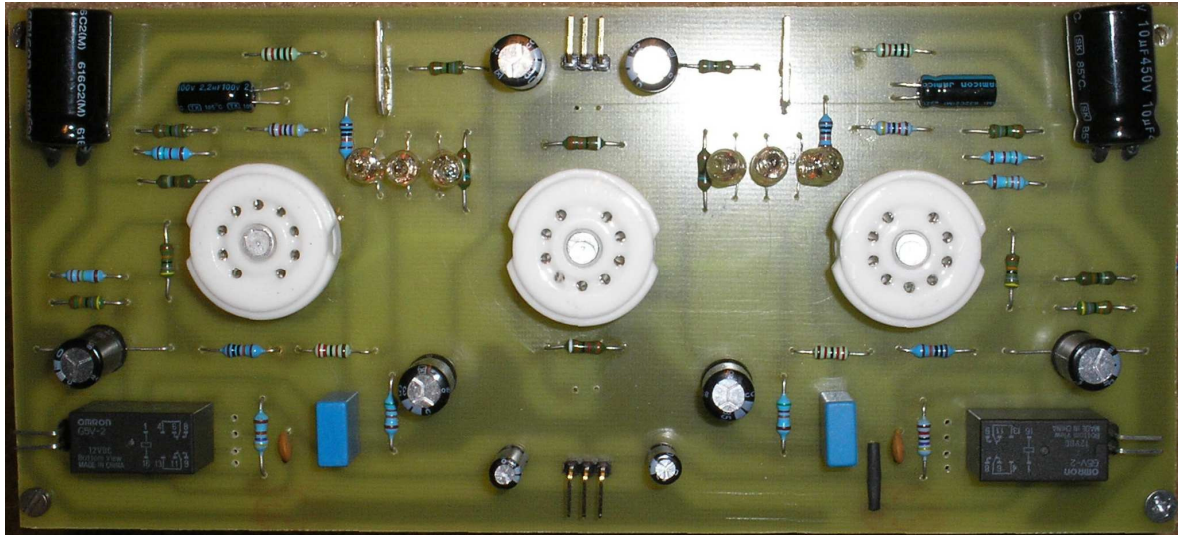
**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab.č. 1 - Parametry napájecího zdroje.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab.č. 2 - Rozpiska součástek pro napájecí zdroj.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab.č. 3 - Popis vývodů modulu.....</i>	<i>44</i>
<i>Tab.č. 4 - Parametry stabilizovaného napájecího zdroje.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab.č. 5 - Rozpiska součástek pro stabilizovaný zdroj a časovač.....</i>	<i>47</i>
<i>Tab.č. 6 - Rozpiska součástek pro korekční obvod.....</i>	<i>50</i>
<i>Tab.č. 7 - Rozpiska součástek pro hlavní desku zesilovače.....</i>	<i>52</i>
<i>Tab.č. 8 – orientační hodnoty napětí.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab.č. 9 - Rozpiska součástek pro mechanickou konstrukci.....</i>	<i>57</i>

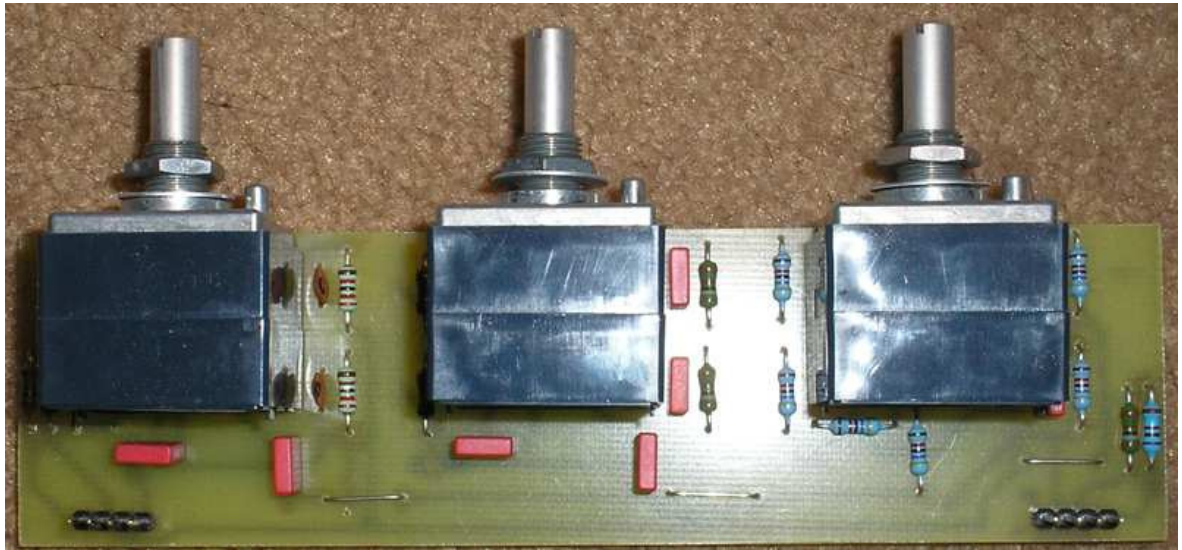
**SEZNAM PŘÍLOH**

- P I            Pohled na osazenou hlavní desku
- P II            Pohled na osazenou desku korekcí
- P III           Celkový pohled na zesilovač - zadní strana
- P IV           Výkres – spodní “U“ profil
- P V            Výkres – vrchní “U“ profil
- P VI

## PŘÍLOHA P I: POHLED NA OSAZENOU HLAVNÍ DESKU



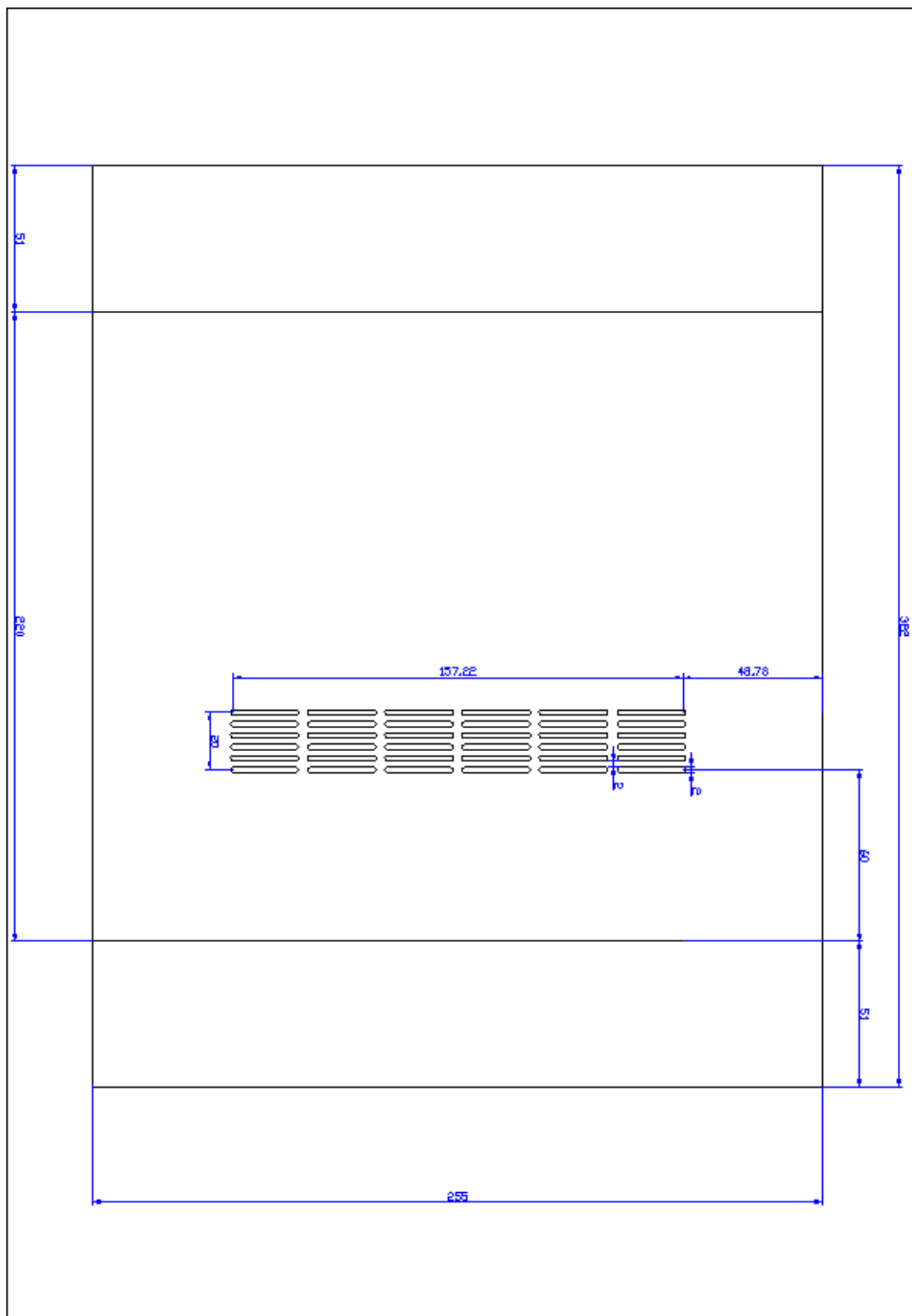
## PŘÍLOHA P II: POHLED NA OSAZENOU DESKU KOREKČÍ



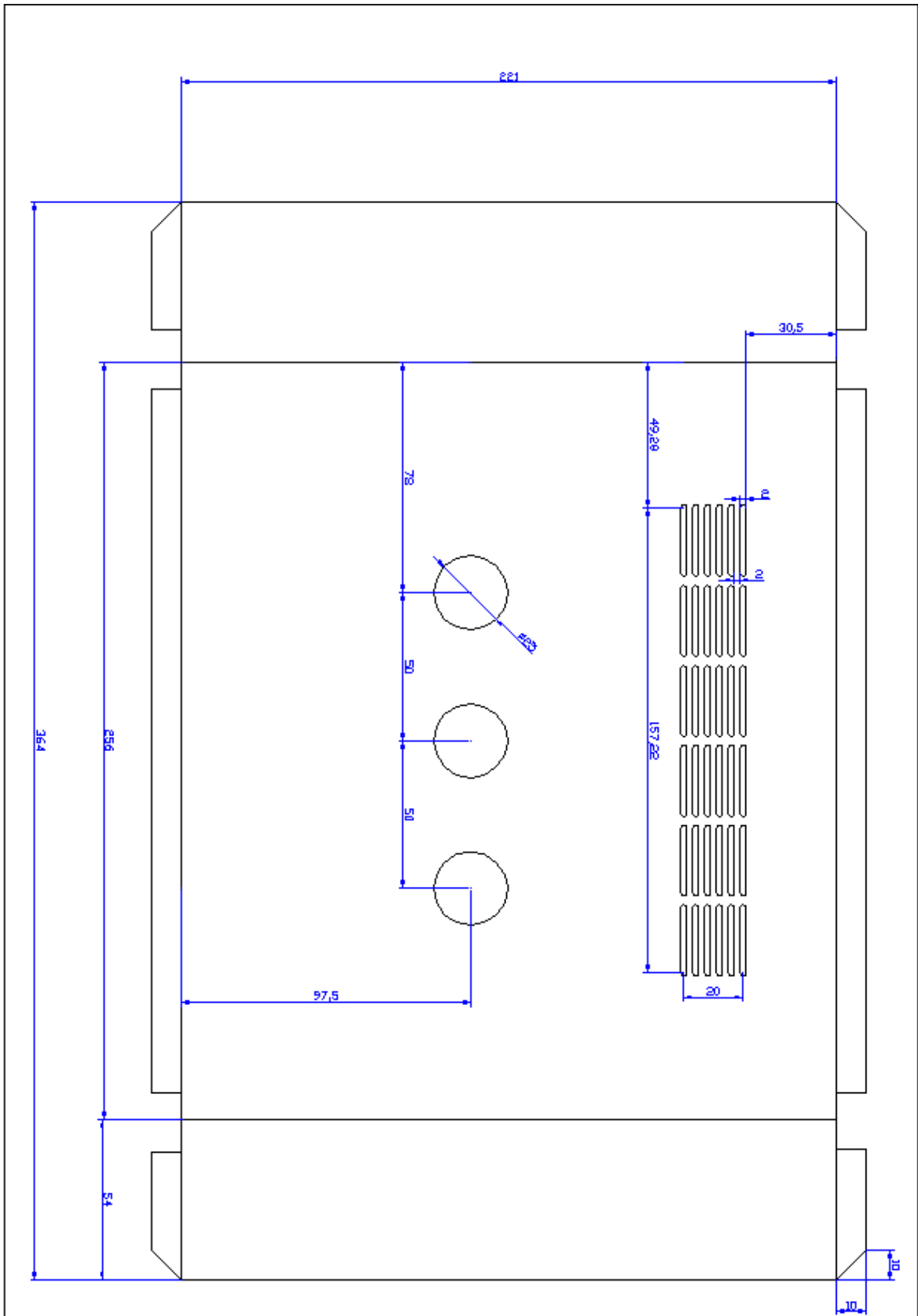
**PŘÍLOHA P IV: CELKOVÝ POHLED NA ZESILOVAČ - ZADNÍ STRANA**



# PŘÍLOHA P V: VÝKRES – SPODNÍ “U“ PROFIL



# PŘÍLOHA P VI: VÝKRES – VRCHNÍ “U“ PROFIL





**PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY**