

Bakalárska práca



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Tranzistorový zesilňovač pre gitaru

Juraj Pohoriljak

Školiteľ: doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
Máj 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pohoriljak** Jméno: **Juraj** Osobní číslo: **499044**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Tranzistorový zesilovač pro kytaru

Název bakalářské práce anglicky:

Transistor Amplifier for Guitar

Pokyny pro vypracování:

Provedte rešerši kytarových předzesilovačů, včetně zapojení s elektronkami. Zaměřte se jednak na parametry vyráběných typů, jednak na jejich zapojení a konstrukci. Vybraná zapojení zesilovačů dle možností analyzujte v obvodovém simulátoru a zjistěte jejich parametry. Zaměřte se zejména na nelineární chování v limitaci, které je typické pro zvuk elektronkových typů zesilovačů. Dále navrhnete vlastní řešení tranzistorového zesilovače s podobnými vlastnostmi jako vykazují zapojení s elektronkami. Výslednou obvodovou strukturu dle možností realizujte funkčním vzorkem a jeho vlastnosti ověřte měřením.

Seznam doporučené literatury:

- [1] KOTISA, Z. NF ZESILOVAČE – 1. díl PŘEDZESILOVAČE. Praha: Nakladatelství BEN, 2001.
- [2] CORDELL, B.: Designing audio power amplifiers. New York: McGraw-Hill, 2011. ISBN 978-0-07-164024-4.
- [3] Wikipedia.org. Guitar amplifier [online]. www [cit. 1.2. 2023]. Dostupné na www: <http://en.wikipedia.org/wiki/Guitar_amplifier>.
- [4] Wikipedia.org. Effect unit [online]. www [cit. 1.2. 2023]. Dostupné na www: <http://en.wikipedia.org/wiki/Effect_unit>.
- [5] WinSpice. Affordable Circuit Simulation Software [online]. www [cit. 1.2. 2023]. Dostupné na www: <<https://www.winspice.co.uk/>>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **06.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
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

Podakovanie

Chcel by som poďakovať vedúcemu práce Doc. Ing. Dr. Jiřímu Hospodkovi za pomoc pri tejto práci. Ďalej by som rád poďakoval rodine a všetkým kamarátom za podporu pri štúdiu. V neposlednom rade patrí moja vďaka študentským podnikom Bar u Dna a Strahov Bar Desítka za to že tu pre mňa boli nielen pri písaní tejto práce ale aj počas celého štúdia.

Prehlásenie

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracoval samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržovaní etických princípov pri príprave záverečných prací.

V Prahe dňa 25. 05. 2023

Abstrakt

V práci sú popísané gitarové zosilňovače jak elektronkové, tak tranzistorové a v krátkosti moderné modelingové čiže digitálne. Popísané sú taktiež jednotlivé druhy elektróniek a tranzistorov používaných v týchto zapojeniach. Podrobnejšie je popísaný predzosilňovač na ktorý je práca zameraná. Ďalej je prevedená simulácia konkrétneho predzosilňovača používaného v zosilňovačoch Marshall JCM800 modelu 2203/2204 na základe ktorého je navrhnuté tranzistorové riešenie tohto zapojenia realizované ako efektový pedál pomocou tranzistorov JFET.

Kľúčové slová: zosilňovač, predzosilňovač, elektrónky, tranzistory, gitarový zosilňovač, efektový pedál

Školiteľ: doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
Katedra teorie obvodů

Abstract

Described in this work are both vacuum tube and solid-state guitar amplifiers with modern modeling amplifiers being briefly mentioned. Also described are the individual types of tubes and transistors used in these circuits. Emphasis is placed on the pre-amplifier, which this work is focused on. A specific pre-amplifier used in Marshall JCM800 models 2203/2204 was simulated, and a transistor based circuit based on it was realized as an effects pedal using JFET transistors.

Keywords: amplifier, pre-amplifier, vacuum tubes, transistors, guitar amplifier, effects pedal

Title translation: Transistor Amplifier for guitar

Obsah

Úvod	1	5 Zapojenie s tranzistormi	31
1 Gitarové zosilňovače	3	5.1 Prvý stupeň.....	31
1.1 Konštrukcia	3	5.2 Druhý stupeň	32
1.1.1 Predzosilňovač.....	4	5.3 Tretí stupeň	34
1.1.2 Výkonový zosilňovač.....	4	5.4 Simulácia celého zapojenia (tranzistory)	36
1.1.3 Napájanie	4	5.5 Porovnanie elektrónkového a tranzistorového zapojenia	36
1.1.4 Reproduktor	4	5.5.1 Meranie	37
1.2 Efektové pedály	5	5.6 Doska plošného spoja	37
1.2.1 Overdrive	5	Záver	39
1.2.2 Distortion	5	Literatúra	41
2 Aktívne súčiastky	7	Prílohy	45
2.1 Elektrónky	7	Model Norman Koren elektrónky ECC83/12AX7	45
2.1.1 Dióda	7	Meracie prístroje.....	45
2.1.2 Trióda	8	Schéma zapojenia predzosilňovača Marshall JCM800 modely 2203/2204.....	46
2.1.3 Tetróda	8	Schéma zapojenia navrhnutého efektového pedálu.....	47
2.1.4 Pentóda	9		
2.1.5 Parametre triód	9		
2.2 Tranzistory	9		
2.2.1 Unipolárny tranzistor (FET)	10		
2.2.2 Bipolárny tranzistor (BJT) ..	11		
2.2.3 Skreslenie tranzistorov	12		
3 Elektrónkový predzosilňovač	13		
3.1 Zosilňovač so spoločnou katódou	13		
3.1.1 Pracovný bod	15		
3.2 Harmonické skreslenie	16		
3.2.1 Orezávanie mriežkovým prúdom	16		
3.2.2 Orezávanie zavretím	16		
3.3 Intermodulačné skreslenie	17		
3.4 Katódový sledovač	17		
3.5 Ovládanie tónu	18		
3.6 Tranzistorový zosilňovač	18		
3.6.1 Zapojenia s operačným zosilňovačom	19		
3.6.2 Modelingové zosilňovače	20		
4 Zapojenie s elektrónkami	21		
4.1 Marshall JCM800 model 2204 ..	21		
4.1.1 Simulácia	22		
4.1.2 Prvý stupeň	24		
4.1.3 Druhý stupeň	25		
4.1.4 Tretí stupeň	26		
4.1.5 Ekvalizér	28		
4.2 Simulácia celého zapojenia (Elektrónky)	29		

Obrázky

1.1 Rôzne druhy gitarových zosilňovačov[31].	3	4.5 Frekvenčná odozva prvého stupňa s vyznačeným poklesom o 3 dB.	24
1.2 Schéma zapojenia Overdrive pedálu Tube Screamer[21].	5	4.6 Spektrum signálu na výstupe prvého stupňa.	25
1.3 Schéma zapojenia Distortion pedálu DS-1[23].	6	4.7 Druhý zosilňovací stupeň.	25
1.4 Pedály BOSS DS-1(vpravo) a Ibanez Tube Screamer(vľavo)[25, 26]. 6		4.8 Frekvenčná odozva druhého stupňa.	26
2.1 Prenosová a anódová charakteristika elektrónky ECC83S od JJ electronics[11].	8	4.9 Spektrum signálu na výstupe druhého stupňa.	26
2.2 Popis konštrukcie a symboli pre N a P kanálový JFET[38].	10	4.10 Tretí zosilňovací stupeň.	27
2.3 Typická výstupná charakteritika tranzistoru JFET typu N[39].	11	4.11 Frekvenčná odozva tretieho stupňa.	27
2.4 Konštrukcia a symboli pre NPN a PNP bipolárne tranzistory, upravené zo zdroja[44].	11	4.12 Spektrum signálu na výstupe tretieho stupňa.	28
2.5 Typická výstupová charakteristika tranzistoru BJT typu NPN s vyznačeným pracovným bodom[45]. 12		4.13 Ekvalizér	28
3.1 Zosilňovač so spoločnou katódou 13		4.14 Spektrum signálu na výstupe ekvalizéra.	29
3.2 Vstupy High a Low v zosilňovači Marshall[18].	14	5.1 Prvý zosilňovací stupeň(JFET). 31	
3.3 Zatažovacia priamka v charakteristike elektrónky ECC83S od JJ electronics.	15	5.2 Frekvenčná odozva prvého stupňa s vyznačeným poklesom o 3 dB.	32
3.4 Zosilnený vstupný signál ovplyvnený orezaním mriežkovým prúdom	16	5.3 Spektrum signálu na výstupe prvého stupňa.	32
3.5 Zosilnený vstupný signál ovplyvnený zavretím elektrónky	17	5.4 Druhý zosilňovací stupeň(JFET). 33	
3.6 Typické zapojenie katódového sledovača[29].	17	5.5 Frekvenčná odozva druhého stupňa.	33
3.7 Zosilňovač so spoločným sourcom. 18		5.6 Spektrum signálu na výstupe druhého stupňa.	34
3.8 Schéma zapojenia zosilňovača Ruby od Runoffgroove[33].	19	5.7 Druhý zosilňovací stupeň(JFET). 34	
3.9 Ovládací panel zosilňovača BOSS Katana 50 W[34].	20	5.8 Frekvenčná odozva tretieho stupňa.	35
4.1 Zosilňovač Marshall JCM800 model 2203/2204 [16].	21	5.9 Spektrum signálu na výstupe tretieho stupňa.	35
4.2 Obvodový model triódy[19].	22	5.10 Spektrum signálu na výstupe ekvalizéra.	36
4.3 Simulovaná anódová charakteristika triódy ECC83S.	23	5.11 Doska plošného spoja v návrhovom prostredí programu KiCad 6.0.	38
4.4 Prvý zosilňovací stupeň.	24	5.12 Schéma predzosilňovača JCM800 model 2203/2204	46
		5.13 Schéma zapojenia s tranzistormy 47	

Tabuľky

4.1 Zvolené parametre pre model Norman Koren.	22
4.2 Parametre elektrónky ECC83S od JJ electronics[11].	22
5.1 Tabuľka ziskov a skreslení jednotlivých stupňov elektrónkového a tranzistorového predzosilňovača.	36
5.2 Tabuľka zmeraných hodnôt prvého zosilňovacieho stupňa pre jednotlivé súčiastky JFET BF256B.	37
5.3 Tabuľka priemerných a simulovaných hodnôt prvého stupňa.	37



Úvod

Elektrónkové zosilňovače boli prvými gitarovými zosilňovačmi. V dnešnej dobe už existuje veľké množstvo zosilňovačov, mimo elektrónkových a tranzistorových existujú aj moderné modelingové s možnosťou pripojenia k osobnému počítaču ale aj software simulujúci klasické zosilňovače. Síce sú elektrónky zastaranou technológiou, zosilňovače s nimi sa používajú dodnes a zvuk ktoré produkujú je mnohými hudobníkmi preferovaný. Veľkú časť zosilňovača tvorí práve predzosilňovač v ktorom dochádza nielen k zosilneniu signálu ale aj jeho upraveniu ekvalizérom a k istému skresleniu.

Cieľom práce je urobiť rešerš gitarových predzosilňovačov, vybrať konkrétny elektrónkový typ a jeho zapojenie analyzovať a na jeho základe navrhnúť tranzistorové riešenie použité ako efektový pedál.

Toto téma rozšírené o podrobný popis výkonového zosilňovača, simulácie a meranie iného typu zosilňovača predomnou spracoval Šimon Fojtík v jeho bakalárskej práci ktorú som si prečítal[35].

Kapitola 1

Gitarové zosilňovače

Gitarové zosilňovače upravujú signál z elektro-magnetických snímačov elektrickej gitary a zosilňujú ho tak aby bol dobre počuteľný. Prvé gitarové zosilňovače sa začali objavovať koncom 20. rokov 20. storočia, tieto zosilňovače boli jednoduché reprodukčné systémy s nízkym výkonom a bez možnosti ovládania tónu[1]. V 30. rokoch boli vyrobené prvé elektrické gitary¹ a s ich zvyšujúcou sa popularitou sa ďalej rozvíjal vývoj zosilňovačov[2]. Takmer všetky zosilňovače boli až do 70. rokov elektrónkové, kedy ich začali nahrádzať zosilňovače tranzistorové pre ich nižšiu cenu, lepšiu životnosť a nižšie rozmery, avšak elektrónkové zosilňovače sú mnohými hudobníkmi dodnes preferované pre ich zvuk a charakter skreslenia[2].



Obrázok 1.1: Rôzne druhy gitarových zosilňovačov[31].

1.1 Konštrukcia

Gitarové zosilňovače môžeme rozdeliť podľa aktívnej elektroniky na elektrónkové, tranzistorové alebo prípadne hybridné, podľa konštrukcie na kombá

¹Dovtedy boli zosilňovače určené pre akustické gitary na ktoré bol nasadený snímač

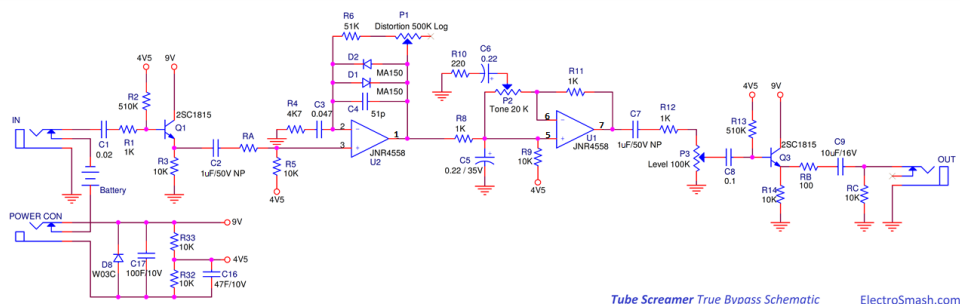
mer, malé zosilňovače určené na cvičenie majú 4 až 8 palcové reproduktory[6].

1.2 Efektové pedály

Efektové pedály sú zariadenia ktoré sa pripájajú k zosilňovaču a ďalej upravujú zvukový signál. Pedály majú väčšinou tvar krabičky a sú ovládané potenciometrami ktoré nastavujú parametre výsledného signálu a spínajú sa nožným spínačom. Existuje množstvo rôznych druhov efektov, ako Distortion, Overdrive, ktoré vytvárajú istý druh skreslenia, ale aj rôzne modulačné efekty ako napríklad Phaser, ktorý využíva fázové filtre.

1.2.1 Overdrive

Efektový pedál Overdrive je pedál používaný na skreslenie vstupného signálu. Názov overdrive vyplýva zo slova prebudenie, tieto pedály poskytujú jemnejšie “elektrónkové“ skreslenie signálu. Ovládanie zahŕňa potenciometer na nastavenie miery skreslenia, ďalej nastavenie hlasitosti prípadne tónu. Skreslenie je v týchto obvodoch dosahované pomocou dvojice diód, nazývaných clippingové diódy, ktoré sú zapojené antiparalelne v spätnej väzbe operačného zosilňovača. Týmto spôsobom je dosiahnuté jemnejšie orezávanie špičiek sinusoidy vstupného signálu, toto orezávanie je symetrické. Znáмым pedálom typu overdrive je Tube Screamer od značky Ibanez, ktorého schéma je na obrázku 1.2.



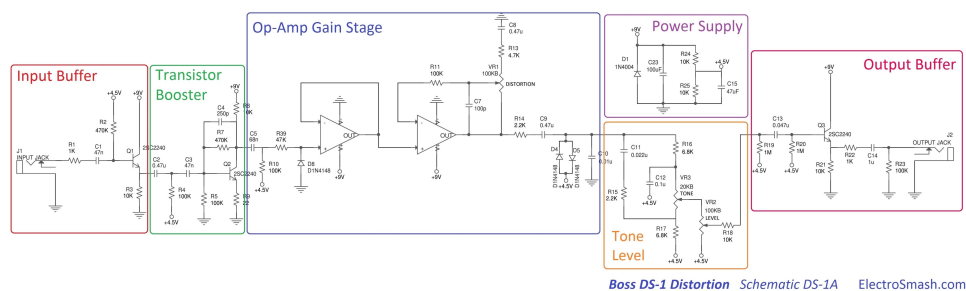
Obrázok 1.2: Schéma zapojenia Overdrive pedálu Tube Screamer[21].

Zapojenie je jednoduché, na vstupe aj výstupe sú emitorové sledovače slúžiace ako buffer. Jadro pedálu tvorí duálny operačný zosilňovač, kde dochádza práve k zosilneniu signálu a jeho skresleniu (prvý operačný zosilňovač) a kmitočtovým úpravám (Druhý operačný zosilňovač)[22].

1.2.2 Distortion

Druhým typom pedálov produkujúcich skreslenie je Distortion. Názov vyplýva priamo zo slova skreslenie, tento typ pedálov produkuje tvrdšie a náhle skreslenie signálu, typické pre tranzistorové zosilňovače. Ovládanie je rovnaké ako pri pedáloch Overdrive, rovnako ako aj spôsob skreslenia pomocou dvoch antiparalelne zapojených orezávacích diód, avšak tentokrát nie sú zapojené

v spätnej väzbe operačného zosilňovača. Známym pedálom typu Distortion je DS-1 od značky Boss, ktorého schéma je na obrázku 1.3.



Obrázok 1.3: Schéma zapojenia Distortion pedálu DS-1[23].

Opäť sa jedná o jednoduché zapojenie, takmer rovnaké ako zapojenie pedálu Tube Screamer. Na vstupe a výstupe sú opäť buffre a jadro je tvorené duálnym operačným zosilňovačom. Pred vstupom do prvého operačného zosilňovača je však ešte zosilňovač so spoločným emitorom, ktorý signál zosilňuje na úroveň vhodnú pre ďalšiu časť obvodu. Veľký zisk tohto zosilňovača spôsobuje asymetrickosť výsledného signálu. Zvýšením emitorového odporu je možné znížiť zisk, čím je dosiahnutá väčšia kontrola nad mierou skreslenia. S použitým nízkym odporom je výsledný signál pri natočení potenciometru Distortion na plno obdĺžnikového charakteru. Za operačným zosilňovačom signál ďalej prechádza cez obvod pre kmitočtové úpravy ktorý je v tomto prípade tvorený dvojicou filtrov, jeden typu horná priepusť a druhý typu dolná priepusť. Potenciometer Tone mieša tieto dva signály. Ďalej potenciometer Level nastavuje hlasitosť tak že podľa natočenia časť signálu uzemňuje.[24].



Obrázok 1.4: Pedály BOSS DS-1(vpravo) a Ibanez Tube Screamer(vľavo)[25, 26].

Kapitola 2

Aktívne súčiastky

V tejto kapitole budú bližšie popísané aktívne súčiastky používané v gitarových zosilovačoch. Sú to elektrónky, z ktorých sa používajú triódy v predzosilňovači (Najčastejšie trióda ECC83/12AX7) a pentódy vo výkonovom zosilňovači (EL34, 6V6...). V zosilňovačoch snažiacich sa priblížiť k elektrónkovému zvuku sa používajú najmä tranzistory JFET. Z elektróniek sa zameriam primárne na triódy keďže v tejto práci sa sústreďujem na predzosilňovače v ktorých sa používajú.

2.1 Elektrónky

Termionické, iný názov vákuové elektrónky sú zariadenia valcového tvaru z ktorých je pri výrobe odčerpaný vzduch tak aby vzniklo vákuum. Elektrónky obsahujú dve alebo viac elektród medzi ktorými prúdia elektróny. Najzákladnejšou elektrónkou je dióda ktorá obsahuje iba dve elektródy, katódu a anódu. ďalšie typy elektróniek sú trióda, tetróda a pentóda ktoré okrem katódy a anódy obsahujú ďalšie elektródy, takzvané mriežky. Katóda v strede elektrónky je priamo alebo nepriamo zahrievaná na vysokú teplotu, pri ktorej začne vypúšťať do vákua elektróny ktoré sú zachytávané anódou ktorú tvorí valcovitý pliešok okolo katódy[9, 10].

Elektrónky boli dominantnou súčiastkou používanou v gitarových zosilňovačoch až do ich nahradenia tranzistormi v 70. rokoch minulého storočia. Napriek tomu že sú elektrónky zastaranou technológiou, veľké množstvo muzikantov používa elektrónkové zosilňovače dodnes a preferujú ich pred tranzistorovými kvôli ich špecifickému zvuku a skresleniu. Nevýhodou elektróniek je však ich vyššia cena a náchylnosť na poškodenie[2].

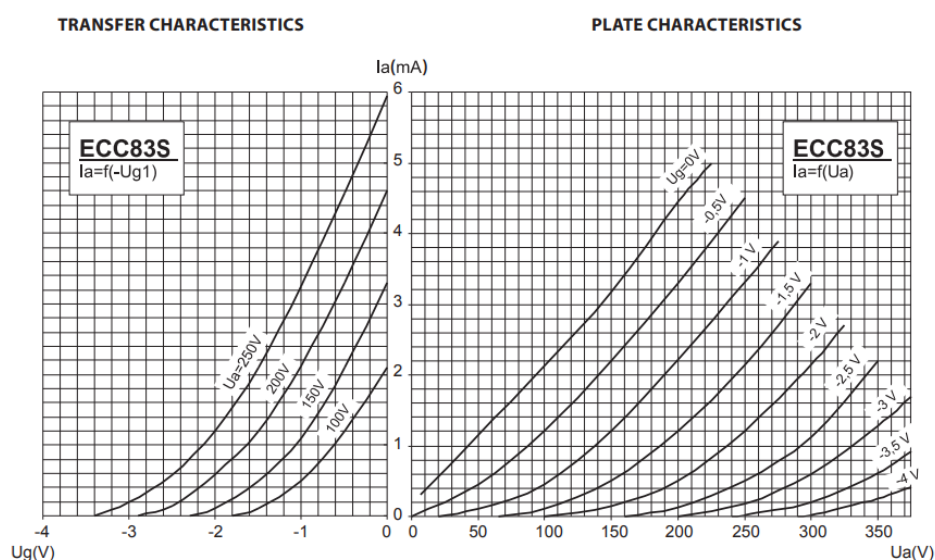
2.1.1 Dióda

Diódu vynášiel v roku 1904 John Ambrose Fleming a je najzákladnejším typom elektrónky, obsahujúca iba katódu a anódu. Ak je na anódu diódy privedené záporné napätie tak nebude priťahovať elektróny a teda vedie prúd len v jednom smere a preto sa používa ako usmerňovač[9, 10].

2.1.2 Trióda

Triódu vynášiel v roku 1907 Lee De Forest pridaním tretej elektródy medzi katódu a anódu. Túto tretiu elektródu nazývame riadiaca mriežka, a ako vyplíva z názvu je tvorená jemnou kovovou mriežkou ktorá obkolesuje katódu. Privedením napätia na riadiacu mriežku je možné ovládať prúd elektrónov ktorý zachytáva anóda, ak je napätie na mriežke kladné, elektróny cez ňu prejdú a pokračujú k anóde, ak je napätie na mriežke záporné, časť elektrónov sa odrazí späť ku katóde. Znižovaním napätia je teda možné ovládať prúd anódou, až do bodu kedy anódou netečie žiaden prúd[9, 10]. Pri triódach môže spôsobiť problém parazitná kapacita medzi mriežkou a anódou (okolo 4 pF pre ECC83/12AX7), ktorá sa násobí Millerovým efektom a obmedzuje frekvenčné pásmo, táto kapacita sa nazýva Millerova kapacita[10, 12].

Triódy sa používajú na zosilnenie signálu, v gitarových zosilňovačoch sa používajú v jednotlivých stupňoch v predzosilňovači. Najčastejšie používanou triódou pre tento účel je trióda ECC83/12AX7.



Obrázok 2.1: Prenosová a anódová charakteristika elektrónky ECC83S od JJ electronics[11].

2.1.3 Tetróda

Tetróda obsahuje 4 elektródy: katódu, anódu, riadiacu mriežku a druhú mriežku. Tetróda funguje podobne ako trióda a existuje viacero typov tetród ktoré sa líšia úlohou druhej mriežky, avšak najčastejšou je tetróda s tieniacou mriežkou. Tento typ tetródy vynášiel v roku 1919 Walter H. Schottky a jej úlohou bolo znížiť parazitnú kapacitu medzi anódou a mriežkou ktorá pri triódach spôsobovala nestabilitu[13, 14]. V tetródach dochádza k sekundárnej emisii, kedy elektróny dopadajúce na anódu majú dostatočnú rýchlosť aby z nej vyrazili elektróny. Pri určitom napätí majú tieto sekundárne elektróny

takú rýchlosť že sa dostanú dostatočne blízko k tieniacej mriežke na to aby na ňu boli pritiahnuté, čím sa zníži prúd anódou. Tento efekt trvá až kým sa napätie na anóde nedostane na dostatočnú úroveň na to, aby na seba anóda bola schopná späť pritiahnúť sekundárne elektróny[14].

■ 2.1.4 Pentóda

Pridaním ďalšej mriežky medzi anódu a tieniacu mriežku dostávame pentódu, ktorú vynášli v roku 1926 Gilles Holst a Bernard D.H Tellegen. Úlohou tejto tretej mriežky je odpudiť elektróny zo sekundárnej emisie späť na anódu[10, 15]. Pentódy sa v gitarových zosilňovačoch používajú vo výkonovom zosilňovači.

■ 2.1.5 Parametre triód

Najdôležitejšie parametre triód sú odpor anódy r_a , transkonduktancia g_m a faktor zosilnenia μ . Hodnoty týchto parametrov sú uvedené v datasheete danej triódy a určujú sa z jej anódovej charakteristiky. Tieto parametre je možné vyjadriť nasledovnými vzorcami 2.1, 2.2 a 2.3.

$$r_a = \Delta V_a / \Delta I_a |_{U_g = \text{konst.}} \quad (2.1)$$

$$g_m = \Delta I_a / \Delta V_g |_{U_a = \text{konst.}} \quad (2.2)$$

$$\mu = \Delta V_a / \Delta V_g |_{I_a = \text{konst.}} \quad (2.3)$$

Kde I_a je prúd anódou, V_a napätie na anóde a V_g napätie na mriežke. Ďalej je možné použiť takzvanú van der Bjil rovnosť, rovnica 2.4.

$$\mu = g_m \cdot r_a \quad (2.4)$$

Je teda možné tretí parameter dopočítať ak poznáme zvyšné dva[9].

■ 2.2 Tranzistory

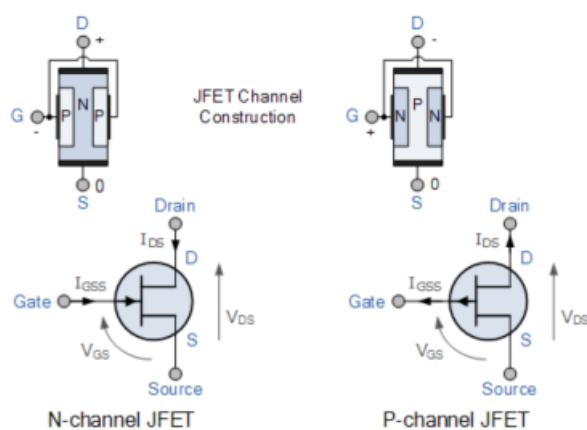
Tranzistory sú polovodičové súčiastky používané v zosilňovačoch alebo ako spínač. Delia sa na bipolárne (tranzistory používajúce jak elektróny, tak aj elektrónové diery ako nosiče náboja) a unipolárne (tranzistory používajúce buď elektróny alebo diery ako nosiče náboja). Tranzistory sú základným blokom modernej elektroniky.

V gitarových zosilňovačoch sa tranzistory začali používať v 70. rokoch 20. storoč kedy postupne začali nahradzovať zosilňovače elektrónkové. Výhod tranzistorov je mnoho, nie je potrebné ich nahrievať, majú nižšiu cenu, rozmery, životnosť atď. Používajú sa unipolárne aj bipolárne tranzistory, no v obvodoch snažiacich sa napodobniť elektrónky sa používajú tranzistory JFET pretože majú najpodobnejšie vlastnosti (Viac sa však podobajú na pentódy ako na triódy)[2, 36, 37].

2.2.1 Unipolárny tranzistor (FET)

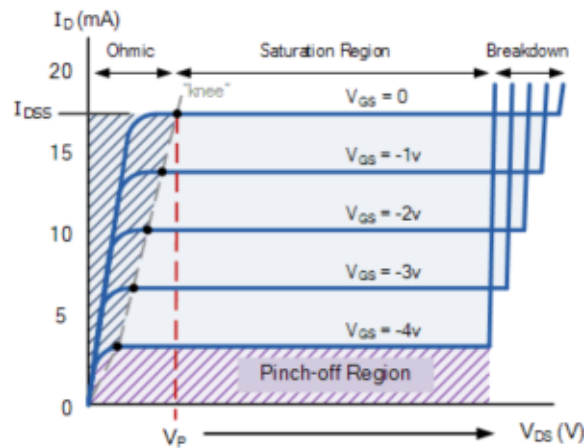
Koncept unipolárnych tranzistorov navrhol v roku 1925 Julius Edgar Lilienfeld, a prvým vyrobeným bol tranzistor JFET v roku 1953. Anglická skratka FET znamená field-effect transistor, čiže tranzistor riadený elektrickým poľom. Pri unipolárnych tranzistoroch sú nosičmi náboja buď elektróny alebo diery, nikdy však oboje a podľa toho sa delia na tranzistory typu N (elektróny) alebo P (diery). Unipolárne tranzistory majú 3 elektródy a sú gate, source a drain. Privedením napätia na riadiacu elektródu gate je ovládaný prúd pretekajúci medzi drainom a sourcom, jedná sa teda o napätím riadené súčiastky. Tvorené sú dlhým polovodičovým kanálom dotovaným tak aby obsahoval kladné nosiče náboja, čiže diery (typ P) alebo záporné nosiče náboja, čiže elektróny (typ N). Na jednej strane tohto kanála je elektróda drain a na druhej source. Elektróda gate je umiestnená na polovodičový materiál ktorý s týmto kanálom tvorí P-N prechod. Popis konštrukcie a symboli pre JFETy typu N a P sú na obrázku 2.2. Smery prúdov a polarity napätí sú pre JFET typu N opačné ako pre JFET typu P[36, 42].

V dnešnej dobe sú síce najrozšírenejšími unipolárnymi tranzistormi tranzistory MOSFET, avšak zameriam sa na tranzistory JFET keďže práve tie sa používajú v gitarových zosilňovačoch (Najčastejšie JFETy typu N).



Obrázok 2.2: Popis konštrukcie a symboli pre N a P kanálový JFET[38].

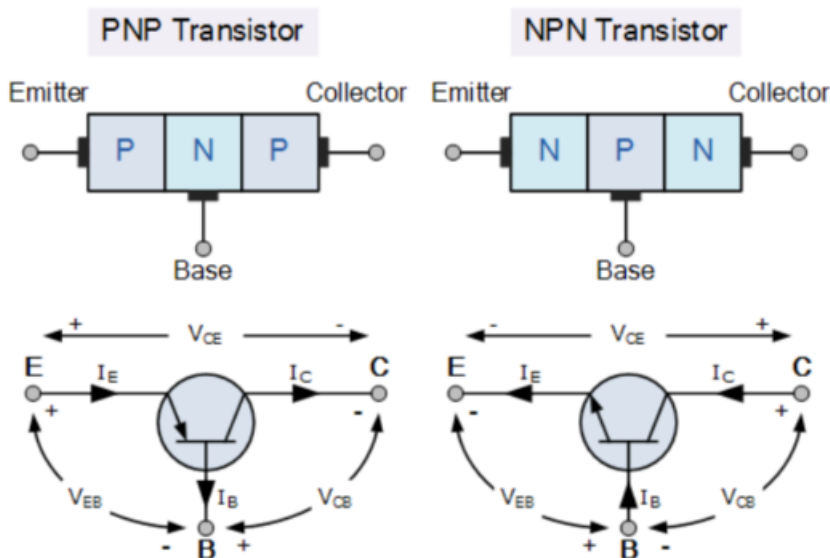
Typická výstupná charakteristika pre JFET je na obrázku 2.3. V charakteristike sú vyznačené jednotlivé operačné regióny. Keď napätie medzi gatom a sourcom U_{gs} presiahne prahové napätie označované ako $U_{gs(off)}$, tranzistorom náhle prestane tiecť prúd. Toto je práve jeden z dôvodov rozdielneho skreslovania tranzistorov, zatiaľ čo pri elektrónkach po dosiahnutí prahového napätia ešte nejakú dobu istý prúd tečie, pri tranzistoroch prestáva tiecť veľmi prudko. Hodnota prahového napätia $U_{gs(off)}$ sa uvádza v datasheete danej súčiastky, avšak neuvádza sa presná hodnota ale rozmedzie hodnôt ktoré je v niektorých prípadoch celkom veľké a teda tranzistory rovnakého typu sa medzi sebou môžu veľmi líšiť[40]. Pre mnou používaný JFET BF256B je táto hodnota uvedená v rozmedzí -0.5 až -8 V[41].



Obrázok 2.3: Typická výstupná charakteristika tranzistoru JFET typu N[39].

2.2.2 Bipolárny tranzistor (BJT)

Prvý bipolárny tranzistor vyrobili v roku 1950 Gordon Teal a Morgan Sparks. Narozdiel od unipolárnych tranzistorov sú bipolárne tranzistory prúdom riadenými súčiastkami keďže výstupný prúd na kolektore je úmerný vsutpnému prúdu na bázi, a nosičmi náboja sú aj elektróny aj diery. Tvorené sú polovodičovým materiálom rozdeleným na tri oblasti ktoré vytvárajú dvojicu P-N prechodov. Podľa usporiadania týchto oblastí sa opäť delia na dva typy, NPN alebo PNP. Na každej z týchto oblastí je umiestnená elektróda, ktoré sa v prípade bipolárnych tranzistorov nazývajú báza, emitor a kolektor[43]. Konštrukcia a schématické značky sú na obrázku2.4.

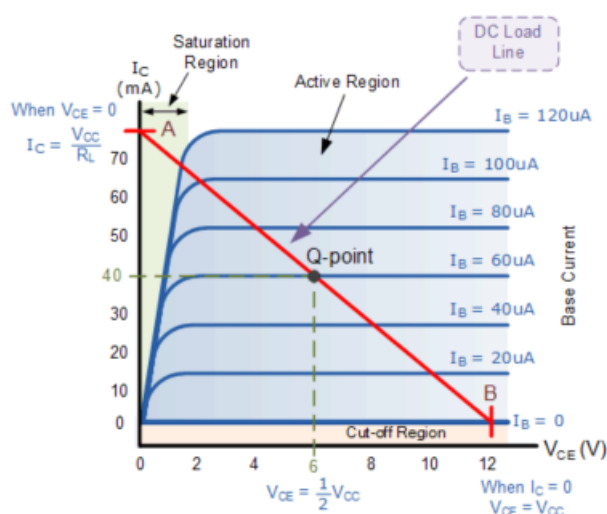


Obrázok 2.4: Konštrukcia a symboly pre NPN a PNP bipolárne tranzistory, upravené zo zdroja[44].

Ako vidno z obrázku, opäť platí že pre tranzistory typu NPN sú smery prúdov a polarita napätí opačné ako pre PNP. Dôležitým parametrom tranzistorov BJT je faktor zosilnenia označovaný ako β pre zapojenia so spoločným emitorom, tento parameter dáva do pomeru prúd kolektorom a prúd bázou, čiže $\beta = I_c/I_b$. Pre zapojenia so spoločnou bázou sa udáva parameter α ktorý sa počíta ako $\alpha = I_c/I_e$. Prepočet medzi parametrami α a β je rovnica 2.5[43].

$$\beta = \frac{\alpha}{\alpha + 1} \quad (2.5)$$

Typická výstupná charakteristika tranzistoru BJT je na obrázku ???. V charakteristike opäť vidno operačné regióny, sú to aktívna časť a saturačná časť. Tranzistor je zavretý keď je prúd bázou nulový[43].



Obrázok 2.5: Typická výstupná charakteristika tranzistoru BJT typu NPN s vyznačeným pracovným bodom[45].

2.2.3 Skreslenie tranzistorov

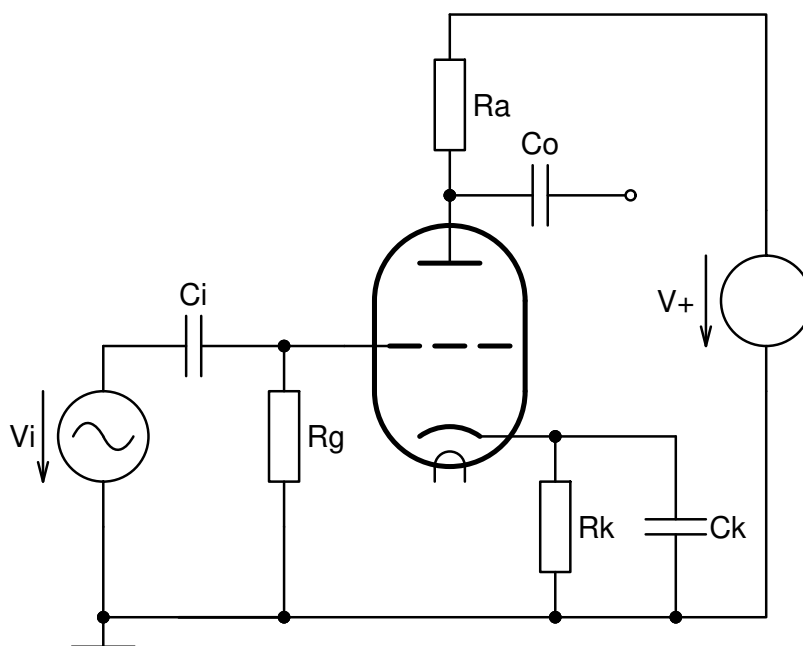
Pri prebudených tranzistoroch dochádza k tvrdému orezaniu špičiek signálu, tento efekt sa nazýva "hard clipping". Jeden z dôvodov je že tranzistorom pri dosiahnutí prahového napätia veľmi rýchlo prestáva tiecť prúd, narozdiel od elektróniek kedy malý prúd chvíľu ešte tečie. Ďalším dôvodom je že prenosová charakteristika tranzistorov má prudký prechod medzi lineárnou časťou a saturačnou/prahovou časťou, prenosová charakteristika elektróniek je v porovnaní miernejšia. Spektrum takto orezaného signálu obsahuje nepárne harmonické s vysokou amplitúdou a tento zvuk je vnímaný ako drsný, zatiaľ čo spektrum signálu orezaného elektrónkami obsahuje aj párne harmonické[37, 46]. Rôzny charakter skreslenia je práve jeden z dôvodov prečo sú niektorými hudobníkmi preferované elektrónkové zosilňovače dodnes.

Kapitola 3

Elektrónkový predzosilňovač

V tejto kapitole budú popísané funkčné bloky používané v elektrónkových predzosilňovačoch. Taktiež bude popísané skreslenie ktoré elektrónky produkujú.

3.1 Zosilňovač so spoločnou katódou

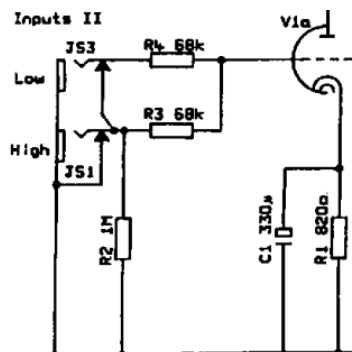


Obrázok 3.1: Zosilňovač so spoločnou katódou

Základným zapojením pre zosilňovacie stupne v elektrónkových predzosilňovačoch je zosilňovač so spoločnou katódou. V_i je vstupný signál z gitarového snímača, veľkosť tohto signálu závisí na type snímača. Signál z jednocievkových snímačov je typicky nižší ako signál z dvojcievkových “humbucker“ snímačov. V_+ je napájacie napätie.

Odpor R_g sa nazýva “Grid-leak“. Tento odpor určuje vstupnú impedanciu stupňa a poskytuje referenciu na zem[9, 20]. Typická hodnota tohto odporu je

1 M Ω , avšak pri niektorých zosilňovačoch záleží na vstupe do ktorého je gitara pripojená. Tieto vstupy sa označujú ako High a Low, čiže vstup s vysokou alebo s nízkou impedanciou.



Obrázok 3.2: Vstupy High a Low v zosilňovači Marshall[18].

Kondenzátory C_i a C_o sú vstupný a výstupný väzobný kondenzátor a oddelujú od seba jednotlivé stupne. C_i izoluje záporné mriežkové napätie od jednosmerného napätia z predchádzajúceho stupňa. Spoločne s R_g tvorí hornú priepust a jeho hodnota teda musí byť zvolená tak aby sa na mriežku dostali žiadané frekvencie. Tento kondenzátor nie je pri prvom stupni potrebný. C_o izoluje jednosmerné anódové napätie od ďalšieho stupňa[9, 20].

Odpor R_a je zatažovací odpor, jeho názov vyplýva z toho že určuje zatažovaciu priamku. Čím menší tento odpor je, tým strmější je zatažovacia priamka. Zatažovací odpor taktiež ovplyvňuje napätový zisk stupňa, čím väčší je odpor, tým väčší je zisk[9, 20].

Odpor R_k je katódový odpor a nastavuje pracovný bod. Na tomto odpore dochádza pretekaním pokojového anódového prúdu k úbytku napätia, čím sa zvýši napätie na katóde ktoré je kladné oproti napätiu na mriežke. Ak máme zvolený pracovný bod, môžeme hodnotu tohto odporu vypočítať pomocou vzťahu 3.1. Tento vzťah avšak platí len v prípade že bude R_k oproti R_a dostatočne malé pretože tento odpor taktiež ovplyvňuje zatažovaciu priamku[9, 20].

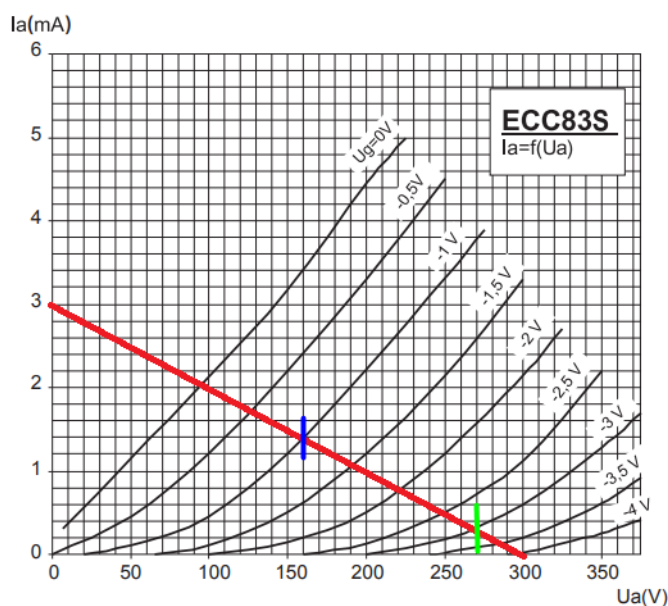
$$R_k = U_k / I_a \quad (3.1)$$

I_a je pokojový prúd anódou a U_k je napätie na ktoré sa zvýšilo napätie na katóde vplyvom odporu R_k .

Kondenzátor C_k sa zapája paralelne s odporom R_k a jeho funkciou je zabrániť zápornej spätnej väzbe spôsobenej odporom R_k ktorá znižuje zisk stupňa. So stúpajúcim mriežkovým napätím totiž stúpa aj prúd anódou, ktorý však tečie aj odporom R_k , čím sa zvyšuje napätie na katóde. Pripojením tohto kondenzátoru teda dojde k tomu, že nárast prúdu na katóde spôsobí jeho nabitie, a naopak pri poklese prúdu sa bude kondenzátor vybíjať aby túto zmenu prúdu vyrovnal[9, 20].

3.1.1 Pracovný bod

Pracovný bod je možné určiť pomocou zaťažovacej priamky ktorú vkreslíme do anódovej charakteristiky triódy. Ako už bolo vyššie spomenuté, túto priamku určuje zaťažovací odpor R_a spolu s odporom R_k (Tento odpor však býva oproti R_a o dosť menší a teda na priamku nemá príliš veľký vliv). Táto priamka pretína osy charakteristiky v bodoch $[I_a=0, V_+]$ a $[I_a=V_+/R_a, 0]$ [9].



Obrázok 3.3: Zatažovacia priamka v charakteristike elektrónky ECC83S od JJ electronics.

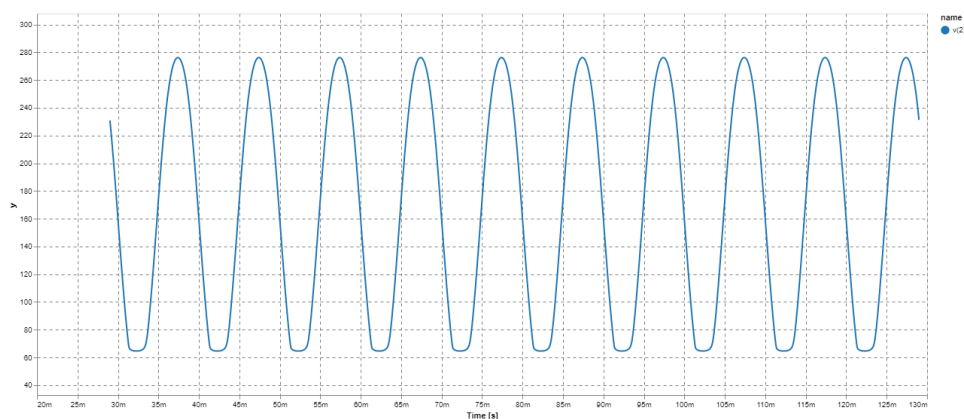
Na obrázku 3.3 je naznačená zatažovacia priamka pre napájacie napätie 300 V a zatažovací odpor 100 k Ω . Táto priamka nám ukazuje možné pracovné body v miestach kde sa priamka pretína s krivkami pre rôzne hodnoty mriežkového napätia. Po zvolení pracovného bodu je možné dopočítať odpor R_k pomocou vzťahu 3.1. Z grafu taktiež vidno efekt odporu R_a , vyššie hodnoty znamenajú nižší sklon zatažovacej priamky. Volba pracovného bodu ovplyvňuje mimo zisku stupňa taktiež jeho skreslenie. Čím rovnomernejšie sú rozložené pozdĺž danej zatažovacej priamky krivky mriežkového napätia, tým nižšie je skreslenie. Z toho vyplýva že vyššie R_a znamená väčšie skreslenie. Ďalej voľba pracovného bodu ovplyvňuje ktorá časť sinusoidy bude pri prebudení orezaná. V obrázku sú znázornené dva pracovné body, konkrétne sa jedná o pracovné body druhého a tretieho zosilňovacieho stupňa predzosilňovača popísaného v ďalšej časti práce. V prvom bode (-) je pracovný bod nastavený tak, že sú orezávané záporné špičky vstupného sinusového signálu. Toto orezávanie je jemné, z toho aj vyplýva anglický názov tohto efektu “soft clipping“. V druhom bode (-) sú naopak orezávané kladné špičky sinusoidy.

3.2 Harmonické skreslenie

Pri prebudených elektrónkach dochádza k efektu “soft clipping“, to znamená, že špičky sínusového vstupného signálu sú orezované jemne a postupne a výsledný zvuk je vnímaný ako menej drsný a prirodzený. Naopak pri tranzistorových zosilňovačoch dochádza k efektu “hard clipping“ kedy sú špičky sinusoidy náhle orezané. V tomto prípade je výsledný zvuk vnímaný ako drsný. Pri elektrónkových zosilňovačoch je bežné že je orezávanie nesymetrické pričom vznikajú párne harmonické ktoré sú pre ľudí príjemnejšie[24]. Efektové pedály snažiac sa priblížiť k “elektrónkovému“ druhu skreslenia sa nazývajú Overdrive.

3.2.1 Orezávanie mriežkovým prúdom

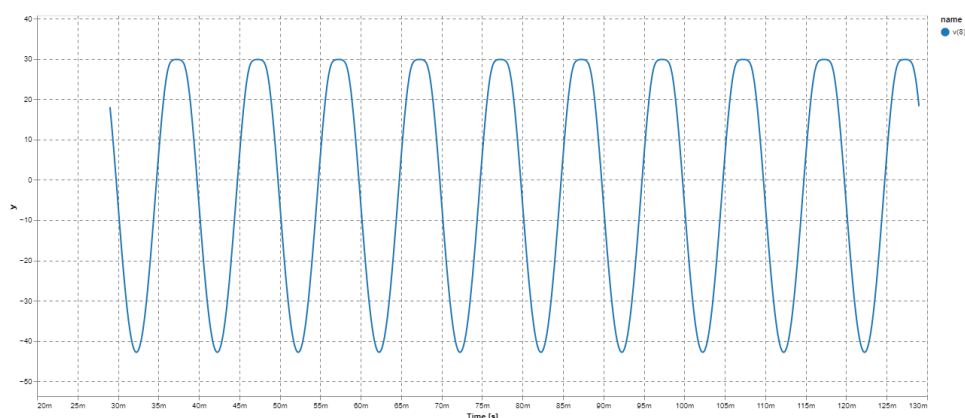
Orezávanie mriežkovým prúdom nastáva keď sa mriežkové napätie začne približovať napätie na anóde. Elektróny sú za normálnych okolností priťahované na anódu, no v tomto prípade začnú byť priťahované na mriežku, čím začne tiecť mriežkový prúd ktorý spôsobí úbytok napätia na odpore zapojenom do série s mriežkou. V skutočnosti však tento prúd začne tiecť pri elektrónke ECC83 už okolo hodnoty napätia $V_{gk} = -1$ V. Tým že tento prúd narastá postupne je aj orezávanie postupné, avšak jeho prudkosť závisí na veľkosti sériového odporu k mriežke. Výstupný signál má orezané záporné špičky sinusoidy[9].



Obrázok 3.4: Zosilnený vstupný signál ovplyvnený orezaním mriežkovým prúdom

3.2.2 Orezávanie zavretím

Orezanie zavretím nastane keď je mriežkový prúd príliš záporný a elektrónka prestane viesť prúd. Pre elektrónku ECC83 toto nastane pri hodnotách zápornejších ako -4 V, ako vidno v anódovej charakteristike. Toto orezanie je náhle avšak oproti orezaniu zavretím pri tranzistoroch je trochu zaoblené vplyvom pretekania malého prúdu aj keď už by elektrónka viesť nemala[9].



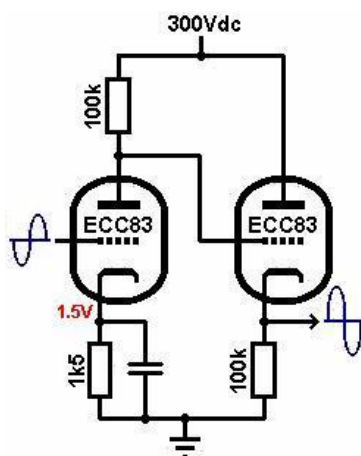
Obrázok 3.5: Zosilnený vstupný signál ovplyvnený zavretím elektrónky

3.3 Intermodulačné skreslenie

Intermodulačné skreslenie nastáva keď je na vstupe viac frekvencií, čím vznikajú nové frekvencie ktoré sú produktom sčítania a odčítania navzájom od seba vstupných frekvencií, ale aj produktom súčtu a rozdielu takto novo vzniknutých frekvencií. Vzniknuté frekvencie teda môžu byť nielen vyššie ako pôvodné ale aj nižšie. Toto skreslenie je výraznejšie v zapojeniach v ktorých dochádza k nesymetrickému clippingu[9].

3.4 Katódový sledovač

Katódový sledovač sa v zosilňovačoch používa ako buffer a najčastejšie sa vyskytuje pred ekvalizérom, ktorý by ináč pôsobil ako veľká záťaž na zosilňovací stupeň. Typicky je zapojený za zosilňovací stupeň s ktorým je v jednosmernej väzbe. Katódový sledovač má zapažovací odpor pripojený ku katóde. Toto zapojenie je na obrázku3.6[28].



Obrázok 3.6: Typické zapojenie katódového sledovača[29].

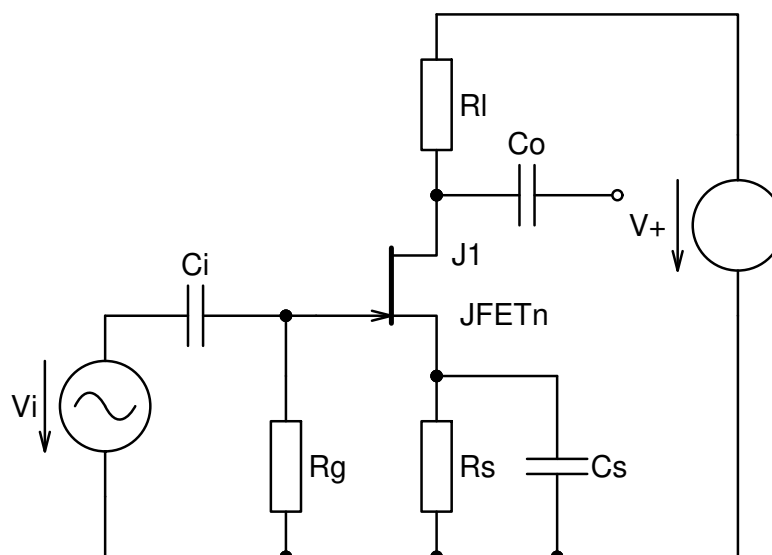
Mriežka sledovača je pripojená na anódu predchádzajúceho stupňa, čiže napätie na jeho mriežke bude rovnaké, a napätie na katóde o niečo väčšie. Pracovné body týchto stupňov sú teda previazané a pracovný bod sledovača často býva na krivke pre vyššie hodnoty U_{gk} , čo spôsobí že začne tiecť mriežkový prúd a zníži sa anódové napätie predchádzajúceho stupňa. Toto spôsobuje že sledovač oreže kladné špičky signálu. Toto orezanie je možné regulovať veľkosťou zaťažovacieho odporu sledovača, pre vyššie hodnoty je orezanie menšie.

3.5 Ovládanie tónu

Existuje množstvo typov obvodov pre ovládanie tónu, v angličtine často nazývaných ako “tone stack“. Tieto obvody sú tvorené filtermi upravujúcimi frekvenčnú odozvu a sú ovládané potenciometrami. Najjednoduchšie obsahujú len jedno ovládanie jednoducho označené ako “Tone“, často tvorené dvoma filtermi, jedným typu horná priepusť, druhým typu dolná priepusť, potenciometer potom mieša tieto dva signály. Ďalšie umožňujú nastavovať zvlášť výšky, stredy aj basy, prípadne len výšky a basy. Množstvo klasických zosilňovačov používa práve tone stack s 3 potenciometrami. [30].

3.6 Tranzistorový zosilňovač

Stavebné bloky používané v tranzistorových zosilňovačoch sú podobné ako tie v elektrónkových. Opäť sa jedná o zosilňovače so spoločným emitorom pre BJT respektíve zosilňovače so spoločným sourcom pre unipolárne tranzistory. Zapojenie so spoločným sourcom je na obrázku 3.7.



Obrázok 3.7: Zosilňovač so spoločným sourcom.

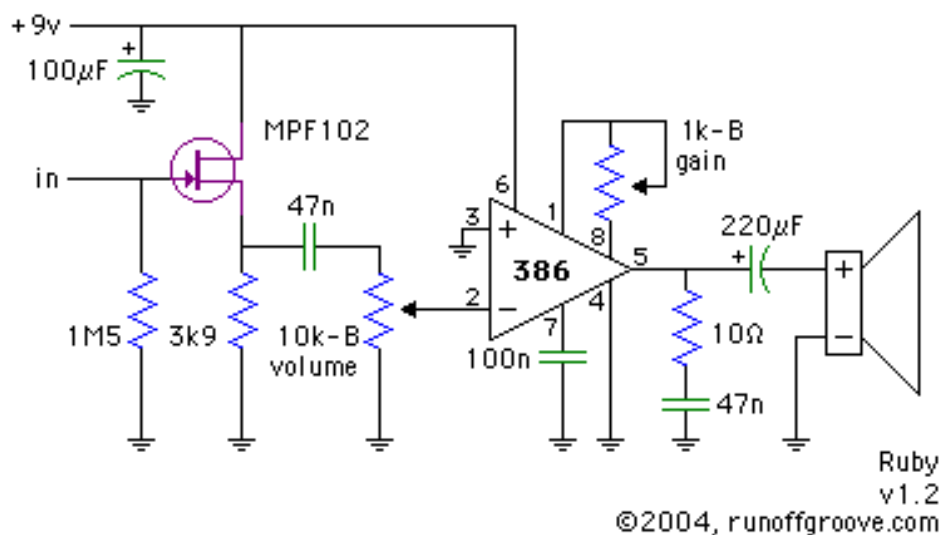
Jednotlivé súčiastky plnia rovnakú funkciu ako pri zapojení s elektrónkou. C_i a C_o sú väzobné kondenzátory oddelujúce od seba jednotlivé stupne. R_g poskytuje referenciu na zem. R_1 je zaťažovací odpor ktorý určuje sklon zaťažovacej priamky. R_s je zdrojový odpor použitý na nastavenie pracovného bodu a C_s blokuje nežiadúci AC signál na source. Rovnaké je aj zapojenie s BJT čiže zosilňovač so spoločným emitorom.

Oproti elektrónkovým zapojeniam je však časté používanie spätnej väzby v stupňoch. Vyskytujú sa taktiež stupne s viacerými tranzistormy a časté je používanie operačných zosilňovačov. Rovnako sa používajú aj buffre, pre BJT sú to emitorové sledovače, pre unipolárne tranzistory zdrojové sledovače.

Existujú taktiež hybridné zosilňovače ktoré používajú jak elektrónky tak tranzistory. Typicky je predzosilňovač elektrónkový a výkonový zosilňovač tranzistorový[2].

3.6.1 Zapojenia s operačným zosilňovačom

Operačné zosilňovače sa používajú v množstve tranzistorových zosilňovačov, príkladom sú napríklad vyššie spomenuté efektové pedály používajúce vo svojom jadre duálne operačné zosilňovače. S výhodou sa používajú taktiež v malých “vreckových“ zosilňovačoch. Príkladom sú Little Gem a jeho vylepšená verzia Ruby od Runoffgroove, ktorý majú množstvo projektov ktoré zahrňajú vlastné návrhy efektových pedálov ale aj tranzistorové zapojenia založené na klasických elektrónkových zosilňovačoch[32]. Schéma zapojenia Ruby je na obrázku 3.8.



Obrázok 3.8: Schéma zapojenia zosilňovača Ruby od Runoffgroove[33].

Jedná sa o jednoduché zapojenie s možnosťou ovládania hlasitosti a zisku. Jadro je tvorené audio operačným zosilňovačom LM386. Piny 1 a 8 sú označené ako vývod “Gain“ a je k nim pripojený potenciometer na nastavenie zosilnenia.

3.6.2 Modelingové zosilňovače

V dnešnej dobe sú modelingové zosilňovače veľmi populárne pre ich široké spektrum tónov ktoré dokážu produkovať a ich relatívne nízku cenu. Tieto zosilňovače spracovávajú signál digitálne. Väčšinou disponujú digitálnymi zabudovanými efektami ako “reverb“ ktorý imituje ozvenu, “delay“ produkujúci oneskorenie zahraného tónu a ďalšími . Taktiež je v niektorých prípadoch možné pripojiť takýto zosilňovač k počítaču a upravovať poskytnuté efekty a uložiť si viacero preferovaných nastavení. Medzi populárne modelingové zosilňovače patrí séria Katana od značky BOSS. Značka BOSS je známa práve svojou širokou ponukou efektových pedálov ktoré sú do tejto série zosilňovačov digitálne zakomponované. Ovládací panel 50 W verzie je na obrázku 3.9.



Obrázok 3.9: Ovládací panel zosilňovača BOSS Katana 50 W[34].

Zosilňovač dovoľuje vybrať z 5 základných typov zvuku vhodných pre rôzne hudobné žánre ktoré je ďalej možné upravovať. Veľkou výhodou je práve nízka cena a množstvo použiteľných efektov ktoré sú v zosilňovači zahrnuté. Počet týchto efektov ďalej stúpa po pripojení k počítaču kedy je možné jednotlivé efekty uložené v pamäti vymeniť a upravovať.

Existuje aj množstvo softwarov simulujúcich rôzne klasické zosilňovače, ktoré rovnako poskytujú veľmi široké spektrum zvukov a možnosti kombinovať rôzne efekty. Tieto programy umožňujú pripojenie elektrickej gitary priamo do počítača a patrí medzi ne napríklad program Rocksmith.

Kapitola 4

Zapojenie s elektrónkami

V tejto kapitole bude popísaný elektrónkový predzosilňovač používaný v gitarových zosilňovačoch Marshall JCM800 model 2203/2204, na základe ktorého som navrhol tranzistorové riešenie tohto zapojenia pomocou JFETov.

4.1 Marshall JCM800 model 2204



Obrázok 4.1: Zosilňovač Marshall JCM800 model 2203/2204 [16].

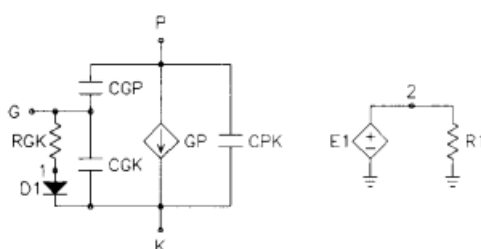
JCM800 je rada zosilňovačov typu hlava od firmy Marshall. Model 2204 je má výkon 50 W a dva vstupy, high a low. Tento model, rovnako ako aj 100 W verzia (2203) sú zosilňovače s ovládaním “Master volume“, to znamená že majú dve ovládania hlasitosti, označené ako “pre-amp volume“, čiže hlasitosť predzosilňovača a “master volume“, čiže celková hlasitosť. Ďalšie ovládania sú výšky, stredy, basy a “presence“. Všetky z týchto potenciometrov, okrem “presence“, sú spojené s obvodom predzosilňovača a budú ďalej popísané. Schéma predzosilňovača používaná v tomto modeli je v prílohe.

Predzosilňovač má tri stupne, za ktorými nasleduje katódový sledovač a obvod pre kmitočtové úpravy signálu. Použité sú dve elektrónky ECC83/12AX7.

4.1.1 Simulácia

Všetky simulácie boli vykonané v programe GEEC pre vstupné sínusové napätie 100 mV s frekvenciou 1 kHz a potenciometrom na nastavenie zisku vytočeným na plno. Pre simuláciu elektrónky bol použitý model Normal Koren, medzi ďalšie možné modely elektróniek patrí model od Duncanamps ktorý je v knižniciach simulačného programu Micro-Cap 12.

Model Norman Koren vymyslel Norman L. Koren v roku 1996. Tento model je vylepšením modelu Marshall Leach z roku 1995, ktorý zle odhadoval prúd anódou pri vysokých anódových a mriežkových napätiach. Model používa 2 rovnice (4.1, 4.2) a 6 parametrov. Obvodový model triódy je na obrázku 4.2.[27]



Obrázok 4.2: Obvodový model triódy[19].

$$U_1 = \frac{U_a}{k_p} \log\left(1 + \exp\left(k_p \left(\frac{1}{\mu} + \frac{U_{gk} + U_{ct}}{\sqrt{k_{VB} + U_a^2}}\right)\right)\right) \quad (4.1)$$

$$I_a = \frac{U_1^X}{k_{G1}} (1 + \text{sgn}(U_1)) \quad (4.2)$$

Parametre sa nastavujú experimentálne podľa anódovej charakteristiky danej triódy, pri správne nastavených parametroch model dokáže túto charakteristiku reatívne dobre kopírovať. Jednotlivé parametre ovplyvňujú rôzne aspekty grafu, X a K_{G1} ovplyvňujú oblasť pre nízke U_{gk} (0 V, -0.5 V). k_p naopak ovplyvňuje oblasť pre vysoké U_{gk} a U_a . k_{VB} určuje ohyb charakteristiky. U_{ct} je offset U_{gk} . Ďalšie parametre triódy sú faktor zosilnenia μ , odpor anódy R_a , transkonduktancia g_m a parazitné kapacity medzi katódou a mriežkou (C_{CG}), katódou a anódou (C_{CA}), anódou a mriežkou (C_{AG}). Tieto parametre sú uvedené v datasheete danej elektrónky[27].

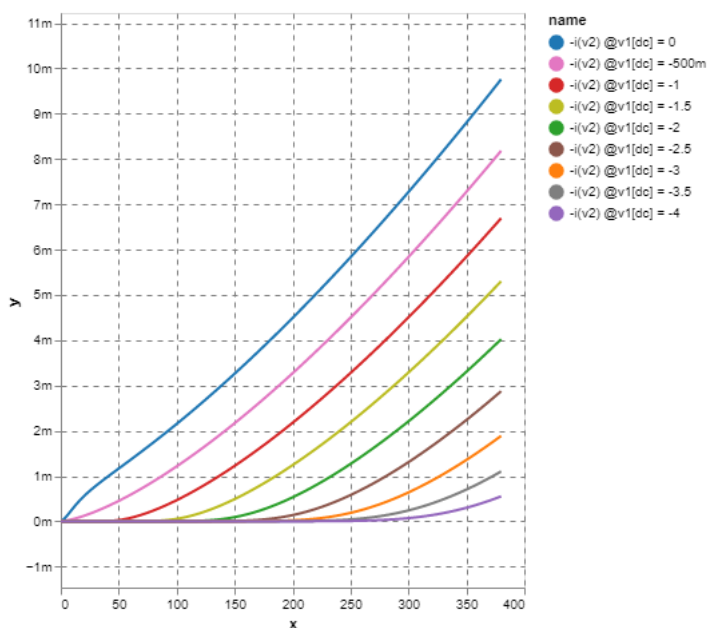
X	K_{G1}	k_p	k_{VB}	U_{ct}
1.43	1650	650	300	0.5

Tabuľka 4.1: Zvolené parametre pre model Norman Koren.

μ (-)	R_a (k Ω)	g_m (S)	C_{CG} (pF)	C_{CA} (pF)	C_{AG} (pF)
100	62.5	1.6	1.6	0.33	1.7

Tabuľka 4.2: Parametre elektrónky ECC83S od JJ electronics[11].

Mnou zvolené parametre vyplývajú z anódovej charakteristiky elektrónky ECC83S značky JJ electronics. Simulácia s týmito parametrami je na 4.3.

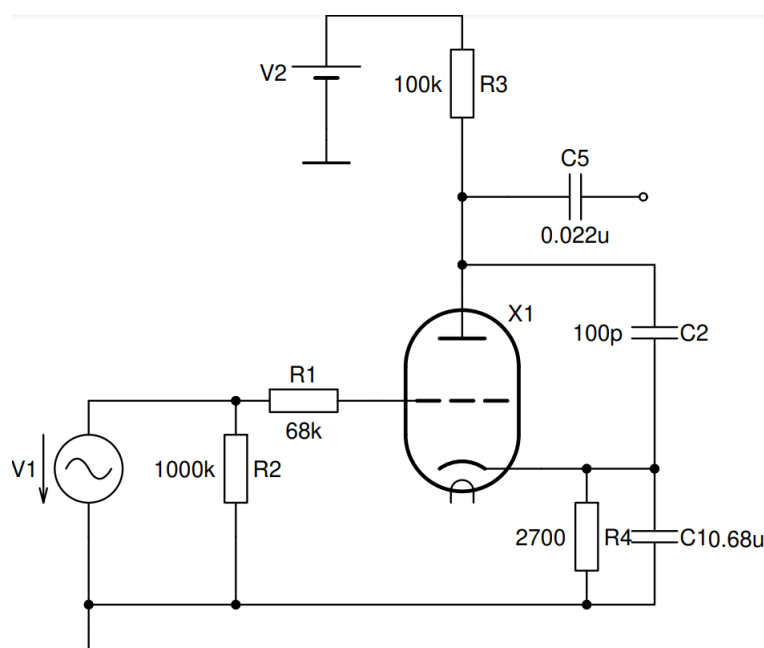


Obrázok 4.3: Simulovaná anódová charakteristika triódy ECC83S.

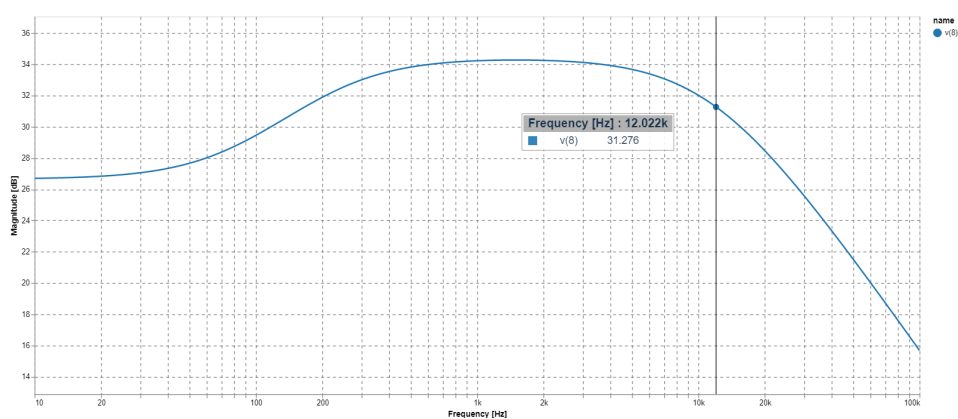
Pomocou tohto modelu boli vykonané všetky simulácie jednotlivých stupňov uvedené ďalej v práci, model je uvedený v prílohe. V simuláciách zapojenia s tranzistormi bol použitý model JFETu BF256B dostupný z knižnice simulačného programu GEEC. V prípade elektróniek bolo pri všetkých simuláciách napájacie napätie 300 V a v prípade tranzistorov 9 V. Jednotlivé stupne boli najprv simulované zvlášť a potom zapojené spolu.

4.1.2 Prvý stupeň

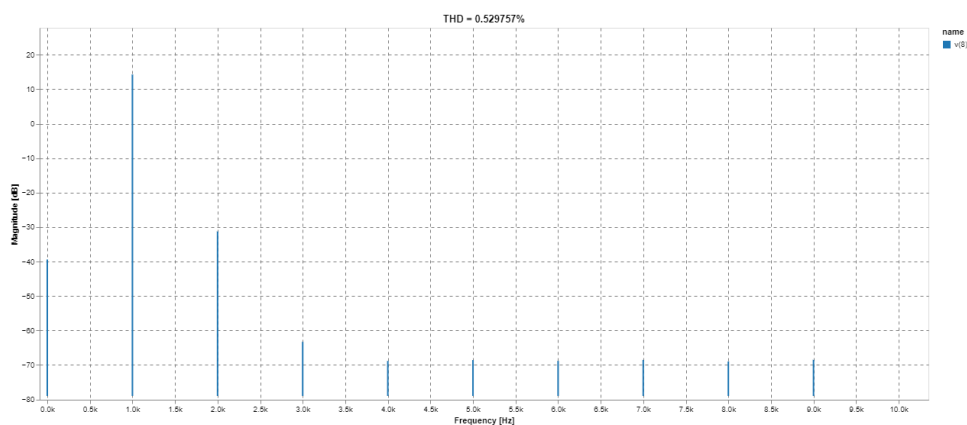
Prvý zosilňovací stupeň je ako aj zvyšné dva zapojený ako zosilňovač so spoločnou katódou a tvorí ho prvá trióda elektrónky ECC83/12AX7. Tento stupeň funguje iba ak je zapojený vstup "high", pre vstup "low" je tento stupeň preskočený. Tento stupeň má zosilnenie približne 50, pričom vstupný signál takmer neskresluje.



Obrázok 4.4: Prvý zosilňovací stupeň.



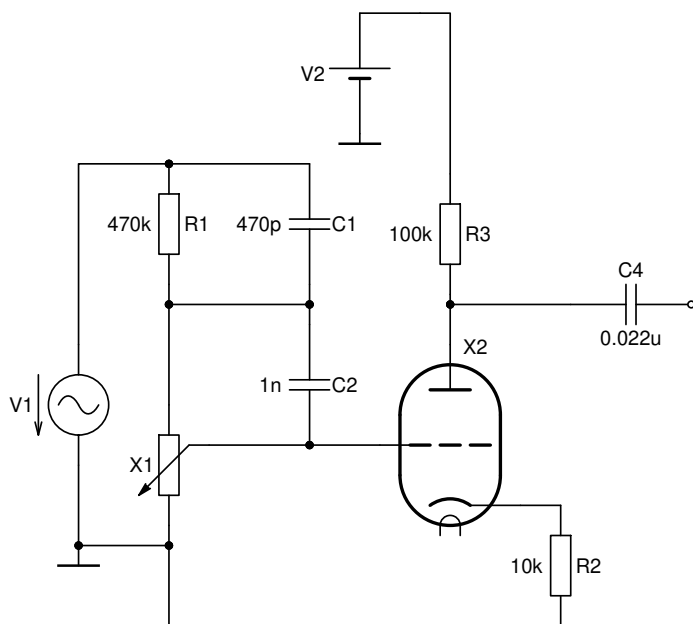
Obrázok 4.5: Frekvenčná odozva prvého stupňa s vyznačeným poklesom o 3 dB.



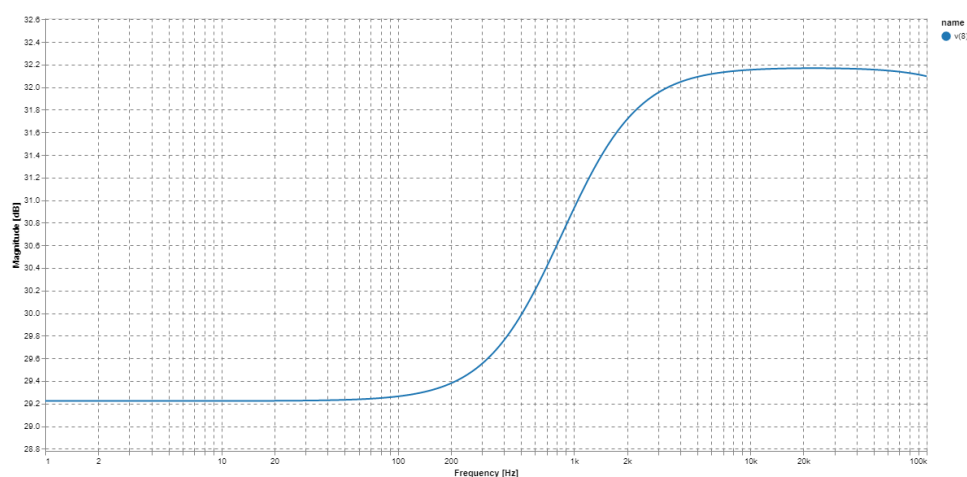
Obrázok 4.6: Spektrum signálu na výstupe prvého stupňa.

4.1.3 Druhý stupeň

Druhý zosilňovací stupeň je tvorený druhou triódou elektrónky ECC83/12AX7. Pred mriežkou triódy tvoria C1 a R1 hornú priepuť ktorá ovplyvňuje frekvenčnú odozvu. Zosilnenie tohto stupňa závisí na polohe potenciometra X1, označovaného ako "Pre-amp volume". Tento potenciometer je logaritmický a má hodnotu 1 M Ω . Pri vytočení na minimum prechádza signál takmer neskreslený a nezosilnený zatiaľ čo pri vytočení na plno je zosilnenie približne 6.5 a skreslenie približne 3.8%. Pracovný bod tohto stupňa je nastavený tak že pri skreslení orezáva kladné špičky sinusoidy vstupného signálu.

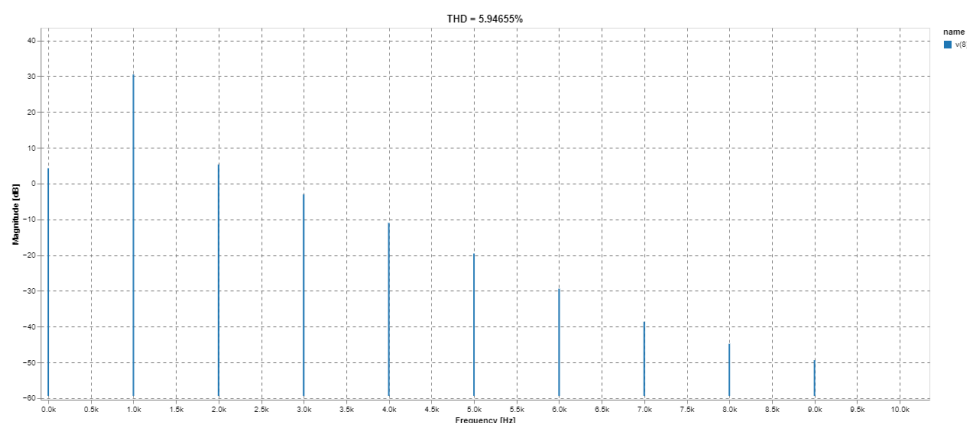


Obrázok 4.7: Druhý zosilňovací stupeň.



Obrázok 4.8: Frekvenčná odozva druhého stupňa.

Frekvenčná odozva je ovplyvnená filtrom typu horná priepusť.

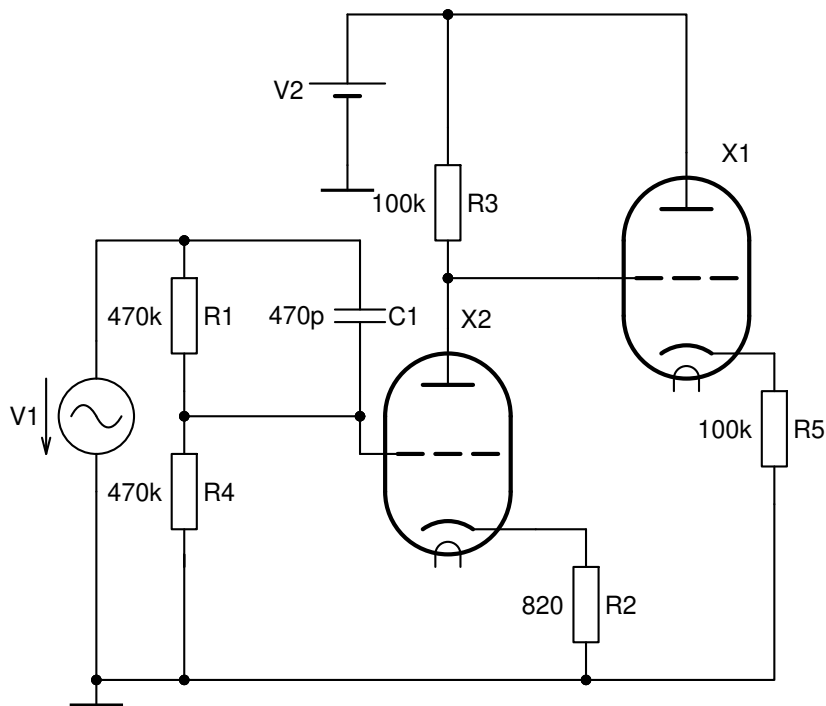


Obrázok 4.9: Spektrum signálu na výstupe druhého stupňa.

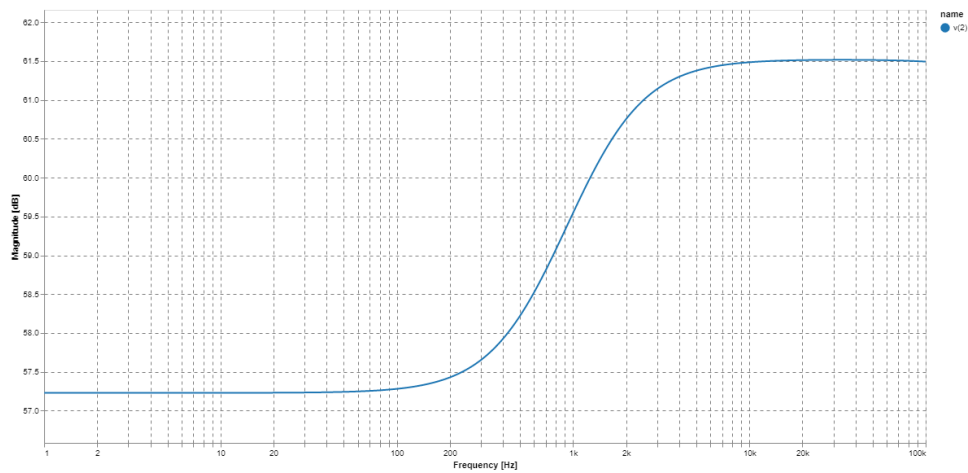
V spektre sa vyskytujú všetky harmonické ktorých úroveň postupne klesá bez výrazných skokov.

4.1.4 Tretí stupeň

Tretí zosilňovací stupeň je tvorený prvou triódou druhej elektrónky ECC83. Tento stupeň má zosilnenie približne 27 a jeho výstup už môže byť veľmi skreslený, v závislosti na polohe potenciometra X1 až 37% skreslenie v prípade natočenia do plna. Za týmto stupňom ďalej nasleduje katódový sledovač tvorený druhou triódou druhej elektrónky, ktorý slúži ako buffer pred ekvalizérom. Bez katódového sledovača by totiž obvod ekvalizéra pôsobil na tento stupeň ako príliš veľká záťaž. Pracovný bod je nastavený tak, že pri skreslení sú orezané záporné špičky sinusoidy vstupného signálu.

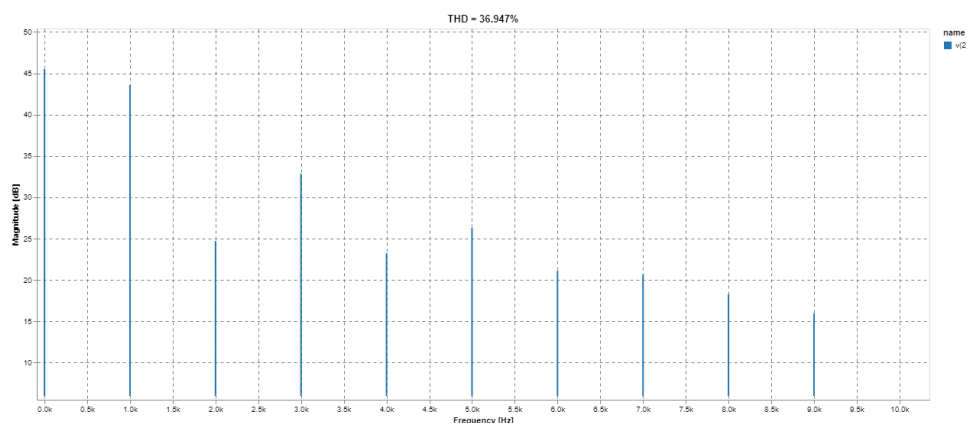


Obrázok 4.10: Tretí zosilňovací stupeň.



Obrázok 4.11: Frekvenčná odozva tretieho stupňa.

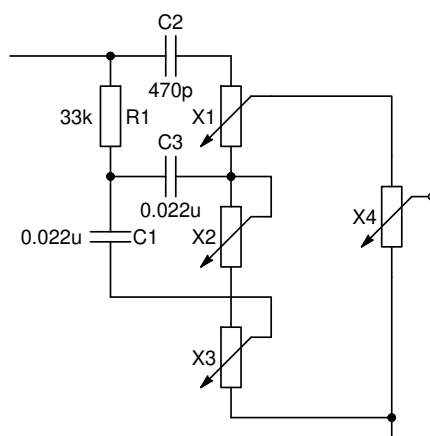
Frekvenčná odozva je rovnako ako pri druhom stupni ovplyvnená filtrom typu horná priepusť.



Obrázok 4.12: Spektrum signálu na výstupe tretieho stupňa.

4.1.5 Ekvalizér

Ekvalizér je časť obvodu ktorá upravuje tón výsledného zvuku. Je tvorený filtermi ovládanými trojicou potenciometrov. Potenciometer *treble* (X1) upravuje výšky signálu, čiže upravuje frekvenčnú odozvu tak že budú viac odfiltrované nízke frekvencie. Potenciometer *bass* (X2) naopak ovplyvňuje útlm vysokých frekvencií signálu, a *middle* (X3) ovplyvňuje stredné frekvencie. Všetky potenciometre sa však navzájom ovplyvňujú. Potenciometre X1 a X3 sú lineárne, zatiaľ čo X2 je logaritmický.

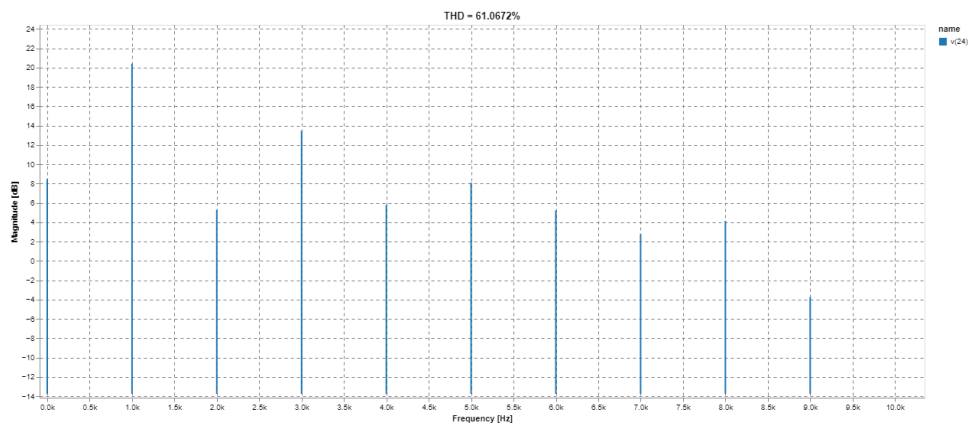


Obrázok 4.13: Ekvalizér

Za ekvalizérom ďalej pokračuje logaritmický potenciometer X4 označený ako master volume, ktorý nastavuje celkovú hlasitosť tak že časť signálu posiela na zem. Za týmto potenciometrom už nasleduje výkonový zosilňovač.

4.2 Simulácia celého zapojenia (Elektrónky)

Celé zapojenie bolo simulované s potenciometrom Gain vytočeným na plno (Maximálne zosilnenie) a všetkými ostatnými potenciometrami vytočenými do polovice. Spektrum pre výstupný signál predzosilňovača je na obrázku 4.14.



Obrázok 4.14: Spektrum signálu na výstupe ekvalizéra.

V spektre sa vyskytujú jak párne tak nepárne harmonické, najvýraznejšou je tretia harmonická.

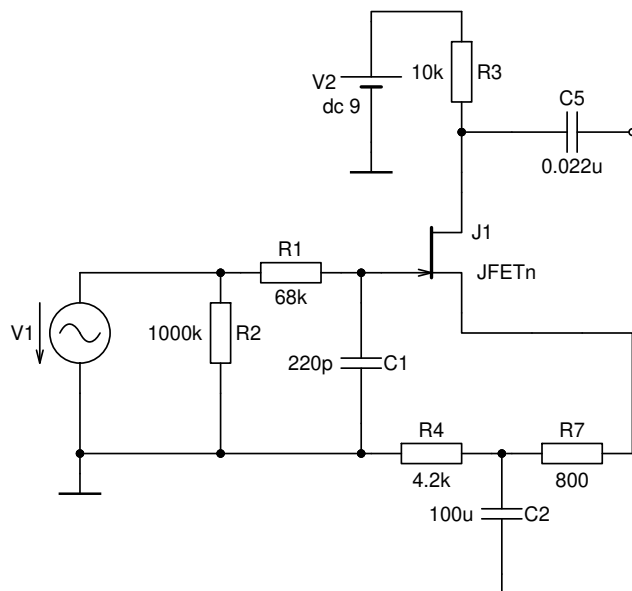
Kapitola 5

Zapojenie s tranzistormi

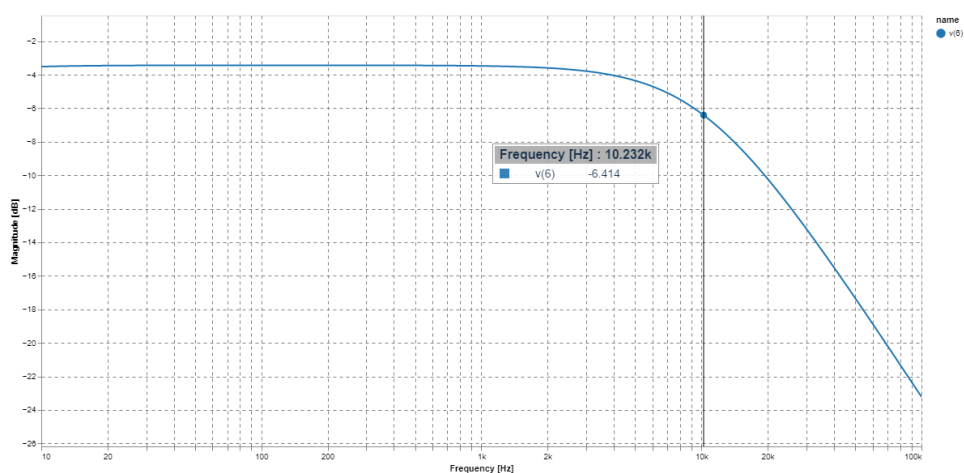
V tejto kapitole bude popísaný návrh zapojenia s tranzistormi JFET BF256B navrhnutý na základe predzosilňovača popísaného v predchádzajúcej kapitole. Toto zapojenie bude realizované ako efektový pedál. Pre pohodlnosť používania bolo zvolené napájacie napätie 9 V aby mohla byť použitá batéria, prípadne napájanie pomocu 9 V adaptéru. Schéma celého zapojenia je v prílohe. Podobnými typmi zapojení, podľa rôznych typov elektrónkových zosilňovačov sa zaoberá stránka Runoffgroove ktorej článku boli pri návrhu tohto zapojenia veľmi prínosné. Jednotlivé stupne boli najprv simulované zvlášť a potom zapojené spolu.

5.1 Prvý stupeň

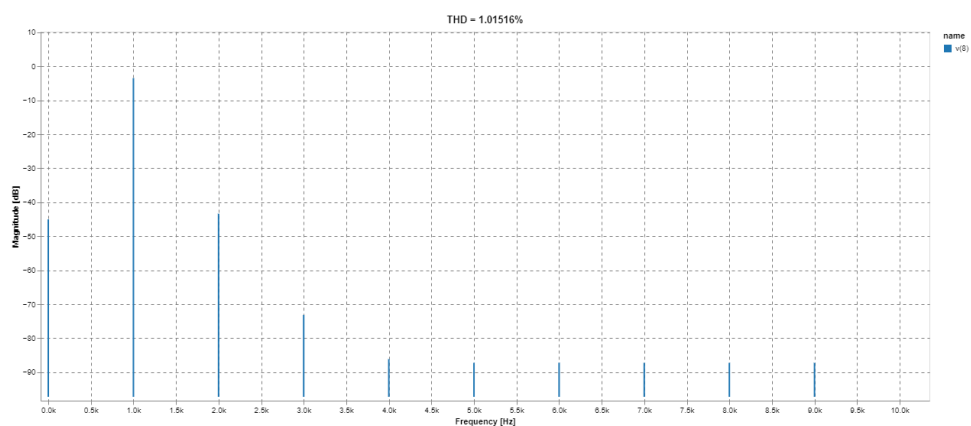
Prvý zosilňovací stupeň má zosilnenie približne 6.7. Tento stupeň príliš neskresluje, avšak oproti zapojeniu s elektrónkou je skreslenie vyššie, asi 1%.



Obrázok 5.1: Prvý zosilňovací stupeň(JFET).



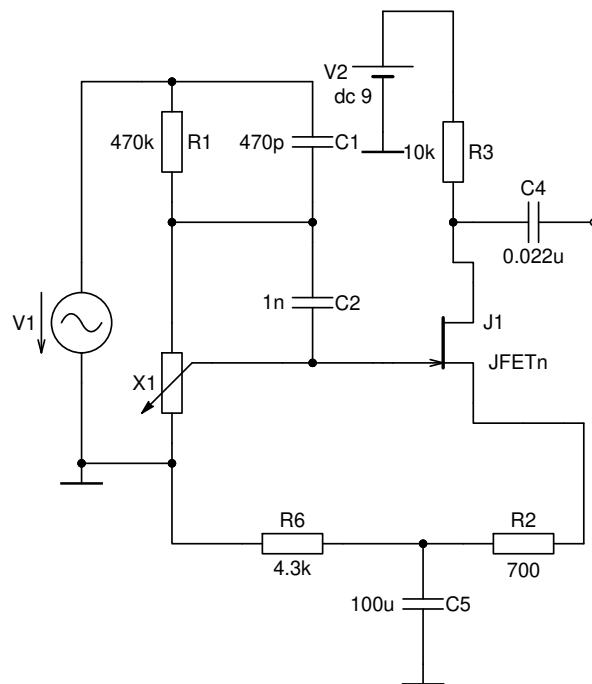
Obrázok 5.2: Frekvenčná odozva prvého stupňa s vyznačeným poklesom o 3 dB.



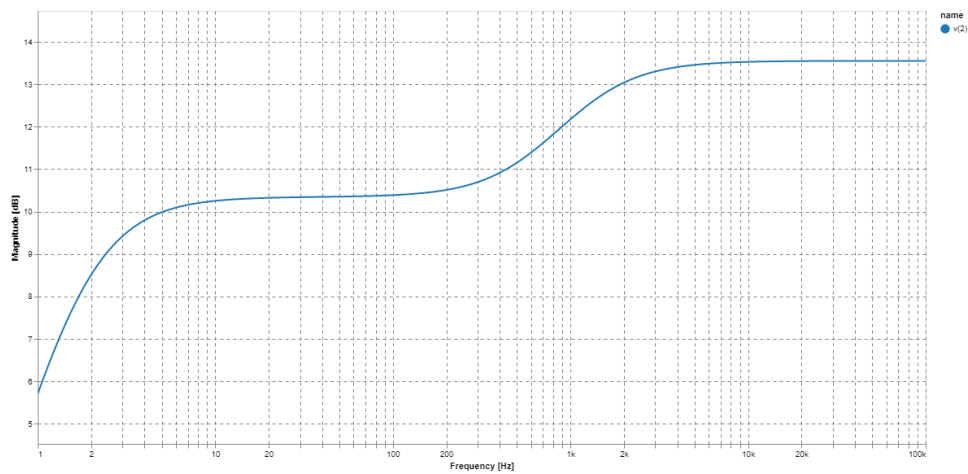
Obrázok 5.3: Spektrum signálu na výstupe prvého stupňa.

5.2 Druhý stupeň

Druhý zosilňovací stupeň je rovnako ako pri zapojení s elektrónkami ovplyvňovaný polohou logaritmického potenciometra X1. pri natočení na minimum je opäť výstupný signál neskreslený a takmer nezosílený, a pri natočení na plno je zosilnenie približne 7. Tento stupeň avšak oproti elektrónkovému zapojeniu má vyššie skreslenie, približne 9.6% pri vytočení na plno, pričom orezávané sú záporné špičky sínusového vstupného signálu. Nižšie skreslenie by išlo dosiahnuť na úkor nižšieho zosilnenia stupňa.

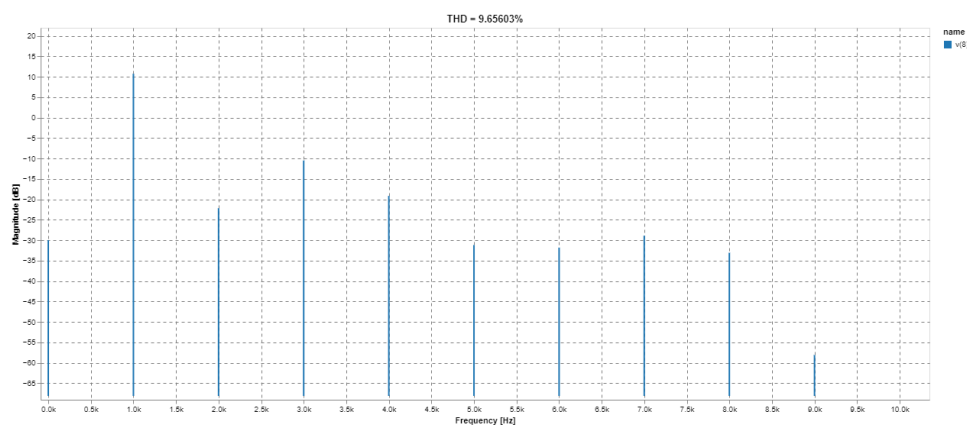


Obrázok 5.4: Druhý zosilňovací stupeň(JFET).



Obrázok 5.5: Frekvenčná odozva druhého stupňa.

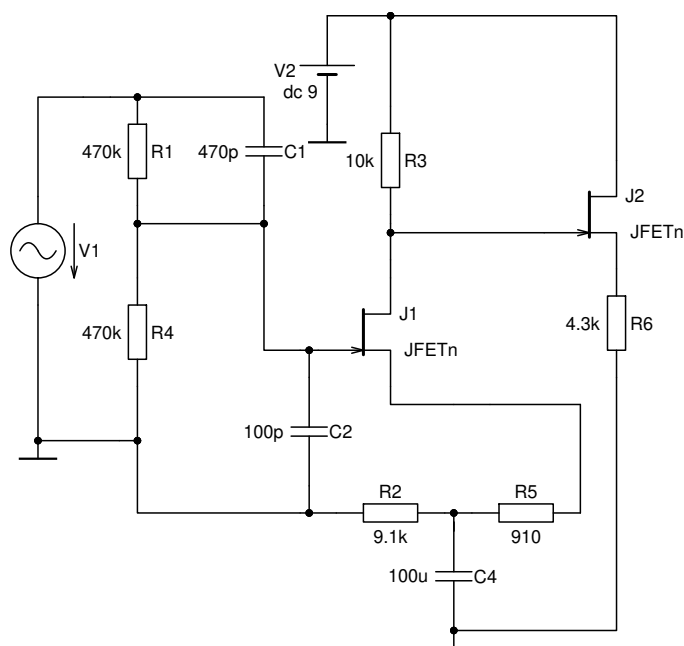
Frekvenčná odozva je opäť ovplyvnená filtrom typu horná priepust.



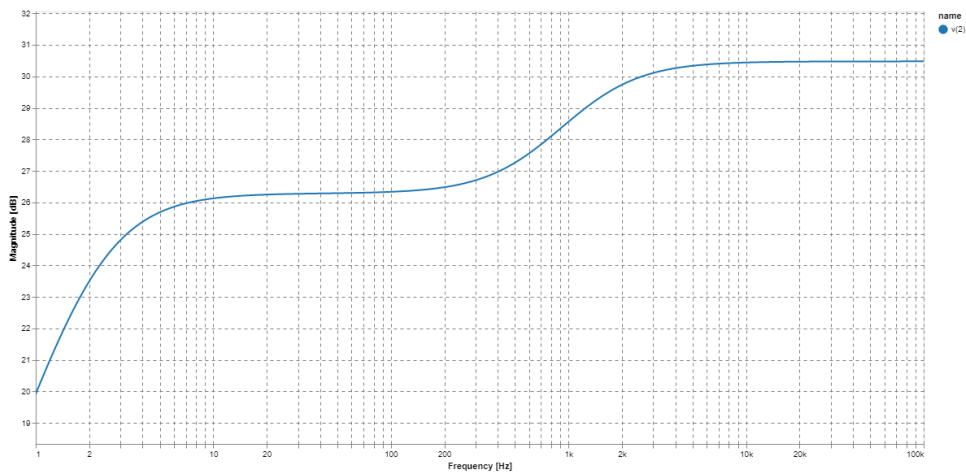
Obrázok 5.6: Spektrum signálu na výstupe druhého stupňa.

5.3 Tretí stupeň

Tretí zosilňovací stupeň má zosilnenie približne 4.7. A jeho výstup je tým viac skreslený, čím viac je natočený potenciometer z predchádzajúceho stupňa, pri plnom vytočení okolo 36%. Rovnako ako pri elektrónkovom zapojení nasleduje za týmto stupňom buffer v podobe sourcového sledovača slúžiaci k rovnakému účelu. Ekvalizér som v tomto zapojení ponechal rovnaký.

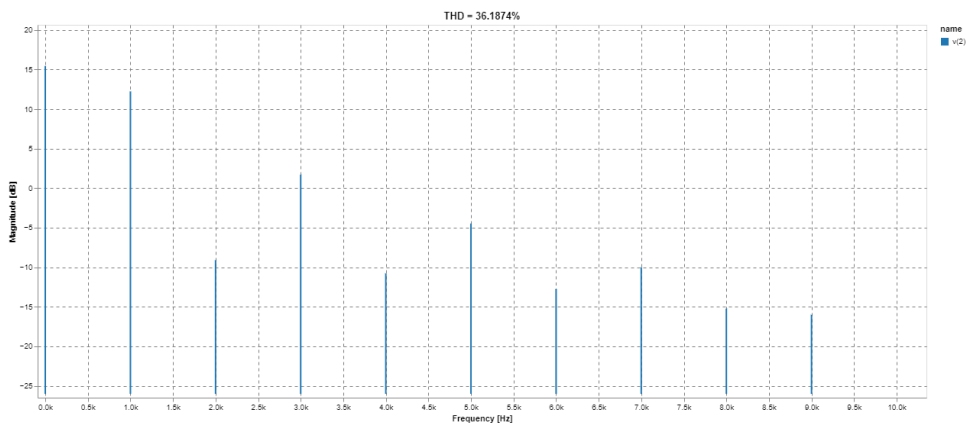


Obrázok 5.7: Druhý zosilňovací stupeň(JFET).



Obrázok 5.8: Frekvenčná odozva tretieho stupňa.

Frekvenčná odozva je rovnako ako pri druhom stupni ovplyvnená filtrom typu horná priepusť.

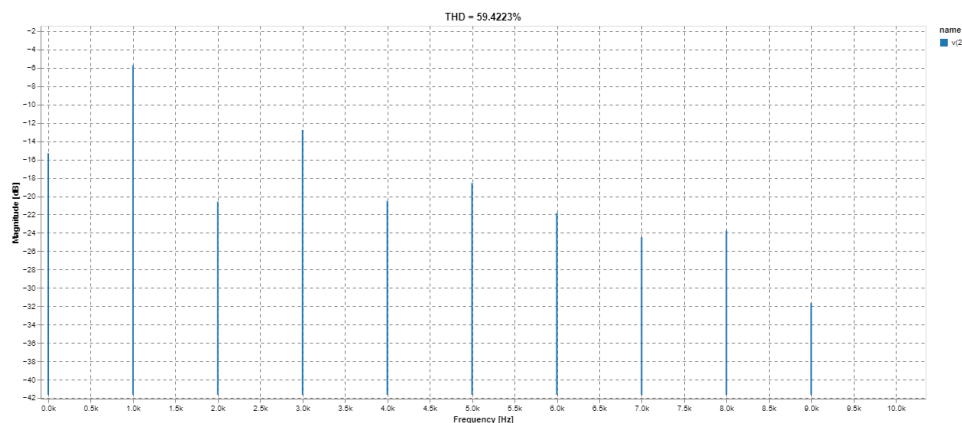


Obrázok 5.9: Spektrum signálu na výstupe tretieho stupňa.

Spektrum obsahuje hlavne nepárne harmonické, oproti zapojeniu s elektrónkami sú párne harmonické viac tlmené.

5.4 Simulácia celého zapojenia (tranzistory)

Celé zapojenie bolo simulované s potenciometrom Gain vytočeným na plno (Maximálne zosilnenie) a všetkými ostatnými potenciometrami vytočenými do polovice. Spektrum pre výstupný signál na konci pedálu je na obrázku 5.10.



Obrázok 5.10: Spektrum signálu na výstupe ekvalizéra.

Spektrum na výstupe ekvalizéra je podobné spektru na výstupe ekvalizéra elektrónkového predzosilňovača. Úroveň signálu je však výrazne nižšia.

5.5 Porovnanie elektrónkového a tranzistorového zapojenia

Rozdiely jednotlivých stupňov boli popísané v ich príslušných sekciách. Pri návrhu bolo snahou priblížiť sa k skresleniu na výstupe tretieho stupňa, vhodným nastavením pracovného bodu tretieho stupňa sa nakoniec podarilo priblížiť podobe spektra na konci elektrónkového predzosilňovača. Tabuľka porovnávajúca zisk a skreslenie jednotlivých stupňov je 5.1.

Prvý stupeň	zisk(-)	skreslenie(%)
Elektrónky	54.2	0.53
Tranzistory	6.7	1.02
Druhý stupeň	zisk(-)	skreslenie(%)
Elektrónky	6.5	5.95
Tranzistory	6.06	9.65
Tretí stupeň	zisk(-)	skreslenie(%)
Elektrónky	27	37
Tranzistory	4.68	36.2

Tabuľka 5.1: Tabuľka ziskov a skreslení jednotlivých stupňov elektrónkového a tranzistorového predzosilňovača.

5.5.1 Meranie

Na breadboarde bol zmeraný prvý stupeň zosilňovača pre 10 súčiastok JFET BF256B. Z časových dôvodov a variácii výsledkov merania pre jednotlivé JFETy ostatné stupne zmerané neboli. Tabuľka s pracovnými bodmi, skreslením a zosilnením jednotlivých súčiastok je tabuľka 5.2.

-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10*
Zisk(-)	5.8	5.8	5.7	5	5	4.8	4.6	4.5	-	-
Skreslenie(%)	3.4	3.5	3.4	5.2	4.8	6.6	7.1	7	4	5.2
U_s (V)	-0.2	-0.23	-0.23	-0.25	-0.2	-0.23	-0.18	-0.2	0	-2.23
U_d (V)	4.5	4.6	4.56	4.1	4.2	3.9	3.9	3.9	4.5	4.1

Tabuľka 5.2: Tabuľka zmeraných hodnôt prvého zosilňovacieho stupňa pre jednotlivé súčiastky JFET BF256B.

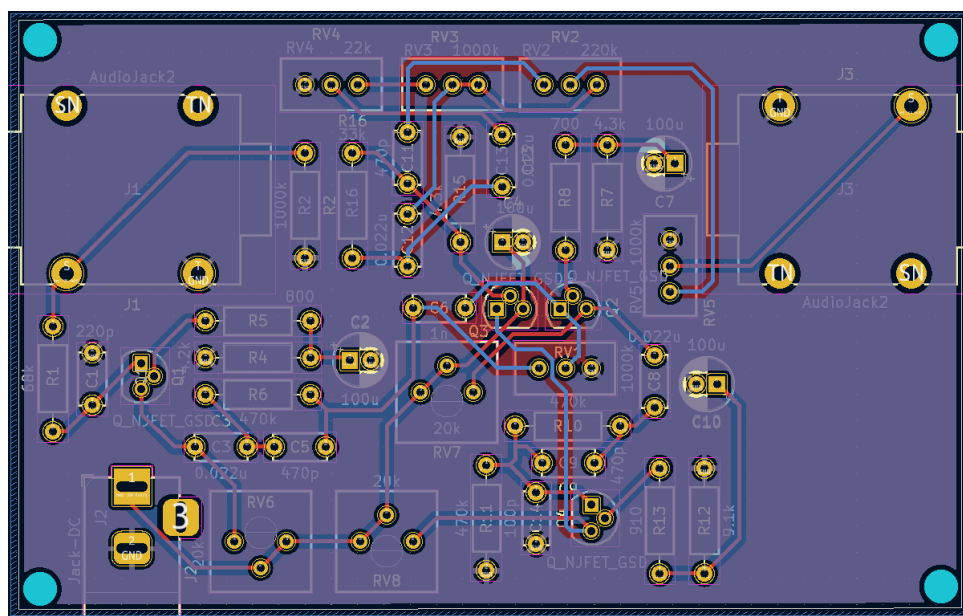
Ako vidno hodnoty sa veľmi líšia od výsledku simulácie pre prvý stupeň, dôvodom je buď nepresnosť modelu použitého v simulácii alebo, variácia medzi jednotlivými JFETami rovnakého typu alebo fakt že bolo merané na breadboarde. Kvôli týmto rozdielom bude namiesto zaťažovacích odporov použitý trimmer na doladenie pracovných bodov. Priemerné a simulované hodnoty výsledkov sú v tabuľke 5.3. JFET označený * bol zo štatistiky vyradený pre výrazný rozdiel v jeho pracovnom bode.

-	Priemer	Simulácia
Zisk(-)	5.15	6.7
Skreslenie(%)	5.07	1
U_s (V)	-0.19	-1.81
U_d (V)	4.24	5.37

Tabuľka 5.3: Tabuľka priemerných a simulovaných hodnôt prvého stupňa.

5.6 Doska plošného spoja

Dosku plošného spoja som navrhol v programe KiCad 6.0. Doska má 2 vrstvy a jej rozmery sú 91.2 mm na dĺžku a 57 mm na šírku. Návrh bol nakoniec realizovaný bez 9 V batérie s možnosťou napájania jedine pomocou 9 V adaptéru. Pedál je ovládaný pomocou 5 potenciometrov : Zisk, celková hlasitosť, výšky, basy, stredy. Doska je na obrázku 5.11.



Obrazok 5.11: Doska plošného spoja v návrhovom prostredí programu KiCad 6.0.



Záver

Cieľom práce bolo urobiť rešerš gitarových predzosilňovačov a nakoniec navrhnúť riešenie tranzistorového efektového pedálu založené na zapojení s elektrónkami. Popísané boli jednotlivé časti gitarových zosilňovačov s dôrazom práve na zapojenie elektrónkového predzosilňovača a základné stavebné bloky v ňom používané. Taktiež boli popísané niektoré typy tranzistorových efektových pedálov produkujúcich skreslenie a v krátkosti spomenuté moderné modelingové zosilňovače. Pre účel návrhu vlastného pedálu bol analyzovaný predzosilňovač používaný v klasických elektrónkových zosilňovačoch Marshall JCM800 modely 2203/2204 a následne bolo navrhnuté riešenie s tranzistormi. Na základe výsledkov simulácií boli dosiahnuté podobné hodnoty skreslenia na konci obvodu a spektrá sa taktiež podobajú avšak úspešnosť sa bude dať posúdiť až na základe zvukovej skúšky keďže zmerané hodnoty sa veľmi líšia od simulovaných hodnôt.



Literatúra

- [1] TEAGLE, John. Antique Guitar Amps 1928-1934. *Vintage Guitar* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.vintageguitar.com/1804/antique-guitar-amps-1928-1934/>
- [2] Guitar amplifier. Wikipedia [online]. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Guitar_amplifier
- [3] COGGINS, Dan. Everything you need to know about power amp types. *Guitarworld* [online]. 11.5.2020 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.guitarworld.com/lessons/everything-you-need-to-know-about-power-amp-types>
- [4] The Single Ended Output Stage. *Valvewizard* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <http://www.valvewizard.co.uk/se.html>
- [5] The Push-Pull Power Output Stage. *Valvewizard* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <http://www.valvewizard.co.uk/pp.html>
- [6] WALSHAM, Matt. Inside A Guitar Amplifier – Part. 1. *Rolandcorp* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://rolandcorp.com.au/blog/inside-guitar-amplifier-part-1>
- [7] 5.1 Power supply for the vacuum tube amplifier stages. *Vtadiy* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.vtadiy.com/book/chapter-5-power-supply-unit/5-1-power-supply-for-the-amplifier-stages/>
- [8] 5.2 Power supply for the vacuum tube filaments. *Vtadiy* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.vtadiy.com/book/chapter-5-power-supply-unit/5-2-power-supply-for-the-vacuum-tube-filaments/>
- [9] BLENCOWE, Merlin. *Designing Valve Preamps For Guitar And Bass*. 2. Wem Publishing, 2012. ISBN 978-0-9561545-2-1.
- [10] Vacuum tube. Wikipedia [online]. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_tube
- [11] ECC83S datasheet. Jj-electronics [online]. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: https://www.jj-electronic.com/images/stories/product/preamplifying_tubes/pdf/ecc83s.pdf

- [12] A closer look at the fetzer valve. Runoffgroove [online]. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.runoffgroove.com/fetzervalue.html>
- [13] Tetrode. Wikipedia [online]. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tetrode>
- [14] The tetrode. *The valve museum* [online]. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <http://www.r-type.org/articles/art-320c.htm>
- [15] The pentode. *The valve museum* [online]. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <http://www.r-type.org/articles/art-320d.htm>
- [16] JCM800. In: *Marshall* [online]. [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://marshall.com/amps/products/amps/vintage-reissues/jcm800-2203>
- [17] JCM800. In: *Thetubestore* [online]. [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.thetubestore.com/lib/thetubestore/schematics/Marshall/Marshall-JCM800-Lead-Mstvol-50W-2204-Schematic.pdf>
- [18] JCM800 1987. *Thetubestore* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.thetubestore.com/lib/thetubestore/schematics/Marshall/Marshall-JCM800-Lead-50W-1987-Schematic.pdf>
- [19] SPICE model for vacuum-tube amplifiers. *Leachlegacy* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://leachlegacy.ece.gatech.edu/papers/tubeamp/tubeamp.pdf>
- [20] Designing common-cathode triode amplifiers. *Aikenamps* [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.aikenamps.com/index.php/designing-common-cathode-triode-amplifiers>
- [21] Tube Screamer schematic. In: *Electrosmash* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.electrosmash.com/images/tech/ds1/boos-ds1-distortion-schematic-parts.jpg>
- [22] Tube Screamer analysis. *Electrosmash* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.electrosmash.com/tube-screamer-analysis>
- [23] BOSS DS-1 Schematic. In: *Electrosmash* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.electrosmash.com/images/tech/ds1/boos-ds1-distortion-schematic-parts.jpg>
- [24] BOSS DS-1 Analysis. *Electrosmash* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.electrosmash.com/boos-ds1-analysis>
- [25] BOSS-DS1. In: *Boss* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.boss.info/global/products/ds-1/>
- [26] TS9 Tube Screamer. In: *Ibanez* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://www.ibanez.com/eu/products/model/tube_screamer/

- [27] Improved vacuum tube models for SPICE simulations. *Normankoren* [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: http://www.normankoren.com/Audio/Tubemodspice_article.html
- [28] The DC coupled cathode follower. *Valvewizard* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <http://www.valvewizard.co.uk/dccf.html>
- [29] DC cathode follower. In: *Valvewizard* [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <http://www.valvewizard.co.uk/DCCF2.jpg>
- [30] *Amplifier tone stacks* [online]. In: . [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://monster.partyhat.co/article/amplifier-tone-stacks/#one-knob-tone-controls>
- [31] Stack of amps. In: *Sweetwater* [online]. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://www.sweetwater.com/insync/media/2019/04/Stack_O_Amps_001.jpg
- [32] *Runoffgroove* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <http://www.runoffgroove.com/articles.html>
- [33] Ruby. In: *Runoffgroove* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <http://www.runoffgroove.com/ruby.png>
- [34] BOSS Katana 50 W. In: *Boss* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://articles.boss.info/wp->
- [35] FOJTÍK, Šimon. *Zesilovač pro kytaru* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/87623/F3-BP-2020-Fojtik-Simon-Zesilovac%20pro%20kytaru.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [36] Transistor. *Wikipedia* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor>
- [37] KYTTÄLÄ, Teemu. *Solid-state guitar amplifier* [online]. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.jeanpierre Poulin.com/PDF/transistor.pdf>
- [38] JFET construction and symbols. In: *Electronics-tutorials* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/wp-content/uploads/2018/05/transistor-tran17.gif>
- [39] Output characteristics JFET. In: *Electronics-tutorials* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/wp-content/uploads/2018/05/transistor-tran18.gif>
- [40] Junction field effect transistor. *Electronics-tutorials* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_5.html
- [41] BF265B Datasheet. *Farnell* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/1868845.pdf>

- [42] Understanding the Differences Between the N-channel and P-channel Field-effect Transistors (FETs). *Eepower* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://eepower.com/technical-articles/an-overview-of-the-field-effect-transistor-fet/#>
- [43] Bipolar transistor. *Electronics-tutorials* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_1.html
- [44] Bipolar transistor construction and symbols. In: *Electronics-tutorials* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/wp-content/uploads/2018/05/transistor-tran1.gif>
- [45] NPN transistor output characteristics. In: *Electronics-tutorials* [online]. [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/wp-content/uploads/2018/05/transistor-tran11.gif>
- [46] DENTON, Dailey. Perception of Distortion: Transistors vs. Tubes. In: *Electronics for Guitarists*. s. 141. ISBN 978-1-4419-9535-3.

Prílohy

Model Norman Koren elektrónky ECC83/12AX7

```
SUBCKT @value[0] A G K PARAMS: Cak=0.9p Cga=2.4p Cgk= 2.3p
Kg1=1060 ex=1.58 mu=100 kp=800 kvb=500 vgc=.7 Rgk=2k
```

```
C1 A G {Cga}
```

```
C2 G K {Cgk}
```

```
B1 A K I=(pow(v(e1),ex)/kg1)*(v(e1)+abs(V(e1)))/V(e1)
```

```
C3 A K {Cak}
```

```
D1 G K DGK
```

```
B2 e1 0 V=(V(a,k)/Kp)*Log(1+exp(Kp*(1/mu+(v(g,k)+vgc)/sqrt(kvb+pow(V(a,k),2))))))
```

```
.model DGK D(Vfwd=0 Ron={RGK} Roff=100meg)
```

```
.ends @value[0]
```

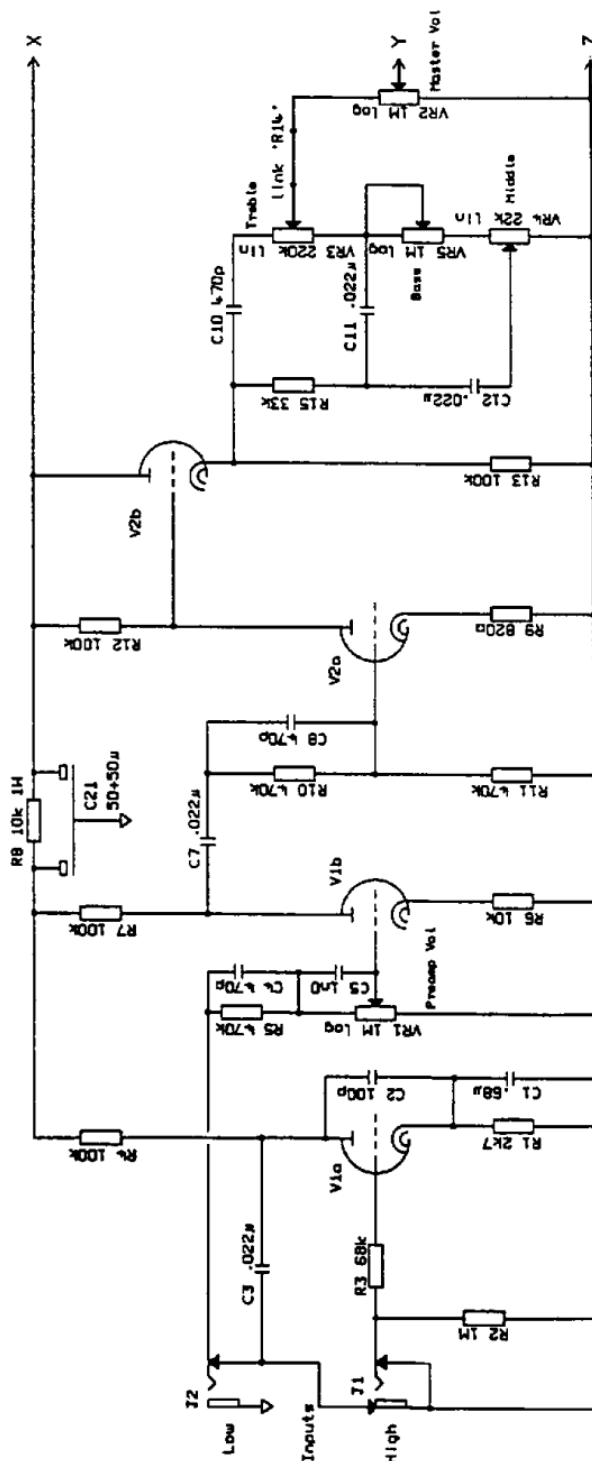
Meracie prístroje

Meranie bolo uskutočnené na prístrojoch:

Lecroy HDO6104-MS High definition Signal Oscilloscope

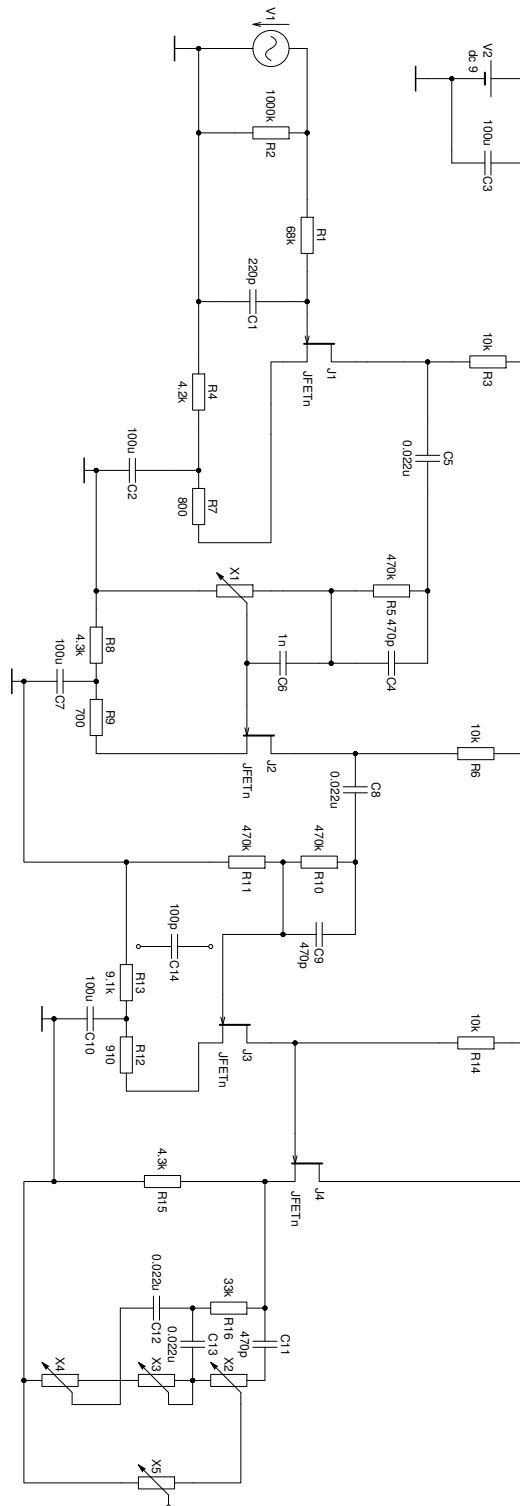
Rohde&Schwarz RTH1002 Digital Oscilloscope

Schéma zapojenia predzosilňovača Marshall JCM800 modely 2203/2204.



Obrázok 5.12: Schéma predzosilňovača JCM800 model 2203/2204

Schéma zapojenia navrhnutého efektového pedálu.



Obrázok 5.13: Schéma zapojenia s tranzistormy