



**Fakulta Elektrotechnická**

**Katedra radioelektroniky**

**Diplomová práce**

# **Kytarový zesilovač s digitálním řízením**

**Jan Hrubý**

**Studijní program:**

**Audiovizuální technika a zpracování signálů**

**Vedoucí práce:**

**doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka**

**Praha, 2024**



**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 23. května 2024

Jan Hrubý





## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hrubý** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **492220**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**  
Specializace: **Audiovizuální technika a zpracování signálů**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Kytarový zesilovač s digitálním řízením**

Název diplomové práce anglicky:

**Guitar Amplifier with Digital Control**

Pokyny pro vypracování:

Provedte rešerši kytarových zesilovačů, přičemž se zaměřte na možnosti jeho řízení, jako je nastavení pracovních bodů, zesílení, omezení/limitace. Na základě rešerše navrhnete vlastní zapojení zesilovače s elektronkami min. v koncovém stupni včetně návrhu DPS. Zjistěte do jaké míry lze řídit parametry konkrétního zapojení zesilovače a výsledky ověřte jak simulací, tak měřeními na funkčním vzorku, který pro tento účel sestavte. Pro řízení vyberte takové akční členy zapojení, které lze ovládat digitálně a navrhnete modul procesorové jednotky, která bude vhodná pro jejich řízení. Nakonec navrhnete a implementujete ovládací SW a jeho funkčnost ověřte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Dailey, Denton J. (2011). Electronics for Guitarists. Springer. ISBN 9781441995360.
- [2] Boehnlein, John (1998). The High Performance Marshall Handbook: A Guide to Great Marshall Amplifier Sounds. Guitar History Series. Vol. 6. Bold Strummer Ltd. p. 37. ISBN 0-933224-80-X.
- [3] VLACH, Jaroslav. LAMPÁRNA aneb Co to zkusit s elektronkami?. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-091-1

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka katedra teorie obvodů FEL**

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

Datum zadání diplomové práce: **03.02.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce: **21.09.2025**

\_\_\_\_\_  
doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Stanislav Víttek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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



### **Poděkování:**

Děkuji vedoucímu práce doc. Dr. Ing. Jiřímu Hospodkovi za vedení mé práce. Dále chci poděkovat Jiřímu Maškovi za zprostředkování výroby desek plošných spojů. Také děkuji za možnost využití měřících přístrojů v laboratoři FEL.

Jan Hrubý



## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem kytarového zesilovače s digitálním řízením. Nejprve je provedena rešerše základních zapojení a vlastností zesilovacích stupňů. Následně je představena motivace pro použití digitálního řízení v kytarovém zesilovači. Hlavní část práce se věnuje samotnému návrhu kytarového zesilovače, včetně návrhu desek plošných spojů (DPS). Přenos bloku frekvenčních korekcí je řízen digitálně, stejně jako zesílení neinvertujícího zapojení operačního zesilovače a poloha pracovního bodu elektronky. Na závěr jsou zvolená zapojení simulována a ověřena měřením na reálném vzorku.

### **Klíčová slova:**

Kytarový zesilovač, Digitální řízení, Zesilovací stupně, Audio analýza, Simulace a měření

## **Abstract**

This thesis focuses on the design of a guitar amplifier with digital control. First, a review of the basic configurations and properties of amplification stages is conducted. Next, the motivation for a digitally controlled guitar amplifier is presented. The main part of the work involves the design of the guitar amplifier, including the design of the printed circuit board (PCB). The transfer of the frequency correction block is digitally controlled, as well as the gain of the non-inverting operational amplifier circuit and the position of the tube's operating point. Finally, the selected configurations are simulated and subsequently verified by measurements on a real sample.

### **Keywords:**

Guitar amplifier, Digital control, Amplification stages, Audio analysis, Simulation and measurement

## Obsah

<b>I</b>	<b>Kytarové zesilovače</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Tranzistory x Elektronky</b>	<b>4</b>
1.1	Tranzistorové zesilovače . . . . .	4
1.2	Elektronkové zesilovače . . . . .	5
1.2.1	Typy elektronek . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Parametry zesilovacího stupně</b>	<b>7</b>
2.1	Napětové zesílení . . . . .	7
2.2	Zkreslení/ limitace . . . . .	8
2.3	Pracovní bod . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Třídy zesilovacích stupňů</b>	<b>9</b>
3.1	Třída A . . . . .	9
3.2	Třída B . . . . .	10
3.3	Třída AB . . . . .	10
3.4	Ostatní třídy . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Výkonový zesilovač</b>	<b>12</b>
4.1	Frekvenční korekce . . . . .	12
4.2	Efektivní smyčka . . . . .	12
4.3	Koncový stupeň . . . . .	13
4.3.1	Fázový invertor . . . . .	14
4.4	Napájecí zdroj . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Digitální řízení</b>	<b>15</b>
5.1	Digitální potenciometr a rheostat . . . . .	16
5.2	Analogové přepínače, Relé . . . . .	17
5.3	Analogově-digitální převodník . . . . .	17
5.4	Digitální zpracování signálu . . . . .	18
<b>II</b>	<b>Návrh zesilovače</b>	<b>19</b>

<b>6</b>	<b>Obvodové řešení</b>	<b>19</b>
6.1	Návrh vstupního stupně . . . . .	19
6.2	Návrh frekvenčních korekcí . . . . .	20
6.3	Návrh digitálně řízeného stupně . . . . .	20
6.4	Návrh fázového invertoru . . . . .	21
6.5	Návrh výkonového stupně . . . . .	21
6.6	Návrh zdroje napájecích napětí . . . . .	22
6.7	Návrh řídicí jednotky . . . . .	24
<b>7</b>	<b>Digitální řízení</b>	<b>24</b>
7.1	Uživatelské rozhraní . . . . .	25
7.2	Konfigurace I2C . . . . .	26
7.3	Řídicí program . . . . .	26
<b>8</b>	<b>Návrh DPS</b>	<b>29</b>
8.1	DPS zdroje . . . . .	29
8.2	DPS řídicí jednotky . . . . .	29
8.3	DPS předzesilovače + fázového invertoru . . . . .	29
8.4	DPS koncového stupně . . . . .	30
<b>III</b>	<b>Simulace a měření</b>	<b>31</b>
<b>9</b>	<b>Simulace digitálně řízených bloků</b>	<b>31</b>
9.1	Simulace bloku frekvenčních korekcí . . . . .	31
9.2	Simulace digitálně řízeného stupně . . . . .	32
<b>10</b>	<b>Měření parametrů</b>	<b>33</b>
10.1	Měření bloku frekvenčních korekcí . . . . .	34
10.2	Měření bloku digitálně řízeného stupně . . . . .	35
10.2.1	Měření vlivu zesílení neinvertujícího stupně s OZ, na výstupní signál	36
10.2.2	Měření vlivu hodnoty katodového rezistoru triody ECC82 na vý- stupní signál . . . . .	37
<b>11</b>	<b>Ověření funkce softwaru</b>	<b>38</b>





## Seznam obrázků

1	Integrovaný zesilovač Dual CV 1460. Zdroj: [3]	1
2	Kytarový zesilovač Marshall 1959 SLP Plexi MKII. Zdroj: [5]	2
3	Tranzistorový zesilovač se společným emitorem.	4
4	a) Neinvertující zapojení OZ; b) Invertující zapojení OZ.	5
5	Elektronkový zesilovač se společnou katodou.	5
6	Elektronka (vlevo) a tranzistor. Zdroj: [7]	7
7	Clipovací obvod.	8
8	Pracovní bod a zatěžovací přímka.	9
9	Princip zesílení zesilovače ve třídě A.	10
10	Princip zesílení zesilovače ve třídě B.	10
11	Princip zesílení zesilovače ve třídě AB.	11
12	a) Pasivní korektor Marshall [10, s. 58]; b) Aktivní korektor [16, s. 93].	13
13	a) Elektronkový zesilovač ve třídě AB; b) Tranzistorový zesilovač ve třídě AB.	14
14	a) Zdroj symetrického napětí; b) Zdroj napětí.	15
15	Principiální zapojení digitálního potenciometru. Zdroj: [17]	16
16	Blokové schéma analogového přepínače. Zdroj: [19]	17
17	Blokové schéma digitálně řízeného zesilovače.	19
18	Digitálně řízený stupeň a fázový invertor s rozdělenou zátěží.	22
19	Výstupní transformátor TRONIC.	23
20	Raspberry Pi Pico H, Zdroj: [22]	25
21	Blokové znázornění běhu programu.	27
22	DPS koncového stupně.	30
23	Grafický editor elektrických obvodů GEEC. Dostupné z [24]	31
24	Simulace frekvenční charakteristiky elektronkového zpětnovazebního korektoru.	32
25	Simulace časových průběhů signálů pro krajní nastavení zesílení stupně s OZ.	32
26	Simulace výstupních signálů fázového invertoru pro krajní nastavení hodnoty katodového odporu.	33
27	Blokové zapojení, pro měření parametrů.	34
28	Měřená přenosová charakteristika zesilovače, pro souhlasné nastavení jezdců.	34

---

29	Měřená přenosová charakteristika zesilovače, pro opačné nastavení jezdců. . .	35
30	Časový průběh a spektrum signálu při neutrálním nastavení řízených prvků.	36
31	Hodnota celkového harmonického zkreslení. . . . .	36
32	Časový průběh a spektrum, při nastavení minimální hodnoty zesílení stupně s OZ. . . . .	36
33	Časový průběh a spektrum, při nastavení maximální hodnoty zesílení stupně s OZ. . . . .	37
34	Časový průběh a spektrum, při nastavení minimální možné hodnoty kato- dového odporu. . . . .	38
35	Časový průběh a spektrum, při nastavení maximální možné hodnoty kato- dového odporu. . . . .	39
36	Kytarový zesilovač s digitálním řízením. . . . .	42



## Úvod

V praxi se lze setkat s velmi širokou škálou zesilovačů signálu. Při návrhu zesilovače je třeba zohlednit, v jaké aplikaci bude zesilovač využíván. Jiné nároky budeme mít pro zesilovač vysokofrekvenčního signálu, a jiné pro zesilovač nízkých kmitočtů. V naprosté většině aplikací požadujeme od zesilovače prosté zesílení, případně frekvenční doladění, již zpracovaného linkového signálu na takovou úroveň, aby došlo k dostatečnému vybudení reproduktorů. V ideálním případě by takovýto zesilovač neměl žádné zkreslení signálu a jeho vlastnosti by byly v čase neměnné. V roce 1966 bylo normou DIN 45 500 specifikováno, jaké parametry musí splňovat zesilovače, které poskytují vysokou věrnost reprodukce, neboli *Hi-Fi* (High - Fidelity) kvalitu poslechu. Aby bylo možné považovat zesilovač za Hi-Fi, musí dodávat výkon minimálně 6 W do každého kanálu, přičemž zkreslení nesmí být větší než 1 % v pásmu 40 Hz-12,5 kHz<sup>1</sup>. „*Přeslechy mezi kanály by měly dosahovat u výkonových stereofonních zesilovačů 40 dB*“ [1, s. 22]. Vzhledem k tomu, že v oblasti techniky byl od 70. let 20. století učiněn významný pokrok, jsou tyto požadavky u běžně vyráběných zesilovačů s rezervou splněny. Z tohoto důvodu se na počátku tisíciletí začal objevovat pojem *High-End audio*. Tento pojem není přesně definován. Obecně High-End zařízení příliš nezvyšuje nároky na kvalitu audio reprodukce oproti Hi-Fi, ale především klade důraz na precizní zpracování, využití kvalitních komponentů a nevšední design audio zařízení [2].

Mnoho zesilovačů je navrženo tak, aby dokázaly zpracovávat více než jen linkové signály, a naopak umožňovaly připojení sluchátek, či více párů reproduktorů. Proto bývají do zesilovačů integrovány například gramofonové předzesilovače s RIAA korekcí, mikrofonní předzesilovače [1, s. 6], či sluchátkové zesilovače pro přímé připojení sluchátek. Na obrázku 1 je integrovaný zesilovač *Dual CV 1460*



**Obrázek 1:** Integrovaný zesilovač Dual CV 1460. Zdroj: [3]

<sup>1</sup>U koncových zesilovačů nesmí zkreslení překročit 0,7 % [1, s. 15]

Kytarové zesilovače jsou optimalizovány především ke zpracování signálu ze snímače kytary. Úroveň signálu z kytarového snímače dosahuje maximálně několik desetín voltů. Je proto třeba, aby předzesilovač poskytoval poněkud větší zesílení oproti běžným předzesilovačům. Poměrně zásadním rozdílem je, že na kytarový zesilovač nemáme příliš velké nároky, co se týká věrnosti reprodukce. Například zkreslení signálu je v této oblasti často vyhledávaná vlastnost. V praxi se lze setkat s tranzistorovými či elektronkovými zesilovači, případně hybridními, které jsou kombinací obou. Zajímavým fenoménem poslední doby jsou i takzvané modelingové zesilovače. Jedná se v podstatě o počítač, který pomocí signálového procesoru umožňuje simulaci v podstatě libovolného kytarového zvuku [4]. Na obrázku 2 je jeden z komerčně nejúspěšnějších zesilovačů vyráběných firmou Marshall.



**Obrázek 2:** Kytarový zesilovač Marshall 1959 SLP Plexi MKII. Zdroj: [5]

Dle současných trendů je patrné, že pro kytaristy klíčová všestranost, variabilita a určitá pohodlnost při nastavení zesilovače. Je žádoucí, aby bylo možné nastavit parametry zesilovače tak, aby výstupní signál odpovídal představě a požadavkům uživatele. Nabízí se tak využití digitálního řízení. Pokud bude možné parametry zesilovače řídit digitálně, je potom otázkou vhodného softwaru jakým způsobem bude zesilovač reagovat na vstupy uživatele, a jakým způsobem bude zesilovač konfigurován.



## Část I

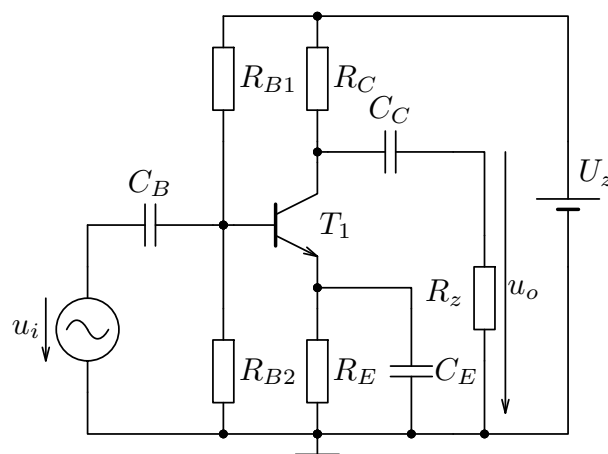
# Kytarové zesilovače

V této kapitole se budu věnovat rešérši zesilovačů a jejich zapojení používaných nejen v kytarových zesilovačích. Budou zde uvedeny vlastnosti zesilovacích stupňů. Dále bude představena motivace digitálního řízení zesilovače.

## 1 Tranzistory x Elektronky

Na úvod zde cituji Dr. Trůnečka [6, s. 109] „*Poněvadž se na výrobních postupech tranzistorů usilovně pracuje, lze předpokládat, (...) že skutečně tranzistory nahradí elektronky na mnoha místech, i když ne všude.*“ S odstupem více než 60 let lze říci, že dnes již opravdu lze elektronky tranzistory plně nahradit ve všech aplikacích. Ovšem jsou oblasti, kde jsou elektronky díky svým vlastnostem stále využívány. Tou je i oblast kytarových zesilovačů. Možným důvodem, proč tomu tak je, může být charakteristické zkreslení elektronky. Elektronkový zesilovač má ve spektrální oblasti výraznější zastoupení sudých harmonických. Při přebuzení elektronky nedochází k náhlému oříznutí signálu, jako v případě tranzistorových zesilovačů, ale signál je postupně deformován [8].

### 1.1 Tranzistorové zesilovače

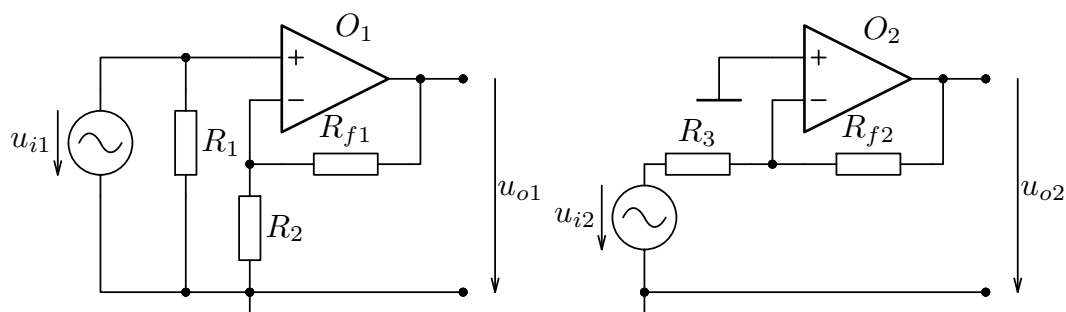


**Obrázek 3:** Tranzistorový zesilovač se společným emitorem.

Tranzistor je v dnešní době využíván v nezměrném množství aplikací. Po roce 1947, kdy byl objeven tranzistorový jev, na kterém je založen princip bipolárních tranzistorů,

zaznamenaly tranzistory obrovský rozmach a postupně tak začaly vytlačovat elektronky. Základní rozdělení tranzistorů je na bipolární, unipolární (MOSFET, MESFET, JFET) a kombinované (IGBT) [9, s. 99]. Na obrázku 3 je znázorněno jedno z typických zapojení bipolárního tranzistoru, jako zesilovač se společným emitorem. Proudem tekoucím do báze tranzistoru je řízen proud tekoucí emitorem, který je  $\beta$  krát větší.  $\beta$  je proudový zesilovací činitel tranzistoru.

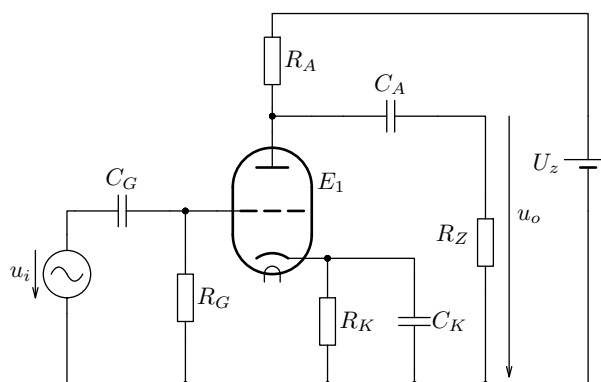
S dalším vývojem polovodičů se v audiotechnice, pro svou jednoduchost a komplexnost, začala využívat zapojení operačního zesilovače (OZ). Za standardní lze považovat invertující, či neinvertující zapojení OZ schématicky znázorněno na obrázku 4. Ve většině případů jsou operační zesilovače navrhovány pro symetrické napájení.



Obrázek 4: a) Neinvertující zapojení OZ; b) Invertující zapojení OZ.

## 1.2 Elektronkové zesilovače

Elektronka je zpravidla skleněná baňka, uvnitř které je vytvořeno vakuum, ve kterém jsou umístěné elektrody. Patentována byla v roce 1907 pod názvem *audion* [10, s. 12]. Na obrázku 5 je znázorněno základní zapojení elektronky jako zesilovače se společnou katodou. Principem tohoto zapojení je, že změna velikosti anodového proudu je řízena velikostí na-



Obrázek 5: Elektronkový zesilovač se společnou katodou.



pětí mezi mřížkou a katodou. Čím je mřížkové napětí vůči katodovému zápornější, tím je proud tekoucí elektronkou nižší. Mřížka je přes rezistor  $R_G$  uzemněna. Na rezistoru  $R_K$  je úbytek napětí dán velikostí rezistoru a proudem elektronkou. Pro střídavé signály je katoda vlivem kondenzátoru  $C_K$  uzemněna. Z pohledu katody je tedy napětí na mřížce záporné a signálovým napětím lze tak proud elektronkou snižovat, či zvyšovat. Tím je měněn i úbytek na anodovém rezistoru  $R_A$ , tedy z anody lze odebírat signálové napětí.

### 1.2.1 Typy elektronek

**Trioda** Elektronku typu trioda tvoří celkem 3 elektrody. Anoda, katoda, řídicí mřížka. Jedná se o nejjednodušší typ elektronek, kterou lze využít pro zesílení signálu. Elektrony jsou vytrhávány z katody a elektronkou tak protéká elektrický proud. Velikost tohoto proudu lze regulovat mřížkovým napětím. Mezi běžně využívané elektrony v oblasti kytarových zesilovačů patří ECC83, ECC82, ECC85. Využívány jsou zejména v předzesilovačích, či fázových invertorech. Ale vyrábí se například výkonová trioda 300B, určená pro koncové stupně zesilovače ve třídě A. [6, s. 91]

**Tetroda** Tetrodu získáme přidáním další mřížky k triodě, mezi anodu a řídicí mřížku. Tato mřížka bývá označována jako stínící. Úkolem této mřížky je zrychlovat elektrony směrem z katody k anodě. Její napětí bývá voleno blízké k napětí na anodě. Nevýhodou tetrody je sekundární emise elektronů. Dopadající urychlené elektrony vyřadí elektrony z anody, a část z nich tak dopadne i na stínící mřížku. Tento nedostatek řeší svazková tetroda, nebo pentoda. Využívaná tetroda je například elektronka 6L6. [6, s. 95]

**Pentoda** Pentoda vznikne přidáním další *řídící* mřížky, mezi anodu a stínící mřížku. Bývá spojena přímo s katodou, či je na ní přivedeno záporné napětí vůči katodě. Její elektrické pole je tedy záporné a tak jsou sekundární elektrony „zatlačeny“ zpět na anodu. Mezi hojně využívané pentody patří elektrony EL34, a KT88. [6, s. 96]

Při objektivním porovnání elektronek a tranzistorů je třeba říci, že hlavní nevýhodou elektronek je nutnost žhavení katod. Tím klesá jejich účinnost<sup>2</sup>. Rovněž nezanedbatelnou výhodou tranzistorů jsou jejich malé rozměry, jak je patrné z obrázku 6, a také mechanická odolnost. Pokud dojde k porušení vakua uvnitř baňky, je elektronka zničena.

<sup>2</sup>Žhavicí obvody běžně dosahují spotřeby v jednotkách Wattů (ECC83 1,89 W; EL34 9,45 W)



Obrázek 6: Elektronka (vlevo) a tranzistor. Zdroj: [7]

## 2 Parametry zesilovacího stupně

Přestože hlavním parametrem zesilovacího stupně je zesílení signálu, je potřeba zohledňovat i další parametry, jako zkreslení a pracovní bod [11, s. 55].

### 2.1 Napěťové zesílení

Napěťové zesílení vyjadřuje, kolikrát je hodnota výstupního napětí  $u_{out}$  vyšší, než je hodnota řídicího napětí (vstupního napětí)  $u_{in}$ . Napěťové zesílení je definováno poměrem

$$A_u = \frac{u_{out}}{u_{in}}, \quad (1)$$

Často bývá napěťové zesílení vyjádřeno v decibelech vztahem

$$A_{u(dB)} = 20 \cdot \log\left(\frac{u_{out}}{u_{in}}\right) [dB]. \quad (2)$$

Zesílení elektronkového stupně zapojeného dle schématu na obrázku 5 bychom určili pomocí vztahu

$$A_u = \frac{-S(R_a || R_z)}{R_i + (R_a || R_z)}, \quad (3)$$

kde  $S$  je strmost elektronky, a  $R_i$  je její vnitřní odpor [16, s. 46].

V případě využití zapojení operačního zesilovače jako neinvertující zesilovač (Obrázek 4a)) je zesílení dáno vztahem

$$A_u = 1 + \frac{R_{f1}}{R_2}. \quad (4)$$

Proud tekoucí do neinvertujícího vstupu operačního zesilovače lze zanedbat, a tak vstupní odpor tohoto stupně přímo odpovídá hodnotě rezistoru  $R_1$ . Zesílení invertujícího zapojení zesilovače s OZ je rovno podílu

$$A_u = -\frac{R_{f2}}{R_3}. \quad (5)$$

Znaménko minus naznačuje, že výstupní signál  $u_{o2}$  a vstupní signál  $u_{i2}$  jsou v protifázi [12, s. XI-7/40].

## 2.2 Zkreslení/ limitace

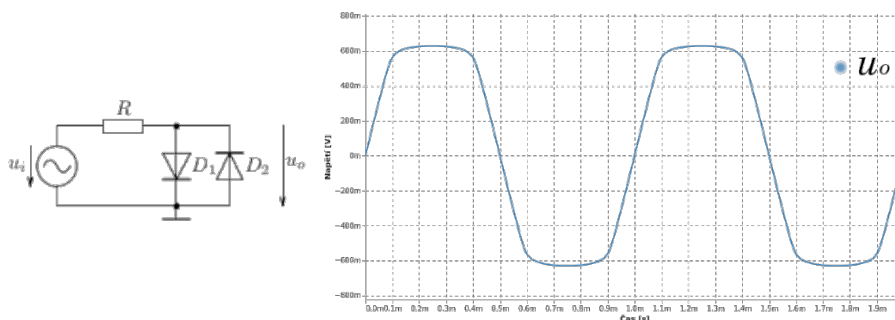
Limitace se projevuje oříznutím či zdeformováním špiček signálu (viz. obrázek 25). Jedná se tedy o významný zásah do tvaru a spektra signálu.

V oblasti kytarových zesilovačů je limitace, respektive zkreslení zesilovacího stupně v některých případech žádoucí. Oříznutím špiček je spektrum signálu obohaceno o vyšší harmonické složky. Dosáhneme tak typického „rockového“ zvuku elektrické kytary.

První z možností, jak dosáhnout zkreslení signálu, je přebuzením zesilovacího stupně. Tedy přivést na jeho vstup takový řídicí signál, který bude mimo pracovní oblast zesilovacího stupně a dojde tak k oříznutí špiček signálu. V literatuře „Electronics for Guitarists“ v kapitole věnující se kytarovému efektu *overdrive* lze vyčíst „... kytarový signál je zesílen tak, abychom dosáhli přebuzení vstupního stupně hlavního zesilovače. Samotný obvod *overdrive* nemusí nutně vytvářet žádné zkreslení. Spíše je zkreslení generováno v přední části hlavního zesilovače (překlad vlastní)“ [11, 192].

Přebuzení lze eliminovat omezením napěťové úrovně řídicího signálu, nebo změnou pracovního bodu aktivního prvku (vyšší napájecí napětí, změna klidového proudu, atd.).

Další využívanou možností zkreslení je využití „Clipovacího obvodu“. Jedním z příkladů tohoto obvodu je antiparalelní zapojení diod, jak je znázorněno na obrázku 7. Signál o vyšší, resp. nižší napěťové úrovni, než je prahové napětí diody, je oříznut. Tohoto zapojení využívají kytarové efekty *distortion* a *fuzz* [11, s. 199].

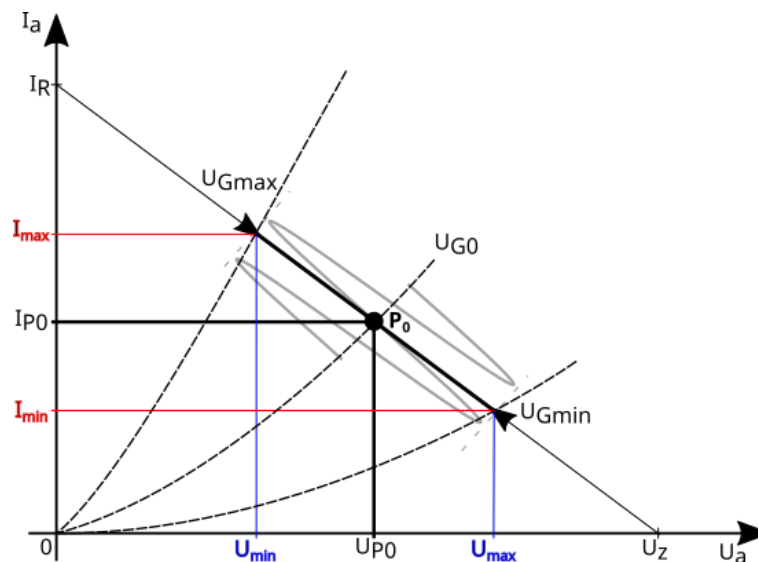


Obrázek 7: Clipovací obvod.

## 2.3 Pracovní bod

Poloha pracovního bodu na převodní charakteristice určuje, v jaké třídě zesilovací stupeň pracuje. V případě elektronek je poloha pracovního bodu dána anodovým napětím, anodovým proudem a mřížkovým napětím. Graficky lze polohu pracovního bodu nalézt s vy-

užitím zatěžovací přímky. Průsečík zatěžovací přímky a křivky konstantního mřížkového napětí vůči katodě, označuje polohu klidového pracovního bodu. Po přivedení střídavého signálového napětí na řídicí elektrodu (mřížku), začne napětí oscilovat kolem pracovního bodu. Na obrázku 8 je tato situace znázorněna body  $U_{Gmin}$  a  $U_{Gmax}$ . Změny polohy pracovního bodu lze docílit například změnou katodového rezistoru. Tím se změní hodnota napětí mezi mřížkou a anodou, a to vyvolá následnou změnu anodového proudu.



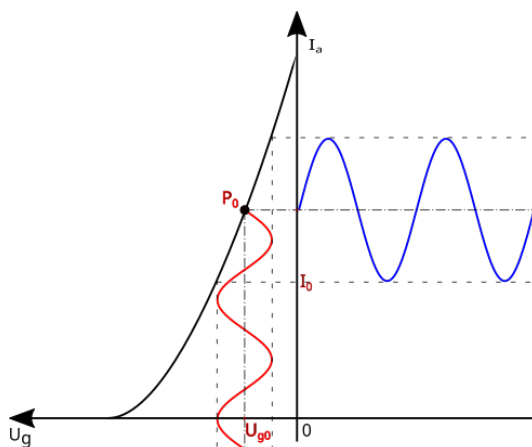
Obrázek 8: Pracovní bod a zatěžovací přímka.

### 3 Třídy zesilovacích stupňů

Třída zesilovače definuje, pro jaké hodnoty řídicího signálu nastává stav, kdy zesilující prvek nepropouští proud [6, s. 191]. V následujících odstavcích budou na obecné převodní charakteristice elektronky představeny základní třídy zesilovacích stupňů a na obrázcích pouze ilustrativně znázorněn princip jejich činnosti.

#### 3.1 Třída A

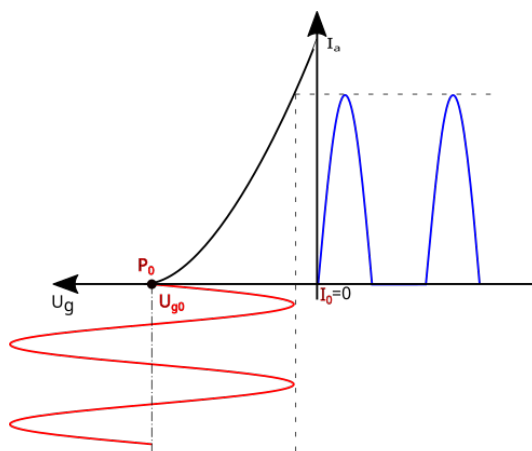
Zapojení zesilovače ve třídě A lze považovat za základní a běžně používané v mnoha aplikacích. Klidový pracovní bod je umístěn v aktivní a lineární oblasti převodní charakteristiky zesilovacího prvku (viz obrázek 9). Z tohoto vyplývá, že i když na vstup zesilovače není přiveden řídicí signál, protéká zesilovačem nenulový klidový proud. Zesilovač tak spotřebovává výkon a klesá tak jeho účinnost. V případě vhodně nastaveného pracovního bodu lze dosáhnout minimálního zkreslení.



Obrázek 9: Princip zesílení zesilovače ve třídě A.

### 3.2 Třída B

Zesilovač ve třídě B má klidový pracovní bod nastaven v oblasti, kde je klidový proud nulový. Na obrázku 10 je znázorněn princip této třídy. Je zpracována pouze polovina řídicího signálu. Z tohoto důvodu bývá využíváno tzv. push-pull zapojení. Třída B na-



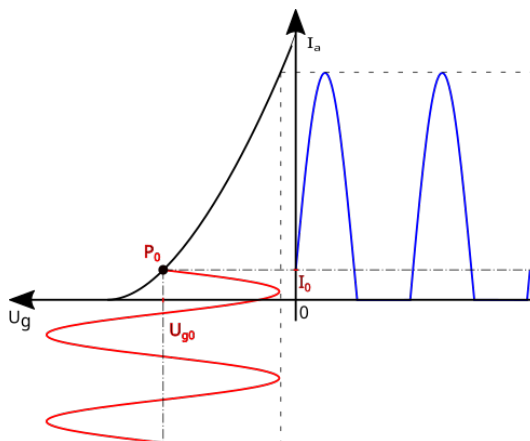
Obrázek 10: Princip zesílení zesilovače ve třídě B.

bízí lepší účinností oproti třídě A, nicméně v zapojení push-pull se projevuje přechodové zkreslení, které je způsobeno nevhodným navázáním přenosových charakteristik aktivních prvků. V audiotechnice tudíž není příliš použitelné.

### 3.3 Třída AB

Pracovní bod zesilovače ve třídě AB je nastaven před zlom přenosové charakteristiky (viz obrázek 11). Klidový proud tedy není nulový, jako ve třídě B, ale nedosahuje takové

hodnoty jako u třídy A. Toto zapojení je kompromisem mezi třídou A a B. Nabízí lepší



**Obrázek 11:** Princip zesílení zesilovače ve třídě AB.

účinnost oproti třídě A a nižší zkreslení signálu oproti třídě B, protože při vhodném nastavení klidových proudů eliminuje přechodové zkreslení [12, XVI-88/131]. V audiotechnice bývá velmi často využíváno.

### 3.4 Ostatní třídy

**Třída C :** Třída C je v audiotechnice prakticky nevyužitelná. Pracovní bod je posunut tak, aby byl tranzistor otevírán pouze špičkami půl vlny signálu. Výhodou je vysoká účinnost, vykoupená značným zkreslením signálu. Využitelné ve vysokofrekvenční výkonové technice.

**Třída D :** Zesilovač ve třídě D pracuje se signálem poněkud odlišně. Tranzistor zde pracuje jako spínač<sup>3</sup>. Vstupní audio signál je převeden na pulzy, jejichž šířka odpovídá jejich amplitudě. Vznikne tak PWM signál. Analogicky jako u třídy AB jsou použity dva tranzistory pracující v push-pull režimu. Rozdíl je v řídicím signálu. Na řídicí elektrody tranzistorů je přiveden vysokofrekvenční PWM signál, reprezentující audiosignál. Tranzistory jsou tak skokově saturovány, či zcela uzavírány. Na výstupu zesilovače je často řazen pasivní integrační členek 2. řádu. Vzhledem k tomu, že spínací frekvence PWM začínají na hodnotách řádově stovek kHz a spínané výkony dosahují dnes běžně jednotek kW, vyžaduje zesilovač přesné řízení a při návrhu je nutné respektovat pravidla pro návrh výkonové VF techniky [13].

**Třída G :** Třída G je svou podstatou totožná jako třída AB. Rozdíl je, že třída G pracuje

<sup>3</sup>Z tohoto důvodu jsou tyto zesilovače označovány jako nelineární

se skokově proměnným napájecím napětím. V důsledku toho, lze při malém buzení zesilovače, snížit napájecí napětí, a tím snížit i výkonovou ztrátu na výkonových prvcích a zvýšit tak účinnost.

Třída H : V principu se jedná o třídu G. S tím rozdílem, že napájecí napětí zde není regulováno skokově, ale spojitě [14].

## 4 Výkonový zesilovač

Výraz *výkonový zesilovač* označuje kompletní řešení zahrnující předzesilovač a koncový zesilovač [1, s. 8]. Kytarový signál zpravidla prochází několika bloky, než je možné ho reprodukovat. Kromě prostého zesílení signálu nabízí většina zesilovačů možnosti úpravy signálu (frekvenční korekce, zkreslení, apod.).

### 4.1 Frekvenční korekce

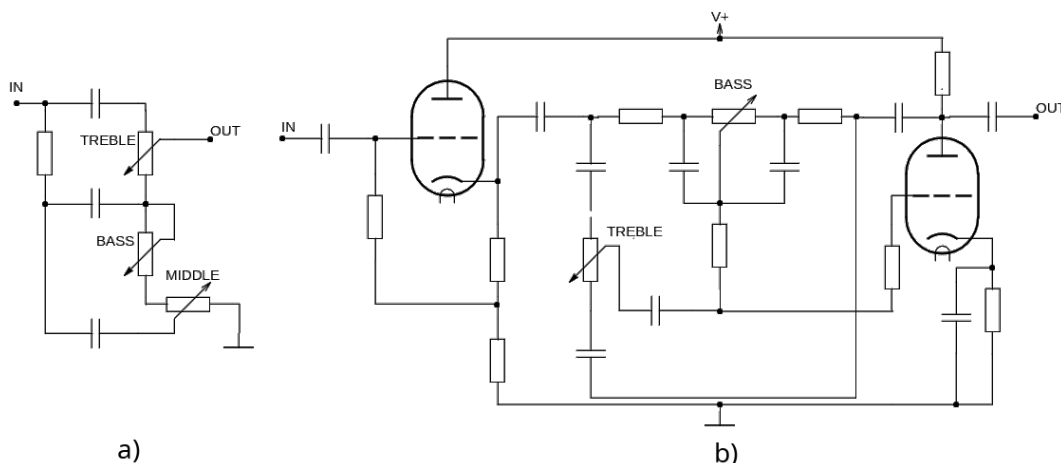
Blok frekvenčních korekcí slouží k úpravě frekvenční charakteristiky zesilovače. Důvodem, proč bývá frekvenční korektor zařazen do řetězce zesilovače je možnost okamžité úpravy signálu. Například z důvodu změny reprobexu, kytary apod. Svou roli zde hraje i vlastnost lidského sluchového systému. Lidské ucho při nízkých hladinách akustického tlaku vyžaduje zvýraznění basů (do 500 Hz) a výšek (od 4 kHz), viz křivky stejné hlasitosti.

V kytarových zesilovačích jsou ve většině případů používány pasivní frekvenční korekce. Jedná se o kombinaci RC článků s proměnnými parametry, v drtivé většině potenciometry. Typickými příklady jsou korektory Marshall či Fender viz obrázek 12a) [10, s. 58]. Vlastností pasivních korektorů je značný útlum signálu, který je třeba kompenzovat.

U aktivních korektorů je korekční člen zapojen ve zpětné vazbě aktivního členu (OZ, elektronky), tak jako na obrázku 12b). Toto přináší výhodu zjednodušení při volbě hodnot součástek a výraznou kompenzaci útlumu článku [16, s. 93].

### 4.2 Efektová smyčka

Efektová smyčka bývá velmi využívána u moderních kytarových aparátů. Jejich dělení je na sériové, či paralelní. Při využití sériové efektové smyčky, dojde k vložení efektu přímo do signálové cesty. Většinou bývá řazena mezi předzesilovačem a koncovým stupněm. Paralelní smyčka pracuje se signálem odlišně. Signál je přimícháván k hlavnímu signálu.



Obrázek 12: a) Pasivní korektor Marshall [10, s. 58]; b) Aktivní korektor [16, s. 93].

To může být výhodné například pro efekty typu delay, či reverb, kde nepožadujeme, aby byl efekt tak výrazný [15].

### 4.3 Koncový stupeň

Koncový stupeň dodává potřebný výkon do zátěže. Je nutné, aby byl na výstupu tohoto stupně signál přizpůsoben impedanci reproduktorů, která dosahuje typicky  $4\ \Omega$ ,  $8\ \Omega$ , či  $16\ \Omega$ . V praxi se lze setkat s jednočinnými či dvojčinnými koncovými stupni.

Pro jednočinný koncový stupeň lze využít jeden aktivní prvek zpravidla pracující ve třídě A. Jeho výhodou je velmi dobrá linearita, která je vykoupena nižší účinností. Je využíván v jednoduchých, málo výkonných zesilovačích [10, s. 42].

Dvojčinný koncový stupeň využívá dva aktivní prvky ve třídě AB, či B, pracující v protitaktním zapojení, často označovaném jako *push-pull* zapojení. Každý ze zesilovačích prvků zpracovává pouze kladnou, resp. zápornou polovinu signálu, lze tak dosáhnout vyššího výstupního výkonu a takto navržený koncový stupeň má i vyšší účinnost [10, s. 53].

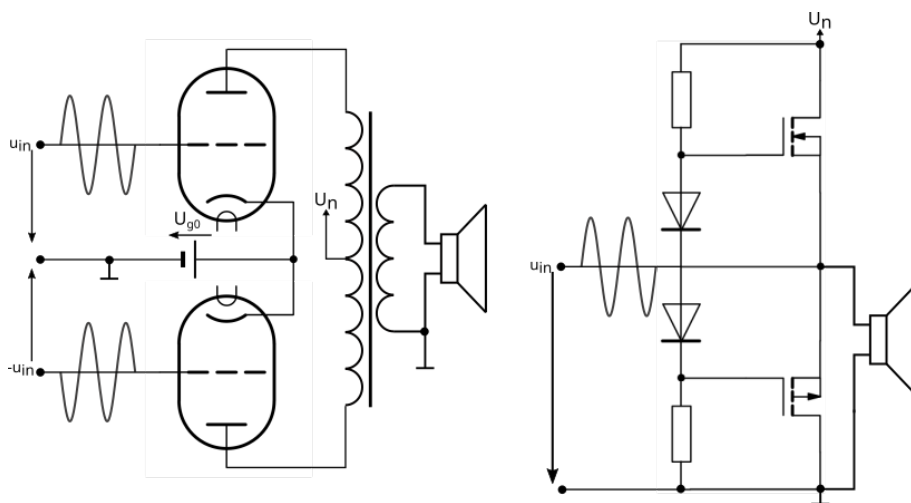
Při využití tranzistorů existují dva základní přístupy. První z nich je možnost, kdy jsou oba tranzistory stejného typu (PNP, NPN, N-kanál, či P-kanál) buzeny signály opačné fáze. Druhým přístupem je využití tzv. komplementárních tranzistorů (viz obrázek 13b). Jde o kombinaci N-kanál a P-kanál, respektive NPN a PNP tranzistorů. Výhodou je, že oba tranzistory jsou buzeny stejným signálem a odpadá tak potřeba fázového invertoru. N-kanál (NPN) zpracovává kladnou a P-kanál (PNP) zápornou půlvlnu signálu [9, s. 118].

Pokud jsou v koncovém stupni využity elektronky, viz obrázek 13a), musí být součástí koncového stupně i výstupní transformátor, navržen pro toto zapojení. Právě potřeba



výstupního transformátoru je jejich značnou nevýhodou. V současné době trh nabízí jen velmi omezené množství výstupních transformátorů a jejich cena se pohybuje v řádech tisíců korun. Elektronky jsou buzeny stejnými signály v opačné fázi.

U elektronkových koncových stupňů, osazených pentodami, bývá využíváno *ultraliniární zapojení*. Stínící mřížky elektronek jsou zapojeny na odbočky primárního vinutí výstupního transformátoru, umístěné mezi 20-45 % od středu vinutí. Toto opatření má příznivý vliv na zkreslení, ale dosažitelný výkon je snížen přibližně o 1/3, oproti běžému pentodovému zapojení [16, s. 159].



**Obrázek 13:** a) Elektronkový zesilovač ve třídě AB; b) Tranzistorový zesilovač ve třídě AB.

#### 4.3.1 Fázový invertor

Jak vyplývá z předchozího textu, pro buzení dvojitých koncových stupňů často vyžadujeme dva stejné signály opačné fáze. Z tohoto důvodu bývá v zesilovačích řazen fázový invertor, jehož výstupem jsou právě tyto signály. Obvodových řešení je celá řada viz [16, s. 129]. Liší se počtem aktivních prvků, možným napětovým zesílením, či mírou symetrie výstupních napětí. V ideálním případě by fázový invertor neměl signál zkreslovat.

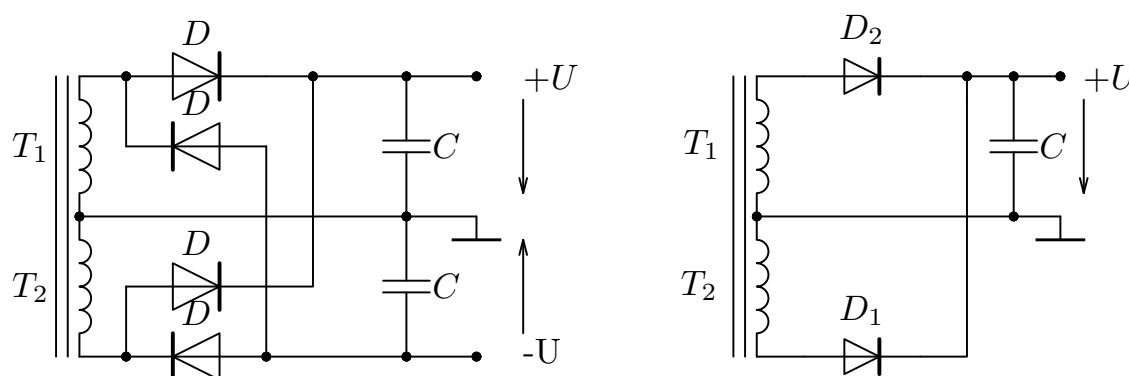
#### 4.4 Napájecí zdroj

Jednotlivé bloky zesilovače vyžadují pro svou správnou funkci různá napájecí napětí. Síťové napětí 230 V je potřeba transformovat dle požadavků zesilovače, následně usměrnit a co možná nejlépe vyfiltrovat. Zde existuje několik možností, jakým způsobem navrhnout zdroj napětí. Pro jednoduché jednočinné stupně se spokojíme s jedním napájecím napě-

tím vůči zemní síci svorce ( $U+$ , GND). Možné obvodové řešení je znázorněno na obrázku 14b). V dvojčinných stupních je výhodou využití zdroje symetrického napájecího napětí ( $U+$ , GND,  $U-$ ), zapojení na obrázku 14a).

Při návrhu zdroje pro zesilovač je třeba vzít v úvahu požadovaný výkon zesilovače a jeho účinnost a dostatečně dimenzovat parametry součástek. Rovněž budeme vyžadovat různé hodnoty napětí například pro tranzistorové, či elektronkové stupně.

Při návrhu zdroje napájecích napětí elektronkového stupně vycházíme z předepsaných hodnot výrobcem. Anodová napětí elektronek typicky dosahují řádově stovek voltů, a nesmíme opomenout napětí (typicky 6,3 V) pro žhavicí obvod katody.



Obrázek 14: a) Zdroj symetrického napětí; b) Zdroj napětí.

## 5 Digitální řízení

Ve spektru mnoha elektronických zařízení bychom dnes jen těžko hledali zařízení, jehož srdcem není řídicí jednotka, která by kontrolovala chod zařízení. Digitální řízení přináší řadu výhod, jak pro uživatele, tak pro návrháře a vývojáře.

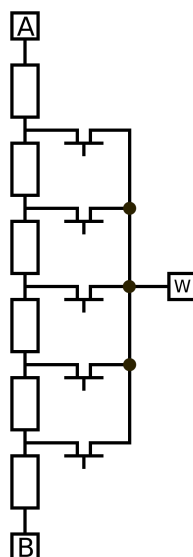
Motivací, proč se zabývat tématem digitálně řízeného zesilovače, může být možnost rychlé a přesné konfigurace zesilovače. Uživatel si například může nastavit oblíbená přednastavení a bez zásahu do obvodu zesilovače mezi nimi libovolně přepínat. Zároveň lze zesilovač opatřit senzory a monitorovat a následně vyhodnocovat činnost a stav zesilovače. To může prodloužit jeho životnost a předejít jeho poškození.

Při návrhu řídicí jednotky je vhodné si specifikovat, jak přesně by měl být zesilovač řízen. Při využití digitálních potenciometrů se pravděpodobně neobejdeme bez procesoru umožňující komunikaci přes I2C, nebo SPI. Rovněž budeme-li chtít vyhodnocovat analogové signály, bude výhodou procesor s AD převodníkem. Dále nás může limitovat počet

pinů procesoru, tedy při návrhu je dobré mít představu, kolik pinů procesoru bude potřeba pro řízení zesilovače. Co se týká nároku na výpočetní výkon procesoru, řízení zesilovače není příliš náročné, většinu času procesor jen čeká na vstup uživatele či změnu parametru zesilovače.

### 5.1 Digitální potenciometr a rheostat

Digitální potenciometr je zařízení, které na základě řídicích příkazů mění polohu jezdce potenciometru. Lze ho tedy chápat jako rezistivně digitálně analogový převodník (resistive digital-to-analog RDAC). V anglicky psané literatuře narazíme na jejich označení *digipot*. Funkce digitálního potenciometru je založena na sériovém zapojení rezistorů, ke kterým je možné adresovatelnými spínači přepínat střed potenciometru (viz obrázek 15). Nelze tedy nastavit zcela libovolnou polohu jezdce, nicméně běžně lze sehnat digipoty s 8 bit rozlišením (256 poloh), což je více než dostatečné. V porovnání s běžným potenciometrem nepodléhá digitální potenciometr opotřebení odporové dráhy, tedy nehrozí, že potenciometr začne po čase praskat či šumět. Jsou využívány různé topologie zapojení rezistorů, tak abychom dosáhli požadovaného průběhu potenciometru. Jejich nevýhodou však je, že vyžadují napájení a není jimi možno zpracovávat signály, které toto napájecí napětí přesahují. Dalším omezujícím faktorem je maximální trvalý proud tekoucí potenciometrem, který u většiny modelů dosahuje maximálně jednotek mA. Možná využití digitál-



**Obrázek 15:** Principiální zapojení digitálního potenciometru. Zdroj: [17]

ních potenciometrů jsou dle výrobce například programovatelný proudový zdroj, oscilátor,

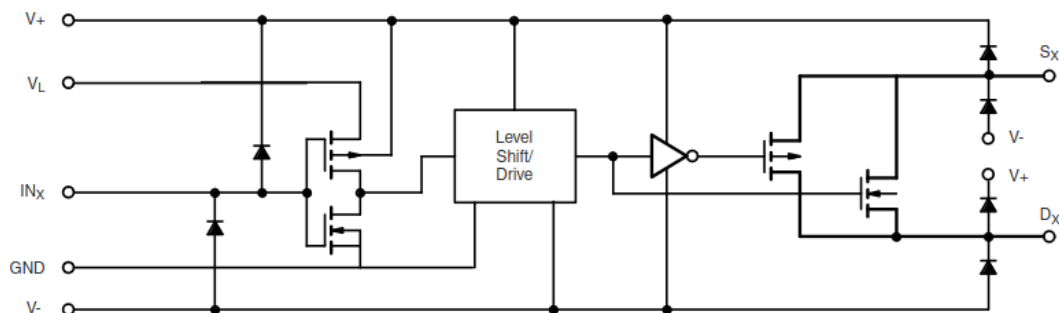
nebo lze změnou hodnoty odporu měnit zesílení operačního zesilovače v invertujícím, či neinvertujícím zapojení [21, s. 20].

## 5.2 Analogové přepínače, Relé

Současná zařízení jsou navržena tak, aby se sama konfigurovala a udržovala v optimálním stavu. Například pro časové a teplotní spínání. Z tohoto důvodu jsou stěžejní součástí těchto zařízení relé a analogové přepínače, které na základě řídicích signálů mění signálovou cestu či připínají napájecí napětí pro doplňující prvky (ventilátor, apod.).

Relé jsou hojně využívána v automatizaci. Nevýhodou však je, že je nelze spínat přímo piny mikroprocesoru. Cívka relé představuje indukční zátěž, vlivem sepnutí, či rozepnutí mohou vznikat napěťové špičky na napájecím napětí, což může negativně ovlivnit činnost mikroprocesoru. Toto je eliminováno zapojením tzv. flyback diody [18].

Analogové přepínače jsou většinou vyráběny jako integrované obvody. Fungují obdobně jako relé, ale neobsahují mechanický kontakt a lze je ovládat přímo piny mikroprocesoru. Vstupní signál nesmí překročit hodnoty napájecího napětí. Na obrázku 16 je principální zapojení analogového přepínače.



Obrázek 16: Blokové schéma analogového přepínače. Zdroj: [19]

## 5.3 Analogově-digitální převodník

V případě digitálního řízení, respektive zpracování analogových dat ze senzorů, je využití analogově-digitálních převodníků nezbytné. V principu jde o převod napětí, programové vyhodnocení a následnou konfiguraci zařízení. V současných mikroprocesorech nepředstavují nic neobvyklého a bývají běžně implementovány z výroby. V oblasti audio zesilovačů lze takto monitorovat například: teplotu (elektronek, tranzistorů), klidové proudy, audio signál, apod.

## 5.4 Digitální zpracování signálu

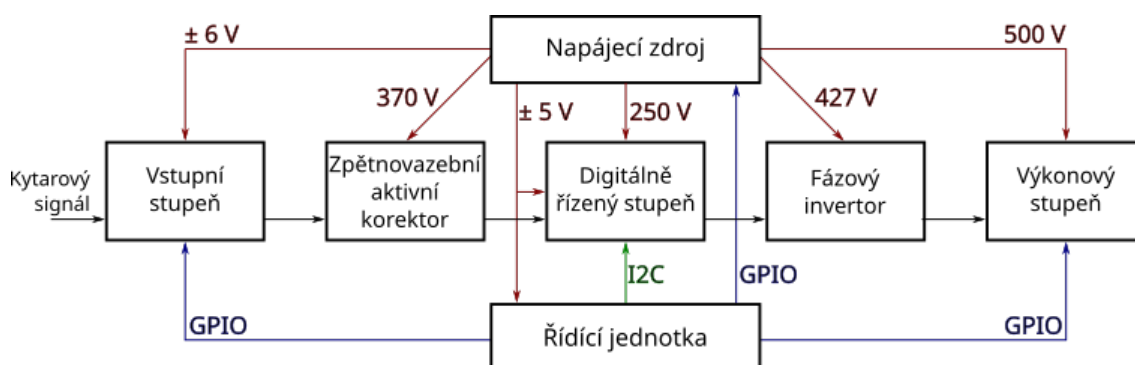
V oblasti audiotechniky bychom mohli zvolit dva přístupy pro zpracování signálu. Prvním z běžně používaných přístupů je zpracování analogových signálů v číslicové doméně. Signály jsou pomocí A/D převodníku převedeny na diskrétní signál, zpracovány (např. číslicové filtry, FFT...) a následně pomocí D/A převodníku převedeny zpět do podoby spojitého analogového signálu. Pro tento přístup byly vyvinuty signálové procesory, které jsou optimalizovány pro práci s diskrétním signálem.

Druhý přístup, jakým způsobem lze digitálně řídit vlastnosti signálu, je využití obvodového řešení (RC článků, zapojení s OZ...) a akčních členů. Ty pracují s analogovým signálem, ale jejich parametry lze nastavovat digitálně. K nastavení bývají využívány sběrnice I2C, či SPI, které jsou běžně ve výbavě mikroprocesorů.

## Část II

# Návrh zesilovače

V této kapitole se budu věnovat návrhu jednotlivých bloků kytarového zesilovače, jehož činnost bude řízena digitálně. Na obrázku 17 je blokové schéma kytarového zesilovače s digitálním řízením.



Obrázek 17: Blokové schéma digitálně řízeného zesilovače.

## 6 Obvodové řešení

Tato kapitola je věnována obvodovému řešení při konstrukci kytarového zesilovače. Jsou zde uvedeny důvody využití jednotlivých zapojení.

### 6.1 Návrh vstupního stupně

Aby nebyl signál zbytečně zatěžován šumem, a zároveň aby signál dosáhl optimální úrovně do dalších stupňů, zvolil jsem zařazení zapojení neinvertujícího zesilovače s operačním zesilovačem *TL062*, který signál prvotně zesílí. OZ je napájen symetrickým napětím  $\pm 6\text{ V}$ . Zesílení tohoto stupně je s využitím vztahu (4) zvoleno přibližně na hodnotu  $2,8x$ . Vstupní hodnota odporu tohoto stupně, a tím celého zesilovače je zvolena  $100\text{ k}\Omega$ .

Pomocí relé, které je řízeno řídicí jednotkou, lze vstup zesilovače přepnout, a tak zesilovač odpojit od zdroje signálu. Využití tohoto opatření je vysvětleno v následujících kapitolách.

## 6.2 Návrh frekvenčních korekcí

Blok frekvenčních korekcí je tvořen elektronickým zpětnovazebním korektorem převzatého z [16, s. 93]. Na vstupu korektoru je trioda ECC83 zapojena jako katodový sledovač. Využití katodového sledovače je nezbytné z důvodu jeho nízkého výstupního odporu. Následně je zapojen tzv. *Baxandallův korektor* ve zpětné vazbě elektronky ECC83. Tento korektor umožňuje pomoci potenciometrů plynulé potlačení, či zvýraznění basů a výšek. Zde jsou místo běžných analogových potenciometrů využity potenciometry digitální, konkrétně typ *AD5282BRUZ200*. Jedná se o dvojitý, 256 pozicový digitální potenciometr s hodnotou  $200\text{ k}\Omega$  řízený pomocí sběrnice I2C. Napájen je symetrickým napětím  $\pm 5\text{ V}$ . V případě potřeby lze spínačem sepnout relé a celý korektor tak překlenout. Tento blok tak nebude mít na výsledný signál žádný vliv.

Z důvodu možné změny napájecího napětí, či změny adresy digitálního potenciometru. Jsou využity dva jumpery. Jedním lze volit mezi nesymetrickým napájením  $+5\text{ V}$ , nebo symetrickým napájením  $\pm 5\text{ V}$ . Druhý jumper je připojen na adresové vstupy. Lze tak tyto vstupy nastavit na log. 1, či log. 0.

Digitální řízení korektoru přináší řadu výhod. Jednou z nich je například možnost fyziologické regulace hlasitosti. Pokud je úroveň signálu nízká, může řídicí jednotka automaticky nastavit zvýraznění basů a výšek, a tím tak kompenzovat vlastnosti lidského ucha. Další výhodou je i možnost uložení více nastavení korektoru a dle potřeby (například při změně kytarového reproboxu) mezi nimi přepínat.

## 6.3 Návrh digitálně řízeného stupně

Dalším blokem je digitálně řízený stupeň. Z důvodu přehlednosti zapojení je zapojení schématicky znázorněno na obrázku 18, spolu s fázovým invertorem, se kterým má tento stupeň přímou vazbu. Jeho první částí je neinvertující zapojení zesilovače s OZ. Dle vztahu (4) je měněno zesílení nastavením hodnoty rezistoru  $R_{V1}$ . Jako proměnný rezistor je využit digitální potenciometr zapojen jako reostat. Je tak umožněno plynulé nastavení zesílení tohoto stupně v rozsahu od  $20x$  cca do  $47x$ . Zesílení je zvoleno tak, aby při minimálním zesílení signál nebyl zkreslován limitací OZ, a naopak při nastavení maximálního zesílení došlo k limitaci OZ, a tak ke zkreslení signálu. Je tak možné plynule nastavovat práh, při jaké napěťové úrovni dochází ke zkreslení signálu. Na obrázku 25 jsou oba případy simulovány.

Za tímto stupněm je umístěn běžný potenciometr pro regulaci hlasitosti. Důvod, proč je řazen právě na této pozici, je možnost zeslabení zkresleného signálu z předchozího stupně. Tedy lze docílit zkreslení i v případě, že je požadován nižší výkon dodávaný zesilovačem do zátěže.

Následuje zapojení triody ECC82, jako zesilovač se společnou katodou. Katodový rezistor je zde opět rozdělen na dva, z nichž jeden je pevný a druhý proměnný. Jako proměnný rezistor  $R_{V2}$  je využita druhá polovina digitálního potenciometru, opět zapojena jako reostat. Změna hodnoty reostatu vyvolá změnu anodového proudu, a tím dojde k posunu pracovního bodu. Změnou polohy pracovního bodu se lze pohybovat na převodní charakteristice elektronky.

Konkrétně je zde využit digitální potenciometr *AD5243BRMZ2.5*. Jde o dvojitý 256 pozicový potenciometr s hodnotou 2,5 k $\Omega$ , který je řízen pomocí sběrnice I2C a napájen 5 V. Důležité v tomto stupni je, aby nebyly překročeny maximální hodnoty digitálního potenciometru, tedy maximální napětí na potenciometru nesmí překročit 5 V a trvale tekoucí proud potenciometrem může být maximálně 5 mA.

Do katody tohoto stupně je zavedena záporná zpětná vazba ze sekundárního vinutí výstupního transformátoru, která přispívá ke stabilitě a ke snížení zkreslení zesilovače.

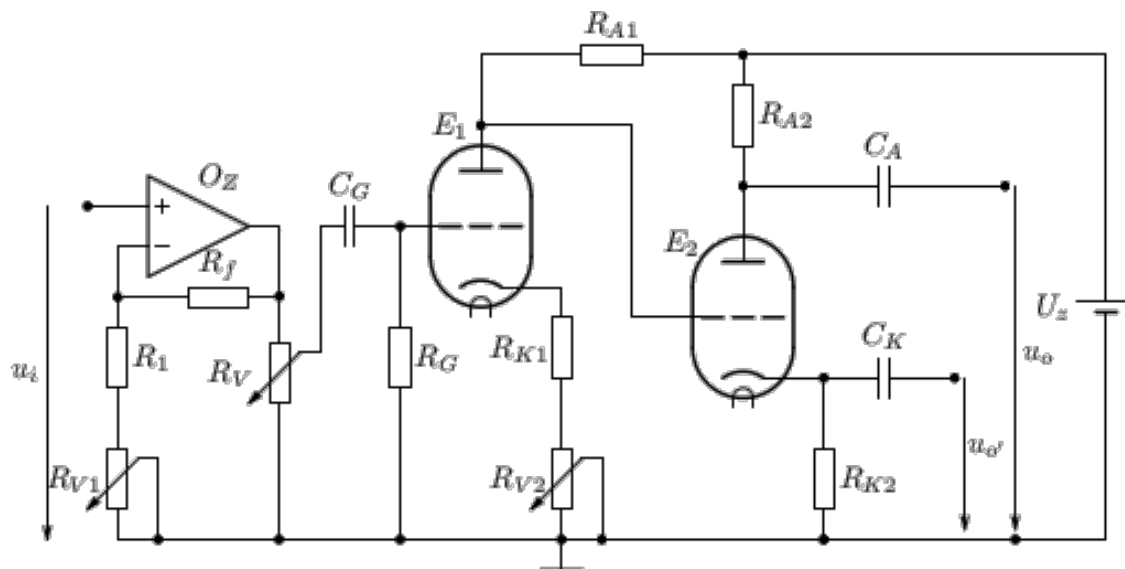
## 6.4 Návrh fázového invertoru

Fázový invertor využívá zapojení elektronky *E2* na obrázku 18. Jedná se o zapojení invertoru s rozdělenou zátěží. Důvodem, proč jsem se ho rozhodl využít je jeho dobrá symetrie výstupních napětí a jednoduchost. Anodový rezistor  $R_{A2}$  a katodový rezistor  $R_{K2}$  mají stejnou hodnotu. Teče jimi stejný proud, tedy i úbytky napětí jsou na nich shodné. Z anody elektronky je odebírán signál opačné fáze oproti signálu řídicímu a z katody signál ve fázi s řídicím signálem. Nevýhodou tohoto zapojení je, že neposkytuje napěťové zesílení [16, s. 133].

## 6.5 Návrh výkonového stupně

Vzhledem k zadání práce jsou v koncovém stupni využity elektronky. Protože je zdroj napětí převzat ze zesilovače TESLA AZK 450 „Music 70“, je i výkonový stupeň inspirován zapojením tohoto zesilovače. Ve výkonovém stupni jsou využity pentody EL34 v ultralinearním režimu pracující v protitaktním zapojení (push-pull) viz kapitola 4.3. Pro tento účel jsem si nechal navinout výstupní transformátor s odbočkami na primárním vinutí u firmy





Obrázek 18: Digitálně řízený stupeň a fázový invertor s rozdělenou zátěží.

TRONIC (Obrázek 19). Výstupní transformátor je navržen pro zátěž  $4\ \Omega$  a  $8\ \Omega$ . Pomocí trimrů je možné nastavit hodnotu klidového proudu každé elektronky zvlášť. Hodnota klidových proudů je nastavena na  $30\ \text{mA}$ .

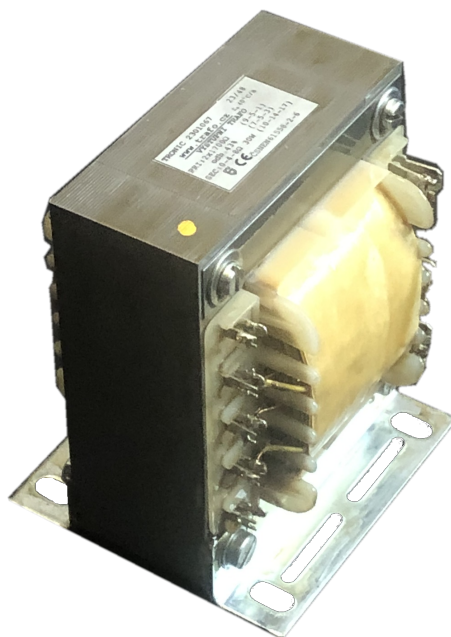
Na střed primárního vinutí výstupního transformátoru je přivedeno stejnosměrné napětí  $500\ \text{V}$  ze zdroje.

Chování výkonového stupně je digitálně vyhodnocováno. Pomocí AD převodníku řídicí jednotky jsou měřeny úbytky napětí na katodových rezistorech pentod. Ze známé hodnoty odporu a naměřeného úbytku napětí je vypočten okamžitý anodový proud tekoucí elektronkou. Lze tedy monitorovat například dodávaný výkon, či nastavení, nebo stav elektronek.

Na straně sekundárního vinutí je relé, s jehož využitím lze ověřit připojení zátěže. Pokud by byl zesilovač provozován bez zátěže, hrozí poškození výstupního transformátoru.

## 6.6 Návrh zdroje napájecích napětí

Ve zdroji jsem využil dva síťové transformátory. První z nich napájí řídicí jednotku, akční členy a zajišťuje stejnosměrné žhavení triod korektoru, digitálně řízeného stupně, a fázového invertoru. Stejnosměrné žhavení elektronek bylo zvoleno z důvodu eliminace síťového rušení. Sekundární napětí  $2 \times 6\ \text{VAC}$  je usměrněno a stabilizováno na symetrické napětí  $\pm 5\ \text{V}$  a  $\pm 6\ \text{V}$ .



**Obrázek 19:** Výstupní transformátor TRONIC.

Vzhledem k tomu, že jsem měl k dispozici síťový transformátor zesilovače TESLA AZK 450 „Music 70“, je použité zapojení napájecího zdroje převzato z dokumentace tohoto zesilovače [20]. Má vhodné hodnoty sekundárních napětí pro žhavení elektronek, a pro anodová napětí. Ve zdroji anodových napětí je využito poměrně komplexní zapojení nábojové pumpy z odboček transformátoru. Zdroj poskytuje následující napájecí napětí:

500 V : napájí koncový stupeň

427 V : ve finálním zapojení nebylo využito

370 V : napájí blok frekvenčních korekcí

250 V : napájí fázový invertor a digitálně řízený stupeň

9 V : napájení cívek všech relé a chladícího ventilátoru

5 V : napájení řídicí jednotky, digitálního potenciometru *AD5243BRMZ2.5*

$\pm 5$  V : napájení digitálního potenciometru *AD5282BRUZ200*

$\pm 6$  V : napájení operačního zesilovače *TL072* a žhavicích obvodů triod *ECC83* a *ECC82*<sup>4</sup>

-46 V : záporné předpětí pro řídicí mřížky koncových pentod *EL34*

<sup>4</sup>Žhavicí obvody pentod EL34 jsou napájeny přímo ze síťového transformátoru střídavým napětím 6,3 V.

Mezi vinutí transformátorů a usměrňovač byla vložena celkem 3 relé řízena řídicí jednotkou. Těmito relé lze spínat žhavicí napětí elektronek spolu s napájecím napětím pro OZ, anodová napětí elektronek, a síťové napětí.

Pro zapnutí zesilovače je síťové relé překlenuto tlačítkem. Při jeho stisku je napájena jen řídicí jednotka, která sepnutím síťového relé zajistí napájení zesilovače i po uvolnění tlačítka.

Z důvodu ochrany před přehřátím součástek je zdroj napájecích napětí aktivně chlazen ventilátorem.

## 6.7 Návrh řídicí jednotky

Při návrhu řídicí jednotky je výchozím bodem použitý mikropočítač, či mikroprocesor. Rozhodl jsem se využít mikroprocesorový vývojový kit Raspberry Pi Pico H. To je doplněno uživatelským rozhraním v podobě LED, tlačítek a rotačního enkodéru. Vzhledem k tomu, že Raspberry Pi Pico pracuje s 3,3 V logickou úrovní a digitální potenciometry s 5 V, využil jsem zapojení pro převod logické úrovně na sběrnici I2C [21, s. 18].

Dále jsou v zesilovači využita relé, řízena mikropočítačem. Ta jsou spínána GPIO piny mikrokontroléru přes NPN tranzistor. Bázové rezistory jsou zvoleny tak, aby proud tekoucí do báze, tranzistor zcela otevřel.

Součástí řídicí jednotky jsou i ochranná opatření. Jedním z nich je kontrola klidových proudů elektronek. Signály z katodových rezistorů výkonových pentod jsou přivedeny na pin mikroprocesoru. V cestě je umístěn jumper, který umožňuje tuto cestu rozepnout, aby při ožívování zesilovače nedošlo k poškození mikroprocesoru. Dále je snímána teplota katod. Je zde využít napěťový dělič, tvořen termistorem a rezistorem. Změna teploty je opět vyhodnocena AD převodníkem.

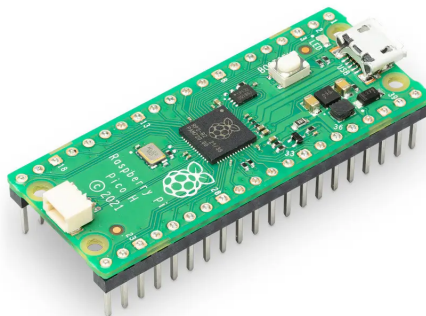
## 7 Digitální řízení

Pro digitální řízení zesilovače jsem se rozhodl využít mikroprocesorový vývojový kit Raspberry Pi Pico H (obrázek 20). Srdcem mikroprocesoru je mikrokontrolér Raspberry Pi RP2040. Nabízí využití až 26 digitálních vstupních/výstupních pinů ve 3,3 V logice<sup>5</sup>. Dále jsou implementovány rozhraní SPI, I2C, UART. Programování probíhá přes micro-USB B. Raspberry Pi Pico umožňuje využít programovací jazyky C, C#, nebo *MicroPy*-

---

<sup>5</sup>3 piny lze využít i jako analogové vstupy.

thon [23]. Já jsem se rozhodl programovat v jazyku Micropython, a jako vývojové prostředí jsem zvolil ThonnyIDE.



Obrázek 20: Raspberry Pi Pico H, Zdroj: [22]

## 7.1 Uživatelské rozhraní

Uživatel obsluhuje program třemi tlačítky. První z nich je „HEAT“. Stiskem tohoto tlačítka dojde k sepnutí relé, které přivede napětí na žhavicí obvody katod všech elektronek a i symetrické napájení OZ ve vstupním stupni. Další je tlačítko „STANDBY“. Po jeho stisknutí řídicí jednotka sepne relé, které připojí sekundární vinutí síťového transformátoru k usměrňovacím diodám a filtračním kondenzátorům. Je tak přivedeno anodové napětí na všechny zesilovací stupně. Tlačítko „SET“ je součástí rotačního enkoderu. Stiskem tohoto tlačítka lze přepínat mezi parametry, které budou nastavovány rotačním enkoderem.

Stavové LED znázorňují uživateli, v jaké části se program právě nachází. Červená LED indikuje, že zesilovač není v aktivním režimu. Blikáním je znázorněno, že klidové proudy nejsou v povoleném rozsahu nebo katody nejsou dostatečně nahřáty. Rozsvícení modré LED značí, že je zátěž připojena. Dvojice oranžových LED slouží k znázornění toho, jaký z parametrů je právě nastavován. Blikání zelené LED indikuje připravenost zesilovače pokračovat v programu dále. Její trvalé rozsvícení značí připnutí anodových napětí, zesilovač je tak v provozu. Pokud jsou rozsvícené společně červená a zelená LED, zesilovač vyhodnocuje klidové proudy.

Grafické LED informují uživatele, na jakou hodnotu je nastaven aktuálně ovládaný parametr. V části programu, kde je odpočítáván čas, jsou postupně rozsvěcovány, a tak znázorňují kolik času zbývá.

## 7.2 Konfigurace I2C

Jak již bylo zmíněno, komunikace řídicí jednotky a mikroprocesoru probíhá pomocí sběrnice I2C. Je zde využita pouze jednosměrná komunikace směrem z řídicí jednotky k digitálním potenciometrům. Nejprve bylo nutné zjistit adresy. K tomu byla využita funkce „i2c.scan()“, jejíž výsledkem jsou adresy zařízení, které jsou připojeny na sběrnici. Digipot pro nastavování frekvenčních korekcí má přiřazenou adresu *0x2c* a digipot pro nastavení katodového odporu spolu se zesílením stupně s OZ *0x2f*. To jaké části digitálního potenciometru je přijatá hodnota určena, definuje hodnota 16. bitu. Pokud má 16. bit přijaté zprávy hodnotu logická 0, je zpráva určena pro terminál, jehož vývody mají index 1.

## 7.3 Řídicí program

Na obrázku 21 je blokově znázorněn běh programu. Po startu programu proběhne nezbytná inicializace a konfigurace.

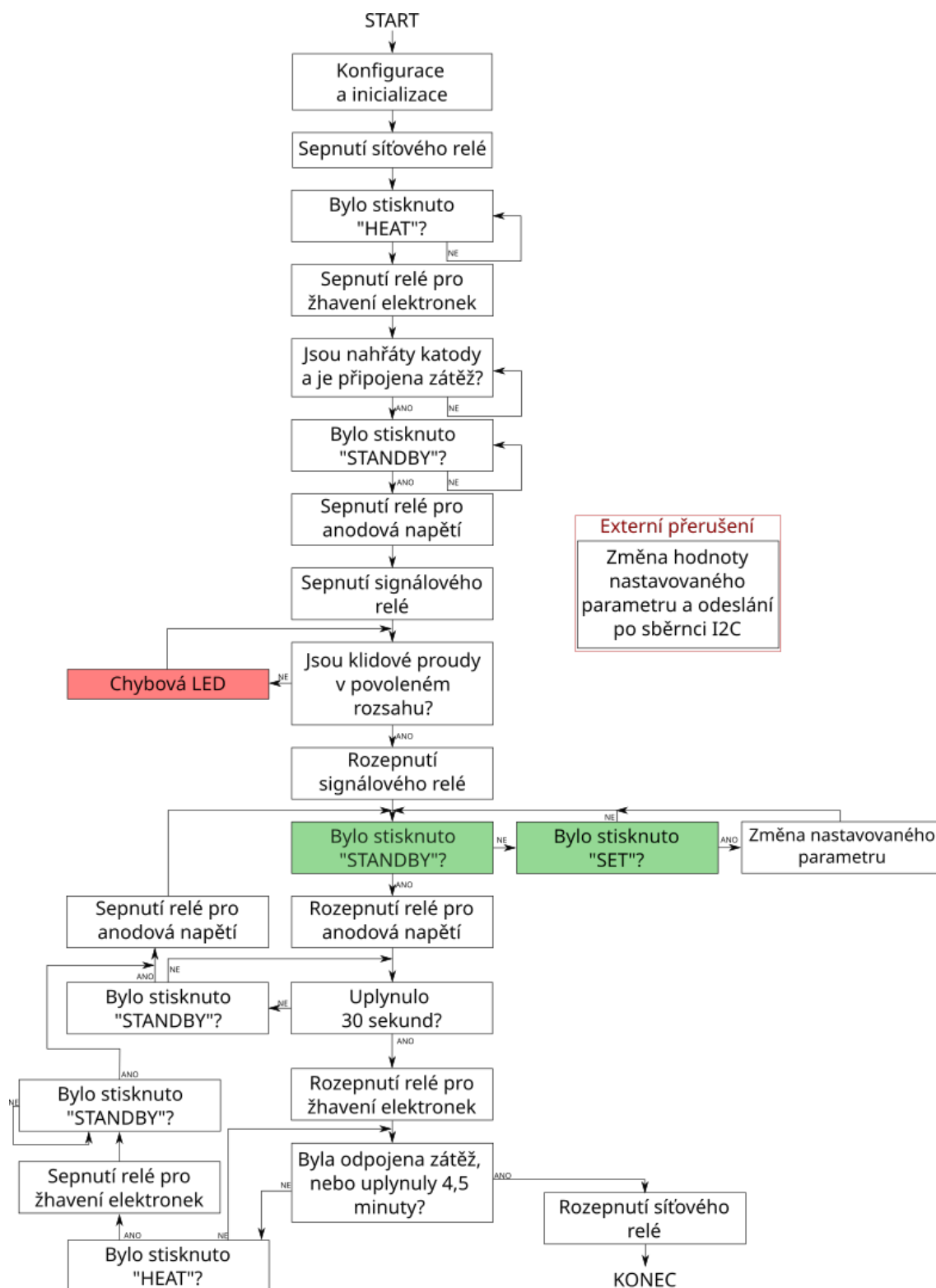
Následně program ve smyčce čeká na vstup uživatele, který stisknutím tlačítka HEAT posune program dále, a jsou tak sepnuta relé žhavicích napětí pro katody elektronek.

Program vyhodnotí, zda je k zesilovači připojena zátěž. Pokud ano, je pin přes zátěž uzemněn a program pokračuje dále. Poté dochází k nastavení hodnot digitálních potenciometrů do neutrálního stavu.

V této chvíli program čeká na dostatečné zahřátí katod koncových pentod. Jejich teplota je vyhodnocována AD převodníkem připojeným na napěťový dělič rezistoru a termistoru. Po dostatečné změně napětí děliče, program vyhodnotí, že jsou katody dostatečně nahřány a zesilovač je tak připraven k použití.

Program opět čeká na vstup uživatele. Pokud dojde k stisknutí tlačítka STANDBY, je sepnuto relé na signálovém vstupu zesilovače, které odpojí vstup zesilovače a není buzen žádným signálem. Poté dojde k sepnutí relé ve zdroji, a je tak připnuto anodové napětí. Začínají se nabíjet kondenzátory a po pár vteřinách dosáhnou anodová napětí jmenovitých hodnot. Následně jsou pomocí AD převodníku měřeny úbytky napětí na katodových rezistorech. Z nich jsou určeny klidové proudy koncových pentod. Pokud jsou hodnoty v povoleném rozsahu, program rozeptne relé na signálovém vstupu a zesilovač je tak v aktivním režimu.

V tento moment je možné zesilovač aktivně užívat. Lze měnit parametry zesilovače jako jsou basy, výšky, zesílení OZ a hodnotu odporu v katodě triody ECC82.



Obrázek 21: Blokové znázornění běhu programu.

Na následující stránce je část programu obsluhující přerušení vyvolané otočením rotačního enkodéru.

```

1 def rotation(pin):#preruseni enkoderu
2     global counter
3     global kdo
4     global clk_last_state
5     if machine.Pin(CLK_PIN).value() != clk_last_state:#vyhodnoceni smeru otaceni
6         if machine.Pin(DT_PIN).value() != machine.Pin(CLK_PIN).value():#rotece podle smeru hodinovych rucicek
7             counter += 5
8         else:#rotace proti smeru hodinovych rucicek
9             counter -= 5
10    clk_last_state = clk_state#ulozeni soucasneho stavu
11    #omezeni proti peteen
12    if counter>255: counter=255
13    if counter<1: counter=1
14    zobraz_hodnotu(counter)#zobrazen na grafickch LED
15    if kdo==1:
16        kam=0x2c
17        poslat=counter#(basy, vet slo -> zvyraznen basu)
18    if kdo==2:
19        kam=0x2c
20        poslat=counter+0x8000#(vysky, men slo -> zvyrazneni vysek)
21    if kdo==3:
22        kam=0x2f
23        poslat=counter #katodovy odpor (vets cslo -> men odpor)
24    if kdo==4:
25        kam=0x2f
26        poslat=counter+0x8000 #zesilen OZ (vetsi cslo -> vetsi zesslen )
27    data = poslat.to_bytes(2, 'big')
28    i2c.writeto(kam, data) #korekce
29    utime.sleep(0.01)

```

Nejprve je vyhodnocen směr otáčení a následně je určeno, na jakou adresu bude hodnota odeslána. Toto přerušení může být zavoláno kdykoli v běhu programu.

Takto program běží dokud není stisknuto tlačítko STANDBY. To program interpretuje tak, že uživatel již nebude zesilovač využívat a odpojí anodové napětí rozpojením příslušného relé. Následně začíná odpočet 30 sekund, pokud dojde k opětovnému stisknutí tlačítka STANDBY, je anodové napětí opět připnuto a zesilovač je opět připraven k reprodukci. Pokud čas uplyne, jsou rozpojena relé přivádějící žhavicí napětí a elektronky tak přestávají být žhaveny. Zesilovač je tak v úsporném režimu.

Zde program 4,5 minuty hlídá, zda je připojena zátěž nebo zda je stisknuto tlačítko HEAT. Pokud uživatel stiskne tlačítko HEAT a zátěž je stále připojena, zesilovač opět začne žhavit katody elektronek. Po stisknutí tlačítka STANDBY je zesilovač, již bez kontroly klidových proudů, znovu uveden do provozu. Pokud před uplynutím 4,5 minut zesilovač vyhodnotí, že byla odpojena zátěž, interpretuje to jako „úklid“ zesilovače a sám se vypne rozpojením síťového relé. V případě, že v časovém limitu nedojde ani ke stisknutí tlačítka, ani k odpojení zátěže, zesilovač se vypne.

Program v programovacím jazyce micropython je k dispozici v příloze této práce.

## 8 Návrh DPS

Návrh DPS proběhl v návrhovém programu KiCad. Pokud to bylo možné, volil jsem součástky typu THT (Through-hole technology). Celkem se zesilovač skládá ze čtyř DPS. Vzhledem k tomu, že se jedná o prototyp, je DPS navržena poněkud robustně. Toto je důvod, proč jsou na DPS zakresleny prvky, které ve finálním schématu nejsou použity. Při návrhu byla snaha vyhnout se zemnicím smyčkám. DPS byly vyrobeny firmou *Prago-Board*.

### 8.1 DPS zdroje

DPS pro napájecí zdroj zesilovače je navrhnut s ohledem na hodnoty napětí ve zdroji, které dosahují hodnot až 500 V. Z tohoto důvodu je nutné zvolit dostatečné izolační mezery mezi spoji. Na DPS napájecího zdroje je umístěn i síťový transformátor 2x6 V společně s filtračními kondenzátory a relé. Tyto prvky zabírají poměrně značnou plochu DPS. I zde je nutné zohlednit polohu některých prvků, konkrétněji konektorů, či svorkovnic, skrze které je distribuováno napětí do příslušných bloků zesilovače.

### 8.2 DPS řídicí jednotky

Na DPS řídicí jednotky je umístěn řídicí mikropočítač, spolu s uživatelským rozhraním. Tato DPS obsahuje mnoho prvků, které je vhodné umístit na kraj desky (rotační enkodér, konektory, LED, tlačítka). Je zde i konektor jack, který slouží jako signálový vstup. K této DPS je přichycen potenciometr pro regulaci hlasitosti.

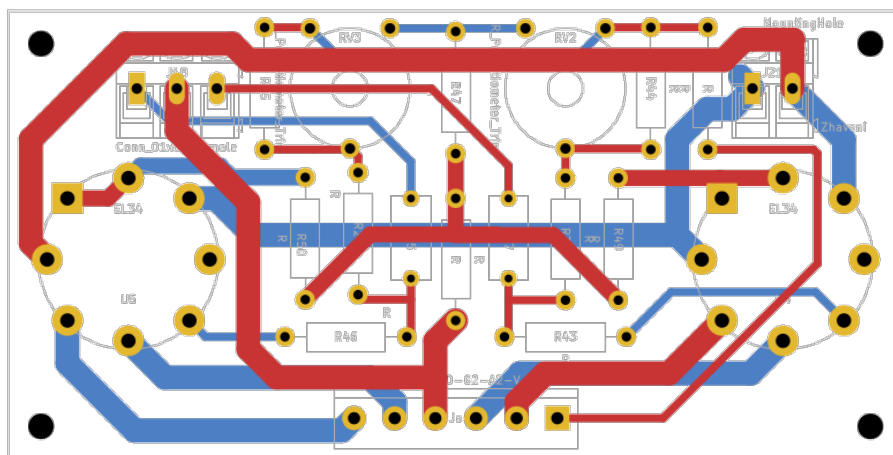
### 8.3 DPS předzesilovače + fázového invertoru

Třetí z DPS je navržena pro předzesilovač společně s fázovým invertorem. Jsou zde umístěny OZ, triody ECC82 a ECC83 a digitální potenciometry. Právě digitální potenciometry se mi nepodařilo sehnat v provedení THT. Tedy je zde využito pouzdro SMD. Na této DPS je poměrně velké množství různých signálů (Anodové napětí, I2C sběrnice, žhavicí napětí...), z tohoto důvodu je nutné hlídat cesty, aby nebylo indukováno rušení k užitečnému signálu.



## 8.4 DPS koncového stupně

Na DPS koncového stupně (Obrázek 22) jsou nejvýraznějšími prvky dvě patice pro koncové pentody EL34. I zde je svorkovnice, která přivádí napájecí a signálová napětí pro koncový stupeň. Napětí na této DPS dosahuje hodnoty 500 V, tedy izolační mezery musí mít odpovídající parametry. Žhavicí proud je nutné rovněž zohlednit. Jeho hodnota je dle výrobce 1,5 A, a tak i šířka spoje musí mít odpovídající hodnotu.



Obrázek 22: DPS koncového stupně.

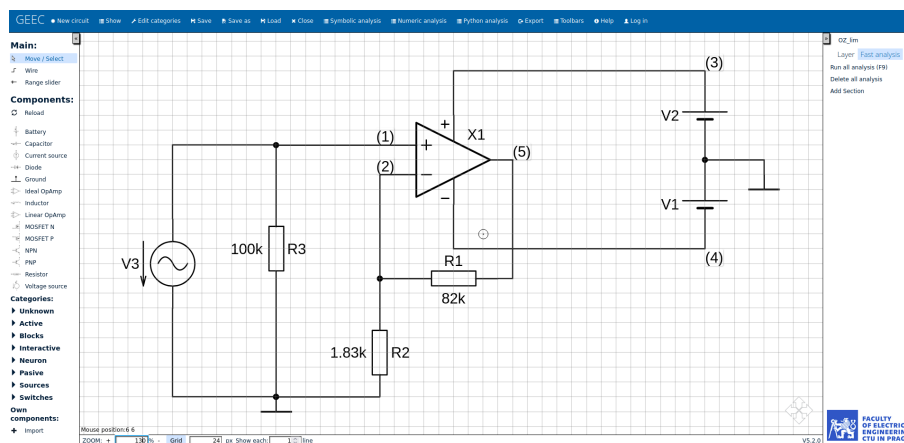
## Část III

# Simulace a měření

Třetí částí práce se věnuji ověření digitálně řízených zapojení simulací a měřením.

## 9 Simulace digitálně řízených bloků

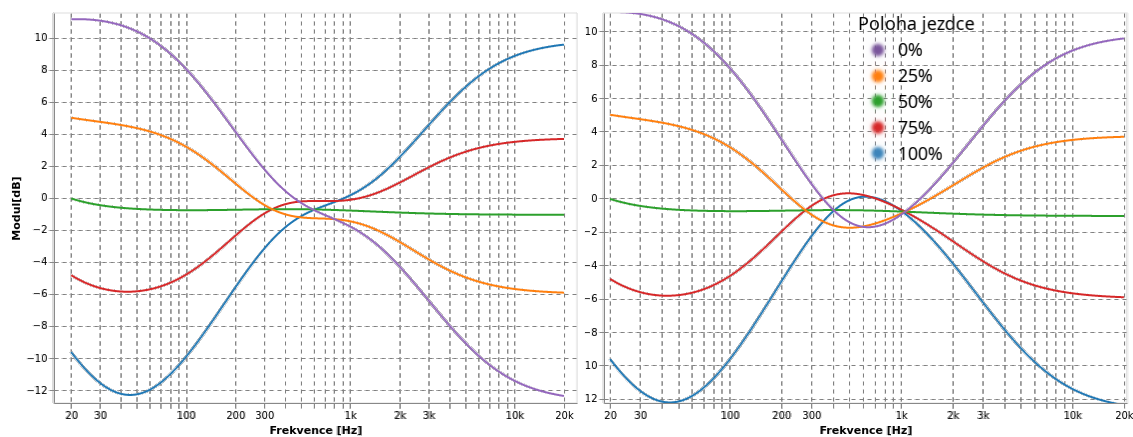
Simulace proběhla v programu GEEC. Byly využity numerické analýzy. *AC analysis* pro zobrazení přenosových charakteristik a *Transient analysis* pro zobrazení časových průběhů signálu.



Obrázek 23: Grafický editor elektrických obvodů GEEC. Dostupné z [24]

### 9.1 Simulace bloku frekvenčních korekcí

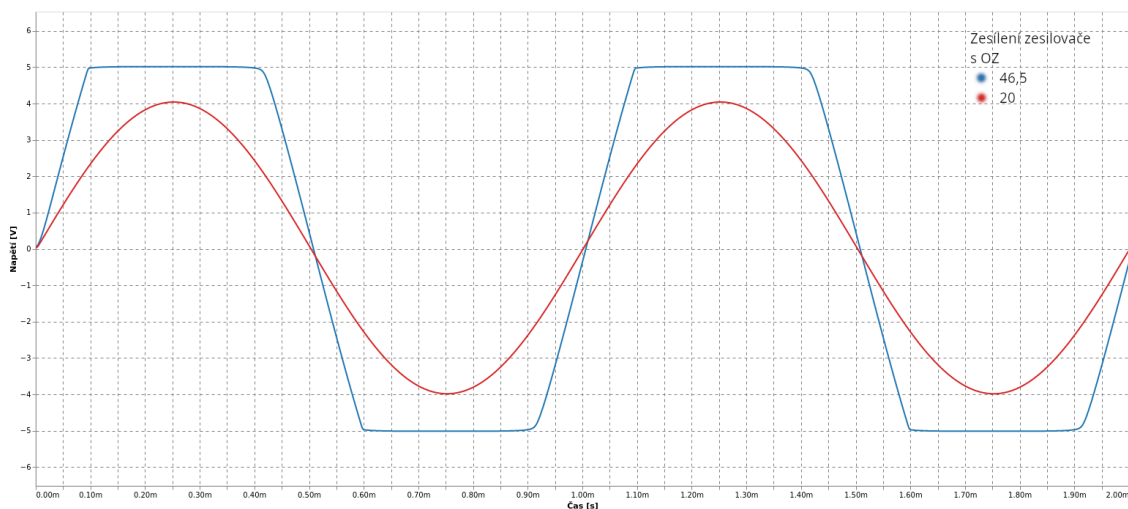
Na obrázku 24 je simulován přenos pro 5 různých nastavení bloku zpětnovazebního frekvenčního korektoru z obrázku 12. Amplituda vstupního signálu byla 1 V, což odpovídá úrovni 0 dB. V pravém grafu jsou oba jezdce potenciometrů nastavovány současně, zatímco na levém grafu jdou polohy jezdců proti sobě. Je patrné, že v neutrální pozici (nastavení 50 %) je útlum korektoru v celém slyšitelném frekvenčním pásmu 20 Hz až 20 kHz přibližně 1 dB. V krajních polohách je v případě basů možné nastavit útlum přes -12 dB či zisk téměř až +11 dB. V případě výšek je maximální možný zisk do +10 dB a maximální možný útlum přes -12 dB.



**Obrázek 24:** Simulace frekvenční charakteristiky elektronkového zpětnovazebního korektoru.

## 9.2 Simulace digitálně řízeného stupně

První částí digitálně řízeného stupně je neinvertující zapojení s OZ. Zde je měněna hodnota jednoho z rezistorů určující zesílení tak, aby bylo možné stupeň nastavit do stavu limitace. Na obrázku 25 jsou znázorněny dva průběhy signálů na výstupu zapojení neinvertujícího zesilovače. Oranžový průběh znázorňuje výstupní signál při nastavení minimálního zesílení. Modrou barvou je zachycen průběh signálu při nastavení maximálního možného zesílení tohoto zapojení. Parametry simulace byly nastaveny následovně, napájecí napětí OZ  $\pm 6$  V, amplituda vstupního signálu 0,2 V. Dále byla simulována změna polohy pracovního bodu



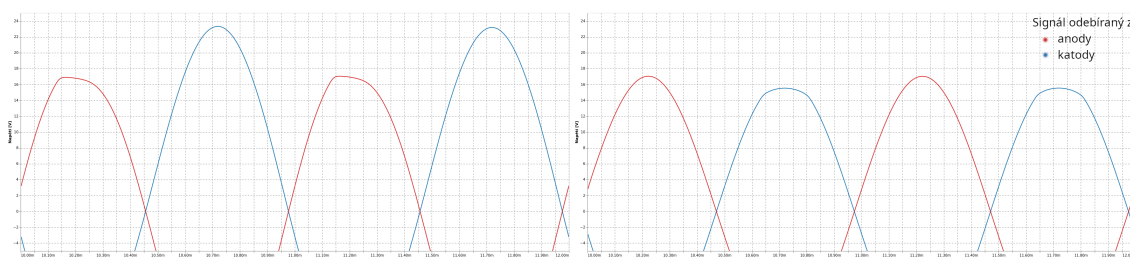
**Obrázek 25:** Simulace časových průběhů signálů pro krajní nastavení zesílení stupně s OZ.

triody ECC82. Hodnota odporu v katodě je simulována pro krajní případy (0,56 k $\Omega$  a 3,06 k $\Omega$ ). V tabulce 1 je znázorněno jaký má změna hodnoty katodového odporu, vliv na souřadnice pracovního bodu. Jak bylo zmíněno v kapitole 6.3, anoda elektronky v digitálně

**Tabulka 1:** Krajiní souřadnice pracovního bodu triody ECC82.

$R_k$ [k $\Omega$ ]	$U_G$ [V]	$I_K$ [mA]	$U_A$ [V]
3,06	-3,91	1,3	93
0,56	-0,84	1,67	48

řízeném stupni má přímou vazbu s mřížkou elektronky fázového invertoru, jak je naznačeno na obrázku 18. Změna pracovního bodu elektronky  $E_1$  tedy přímo ovlivňuje i pracovní bod elektronky  $E_2$ . Na obrázku 26 jsou časové průběhy výstupních signálů fázového invertoru. Z časových průběhů je patrné, že změnou katodového rezistoru ve stupni s ECC82,

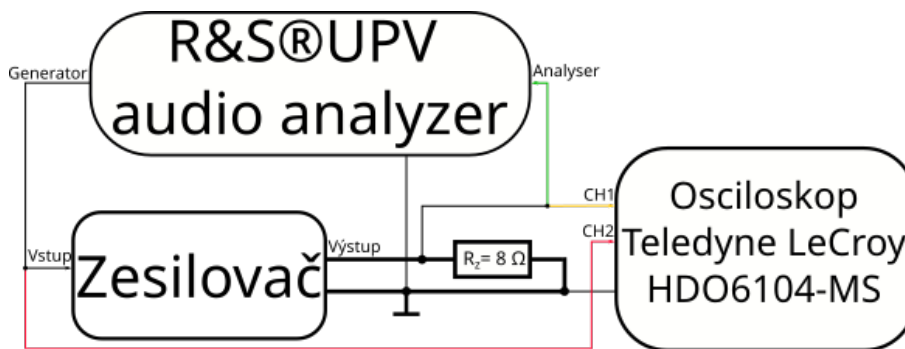
**Obrázek 26:** Simulace výstupních signálů fázového invertoru pro krajní nastavení hodnoty katodového odporu.

dochází ke změně symetrie výstupních napětí, kterými jsou buzeny pentody v koncovém stupni. Lze tak symetrii nastavit s velikou přesností, či naopak zcela rozladit a dosáhnout tak jiného typu zkreslení signálu.

## 10 Měření parametrů

Pro měření parametrů zesilovače byl využit *RS®UPV Audio Analyzer* společně s osciloskopem *Teledyne LeCroy HDO6104-MS*. Zapojení je blokově znázorněno na obrázku 27. Zesilovač je pro potřeby měření zatížen výkonovým rezistorem 8  $\Omega$ .

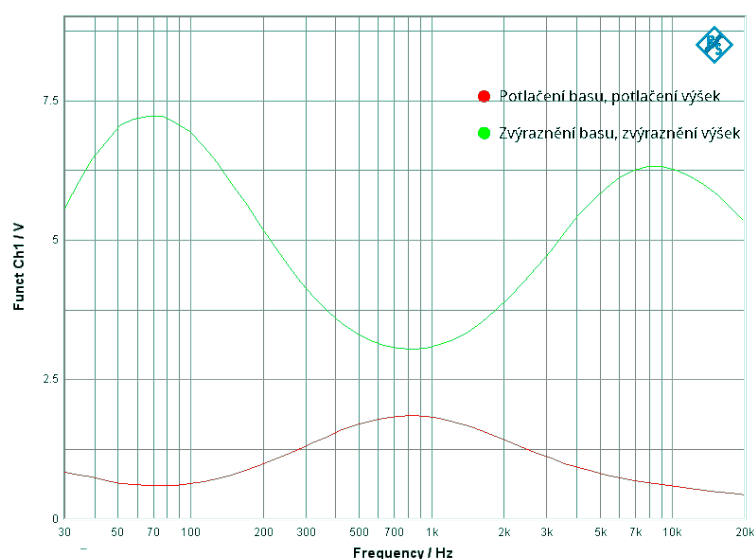
Postup měření byl ve všech případech stejný. Po zapojení měřicího stanoviště byl zesilovač zapnut. Nejdříve byly žhaveny katody elektronek, aby došlo k ustálení jejich teploty a nedocházelo například ke kolísání proudu tekoucím elektronkou. Následně byl do řídicí jednotky nahrán program, který digitálně řízené prvky uvedl do konfigurace, které vyžadovalo měření příslušného parametru. Vždy, když byl měřen určitý parametr, ostatní byly konfigurovány do neutrální pozice.



Obrázek 27: Blokové zapojení, pro měření parametrů.

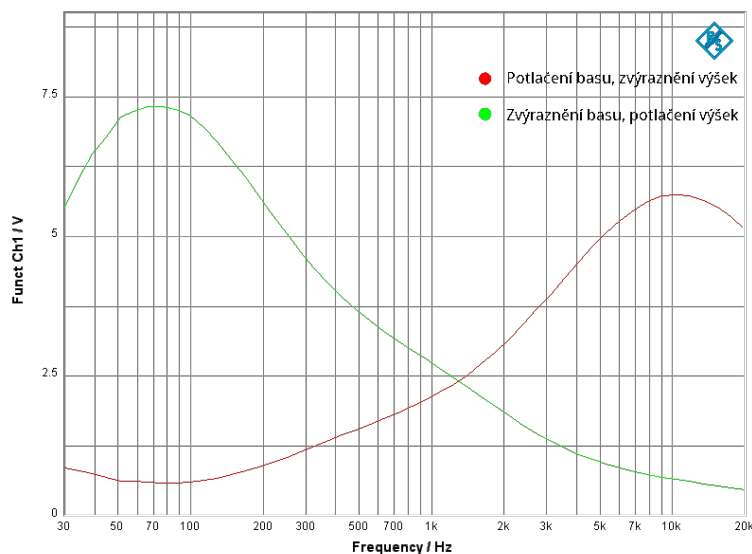
### 10.1 Měření bloku frekvenčních korekcí

V návaznosti na simulaci jsem měřil přenosovou charakteristiku zesilovače pro různá nastavení bloku frekvenčních korekcí. Na vstup zesilovače je přiveden harmonický přelaďovaný signál v rozsahu od 30 Hz do 20 kHz. Amplituda vstupního signálu byla nastavena na hodnotu 18 mV, aby nedošlo k limitaci některého ze stupňů, a tím k nežádoucímu zkreslení. Nastavení audio analyzátoru proběhlo podle online manuálu [25]. Na obrázku 28 jsou vykresleny změřené přenosové charakteristiky pro souhlasné potlačení, resp. zvýraznění, basů a výšek bloku korektoru. Červený průběh znázorňuje průběh pro maximální potlačení basů a výšek, a zelený průběh naopak korektor v konfiguraci pro jejich maximální zvýraznění. Dále byla změřena tatáž charakteristika, pro opačné nastavení jezdců potenciometru v korektoru (Obrázek 29). Zeleným průběhem je zachycena přenosová charakteristika pro nastavení maximálního zvýraznění basů a maximálního útlumu výšek. Červená křivka



Obrázek 28: Měřená přenosová charakteristika zesilovače, pro souhlasné nastavení jezdců.

vykresluje přenosovou charakteristiku při nastavení maximálního potlačení basů a maximálním zvýraznění výšek.



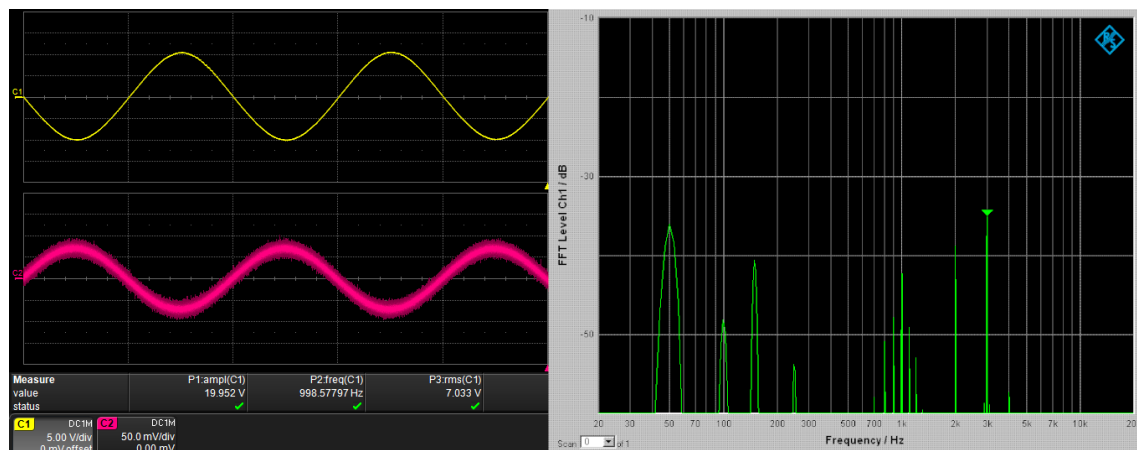
**Obrázek 29:** Měřená přenosová charakteristika zesilovače, pro opačné nastavení jezdců.

## 10.2 Měření bloku digitálně řízeného stupně

Dalším bodem bylo měření harmonického zkreslení zesilovače, pro různá nastavení digitálně řízeného stupně. I v tomto případě jsem při nastavování audio analyzátoru vycházel z online manuálu [26]. Pro měření harmonického zkreslení je na vstup zesilovače přiveden harmonický signál o frekvenci 1 kHz a amplitudě 50 mV. Tím je zesilovač vybuděn tak, aby hodnota napětí na zatěžovacím rezistoru dosahovala hodnoty  $7 V_{ef}$ . To odpovídá výstupnímu výkonu přibližně 6 W.

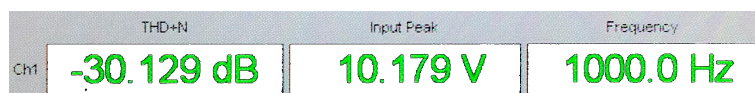
Na obrázku 30 je zachycen časový průběh vstupního a výstupního signálu, společně se spektrem výstupního signálu, určeného pomocí *rychlé Fourierovy transformace* (FFT). Jezdce všech digitálních potenciometrů jsou nastaveny do střední polohy. Pro takto konfigurovaný zesilovač je hodnota celkového harmonického zkreslení (THD) na obrázku 31.

Hodnota -30 dB po přepočtu na procenta odpovídá hodnotě přibližně 3,16 %. Tato poměrně vysoká hodnota THD je způsobena výrazným zastoupením druhé a třetí harmonické, spolu se síťovým rušením o frekvenci 50 Hz a 100 Hz. Ze spektra výstupního signálu, je patrné, i intermodulační zkreslení. To je způsobeno tím, že na vstup zesilovače není přivedena pouze první harmonická, ale je přítomno i síťové rušení. Ve spektru výstupního signálu se tak projeví frekvence, které nejsou součástí vstupního signálu. Například kolem



Obrázek 30: Časový průběh a spektrum signálu při neutrálním nastavení řízených prvků.

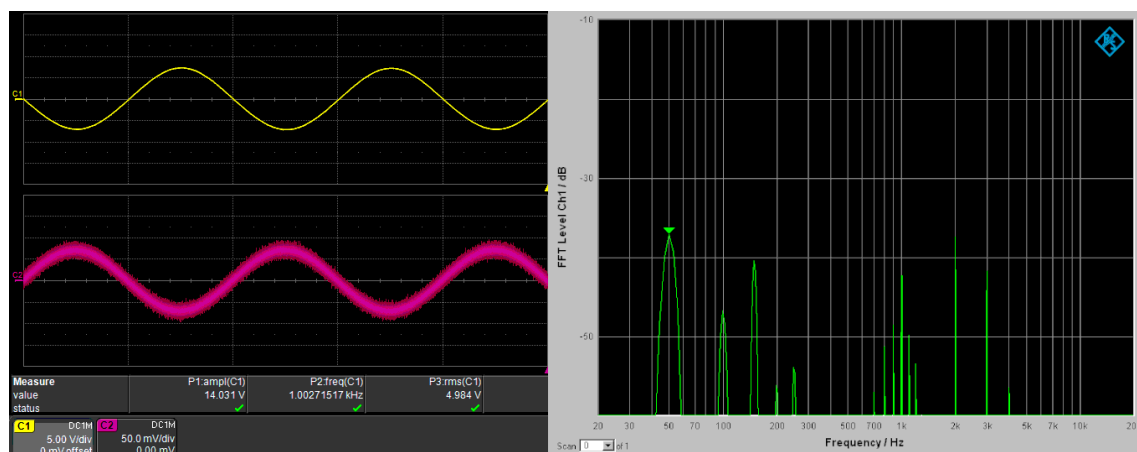
frekvence první harmonické 1 kHz jsou přítomny i frekvence blízké této hodnotě (800 Hz, 900 Hz, 1100 Hz, 1200 Hz). Síťové rušení je o to výraznější, že měřený zesilovač není uložen v chassis, a tak jsou indukována rušení.



Obrázek 31: Hodnota celkového harmonického zkreslení.

Hodnota THD není pro toto měření příliš významná. Zde je pozorován především vliv nastavení řízených stupňů na spektrum a časový průběh výstupního signálu.

### 10.2.1 Měření vlivu zesílení neinvertujícího stupně s OZ, na výstupní signál



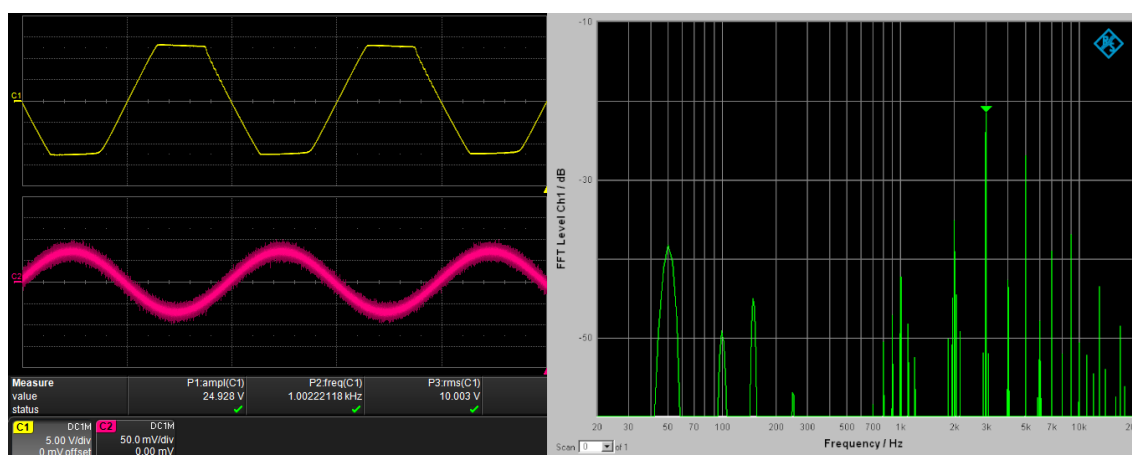
Obrázek 32: Časový průběh a spektrum, při nastavení minimální hodnoty zesílení stupně s OZ.

Pro potřeby měření je zesílení neinvertujícího zapojení operačního zesilovače  $20x$ , tedy

minimální možnou hodnotu. Výsledek měření je na obrázku 32. Napěťová úroveň výstupního signálu klesla na cca  $5 V_{ef}$ , tedy dodávaný výkon do zátěže tak odpovídá hodnotě 3,1 W. Poměr zastoupení harmonických je obdobný jako při neutrální konfiguraci zesilovače, a tak došlo pouze k zeslabení signálu.

Druhé měření bylo provedeno pro nastavení maximálního možného zesílení stupně s OZ, tzn. přibližně  $47x$ . Z obrázku 33 je patrné, že výstupní signál je zkreslen limitací právě tímto stupněm. To je způsobeno tím, že napájecí napětí dosahuje konečné hodnoty  $\pm 6 V$ . Ve spektru výstupního signálu došlo k výraznému obohacení vyššími harmonickými frekvencemi. Dominantní jsou zde třetí, pátá, sedmá a devátá harmonická. Tento výsledek je očekáván, vzhledem k tomu, že dochází k limitaci operačního zesilovače, tedy typu zkreslení, které je bohaté právě na liché harmonické složky.

Dle simulovaných průběhů signálů na obrázku 25, bylo očekáváno, že pro různá nastavení zesílení stupně neinvertujícího zapojení zesilovače s OZ, bude možné řídit míru limitace tohoto stupně. To je potvrzeno výsledky měření, kde bylo ověřeno, že pro různá nastavení zesílení lze limitaci stupně omezit, či podpořit. Uživatel tak může nastavovat míru zkreslení vlivem této limitace, která obohacuje spektrum výstupního signálu o liché harmonické složky.



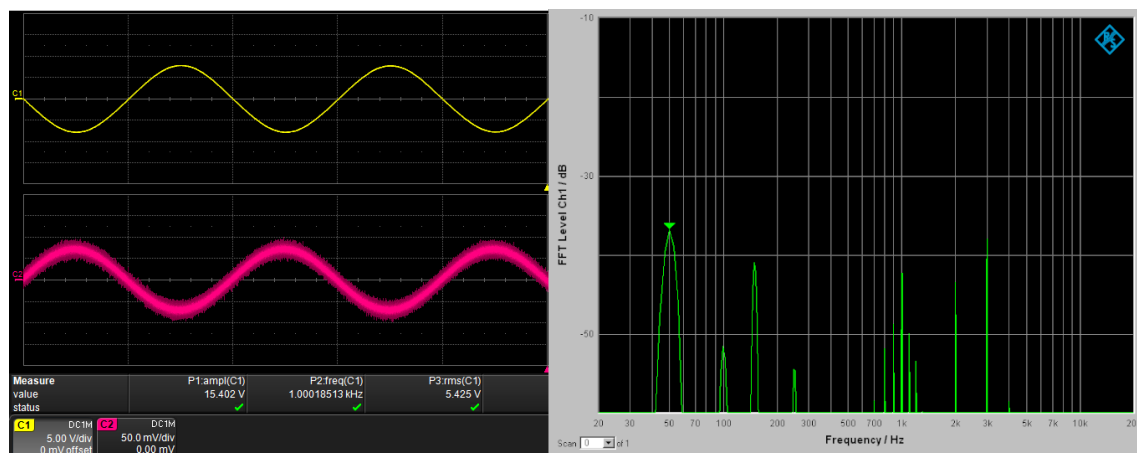
Obrázek 33: Časový průběh a spektrum, při nastavení maximální hodnoty zesílení stupně s OZ.

### 10.2.2 Měření vlivu hodnoty katodového rezistoru triody ECC82 na výstupní signál

Další z měřených konfigurací zesilovače je nastavení katodového rezistoru triody ECC82 na hodnotu  $560 \Omega$ . Napětí mezi mřížkou a anodou tak klesá a proud elektronkou tak mírně



vzroste. Je tak posunut pracovní bod do lineární oblasti přechodové elektronky. Z průběhů signálu a spektra, zachycené na obrázku 34, je možné vyčíst, že výstupní napětí kleslo na hodnotu  $5,4 V_{ef}$  (což odpovídá  $3,6 W$ ). Zastoupení harmonických frekvencí zůstalo prakticky ve stejném poměru.



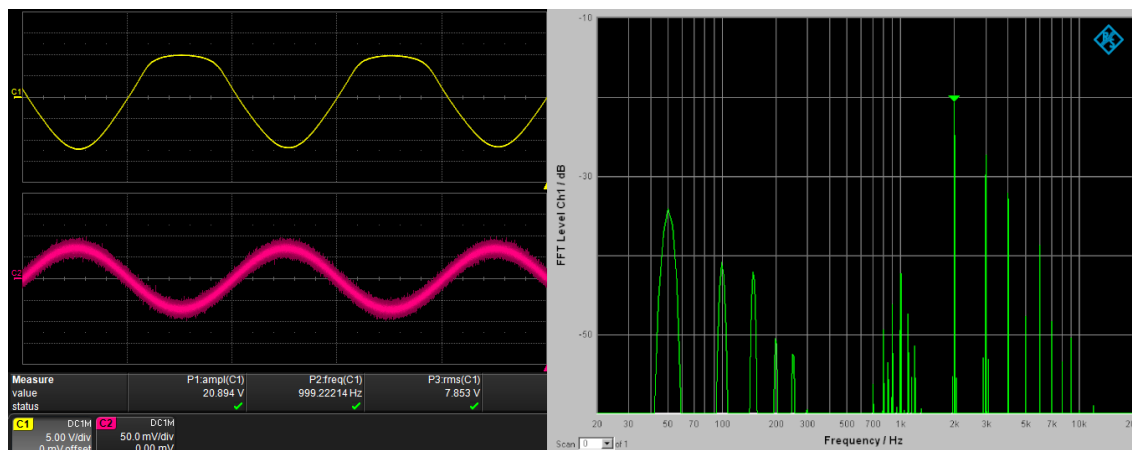
**Obrázek 34:** Časový průběh a spektrum, při nastavení minimální možné hodnoty katodového odporu.

Poslední měření bylo provedeno pro hodnotu katodového rezistoru  $3,06 k\Omega$ . Absolutní hodnota napětí mezi katodou a mřížkou tak vzroste a hodnota anodového proudu klesá. To způsobí posun pracovního bodu blíže k ohybu přenosové charakteristiky. Důsledkem toho, jak je patrné z časového průběhu na obrázku 35, je výrazná deformace kladné půlvlny signálu. Při pohledu na spektrum výstupního signálu, je výraznější zastoupení vyšších harmonických frekvencí. Dominantní je zde druhá harmonická spolu s třetí, čtvrtou, a šestou. Protože dochází ke zkreslení elektronkou, je zde podpořen předpoklad, že elektronkové zkreslení je bohatší na sudé harmonické.

Při porovnání naměřených dat, se simulací z obrázku 26 se zdá, že naměřené výsledky odpovídají simulovaným průběhům. Bylo simulováno, že hodnota katodového odporu má vliv na polohu pracovního bodu. Důsledkem je změna symetrie signálů, kterými jsou buzeny koncové pentody. Při nastavení hodnoty katodového odporu  $3,06 k\Omega$  tak skutečně dojde ke zkreslení kladné půlvlny výstupního signálu.

## 11 Ověření funkce softwaru

Ověřoval jsem zda řídicí jednotka správně vyhodnotí stav zesilovače. Při vzdálení termistoru od koncových pentod, nedojde ke změně napětí děliče. Program tak správně zůstane



**Obrázek 35:** Časový průběh a spektrum, při nastavení maximální možné hodnoty katodového odporu.

v nekonečné smyčce, protože předpokládá, že katody nejsou žhaveny. Dále jsem pak před zapnutím zesilovače odpojil zátěž. Řídící jednotka správně vyhodnotila, že by mohlo dojít k poškození výstupního transformátoru, a dokud není připojena zátěž, program dále nepokračuje. Poslední simulovanou ochranou byla změna klidového proudu koncových pentod. U jedné z elektronek jsem pomocí trimru nastavil minimální hodnotu klidového proudu. Po sepnutí anodového napětí tento problém řídicí jednotka indikovala rozsvícením červené LED. Dokud byl klidový proud mimo povolený rozsah, nebylo možné zesilovač využívat, protože signálový vstup byl stále odpojen.

Při měření bylo zjištěno, že při nastavování potlačení, či zdůraznění výšek jsou směry proti správnému smyslu. Tedy otočením po směru hodinových ručiček dochází k potlačení, místo k zvýraznění, což by bylo přirozené. Toto ale lze úpravou programu poměrně jednoduše vyřešit. Dalším námětem k optimalizaci je lepší zachycení při rotaci enkodéru. Při rychlém otáčení enkodéru program špatně vyhodnocuje směr otáčení. Zpomalením otáčení je vše tak jak má být.



## Závěr

Výsledkem práce je tak prototyp kytarového zesilovače, na obrázku 36, jehož chod je řízen a kontrolován pomocí digitální řídicí jednotky.

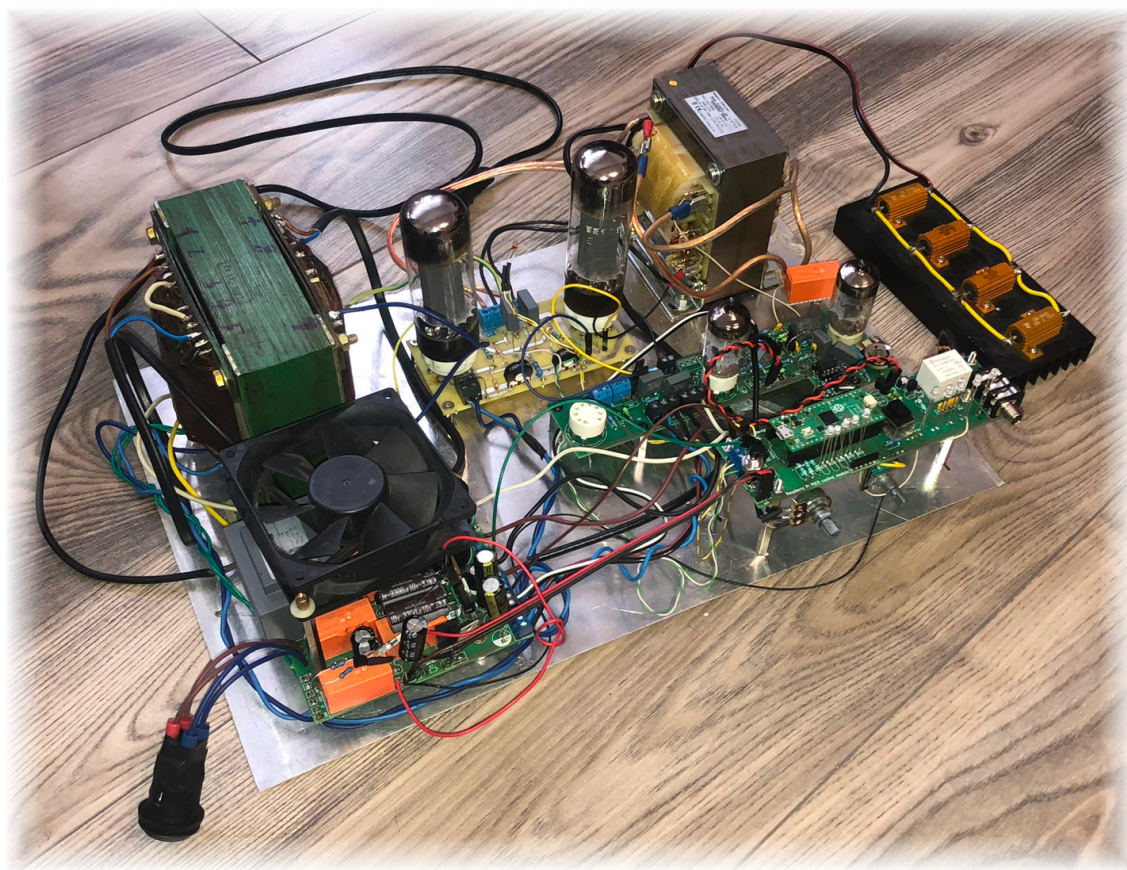
V první části této práce je obecně probrána problematika zesilovačů. Je zde definován základní rozdíl tranzistorových a elektronkových zesilovačů. Následně jsou probrány základní parametry zesilovacích stupňů, které je třeba při návrhu zohledňovat. Kromě zesílení stupně, je vysvětlen i význam limitace, respektive zkreslení signálu a její význam v kontextu kytarových zesilovačů. Pro potřeby následujících kapitol, jsou představeny třídy zesilovacích stupňů a princip jejich činnosti. Poté je vymezen význam sousloví „Výkonový zesilovač“, a vysvětleny jeho bloky. Poslední kapitola této části představuje možnosti digitálního řízení, a jejich potenciální využití pro změnu vlastností signálů, či pro řízení zesilovače.

Druhá část je věnována návrhu kytarového zesilovače, jehož činnost je digitálně řízena. První kapitola se zabývá obvodovým řešením kytarového zesilovače. Zde je vysvětlen důvod zařazení daného bloku do zesilovače, a jeho obvodová realizace. S ohledem na zadání zde zmíním blok frekvenčních korekcí. Právě v tomto bloku je využit digitální potenciometr, který nahrazuje klasické potenciometry. Tento blok tak umožňuje digitálně řízenou korekci frekvenční charakteristiky zesilovače. Následuje blok, jehož parametry jsou rovněž řízeny pomocí mikropočítače. V první části je neinvertující zapojení zesilovače s operačním zesilovačem. Jedním z rezistorů, určující zesílení tohoto stupně, je digitální potenciometr zapojen jako reostat. Lze tak digitálně nastavovat zesílení a tím tak omezit, či naopak podpořit limitaci tohoto zapojení. Následně je řazen elektronkový stupeň, kde je s využitím digitálního potenciometru zapojeného v katodě elektronky možné měnit pracovní bod. Vzhledem k zadání je koncový stupeň realizován pomocí elektronek. Konkrétněji je využito ultralinearního zapojení výkonových pentod EL34 ve třídě AB pracující v protitaktním režimu. Dále je popsán postup při návrhu desek plošných spojů pro jednotlivé bloky. V závěru této části je popsána řídicí jednotka, spolu s uživatelským rozhraním, a ovládacím softwarem. Pro digitální řízení je využit mikropočítač Raspberry Pi Pico, který komunikací po sběrnici I2C nastavuje polohy jezdců digitálních potenciometrů. Ovládací software je přílohou předložené práce.

Třetí a poslední část práce je věnována simulaci vybraných zapojení a měření zesilovače. Simulace je provedena pro zapojení, která jsou řízena digitálně. Tedy pro přenos bloku

frekvenčních korekcí, pro nastavitelné zapojení zesilovače s OZ, a pro změnu pracovního bodu elektronky ECC82. Při měření bloku frekvenčních korekcí byla ověřena jeho funkce, a především možnost řídit jeho parametry digitálně. Při porovnání simulace a měření jsou výsledky podobné. Došlo pouze k mírnému posunu frekvencí, což může být způsobeno například tolerancemi součástek. Při měření digitálně řízeného stupně bylo úspěšně ověřeno, že je možné pomocí digitálního potenciometru nastavovat pracovní bod elektronky ECC82, a řídit zesílení neinvertujícího zapojení s operačním zesilovačem. Lze tak nastavit požadované zkreslení signálu kytarového zesilovače.

Na základě získaných výsledků je možné zabývat se otázkou určité optimalizace řídicí jednotky. Je zde možnost využití displeje, který by uživateli přinášel komfortnější přehled o činnosti zesilovače. Možné je rovněž využití vývojového kitu Raspberry Pi Pico W, na kterém je implementován Wi-Fi modul. Pak by při využití vhodné aplikace bylo možné, konfigurovat a ovládat zesilovač například z mobilního telefonu, či PC.



**Obrázek 36:** Kytarový zesilovač s digitálním řízením.



## Použitá literatura

- [1] KOTISA, Zdeněk. *NF zesilovače – 1. díl Předzesilovače*. Praha: BEN – technická literatura, 2001. ISBN 80-7300-030-X.
- [2] *What are the Differences Between Hi-Fi and High-End?* [online]. hifilife. [cit. 28.3.2024]. Dostupné z: <https://hifilife.com/en/blogs/hi-fi-sound-systems-and-equipment/what-are-the-differences-between-hi-fi-and-high-end>
- [3] *Dual CV 1460* [online]. Springair. [cit. 20.4.2024]. Dostupné z: <https://www.springair.de/en/dual-cv-1460/h78431>
- [4] *Amplifier modeling* [online]. wikipedia. [cit. 5.4.2024]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Amplifier\\_modeling](https://en.wikipedia.org/wiki/Amplifier_modeling)
- [5] *Marshall 1959 SLP Plexi MKII head kytarový zesilovač* [online]. Musicsquare. [cit. 20.4.2024]. Dostupné z: [https://musicsquare.cz/134516\\_Marshall-1959-SLP-Plexi-MKII-head-kytarovy-zesilova.html](https://musicsquare.cz/134516_Marshall-1959-SLP-Plexi-MKII-head-kytarovy-zesilova.html)
- [6] TRŮNEČEK, Jiří. *Radiotechnika v teorii a praxi*. Praha: PRÁCE, 1963. ISBN 24-005-63.
- [7] *Tube vs. transistor* [online]. Tubeampdoctor. [cit. 22.5.2024]. Dostupné z: <https://www.tubeampdoctor.com/magazin/en/tube-vs-transistor/>
- [8] ŠANDERA Josef. *Elektronkové zesilovače, jejich vlastnosti a konstrukce* [online]. DPS Elektronika od A do Z. [cit. 20.4.2024]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/clanky/id:51478/elektronkove-zesilovace-jejich-vlastnosti-a-konstrukce>
- [9] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA . *ELEKTRONIKA součástka a obvody, principy a příklady*. 3. vyd. Praha: Grada, 2005. ISBN 978-80-247-1241-3.
- [10] VLACH, Jaroslav. *LAMPÁRNA aneb Co to zkusit s elektronkami?*. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-091-1
- [11] DAILEY, Denton J. *Electronics for Guitarists*. New York: Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-4086-4

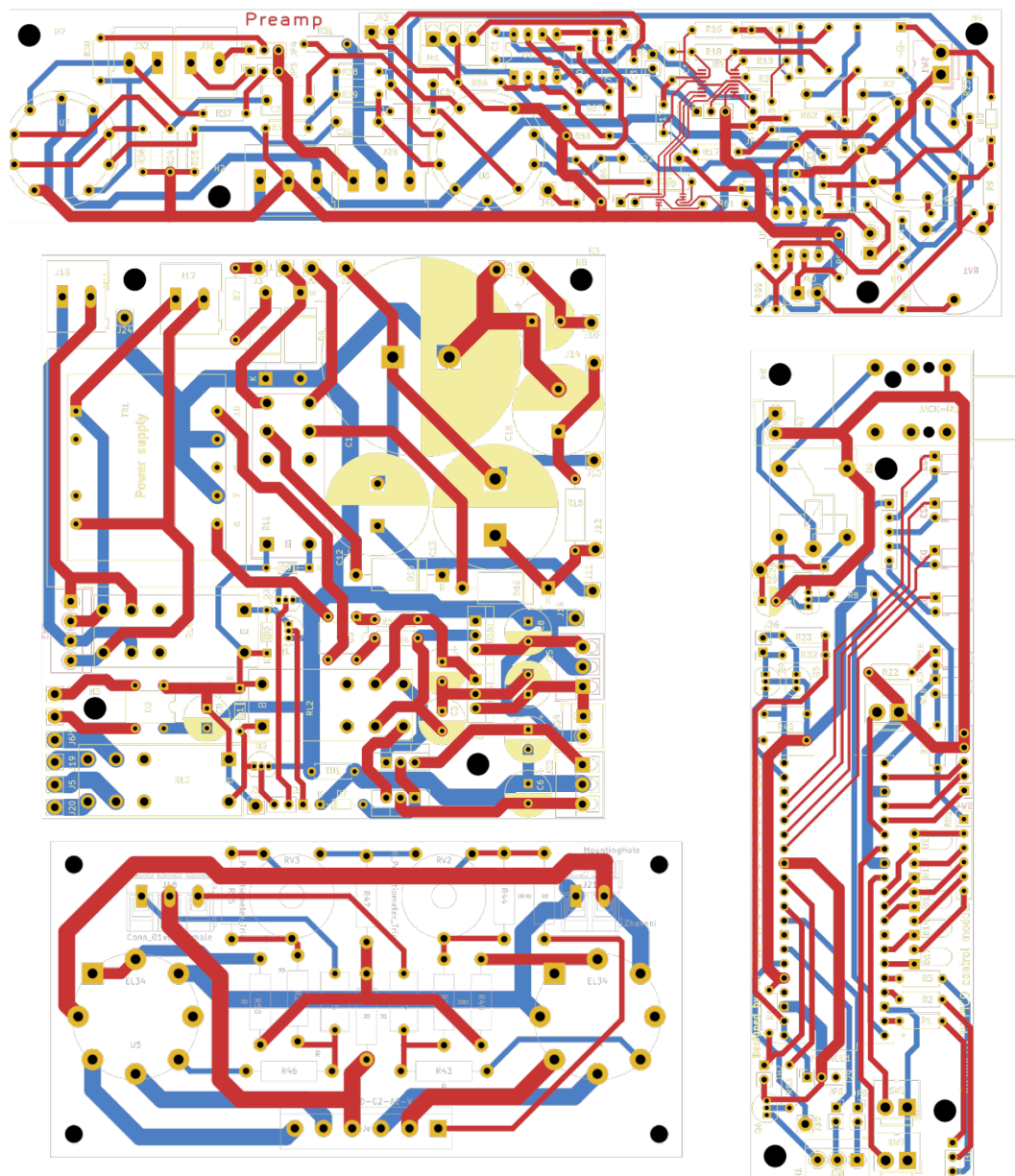
- [12] HOSPODKA, Jiří. *Elektronické obvody* [online]. [cit. 20.5.2024]. Dostupné z: <https://hippo.fel.cvut.cz/vyuka/soubory/ElektronickeObvody.pdf>
- [13] *Audio zesilovače pracující ve třídě D* [online]. ELWEB.CZ. [cit. 1.4.2024]. Dostupné z: <http://www.elweb.cz/clanky.php?clanek=109>
- [14] *302 Co je to třída zesilovače?* [online]. DEXON. [cit. 1.4.2024]. Dostupné z: <https://www.dexon.cz/clanky/serialy/302-co-je-to-trida-zesilovace.html>
- [15] *Jak zapojit kytarový signálový řetězec – II. díl* [online]. Frontman. [cit. 22.5.2024]. Dostupné z: <https://www.frontman.cz/jak-zapojit-kytarovy-signalovy-retezec-ii-dil>
- [16] LUKEŠ, Jaroslav. *Věrný zvuk*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. ISBN 301-05-38.
- [17] *Digital potentiometer* [online]. Wikipedia. [cit. 20.4.2024]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_potentiometer](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_potentiometer)
- [18] FRAJDL, Martin. *Elektromagnetické relé* [online]. laskakit. [cit. 10.4.2024]. Dostupné z: <https://blog.laskakit.cz/elektromagneticke-rele/>
- [19] *Improved Quad CMOS Analog Switches* [online]. Farnell. [cit. 20.4.2024]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/2046374.pdf>
- [20] *Stolní zesilovač AZK 450* [online]. Svět elektronek. [cit. 12.5.2024]. Dostupné z: <http://www.svetelektronek.wz.cz/tesla/music70.pdf>
- [21] *AD5280/AD5282* [online]. Farnell. [cit. 23.4.2024]. Dostupné z: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5280\\_5282.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5280_5282.pdf)
- [22] *Raspberry Pi Pico H* [online]. rpishop.cz. [cit. 23.4.2024]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/raspberry-pi-pico/5069-raspberry-pi-pico-h.html>
- [23] *Raspberry Pi Pico datasheet* [online]. raspberrypi. [cit. 23.4.2024]. Dostupné z: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-datasheet.pdf>
- [24] *GEEC: Graphic editor of electrical circuits* [online]. GEEEC. [cit. 22.5.2024]. Dostupné z: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-datasheet.pdf>



- [25] *Measuring the Frequency Response of an Amplifier, Equalizer, etc.* [online]. Rohde-Schwarz. [cit. 21.5.2024]. Dostupné z: [https://www.rohde-schwarz.com/webhelp/upv\\_onlinemanual\\_en\\_1/Content/d144512e5853.htm](https://www.rohde-schwarz.com/webhelp/upv_onlinemanual_en_1/Content/d144512e5853.htm)
- [26] *Measuring Total Harmonic Distortion (THD+N) of a DUT* [online]. RohdeSchwarz. [cit. 21.5.2024]. Dostupné z: [https://www.rohde-schwarz.com/webhelp/upv\\_onlinemanual\\_en\\_1/Content/d144512e6467.htm](https://www.rohde-schwarz.com/webhelp/upv_onlinemanual_en_1/Content/d144512e6467.htm)

# Přílohy

## Desky plošných spojů



# Schematické zapojení zesilovače

