



**Fakulta Elektrotechnická**

**Katedra telekomunikační techniky**

**Bakalářská práce**

# **Konstrukce audio zesilovače s vakuovými prvky**

**Jan Hrubý**

**Studijní program:**

**Elektronika a komunikace**

**Vedoucí práce:**

**prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc.**

**Praha, 2022**



**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Praha 19. května 2022

Jan Hrubý



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hrubý** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **492220**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra telekomunikační techniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Konstrukce audio zesilovače s vakuovými prvky**

Název bakalářské práce anglicky:

**Construction of an Audio Amplifier with Vacuum Elements**

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rozbor moderních vakuových prvků pro audio aplikace. Uveďte přehled dostupných typů. Popište základní parametry vakuových prvků a jejich vliv na vlastnosti zesilovače. Navrhněte a realizujte HiFi audio zesilovač s vakuovými prvky. Uvažujte výstupní výkon 2x15W. Následně ověřte kmitočtovou charakteristiku navrženého zesilovače.

Seznam doporučené literatury:

[1] Vlach, J. - Vlachová, V.: Lampárna aneb Co to zkusit s elektronikami, BEN 2004. ISBN: 0-7300-091-1.  
[2] Tomer R. B.: Getting the Most Out of Vacuum Tubes. Howard W. Sams & Co., 1960. Reprinted by KCK Media Corp., 2019. ISBN: 978-1-88258-029-3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc. katedra telekomunikační techniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Zahradník, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



**Poděkování:**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce prof. Ing. Pavlovi Zahradníkovi, CSc. za poskytnutí elektronky NuTube a výstupních transformátorů. Děkuji také Jiřímu Maškovi za výrobu DPS a firmě ALTEI za poskytnutí měřičo zařízení.

Jan Hrubý





## **Abstrakt**

Obsahem této práce je rozbor vakuových prvků využívaných v audiotechnice a návrh stereo HiFi zesilovače. V první části je čtenář uveden do principů a typů vakuových prvků využívaných v audiotechnice. Jsou zde vyjmenovány základní parametry a jejich vliv na vlastnosti zesilovače. Zabýváme se zde i moderními vakuovými prvky, zejména pak technologií NuTube. Druhá část práce je věnována kompletnímu návrhu a realizaci stereo HiFi zesilovače využívající vakuové prvky. V zesilovači je použita i moderní elektronka NuTube. Následně je změřena kmitočtová charakteristika zesilovače.

### **Klíčová slova:**

Zesilovač, HiFi, Elektronka, NuTube, Kmitočtová charakteristika

## **Abstract**

The content of this work is the analysis of vacuum elements used in audio technology and the design of stereo HiFi amplifier. In the first part, the readers are introduced into the principles and types of vacuum elements used in audio technology. The basic parameters and their influence on the properties of the amplifier are listed here. We are also dealing with modern vacuum elements, especially NuTube technology. The second part of the thesis is devoted to the complete design and implementation of a stereo HiFi amplifier using vacuum elements. Modern NuTube tube is also used in the amplifier. The frequency characteristic of the amplifier is then measured.

### **Keywords:**

Amplifier, HiFi, Tube, NuTube, Frequency characteristics

## Obsah

<b>I</b>	<b>Vakuové prvky pro audiotechniku</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Obecná charakterizace vakuových prvků</b>	<b>4</b>
1.1	Historie . . . . .	4
1.2	Princip . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Provedení a typy elektronek</b>	<b>6</b>
2.1	Trioda . . . . .	6
2.2	Tetroda . . . . .	6
2.2.1	Svazková tetroda . . . . .	8
2.3	Pentoda . . . . .	8
2.4	Magické oko . . . . .	9
2.5	Kombinace více typů v jednom pouzdře . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Základní parametry elektronek, jejich vliv na vlastnosti zesilovače</b>	<b>10</b>
3.1	Žhavicí napětí/proud ( $U_f/I_f$ ) . . . . .	10
3.2	Anodové napětí a proud ( $U_A/I_A$ ) . . . . .	10
3.3	Mřížkové napětí ( $U_g$ ) . . . . .	11
3.4	Vnitřní odpor ( $R_i$ ) . . . . .	11
3.5	Zesilovací činitel ( $\mu$ ) . . . . .	11
3.6	Strmost ( $S$ ) . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Zapojení ve třídě A</b>	<b>13</b>
4.1	Pracovní bod . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Moderní vakuové prvky</b>	<b>15</b>
5.1	Modifikace známých typů . . . . .	15
5.2	KORG - NuTube 6P1 . . . . .	16
<b>II</b>	<b>Návrh HiFi zesilovače</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Zdroj</b>	<b>18</b>
6.1	Zdroj napětí pro předzesilovač . . . . .	18

6.2	Zdroj napětí pro koncový stupeň . . . . .	19
<b>7</b>	<b>Předzesilovač</b>	<b>21</b>
7.1	Gramofonový předzesilovač . . . . .	21
7.2	Stupeň NuTube . . . . .	22
7.3	Stupeň ECC82 a katodový sledovač . . . . .	22
7.4	Frekvenční korekce . . . . .	24
<b>8</b>	<b>Výkonový stupeň</b>	<b>26</b>
8.1	Fázový invertor . . . . .	26
8.2	Výstupní transformátor a výkonové pentody . . . . .	26
<b>9</b>	<b>Návrh desek plošných spojů (DPS)</b>	<b>29</b>
9.1	Zdroj . . . . .	29
9.2	Předzesilovač . . . . .	29
9.3	Koncové DPS . . . . .	29
<b>10</b>	<b>Doplňkové obvody/prvky</b>	<b>30</b>
10.1	Balance . . . . .	30
10.2	Omezení síťového brumu . . . . .	30
10.3	Boost . . . . .	30
10.4	Power, Standby, Impedance . . . . .	30
<b>11</b>	<b>Chassis</b>	<b>31</b>
<b>12</b>	<b>Měření kmitočtové charakteristiky</b>	<b>32</b>
<b>A</b>	<b>Desky plošných spojů</b>	<b>37</b>
<b>B</b>	<b>Schematické zapojení</b>	<b>38</b>
<b>C</b>	<b>Fotografie</b>	<b>39</b>



## Seznam obrázků

1	Zesilovač Manley STINGRAY® II, zdroj: [2]. . . . .	1
2	Princip nepřímožhavené triody. . . . .	4
3	Schematická značka triody. . . . .	6
4	Anodová charakteristika triody, zdroj: [3, s. 90]. . . . .	6
5	Schematická značka tetrody. . . . .	7
6	Anodová charakteristika tetrody, zdroj: [3, s. 96, obr. 9-15]. . . . .	7
7	Schematická značka pentody. . . . .	8
8	Anodová charakteristika pentody, zdroj: [3, s. 97]. . . . .	8
9	Schematická značka indikační elektronky. . . . .	9
10	Základní zapojení elektronky. . . . .	13
11	Doporučený pracovní bod elektronky ECC82, zdroj: upraveno [7]. . . . .	14
12	ECC803 (vlevo) a ECC83. . . . .	15
13	ECC83 - Gold Pins, zdroj: [9]. . . . .	15
14	NuTube 6P1, zdroj: [11]. . . . .	16
15	Schematické zapojení zdroje pro předzesilovač. . . . .	19
16	Schematické zapojení žhavicího obvodu NuTube. . . . .	19
17	Schematické zapojení zdroje pro koncový stupeň. . . . .	20
18	Schematické zapojení gramofonového předzesilovače. . . . .	21
19	Pracovní bod NuTube. . . . .	22
20	Schematické zapojení NuTube, zdroj: upraveno [13]. . . . .	23
21	Pracovní bod ECC82, zdroj: upraveno [7]. . . . .	23
22	Schematické zapojení stupně s ECC82 a katodového sledovače. . . . .	24
23	Schematické zapojení frekvenčních korekcí. . . . .	24
24	Přenos bloku frekvenčních korekcí. . . . .	25
25	Schematické zapojení fázového invertoru. . . . .	26
26	Výstupní transformátor OTRG-15W-1. . . . .	26
27	Klidový pracovní bod EL84, zdroj: upraveno [17]. . . . .	27
28	Schematické zapojení koncového stupně. . . . .	28
29	Chassis. . . . .	31
30	Kmitočtová charakteristika zesilovače. . . . .	32
31	Zesilovač využívající vakuové prvky. . . . .	34



## Úvod

Zesilovač lze popsat jako zařízení, které vstupní signál zesílí na signál výstupní. Do začátku 20. stletí představovala tato, na první pohled jednoduchá, úloha poměrně komplikovaný a z hlediska elektrotechniky složitý problém. S vynálezem elektronky, konkrétně triody, již zesílení signálu tak složité nebylo, a tak začaly vznikat elektronkové zesilovače, vysílače, či první počítače (ENIAC). Přibližně v polovině 20. století byl však objeven princip bipolárního tranzistoru. Tranzistor oproti elektronce, dosahuje lepší efektivity, má lepší elektrické vlastnosti a je menší. Z těchto důvodů byly elektronky ve většině aplikacích nahrazeny tranzistory a v současné době se využívají velmi málo.

Po přečtení předchozího odstavce bychom mohli polemizovat, zda má smysl se elektronkami i v současné době zabývat. Nad tímto tématem se vedou na internetu nekonečné diskuze [1]. Nicméně odpovědět na tuto otázku nebude náplní této práce. Faktem je, že elektronky své místo v oblasti HiFi (viz obrázek 1) a kytarových zesilovačů stále mají.

Práce je rozdělena na dvě části. Část první je věnována rozboru vakuových prvků pro audiotechniku. V druhé části je popsán návrh a realizace stereo HiFi zesilovače.



**Obrázek 1:** Zesilovač Manley STINGRAY® II, zdroj: [2].





## Část I

# Vakuové prvky pro audiotechniku

Tato část práce se věnuje vakuovým prvkům používaným v audiotechnice. Je zde zjednodušeně popsán jejich princip, parametry na které lze běžně narazit a vybraná provedení, která jsou v audiotechnice využívána.

## 1 Obecná charakterizace vakuových prvků

Výraz vakuový prvek pro audiotechniku lze nahradit slovem elektronka. Elektronka je většinou skleněná baňka, ve které je vytvořeno vakuum. Uvnitř elektronky jsou kovové elektrody. V audiotechnice našla elektronka využití především jako zesilovač elektrických signálů.

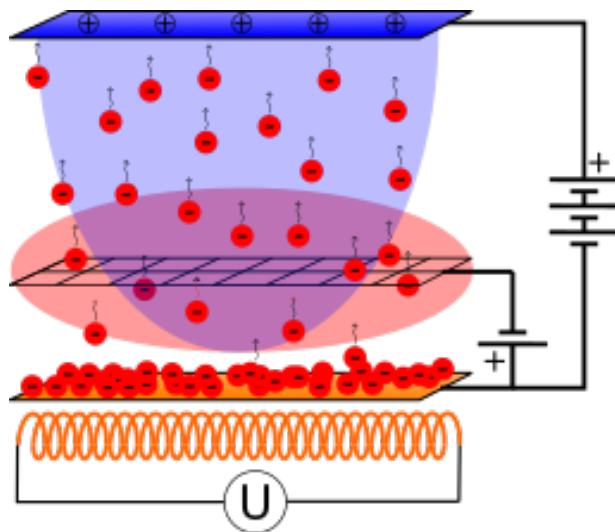
### 1.1 Historie

Důležitost vynálezu elektronky svým výrokem přiblížil Dr. Trůneček [3, s. 83] „*Úžasný rozmach radiotechniky způsobil teprve vynález elektronky.*“

Pomyslný základní kámen elektronky učinil Thomas Alva Edison vynálezem žárovky. V roce 1904 na něj navázal John Ambrose Fleming, který do baňky k žárovkovému vláknu přidal druhou elektrodu a vynalezl tak diodu, první typ elektronky. Tuto nejjednodušší formu elektronky zdokonalil roku 1907 americký fyzik Lee de Forest, který mezi anodu a katodu diody umístil řídící elektrodu a vynalezl Audion (první triodu) [4, s. 12].

### 1.2 Princip

Elektronka využívá ke své činnosti princip termoemise. Dle webové encyklopedie fyziky Mgr. Reichla [5, s. 83] je termoemise jev, při kterém „*se uvolňují ty elektrony, které mají dostatečnou energii, aby mohly opustit povrch pevné látky. Tato energie musí být větší než je tzv. výstupní práce, tj. energie nutná na přerušení sil, kterými je elektron přitahován k atomovým jádrům dané látky.*“



Obrázek 2: Princip nepřímohavené triody.

V případě elektronky je možno princip zjednodušeně popsat následující větou, doplněnou obrázkem 2. Záporně nabitě volné elektrony jsou ze žhavené katody vytrhávány kladným elektrickým polem anody. Elektronkou tak protéká elektrický proud, od katody k anodě.

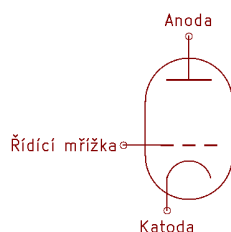
U jednoduché elektronky typu dioda, nelze proud elektronů příliš regulovat. Regulace proudu lze dosáhnout přidáním řídicí mřížky mezi anodu a katodu. Zvolíme-li napětí na řídicí mřížce vůči katodě záporné, bude záporné elektrické pole řídicí mřížky elektrony tekoucí z katody k anodě odpuzovat. Napětím řídicí mřížky tak lze regulovat množství elektrického proudu tekoucího elektronkou. Tedy je-li napětí přivedené na mřížku střídavé, je střídavý i proud tekoucí elektronkou.

## 2 Provedení a typy elektronek

V audiotechnice se využívá poměrně velké množství elektronek. Naprostá většina slouží k zesílení signálu, ale používají se i indikační. Zde budou uvedeny běžně používané typy elektronek lišící se počtem mřížek.

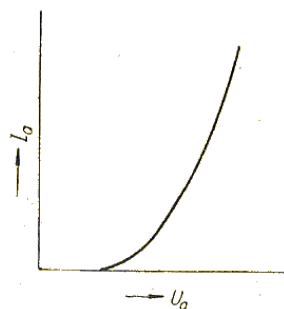
### 2.1 Trioda

Trioda je konstrukčně nejjednodušší elektronka využitelná k zesílení signálu, s celkem třemi elektrodami, viz obrázek 3. Tvoří ji anoda, katoda a třetí řídicí elektroda nazývaná řídicí mřížka.



Obrázek 3: Schematická značka triody.

Princip triody byl popsán v kapitole 1.2. Triody jsou ve velké míře používány v předzesilovačích, nicméně některé HiFi zesilovače využívají triody zapojené ve třídě A i pro koncové stupně. Anodová charakteristika triody je na obrázku 4.



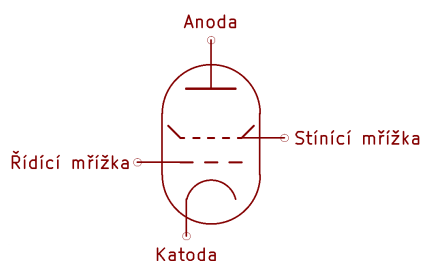
Obrázek 4: Anodová charakteristika triody, zdroj: [3, s. 90].

*Příklad: ECC82, 300B, KORG NuTube 6P1*

### 2.2 Tetroda

Pokud chceme elektronkou regulovat vyšší proudy, musí vzrůst intenzita elektrického pole anody, aby z katody přitáhla více elektronů a proud tekoucí elektronkou vzrostl. Toho lze

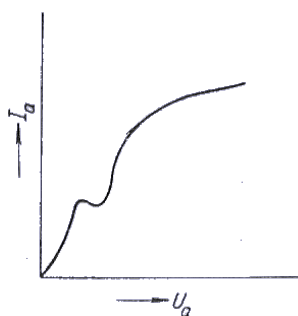
docílit buď zvýšením anodového napětí, nebo vložením mezi anodu a řídicí mřížku další mřížku, na které bude napětí blízké anodovému a tím intenzita elektrického pole vzroste. Vznikne elektronka se čtyřmi elektrodami, nazývaná tetroda. Její schematická značka je na obrázku 5.



**Obrázek 5:** Schematická značka tetrody.

Vložená mřížka je mezi anodou a řídicí mřížkou, tedy tvoří jakési stínění. Proto ji nazýváme stínící [3, s. 95].

V porovnání s triodou umožňuje tetroda vyšší anodovou ztrátu, má vyšší zesilovací činitel i vnitřní odpor. Přidáním stínící mřížky rovněž dojde ke snížení nežádoucí kapacity mezi anodou a řídicí mřížkou. Hlavní nevýhodou tetrody je tzv. sekundární emise, vlivem



**Obrázek 6:** Anodová charakteristika tetrody, zdroj: [3, s. 96, obr. 9-15].

kteří má anodová charakteristika tetrody prohlubeň, obrázek 6. Jde o jev, kdy elektrony urychlené stínící mřížkou vysokou rychlostí dopadají na anodu, a tak z ní vyraží elektrony. U triody se tyto elektrony vrátí zpět k anodě, protože jiný zdroj kladného elektrického pole u triody není. Tetroda má však kladně nabitou stínící mřížku umístěnou blízko k anodě, a proto jsou některé vyražené elektrony z anody přitaženy stínící mřížkou. Katodový proud se tak rozdělí na proud anodový a proud stínící mřížkou.

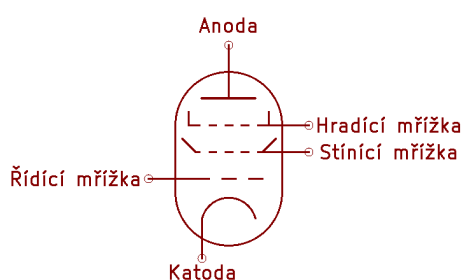
### 2.2.1 Svazková tetroda

Tento jev lze omezit tak, že tok elektronů z anody soustředíme do tenkých svazků [3, s. 96]. Zjednodušeně lze říci, že pokud je elektron vyražen z anody, tak ho elektrony proudící svazkem zatlačí zpět na anodu. Takto řešené elektronky nazýváme svazkové tetrody a jejich anodová charakteristika je podobná anodové charakteristice pentody na obrázku 8.

*Příklad: KT88, 6L6*

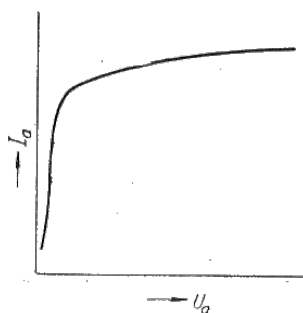
### 2.3 Pentoda

Pentoda vznikne přidáním další mřížky k tetrodě. Schematická značka je na obrázku 7. Důvodem přidání této mřížky je opět sekundární emise. Oproti svazkové tetrodě, pentoda tento jev eliminuje právě přidanou tzv. hradící mřížkou umístěnou mezi anodou a stínící mřížkou. Ta zpravidla bývá spojena s katodou, či je na ní menší záporné napětí. Tak se elek-



**Obrázek 7:** Schematická značka pentody.

trony vyražené z anody nedostanou až ke stínící mřížce, ale jsou hradící mřížkou svedeny zpět na katodu [3, s. 96].

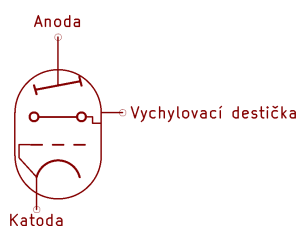


**Obrázek 8:** Anodová charakteristika pentody, zdroj: [3, s. 97].

*Příklad: EL84, EL34, EF86*

## 2.4 Magické oko

Magické oko je indikační elektronka, tvoří ji katoda, vychylovací destička a anoda. Na anodu je nanesen luminofor. Když tedy elektron dopadne na anodu, luminofor pohltí elektron a vyzáří foton. Tok elektronů dopadajících na anodu je řízen vychylovací destičkou. Pokud není na vychylovací destičku přivedeno žádné napětí, elektrony dopadají na anodu a ta září. Přivedeme-li na vychylovací destičku záporné napětí, destička začne elektrony odpuzovat, a tak část anody nezáří [6]. Schematická značka indikační elektronky je na obrázku 9.



**Obrázek 9:** Schematická značka indikační elektronky.

*Příklad: EM84, EM800*

## 2.5 Kombinace více typů v jednom pouzdře

Na trhu se lze setkat s elektronkami, které v jednom pouzdře kombinují dva různé typy elektronek, například trioda/pentoda, či kombinace triod ECC83 a ECC82. I indikační elektronka zpravidla bývá v jednom pouzdře s klasickou triodou, která řídící signál zesílí, a tak vzroste citlivost indikační elektronky.

*Příklad: PCL86, ECC832*

### 3 Základní parametry elektronek, jejich vliv na vlastnosti zesilovače

Zde budou vyjmenovány a základně popsány parametry, které se běžně objevují v datasheetech elektronek. Pro lepší orientaci jsou uvedeny i typické hodnoty doporučené výrobcem.

#### 3.1 Žhavicí napětí/proud ( $U_f/I_f$ )

Dle žhavení katody dělíme elektrony na přímožhavené a nepřímožhavené.

- Přímožhavené - žhavicí elektrický proud protéká přímo katodou a tím ji zahřívá.
- Nepřímožhavené - katoda je zahřívána žhavicím vláknem.

Žhavicí napětí je napětí, kterým je žhavena katoda. Přímožhavené katody je nutno žhavit stejnosměrným napětím. Pokud je katoda žhavena nepřímo, lze pro její žhavení využít i napětí střídavé (ECC82  $U_f=6,3$  V).

Žhavicí proud je dodáván do žhavicí spirály, resp. katody, a tím ji zahřívá. Jeho hodnota záleží na typu elektrony. Nicméně hodnoty žhavicího proudu bývají poměrně vysoké (ECC82  $I_f=300$  mA).

- Příliš vysoké žhavicí napětí zkracuje životnost elektrony.
- Při malém žhavicím proudu katoda není schopna emitovat dostatečné množství elektronů.

#### 3.2 Anodové napětí a proud ( $U_A/I_A$ )

Anodové napětí je napětí anody vztahované ke katodě. Hodnota anodového napětí je volena vzhledem k aplikaci a typu elektrony (ECC82  $U_a=250$  V).

Proud tekoucí mezi katodou a anodou se označuje jako anodový. Hodnota anodového proudu je úměrná anodovému a mřížkovému napětí. Anodový proud se běžně pohybuje v řádech desítek mA. (ECC82  $I_A=10,5$  mA)

- Anodové napětí a proud jsou parametry určující pracovní bod, a proto při jeho nesprávně zvolené hodnotě může elektronka signál zkreslovat.
- Příliš vysoká hodnota anodového proudu a napětí může vést k překročení maximální povolené výkonové ztráty elektrony, a tím ji poškodit.



### 3.3 Mřížkové napětí ( $U_g$ )

Mřížkové napětí je napětí mezi řídicí mřížkou a katodou elektronky. V zesilovačích je toto napětí střídavé se zápornou stejnosměrnou složkou. Právě stejnosměrná složka je udávána v datasheetu. (ECC82  $U_g = -8.5\text{V}$ )

- Přílišné záporné napětí mřížky může elektronku zcela zavřít. Elektrický proud by v tomto případě elektronkou vůbec neprotékal.

### 3.4 Vnitřní odpor ( $R_i$ )

Elektronky mají ze své podstaty vysoký vnitřní odpor. Definujeme ho jako poměr anodového napětí ku anodovému proudu

$$R_i = \frac{U_A}{I_A}, \quad (1)$$

pro konstantní hodnotu mřížkového napětí ( $U_g = \text{konst}$ ). Hodnoty vnitřního odporu elektronek se běžně pohybují v desítkách kiloohmů. (ECC82  $R_i = 7,7 \text{ k}\Omega$ )

- Vnitřní odpor elektronky je dán její konstrukcí a hodnotou mřížkového napětí. Pokud je vnitřní odpor elektronky nižší, protéká jí vyšší proud. To je třeba zohlednit při návrhu zdroje.

### 3.5 Zesilovací činitel ( $\mu$ )

Zesilovací činitel je bezrozměrnou veličinou definovanou jako poměr anodového a mřížkového napětí,

$$\mu = \frac{U_A}{U_g}, \quad (2)$$

které u katody vyvolají stejnou intenzitu elektrického pole. Typické hodnoty jsou řádově desítky. (Pro ECC82  $\mu = 17$ , ECC83  $\mu = 100$ )

- Hodnota zesilovacího činitele rovněž záleží na konstrukci a typu elektronky. Pokud je zesilovací činitel nízký, je třeba kaskádně zapojit více zesilovacích stupňů k dosažení potřebné intenzity signálu.

### 3.6 Strmost ( $S$ )

Vychází z přenosové charakteristiky elektronky. Je definována jako poměr anodového proudu ku mřížkovému napětí.

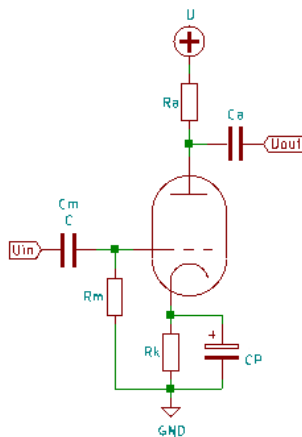
$$S = \frac{I_A}{U_g}. \quad (3)$$

Jde o parametr, který udává, jak se změní velikost anodového proudu v závislosti na změně mřížkového napětí. Obvykle se značí písmenem  $S$  a její jednotkou je A/V. (Pro ECC82  $S=2,2$  mA/V)

- Strmost lze interpretovat jako odezvu anodového proudu na mřížkové napětí. Elektronky s malou strmostí je potřeba budit napětím o větší amplitudě, abychom dosáhli požadované odezvy anodového proudu.

## 4 Zapojení ve třídě A

Jelikož při konstrukci zesilovače je hojně využíváno zapojení ve třídě A (viz obrázek 10), budou zde uvedeny základní vlastnosti tohoto zapojení. Hlavním důvodem využití třídy A je, že takto zapojený zesilovač má velmi dobrou linearitu, kterou zejména pro audioaplikace požadujeme.



Obrázek 10: Základní zapojení elektronky.

### 4.1 Pracovní bod

Poloha pracovního bodu určuje třídu, ve které zesilovač pracuje. Ve třídě A s výhodou umísťujeme pracovní bod do poloviny napájecího napětí ( $U_a = U/2$ ) a do lineární části anodové charakteristiky [4, s. 21]. Z těchto dvou podmínek zvolíme optimální polohu pracovního bodu znázorněnou na obrázku 11 a odečteme potřebné hodnoty pro jeho nastavení ( $U_a, I_k, U_g$ ). Velikost anodového a katodového odporu pak lze určit s využitím Ohmova zákona:

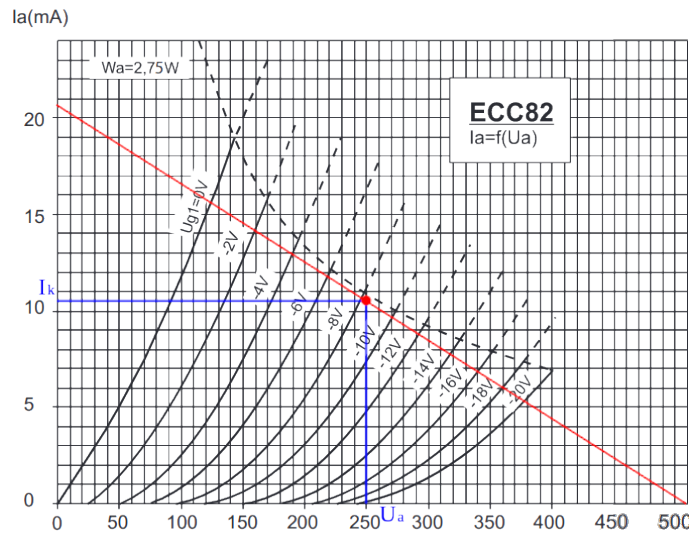
$$R_a = \frac{U_a}{I_k}, \quad (4)$$

$$R_k = \frac{U_g}{I_k}. \quad (5)$$

Kondenzátor  $C_P$  zapojený paralelně ke katodovému odporu stabilizuje polohu pracovního bodu elektronky.

Nevýhodou zapojení zesilovače ve třídě A je tzv. klidový proud  $I_k$ , ten protéká elektronkou, i když není na mřížku přivedený žádný řídicí signál.

V obvodu řídicí mřížky bývá zpravidla zapojen derivační článek, z důvodu filtrace frekvencí, které už není zesilovač schopen zpracovat. Respektive frekvence menší než  $f_{min}$  jsou



**Obrázek 11:** Doporučený pracovní bod elektronky ECC82, zdroj: upraveno [7].

tlumeny. Pro hodnoty součástek musí být splněna následující podmínka

$$\frac{1}{2\pi R_m C_m} < f_{min}. \quad (6)$$

Dle [3, s. 92] lze při mřížkovém napětí menším než -2 V, proud tekoucí mřížkou zanedbat.

Hodnota  $R_m$  je tedy rovna přímo vstupnímu odporu zesilovače.

## 5 Moderní vakuové prvky

Vývoj vakuových prvků sice oproti minulému století výrazně zpomalil, nicméně zcela se nezastavil. Vzhledem k tomu, že elektronky se v audio oblasti stále využívají, výrobci modifikují již používané typy, či vyvíjejí nové technologie.

### 5.1 Modifikace známých typů

Běžně lze narazit na elektronky lišící se délkou anody. Nejedná se zcela o moderní modifikaci. Vyrábí se elektronky s dlouhou, či elektronky s krátkou anodou (long plate, short plate). Dlouhé anody se vyráběly dříve než krátké. Mají lepší podání basových frekvencí, nicméně lehce vyšší šum. Oproti tomu krátké anody mají lepší podání vyšších frekvencí a jsou odolnější vůči vibracím [8]. Provedení lze určit z názvu ECC83 - krátká anoda, ECC803 - dlouhá anoda. Rozdíl je patrný na obrázku 12, kde jsou oba typy.



Obrázek 12: ECC803 (vlevo) a ECC83.

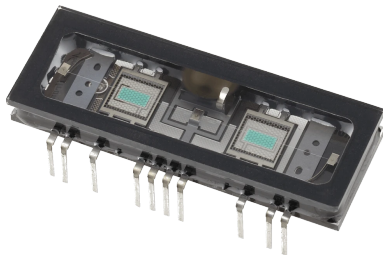
Další používanou modifikací je pozlacení pinů elektronky, znázorněno na obrázku 13. Takto upravené se většinou označují jako prémiové. Pozlacení pinů zmenšuje přechodový odpor kontaktů.



Obrázek 13: ECC83 - Gold Pins, zdroj: [9].

## 5.2 KORG - NuTube 6P1

Elektronka NuTube 6P1 (viz obrázek 14) je moderní elektronka vyvinutá firmou KORG ve spolupráci s Noritake Itron Corporation. Technologii NuTube firma na svých webových stránkách zveřejnila 22.1.2015. Tuto elektronku KORG využívá ve svých zesilovačích, či v kytarových předzesilovačích [10]. NuTube přináší do světa elektronek určitý



**Obrázek 14:** NuTube 6P1, zdroj: [11].

kompromis mezi klasickými elektronkami, jejichž charakteristický zvuk je v audio aplikacích stále žádoucí a tranzistory, které vynikají malými rozměry, malou spotřebou energie a velmi dobrými elektrickými vlastnostmi [12]. Z pohledu provedení je NuTube dvojitá přímo žhavená trioda se společnou katodou. Zajímavostí je i použití fluorescenčních vákuových displejů. Hlavní výhodou NuTube oproti klasickým triodám je menší energetická náročnost [13] (dle výrobce až o 98 %).

## Část II

# Návrh HiFi zesilovače

V této části bakalářské práce se věnuji kompletnímu návrhu, realizaci a měření stereo HiFi zesilovače, který ke své činnosti využívá vakuové prvky. V zesilovači je použita i moderní elektronka NuTube. Je zde popsán návrh jednoho kanálu (druhý kanál je identický) a zdroje napětí pro oba kanály.

## 6 Zdroj

Při návrhu zesilovače je poměrně limitující dostupnost vhodných transformátorů. Z tohoto důvodu jsem se nejprve zabýval návrhem zdroje potřebných napětí a následně podle těchto hodnot navrhl jednotlivé stupně zesilovače. Z důvodu bezpečnosti jsou ve zdroji i proudové pojistky.

Jsou použity dva síťové transformátory, jeden pro předzesilovač a fázový invertor, druhý pro koncové pentody. Zdroj je společný pro oba kanály zesilovače.

### 6.1 Zdroj napětí pro předzesilovač

Zdroj pro předzesilovač je napájen síťovým transformátorem INDEL TSL 40/002 [14], jehož parametry jsou v tabulce 1.

**Tabulka 1:** Parametry transformátoru INDEL TSL 40/002.

Vinutí	$U_{ef}$ (V)	$I$ (A)
1.	200	0,06
2.	200	0,06
3.	9	0,4
4.	6,3	2,15

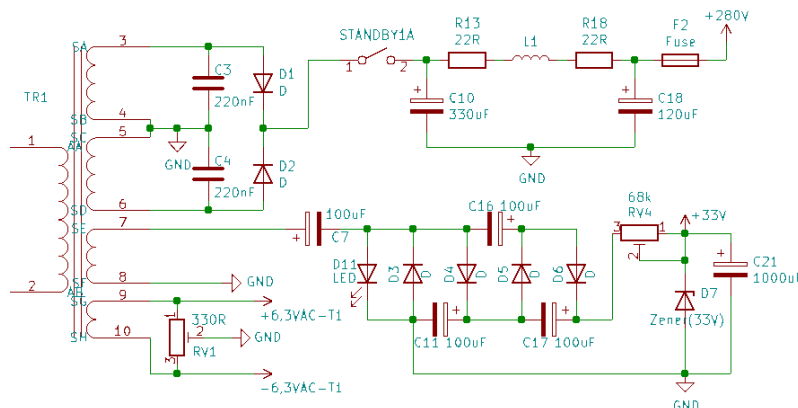
Anodové napětí musí být stejnosměrné. Z tohoto důvodu je 1. a 2. sekundární vinutí seriově spojeno a napětí následně dvoupulzně usměrněno [15, s. 94, obr: 4.32]. Hodnota anodového napětí pro předzesilovač vychází z

$$U_{DC} = U_{ef} \cdot \sqrt{2} = 200 \cdot \sqrt{2} \doteq 283V. \quad (7)$$

Za usměrňovačem je řazen dvoupólový vypínač standby (viz kapitola 10.4). Abychom předešli pronikání síťového brumu, je potřeba usměrněné napětí co nejlépe vyfiltrovat. K tomu slouží filtrační kondenzátory, odpory a cívka. Výsledná hodnota použitelného anodového napětí pro předzesilovač tak bude přibližně 275 V.

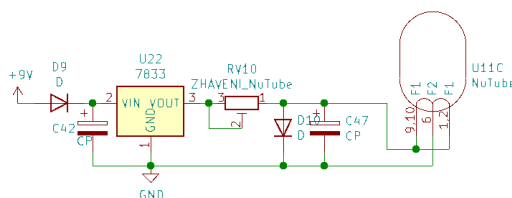
Dále je třeba získat anodové napětí pro NuTube. K tomu slouží 3. sekundární vinutí transformátoru. Zde je využito zapojení zvané nábojová pumpa, či násobič napětí. Anodový proud odebíraný NuTube je velmi malý (maximalně stovky mikroampér), tedy násobič napětí lze použít. Hodnotu anodového napětí NuTube volím 33 V, stabilizuje ho Zenerova dioda. Celé zapojení je znázorněno na obrázku 15.





Obrázek 15: Schematické zapojení zdroje pro předzesilovač.

NuTube, jakožto elektronka, vyžaduje rovněž žhavení katody. Katoda je žhavená přímo napětím 0,7 V. Tedy žhavicí napětí je voleno stejnosměrné. S výhodou je zde použita kře-



Obrázek 16: Schematické zapojení žhavicího obvodu NuTube.

míková dioda, která na sobě udržuje napětí 0,7 V. Celé schéma žhavicího obvodu NuTube je na obrázku 16.

4. sekundární vinutí, je s malou modifikací (viz kapitola 10.2) přímo využito pro žhavení šesti elektronek ECC82 a ECC83 v předzesilovači a fázovém invertoru. Žhavicí proud jedné elektronky je 300 mA [7]. Celkový odebíraný proud ze 4. vinutí je přibližně  $6 \cdot 300 = 1800$  mA. Napětí 4. vinutí je rovněž využito pro indikační LED.

## 6.2 Zdroj napětí pro koncový stupeň

Pro napájení koncového stupně jsem zvolil síťový transformátor INDEL TSL 40/001 [16]. Parametry vinutí transformátoru jsou v tabulce 2. Sekundární napětí 1 je usměrněno diodovým můstkem [15, s. 94, obr: 4.34]. Hodnotu takto usměrněného napětí lze určit obdobně dle (7). V tomto případě bude mít hodnotu

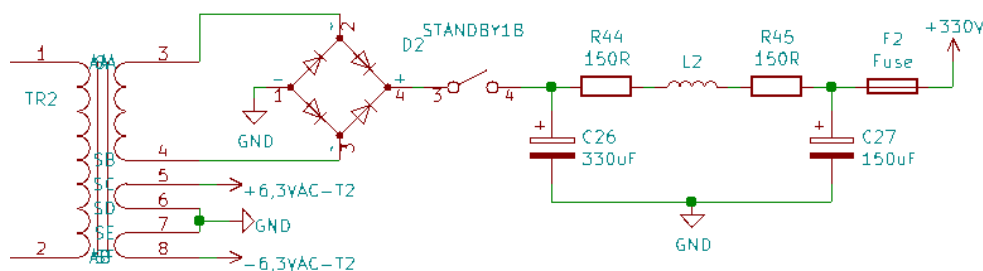
$$U_{DC} = 235 \cdot \sqrt{2} \doteq 332V. \quad (8)$$

**Tabulka 2:** Parametry transformátoru INDEL TSL 40/001.

Vinutí	$U_{ef}$ (V)	$I$ (A)
1.	235	0,075
2.	3,15	3
3.	3,15	3

Anodové napětí je stejně jako u předzesilovače filtrováno kondenzátory, cívkou a odpory. Hodnoty odporů R44 a R45, na obrázku 17 jsou zvoleny tak, aby anodové napětí na všech EL84 bylo blízké 250 V.

Seriově spojené 2. a 3. sekundární vinutí s uzemněným středem, žhaví katody koncových pentod. Žhavicí proud jedné EL84 je dle [17] 760 mA. Celkový odebíraný proud je tedy  $4 \cdot 760 = 3040$  mA. Zde je maximální možný proud vinutí překročen o 40 mA, což odpovídá přibližně 1 %. Tedy nemyslím si, že by tímto byla ohrožena správná funkce transformátoru.

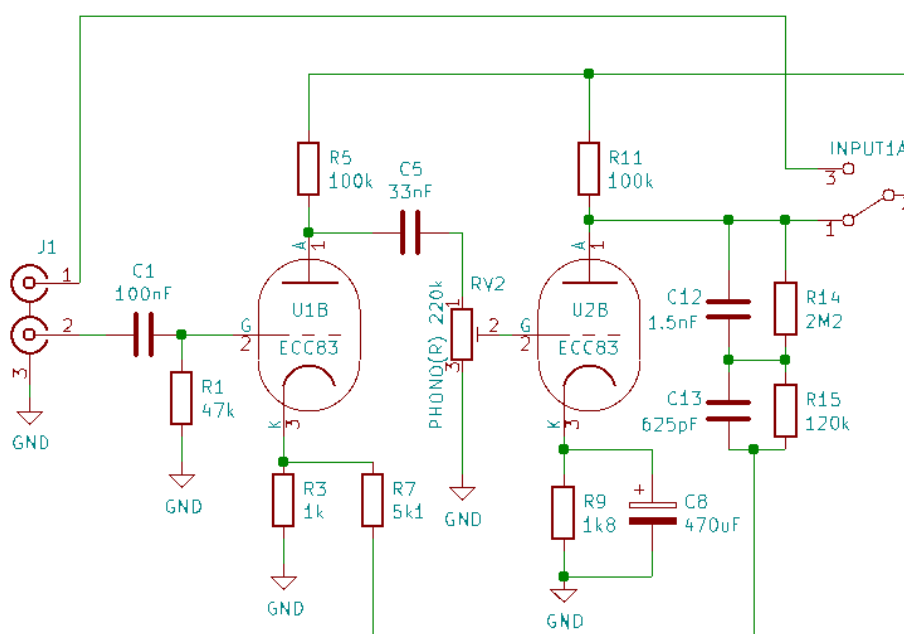
**Obrázek 17:** Schematické zapojení zdroje pro koncový stupeň.

## 7 Předzesilovač

Od HiFi zesilovače požadují zpracování jak linkového, tak gramofonového signálu. Linkovým signálem rozumím signál o napěťové úrovni přibližně 1 V, gramofonový pak o napěťové úrovni kolem 2 mV. Takovýto signál není schopen dostatečně vybudit koncové pentody. Proto je nezbytné zařazení předzesilovače, který signál pro koncový stupeň dostatečně zesílí případně frekvenčně zkoriguje.

### 7.1 Gramofonový předzesilovač

Gramofonový předzesilovač zajišťuje prvotní zesílení gramofonového signálu na linkovou úroveň. Předzesilovač je navrhnout pro magnetodynamickou přenosku, která dle tabulky [18, s. 19, Tab. 1.] vyžaduje vstupní impedanci zesilovače alespoň 47 kΩ. Využil jsem zapojení znázorněné na obrázku 18, vycházející ze zapojení [19]. Gramofonový předzesilovač

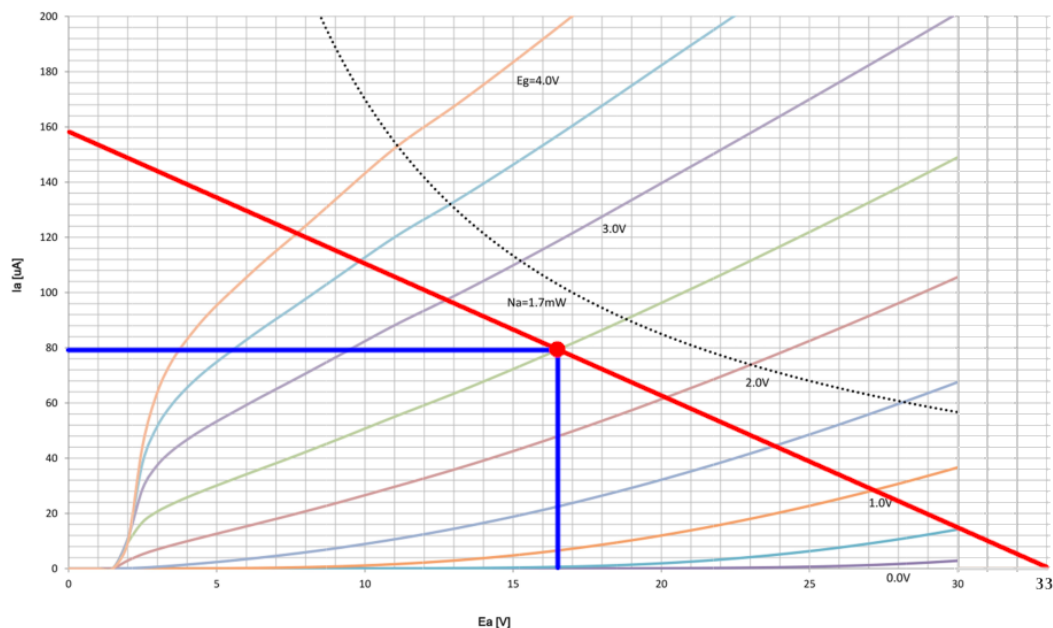


Obrázek 18: Schematické zapojení gramofonového předzesilovače.

je realizován triodou ECC83. Zesílení je dosaženo pomocí dvou kaskádně zapojených zesilovacích stupňů ve třídě A. Z anody druhého stupně je zavedena záporná kapacitní zpětná vazba do katody prvního stupně. Tato vazba způsobí, že s rostoucí frekvencí signálu klesá zesílení první triody. Důvodem je, že amplituda gramofonového signálu je přímo uměrná kmitočtu. Proto je třeba signál korigovat takzvanou RIAA křivkou.

## 7.2 Stupeň NuTube

NuTube má maximální povolenou anodovou ztrátu 1,7 mW. Z tohoto důvodu je využita pro zesílení linkové úrovně. Je zde použito zapojení ve třídě A. Pracovní bod je volen v souladu s postupy popsány v kapitole 4.1. Na obrázku 19 je znázorněna mnou zvolená poloha pracovního bodu NuTube. K dosažení potřebného napětí na mřížce 2,5 V, je využit



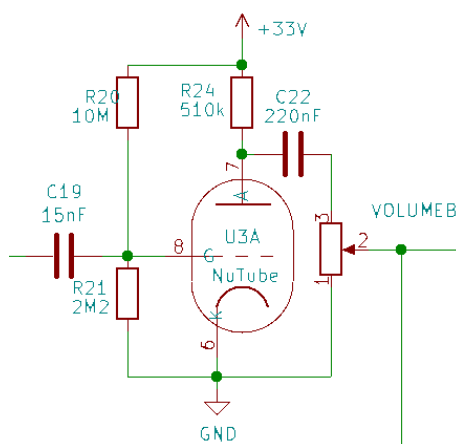
Obrázek 19: Pracovní bod NuTube.

napětový dělič. Zde je ovšem potřeba vzít v úvahu mřížkový proud  $I_g$ , který je pro napětí 2,5 V přibližně  $14 \mu A$  [13]. Z tohoto důvodu je dělicí poměr napětového děliče volen  $1/5,5$ . Což při napájecím napětí 33 V odpovídá asi 6 V na mřížce. Nicméně právě vlivem mřížkového proudu bude na mřížce NuTube 2,5 V.

Hodnota anodového odporu je volena tak aby na něm byl úbytek napětí přibližně 16 V. Rovněž je nutno ohlídat podmínku (6). Výsledné zapojení je na obrázku 20.

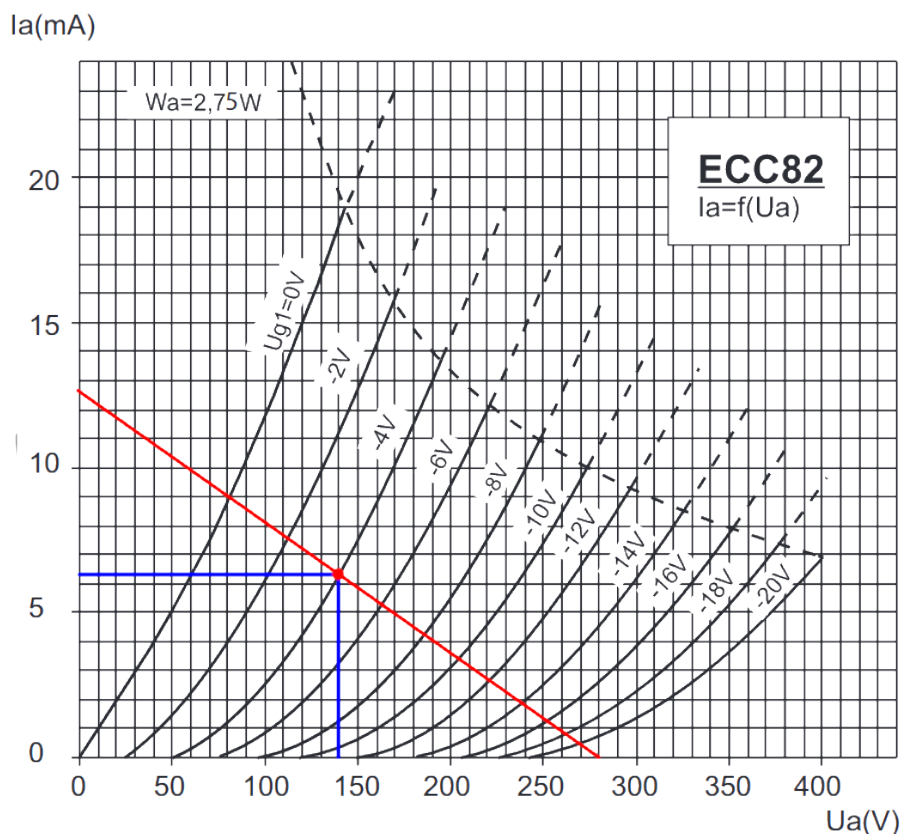
## 7.3 Stupeň ECC82 a katodový sledovač

Postup návrhu tohoto stupně je obdobný postupu uvedenému v předchozím odstavci. Jedná se o klasické zapojení elektronky. Provedeme určení vhodné polohy pracovního bodu a následné dopočtení hodnoty obvodových prvků. Anodové napětí dodávané zdrojem má hodnotu 275 V. Podle postupů popsanych v kapitole 4.1 je na obrázku 21 znázorněna optimální poloha pracovního bodu.



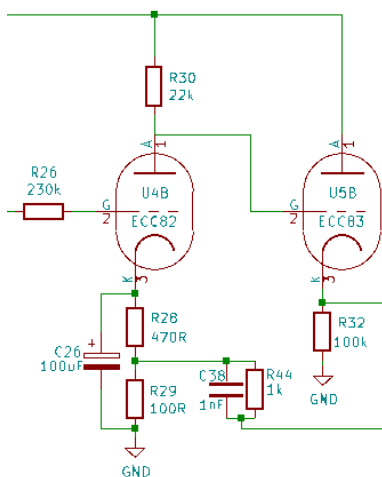
**Obrázek 20:** Schematické zapojení NuTube, zdroj: upraveno [13].

Do katody elektronky je ze sekundárního vinutí výstupních transformátorů přes odporový dělič zavedena záporná zpětná vazba. Tato vazba brání rozkmitání zesilovače vysokofrekvenčním signálem [20]. Ze vztahů (4) a (5) dopočteme hodnoty rezistorů. Kondenzátor v katodě elektronky stabilizuje hodnotu napětí na katodovém odporu.



**Obrázek 21:** Pracovní bod ECC82, zdroj: upraveno [7].

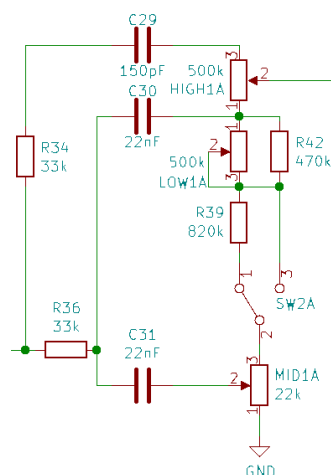
Následuje katodový sledovač. V zesilovači je řazen před frekvenční korekce. Důvodem, proč tomu tak je, je skutečnost, že oproti doposud využívanému zapojení se společnou anodou (zesilovač ve třídě A), má katodový sledovač nižší hodnotu výstupní impedance. Tedy zde zajišťuje impedanční přizpůsobení pro obvod s frekvenčními korekcemi. Jeho zesílení je maximálně jednotkové a neobrací fázi signálu. V zesilovači je realizován triodou ECC83. Celé zapojení tohoto stupně je znázorněno na obrázku 22.



Obrázek 22: Schematické zapojení stupně s ECC82 a katodového sledovače.

#### 7.4 Frekvenční korekce

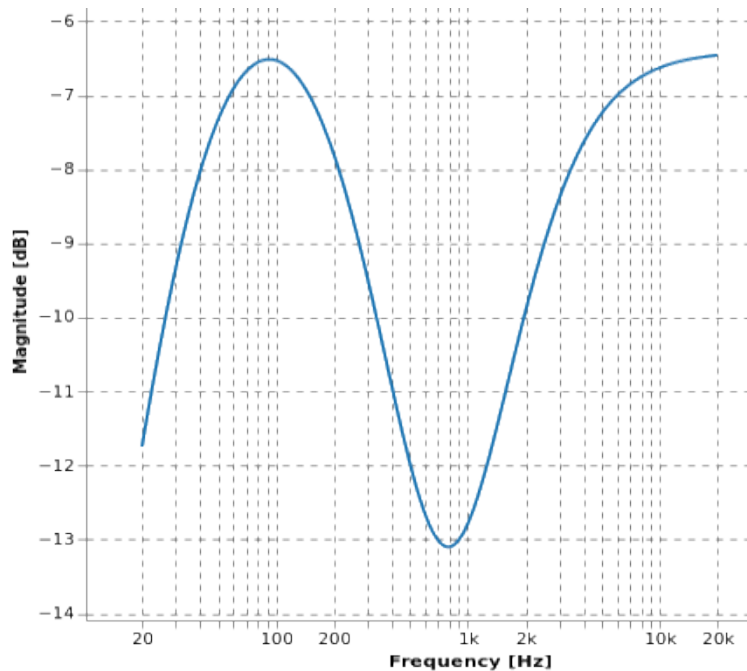
Aby bylo možno signál frekvenčně korigovat, zařadil jsem do řetězce předzesilovače i blok se základními pasivními frekvenčními korekcemi. Rozhodl jsem se využít mírně modifikované zapojení typu marshall (obrázek 23) převzato z [4, s. 58, obr. 4.16].



Obrázek 23: Schematické zapojení frekvenčních korekcí.

Korekce se nastavují pomocí potenciometrů<sup>1</sup>. Každý z nich ovládá jedno pásmo (basy, středy, výšky).

Nevýhodou tohoto zapojení je značný útlum signálu a ne příliš optimalní frekvenční charakteristika v nulové poloze. Výstup simulace přenosu bloku frekvenčních korekcí v programu GEEC je na obrázku 24.



**Obrázek 24:** Přenos bloku frekvenčních korekcí.

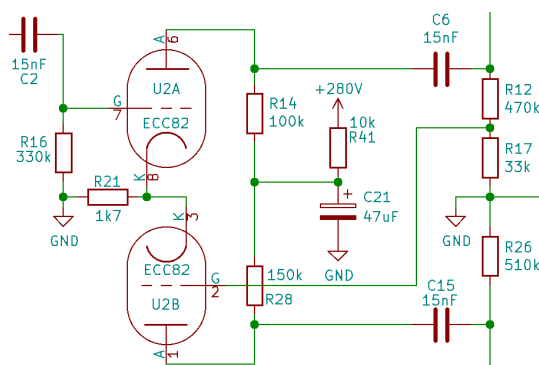
<sup>1</sup>Potenciometry jsou ve stereo provedení, aby bylo možné regulovat oba kanály stejně.

## 8 Výkonový stupeň

Výkonový stupeň využívá zapojení ve třídě AB. Toto zapojení kombinuje linearitu třídy A a dobrou účinnost třídy B. Na vstupu výkonového stupně je fázový invertor. Dále jsou pak zapojeny výstupní pentody s výstupním transformátorem.

### 8.1 Fázový invertor

Použití fázového invertoru je pro zesilovač ve třídě AB nezbytné. Fázový invertor vytvoří ze signálu z předzesilovače dva symetrické signály<sup>2</sup>, které jsou následně přivedeny na řídicí mřížky koncových pentod. Fázový invertor je realizován triodou ECC82. Mnou využité zapojení na obrázku 25, využívá pomocnou elektronku a je převzato z [3, s. 194].



Obrázek 25: Schematické zapojení fázového invertoru.

### 8.2 Výstupní transformátor a výkonové pentody

Výstupní transformátor na obrázku 26 společně s výkonovými pentodami tvoří poslední stěžejní blok zesilovače. V koncovém stupni je použit transformátor OTRG-15W-1 společně s elektronkami EL84.

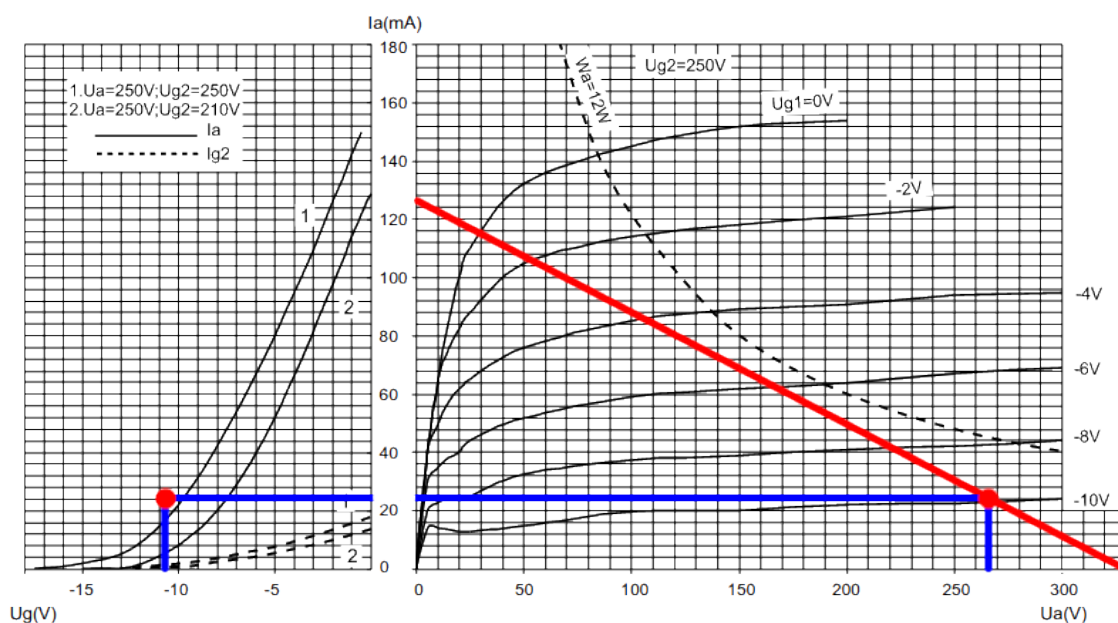


Obrázek 26: Výstupní transformátor OTRG-15W-1.

<sup>2</sup>Signály vzájemně posunutě o 180°



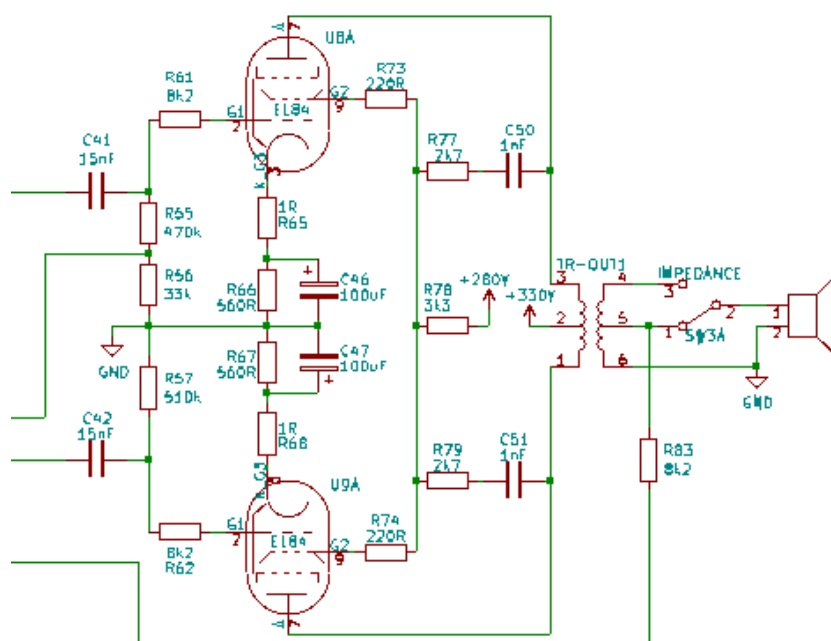
Použití výstupního transformátoru je nezbytné z důvodu rozdílných impedancí elektronky a reproduktoru. Transformátor tedy zajišťuje impedanční přizpůsobení mezi elektronkou a reproduktorem. Jeho konstrukce umožňuje využití zapojení nazývané push-pull. V tomto zapojení mají elektronky posunutý pracovní bod, těsně před ohyb převodní charakteristiky (viz obrázek 27). Každá elektronka pracuje primárně s jednou půlvlnou signálu. Elektronka pracující s kladnou půlvlnou signál „tlačí“ (push) zatímco elektronka se zápornou půlvlnou „tahá“ (pull).



**Obrázek 27:** Klidový pracovní bod EL84, zdroj: upraveno [17].

Anodové napětí je přes vinutí transformátoru přivedeno na anody. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.3 stínící mřížka je připojena na potenciál blízký anodě, přibližně 250 V. Hradící mřížka EL84 je z výroby pevně spojena s katodou. Sériové zapojení kondenzátoru a odporu mezi stínící mřížku a anodu zlepšuje vlastnosti zesilovače z hlediska linearity [20]. V katodovém obvodu elektronek je přidán měřící rezistor o hodnotě 1  $\Omega$ . Ten slouží k měření klidového proudu tekoucího pentodou. Pro správnou funkci tohoto zapojení je žádoucí, aby byl klidový proud obou elektronek stejný. Hodnota klidového proudu, je cca 20 mA. Schematické zapojení koncového stupně je na obrázku 28.

Vzhledem k tomu že klidový proud každé EL84 je 20 mA, celkem je ze zdroje odebíráno  $4 \cdot 20 = 80$  mA. Maximální možný proud dodaný transformátorem je 75 mA a tak je transformátor mírně přetížený.



Obrázek 28: Schematické zapojení koncového stupně.

## 9 Návrh desek plošných spojů (DPS)

V úvodu této části zmíním, že s postupným oživováním jednotlivých bloků docházelo k úpravám zapojení. Tudíž DPS v příloze A, které jsem navrhl, zcela neodpovídají finálnímu zapojení.

Protože pracujeme s napětím až 300 V, je nutné dostatečné nastavení izolačních mezer na plošném spoji (pro 300 V alespoň 1,5 mm). Zesilovač tvoří celkem čtyři DPS (zdroj, předzesilovač, koncový stupeň levý kanál, koncový stupeň pravý kanál). Všechny DPS v sobě mají montážní díry na uchycení pomocí distančních sloupků k chassis.

### 9.1 Zdroj

DPS pro zdroj je společná pro předzesilovač i koncový stupeň. Je zde volena šířka cesty 5 mm a šířka izolační mezery 2 mm. Značná část plochy DPS je zaplněna elektrolytickými filtračními kondenzátory a pojistkovými pouzdry.

### 9.2 Předzesilovač

DPS pro předzesilovač je navržena s určitým kompromisem mezi designem (rozmístění elektronek a potenciometrů), a co možná nejnižším pronikáním brumu. Snažil jsem se vyvarovat zbytečně dlouhému vedení signálu. Vstupní signály levého a pravého kanálu procházejí předzesilovačem paralelně, to znamená, že každý projde jednou polovinou NuTube a všech ECC82/83. V mnou použitém programu KiCad není nadefinované pouzdro pro NuTube, to jsem si musel vytvořit sám.

### 9.3 Koncové DPS

Obě DPS pro koncové stupně mají zrcadlené rozložení elektronek, opět z důvodu designu. Šířka izolační mezery je stejná jako u zdroje. V KiCadu jsou sice nadefinována pouzdra pro EL84, nicméně jsem je zde mírně modifikoval z důvodu uvolnění prostoru.

## 10 Doplnkové obvody/prvky

### 10.1 Balance

Potenciometr balance slouží k případnému vyvážení hlasitostí levého a pravého kanálu. Zapojení je převzato z [21, s. 82, obr. 63].

### 10.2 Omezení síťového brumu

Elektronky jsou žhaveny střídavým napětím o síťové frekvenci 50 Hz. Vlivem indukce hrozí, že se tento brum projeví na výstupu zesilovače. To lze do jisté míry eliminovat tak, že se na žhavicí vinutí připojí trimr s uzemněným jezdcem. Poloha jezdce se nastaví, když je zesilovač v provozu a brum je nejmenší.

Dále je nutno dodržovat zásady správného zemnění [18, s. 26].

### 10.3 Boost

Přepínač boost slouží k zvýraznění basových frekvencí, při nižších hlasitostech. Kompenzuje se tak nedokonalost lidského ucha.

### 10.4 Power, Standby, Impedance

Vypínač power připíná síťové napětí k síťovým transformátorům. Začínají se tak žhavit katody elektronek a pomalu se uvádí do provozu NuTube<sup>3</sup>.

Standby připíná anodové napětí všem elektronkám pro předzesilovač a koncový stupeň. Zapnutí tohoto vypínače je vhodné po nažhavení katod elektronek (cca 1 minuta po zapnutí).

K zesilovači lze připojit reproduktory s impedancí 4  $\Omega$  nebo 8  $\Omega$ . Přepínač impedance slouží k připojení odpovídajících vinutí výstupních transformátorů na výstupní svorky.

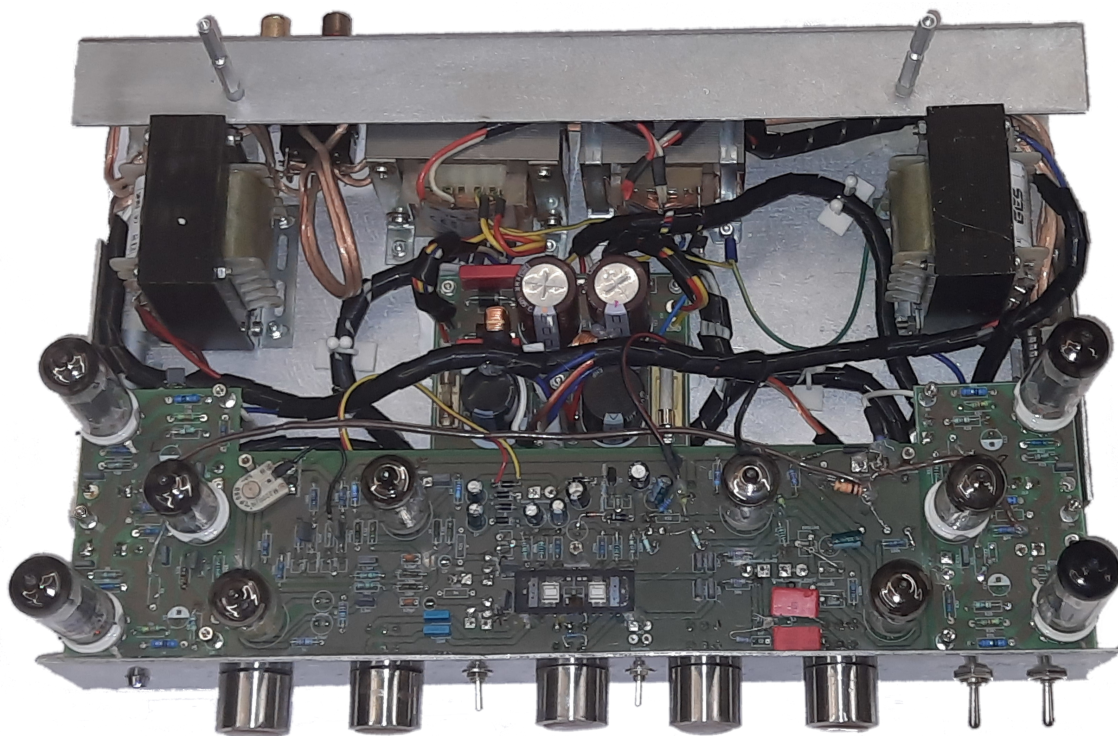
---

<sup>3</sup>Pomalou, protože kondenzátor filtrující anodové napětí je nabíjen malým proudem přes odpor. A tak je NuTube připravena k reprodukci za cca 1 minutu.

## 11 Chassis

Chassis má v zesilovači dvojí úlohu. Hlavní úloha je praktická. Na chassis jsou uchyceny všechny části zesilovače (DPS, transformátory, přepínače, vstupní konektory a indikační led). Chassis také brání pronikání vnějšího rušení. Při rozmístění DPS a transformátorů je snaha o minimalizaci pronikání síťového brumu. Z tohoto důvodu jsou síťové a výstupní transformátory vzájemně kolmé [22, s. 39, obr: 1.22], tak jak je tomu na obrázku 29.

Sekundární úloha je design. Vzhledem k tomu, že první dojem získáme již při pohledu na zesilovač, musí působit dobře i vizuálně. Z tohoto důvodu jsem kombinoval dřevo a leštěný kov. Hliníkový „U“ profil tvoří spodní část chassis. Z přední strany „U“ profilu jsou uchyceny potenciometry a přepínače, ke spodní straně jsou přišroubovány DPS a transformátory. Vrchní část tvoří lakovaná dřevěná překližka, přes DPS předzesilovače a koncových stupňů, nerezový „L“ profil přes transformátory a zdroj. Boky jsou z lakovaného borovicového prkna. Na zadní straně chassis je v horní části větrací mřížka a v dolní části vstupní a reproduktorové konektory.

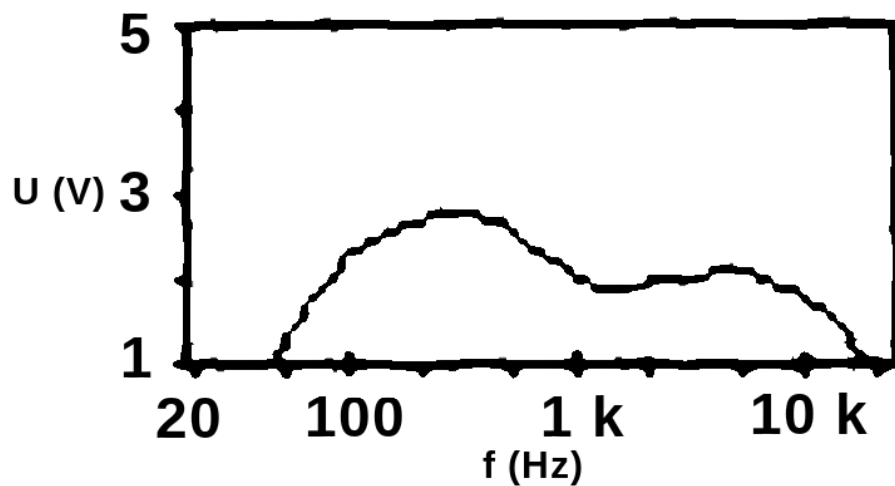


Obrázek 29: Chassis.

## 12 Měření kmitočtové charakteristiky

Pro změření kmitočtové charakteristiky byly využity přístroje NTI Audio MR-2 Minirator a NTI Audio ML1 Minilyzer.

Zesilovač je zatížen odporovou zátěží  $4 \Omega$ , a vybuzen na výkon 1 W. Měření probíhá v třetinooktávním pásmu kmitočtů. Naměřený graf kmitočtové charakteristiky je zobrazen na obrázku 30. Pro oba kanály zesilovače je frekvenční průběh stejný.



Obrázek 30: Kmitočtová charakteristika zesilovače.







## Závěr

Cílem první části práce bylo provést rozbor vakuových prvků používaných v audiotechnice. Pro lepší pochopení vakuových prvků byl uveden princip funkce elektronek, ze kterého jsme následně vycházeli při jejich detailnější analýze. Byla uvedena provedení a typy elektronek, které se v audiotechnice běžně využívají. Následně jsme se věnovali běžně výrobci udávaným parametrům elektronek, kde jsme přiblížili jejich vliv na vlastnosti zesilovače. Z důvodu teoretické přípravy na druhou část práce, jsem do práce zařadil kapitolu, kde byl popsán návrh základního zapojení elektronky ve třídě A. V závěru první části jsme se zaměřili na moderní vakuové prvky. Kromě uvedení přehledu modifikací již známých a používaných typů, jsme si představili moderní elektronku NuTube.

V druhé části práce byl popsán návrh a realizace HiFi zesilovače vakuovými prvky. Nejdříve byly schematicky popsány jednotlivé bloky a jejich úloha v zesilovači. Následně je popsán návrh DPS a chassis. Na závěr je proměřena kmitočtová charakteristika zesilovače.

V zesilovači je experimentálně použita i moderní elektronka NuTube. Jedná se o jednoduché zapojení, které má své nedostatky. Nicméně použití NuTube v HiFi technice by po optimalizaci zapojení možné bylo.

Výstupem práce je zesilovač využívající ke své činnosti vakuové prvky na obrázku 31. Bohužel nelze zesilovač označovat jako HiFi. Při měření zesilovače bylo zjištěno, že má poměrně velké zkreslení (cca 4 %). Kmitočtová charakteristika rovněž nedosahuje parametrů moderních HiFi zesilovačů. Již s postupným ožíváním zesilovače jsem zjišťoval, že některá použitá zapojení nejsou zvolena zcela vhodně. Díky bakalářské práci, jsem získal nové vědomosti a především zkušenosti týkající dané problematiky. Pokud bych se návrhem HiFi zesilovače zabýval v budoucnu, určitě bych využil jiné zapojení pro frekvenční korekce. Také bych volil zapojení koncových pentod v ultralinearním režimu [21, s. 23].



**Obrázek 31:** Zesilovač využívající vakuové prvky.



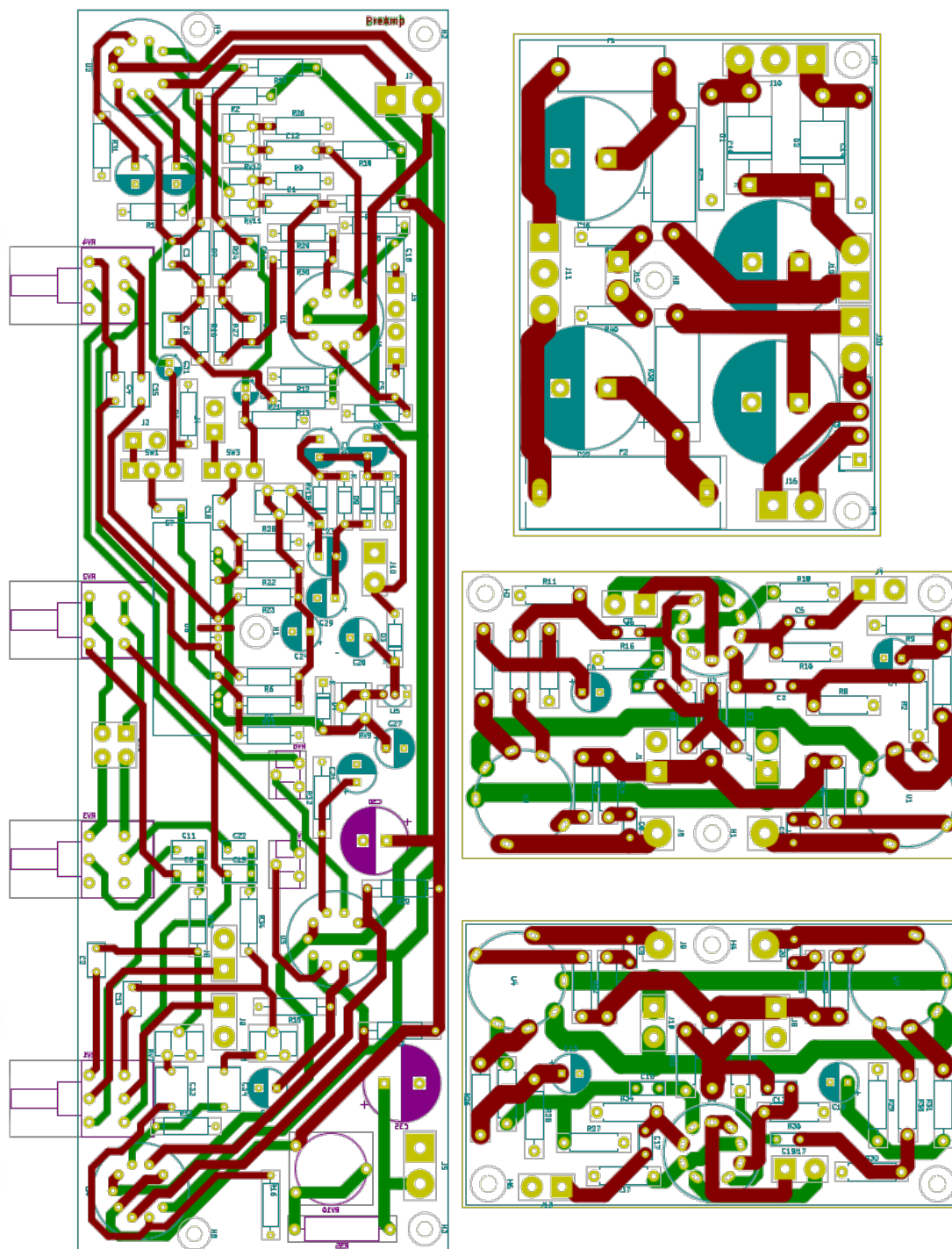
## Použitá literatura

- [1] Proč elektrony. *Horn Studio* [online]. [cit 4.5.2022]. Dostupné z: <http://www.hornstudio.cz/proc-elektronky/>
- [2] Manley STINGRAY® II. *ALTEI* [online]. [cit 17.5.2022]. Dostupné z: <https://www.altei.cz/altei-shop/manley-stingray/>
- [3] TRŮNEČEK, Jiří. *Radiotechnika v teorii a praxi*. Praha: PRÁCE, 1963. ISBN 24-005-63.
- [4] VLACH, Jaroslav. *LAMPÁRNA aneb Co to zkusit s elektronkami?*. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-091-1
- [5] REICHL, Jaroslav. Termoelektrické články. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2.3.2022]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/909-termoelektricke-clanky>
- [6] PÉK, Jozef. Jak funguje magické oko [online]. [cit. 12.4.2022]. Dostupné z: <http://pjenicek.sweb.cz/radio/navodyj1/mgoko1.htm>
- [7] DATASHEET ECC82. *JJ Electronic* [online]. [cit. 18-3-2022]. Dostupné z: [https://www.jj-electronic.com/images/stories/product/preamplifying\\_tubes/pdf/ecc82.pdf](https://www.jj-electronic.com/images/stories/product/preamplifying_tubes/pdf/ecc82.pdf)
- [8] The Vacuum Tube Plate Cheat Sheet. *FUZZ audio* [online]. [cit 20.3.2022]. Dostupné z: <https://fuzzaudio.com/vacuum-tubes-plate-cheat-sheet-fuzz-audio>
- [9] ECC83 - Gold Pins. *Electro-Harmonix* [online]. [cit. 7.4.2022]. Dostupné z: <https://shop.ehx.com/catalog/items/12ax7ehg-1.jpg>
- [10] Gallery. *KORG* [online]. [cit. 18.5.2022]. Dostupné z: <https://korgnutube.com/en/gallery/>
- [11] NuTube 6P1. *KORG* [online]. c2022 [cit. 7.4.2022]. Dostupné z: <https://korgnutube.com/wp-content/uploads/images/omote.png>
- [12] KORG INC and Noritake Co., Limited Release Innovative Vacuum Tube: the Nutube. *KORG* [online]. 22. 01. 2015. [cit. 7.4.2022]. Dostupné z: <https://www.korg.com/hken/news/2015/012212/>

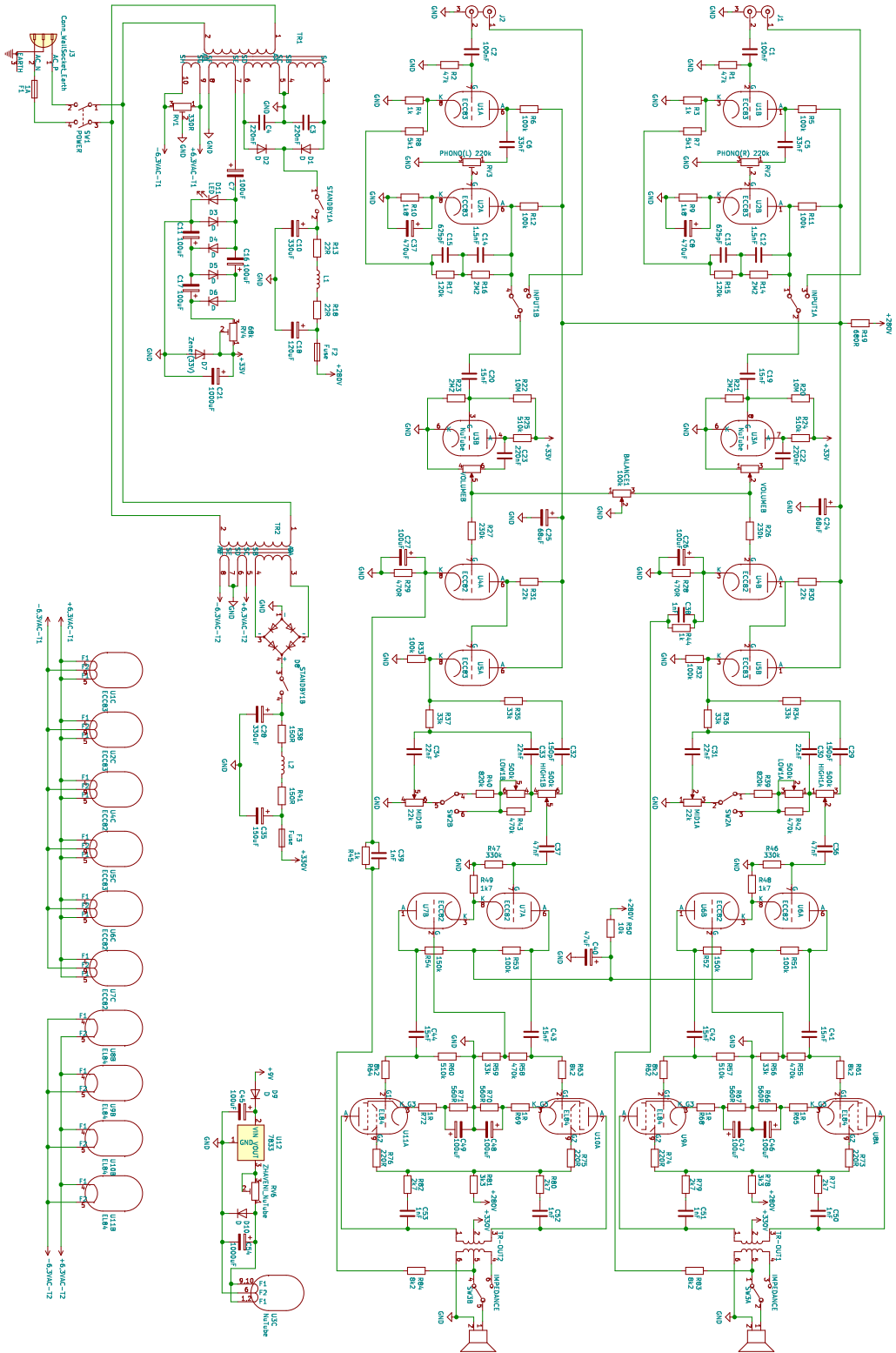
- [13] DATASHEET Nutube 6P1. *KORG* [online]. [cit. 18-3-2022]. Dostupné z: <https://form.k3r.jp/korg/nutubedatasheetrequest1e>
- [14] TSL 40/002 INDEL. *TME* [online]. [cit. 27.2.2022]. Dostupné z: [https://www.tme.eu/cz/en/details/tsl40\\_002/transformers-with-fastening/indel/tsl-40-002/](https://www.tme.eu/cz/en/details/tsl40_002/transformers-with-fastening/indel/tsl-40-002/)
- [15] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA . *ELEKTRONIKA součástka a obvody, principy a příklady*. 3. vyd. Praha: Grada, 2005. ISBN 978-80-247-1241-3.
- [16] TSL 40/001 INDEL. *TME* [online]. [cit. 27.2.2022]. Dostupné z: [https://www.tme.eu/cz/en/details/tsl40\\_001/transformers-with-fastening/indel/tsl-40-001/](https://www.tme.eu/cz/en/details/tsl40_001/transformers-with-fastening/indel/tsl-40-001/)
- [17] DATASHEET EL84. *JJ Electronic* [online]. [cit. 18-3-2022]. Dostupné z: [https://www.jj-electronic.com/images/stories/product/power\\_tubes/pdf/el84.pdf](https://www.jj-electronic.com/images/stories/product/power_tubes/pdf/el84.pdf)
- [18] KOTISA, Zdeněk. *NF zesilovače – 1. díl Předzesilovače*. Praha: BEN – technická literatura, 2001. ISBN 80-7300-030-X.
- [19] *Three ECC83-Based Tube Phono Preamplifier Circuits* [online]. EEWeb. 12.1. 2012. [cit. 2.3.2022]. Dostupné z: <https://www.eeweb.com/three-ecc83-based-tube-phono-preamplifier-circuits/>
- [20] JENÍČEK, Petr. 15W stereo Hi-Fi zesilňovač s elektrónkami EL84. *Elektrónkové zesilňovače pre začiatovníkov* [online]. [cit. 7.4.2022]. Dostupné z: <http://tubeamp.wz.cz/el84pp15w.php>
- [21] HYAN, Jaroslav T. *Zesilovače pro věrnou reprodukci*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960. ISBN 05-31.
- [22] JONES Morgan. *Bulding Valve Amplifiers*. Oxford: Newnes, 2004. ISBN 0-7506-5695-6.

## Přílohy

## A Desky plošných spojů



# B Schematické zapojení



## C Fotografie

