



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Pedagogická fakulta
Katedra aplikované fyziky a techniky

Diplomová práce

Využití elektronek v současné době

Vedoucí práce: Ing. Michal Šerý, Ph.D.

Autor práce: Bc. Josef Čepička

Studijní obor: Učitelství fyziky a výpočetní techniky s elektronikou pro 2. stupeň ZŠ,
kombinované studium

České Budějovice 2013

Anotace

Cílem této diplomové práce je zkonstruování ukázkového modelu elektronkového zesilovače s možností měření procházejícího signálu ve více bodech a možností náhledu do zapojení a konstrukce zesilovače. Na začátku práce je popsáno několik zásadních témat týkajících se elektronek a zapojení s nimi, jako například princip zesílení signálu pomocí elektronek, třídy nízkofrekvenčních zesilovačů a popis několika typů nežádoucích zkreslení. Další část práce pojednává o samotném návrhu zkonstruovaného zesilovače, popisu vzniku a osazení desek plošných spojů a použitých elektronkách a transformátorech. Následující část práce je věnována měření základních vlastností zesilovače a měření vlastností elektronek pomocí přístroje TESLA BM215A. V závěrečné kapitole jsou uvedeny technické parametry zesilovače a fotodokumentace.

Abstract

Aim of this thesis is to construct a demonstration model of a vacuum tube amplifier with a possibility of measurement of signal on more places and a possibility to see the wiring and construction of the amplifier. The first part of the work treats some important themes concerning vacuum tubes and wiring with them, for example a principle of signal intensification by vacuum tubes, categories of low-frequency amplifiers and description of several types of undesirable distortions. Next part deals with the design of the constructed amplifier, the description of the construction itself and placement of the components on the printed circuit boards and used vacuum tubes and transformers. The following part is focused on measurement of the basic properties of the amplifier and vacuum tubes by means of TESLA BM215A appliance. The final part contains technical parameters of the amplifier and photo documentation.

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě - v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Táboře 27. 12. 2013

Touto formou děkuji vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Michalovi Šerému, Ph.D., za přípravné konzultace a připomínky při zpracování diplomové práce.

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Elektronky.....	7
2.1	Princip činnosti a funkce elektronek	7
2.2	Základní vlastnosti elektronek	9
2.3	Pracovní bod elektronkového zesilovače	11
2.4	Třídy NF zesilovačů.....	12
2.4.1	Zesilovač třídy A	12
2.4.2	Zesilovač třídy B.....	13
2.4.3	Zesilovač třídy AB.....	14
3	Zkreslení NF zesilovačů	15
3.1	Přechodové zkreslení signálu	15
3.2	Harmonické zkreslení.....	16
3.3	Intermodulační zkreslení TID	16
3.4	Zkreslení SID	17
3.5	Zkreslení TIM	17
3.6	Zkreslení limitací	18
4	Problematika elektronkových zesilovačů	18
4.1	Žhavení elektronek.....	19
5	Návrh zesilovače.....	21
5.1	Schéma zesilovače a zdroje napětí	24
5.2	Návrh desek plošných spojů.....	27
5.3	Osazovací plán desek plošných spojů	28
5.4	Rozpiska součástek	30
5.5	Transformátory.....	31
5.6	Použité elektronky.....	31
5.6.1	Elektronky v předzesilovacím stupni.....	33

5.6.2	Elektronky v koncovém stupni	33
6	Oživení zesilovače	33
6.1	Oživení zdroje	34
6.2	Oživení signálové části	34
7	Mechanická konstrukce	34
8	Návrh a realizace informativních panelů	36
9	Konstrukce reproduktorové skříně.....	37
9.1	Reproduktor Celestion TUBE 10	37
10	Měření základních charakteristik.....	40
10.1	Fourierova řada výstupního signálu zesilovače.....	40
10.2	Měření amplitudové charakteristiky koncového stupně.....	41
10.3	Měření maximálního výstupního výkonu.....	43
10.4	Měření základních vlastností elektronek pomocí přístroje Tesla BM215A. 43	
10.5	Vliv potenciometru „Zisk 1“ na procházející signál	44
10.6	Použité měřicí přístroje.....	45
11	Zkoušeč elektronek TESLA BM215A	45
11.1	Postup měření	45
11.2	Technické parametry	48
12	Základní parametry zkonstruovaného zesilovače	49
12.1	Fotodokumentace	49
12.2	Záznam zvuku zesilovače.....	51
13	Závěr	57
	Seznam použitých zdrojů.....	60
	Seznam zkratk	61
	Seznam obrázků.....	62
	Seznam grafů	63

1 Úvod

Elektronka je aktivní elektronický prvek. V dnešní době jsou elektronky vytlačeny modernějšími aktivními prvky jako jsou tranzistory a operační zesilovače. Avšak v některých odvětvích jsou elektronky a jejich specifické vlastnosti opět žádány. Ve většině případů se jedná o obor audio techniky a práce s audio signálem. Například kytarové zesilovače s elektronkami mají mnohem příjemnější a přirozenější zvuk (případně zkreslení zvuku) pro lidské ucho než zesilovače, které pro zesílení a případné zkreslení zvuku využívají tranzistory nebo operační zesilovače. Stejně tak pro zpracování zvuku v Hi-Fi kvalitě se výrobci stále více vrací k léty ověřeným elektronkám. Například slovenská firma JJ electronic, která je již dlouhá léta předním světovým výrobcem elektronek, zařadila do svého sortimentu kompletní elektronkové zesilovače určené pro věrný poslech hudby. Tato firma převzala výrobní postupy a část technologií od bývalého podniku Tesla.

2 Elektronky

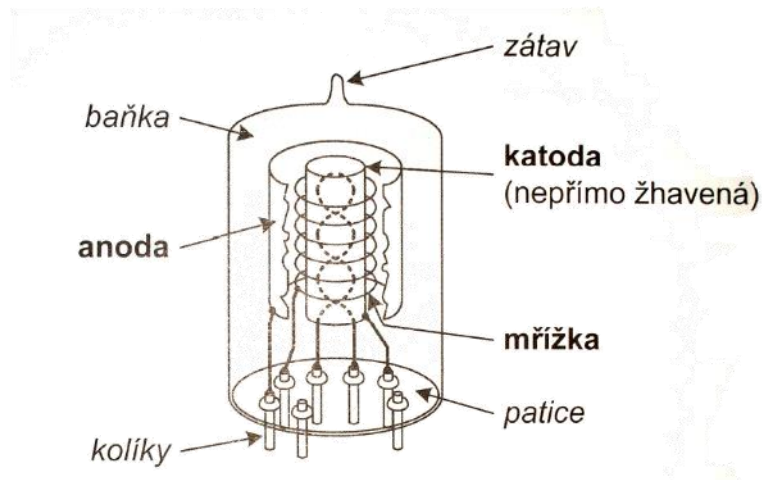
Vynálezem elektronky se začala psát nová historie elektroniky. Elektrotechnici získali první aktivní elektronický prvek, který se dal využít k zesílení, spínání či vytváření oscilací.

2.1 Princip činnosti a funkce elektronek

Elektronka je tvořena většinou skleněnou baňkou, ze které je odčerpáný vzduch. Vzniklé vakuum umožňuje pohyb elektronů. Do baňky je zataveno několik elektrod. Základem je katoda a anoda, mezi kterými prochází elektrony. Průchod elektronů mezi těmito elektrodami je možné řídit pomocí další elektrody - tzv. mřížky.

Katoda je tvořena kovem, který je schopen emise elektronů. Pro dosažení emise je potřeba katodu dostatečně ohřát. To se provádí buď přímým, nebo nepřímým žhavením. Častěji používané nepřímé žhavení je realizováno rozzhaveným vodičem, který je umístěn uvnitř katody (viz obr. 1). Nízkou úrovní napětí, které přivádíme na řídicí mřížku, můžeme řídit výstupní napětí na anodě.

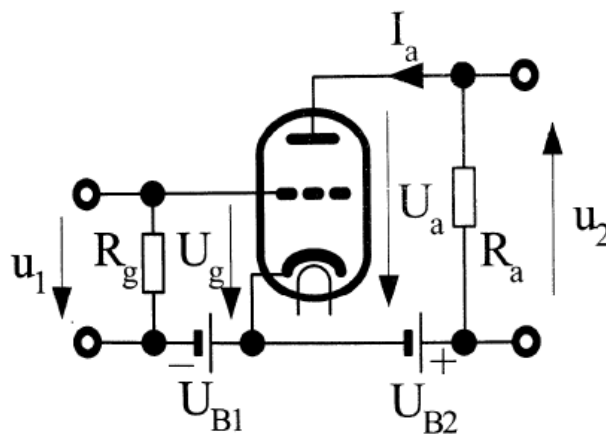
Podle počtu elektrod (mřížek) umístěných mezi katodou a anodou dělíme elektronky na diody, triody, pentody a další vícemřížkové systémy.



Obrázek 1 Elektronka - trioda [1]

Na obr. 2 je znázorněno základní zapojení triody v elektrickém obvodu. Pracovní bod triody je určen anodovým napětím U_a , anodovým proudem I_a a mřížkovým napětím U_g (mřížka je vzhledem ke katodě záporná, mřížkový proud nulový). S rostoucím napětím u_1 na mřížkovém odporu R_g se zvětšuje anodový proud I_a , zmenšuje se anodové napětí U_a a zvětšuje se výstupní napětí u_2 na odporu R_a . [1] Napěťové zesílení elektronky A_u je dáno vztahem (1).

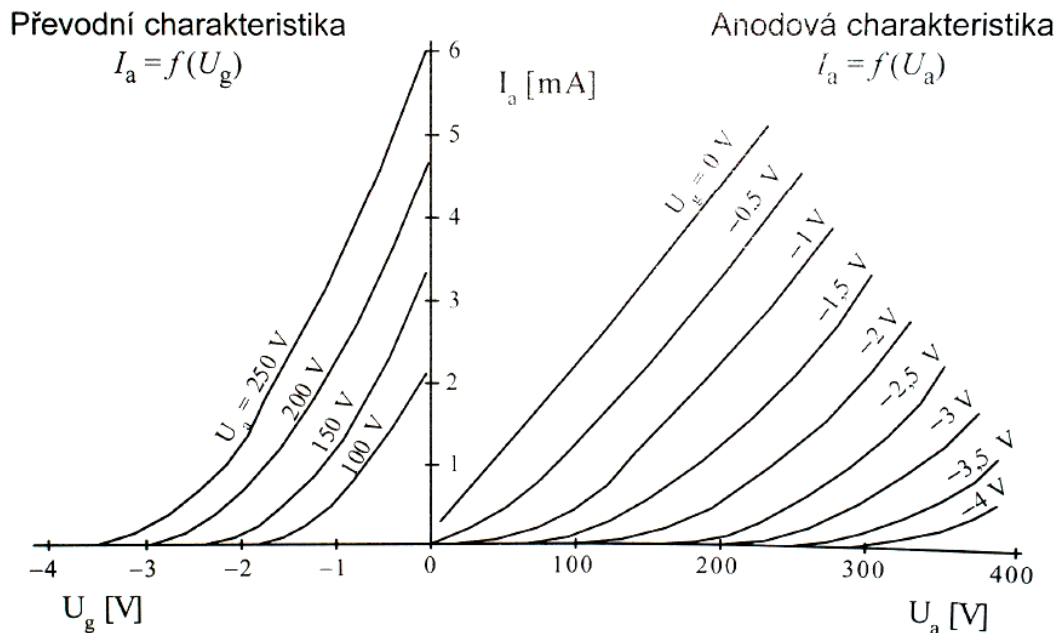
$$A_u = \frac{u_2}{u_1} \quad (1)$$



Obrázek 2 Základní zapojení triody [1]

2.2 Základní vlastnosti elektronek

Vlastnosti elektronek se popisují statickými charakteristikami. Na obr. 3 je znázorněna modelová charakteristika elektrony - triody. V levé části je znázorněna parametrická závislost anodového proudu I_a na mřížkovém napětí U_g pro různá anodová napětí U_a , která se nazývá převodní charakteristikou elektrony (angl. transfer characteristic). V pravé části je znázorněna parametrická závislost anodového proudu I_a na anodovém napětí U_a pro různá mřížková napětí U_g , která se nazývá anodovou charakteristikou elektrony (angl. plate characteristics). [1]



Obrázek 3 Modelová charakteristika elektrony s jednou mřížkou - triody [1]

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

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

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

Vnitřní odpor R_i (angl. plate impedance) je poměr přírůstku anodového proudu ΔI_a k přírůstku anodového napětí ΔU_a při konstantním mřížkovém napětí U_g a udává se obvykle v [k Ω]:

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

Zesilovací činitel μ (angl. amplification factor) je poměr přírůstku anodového napětí ΔU_a k přírůstku mřížkového napětí ΔU_g při konstantním anodovém proudu I_a :

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

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

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

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

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

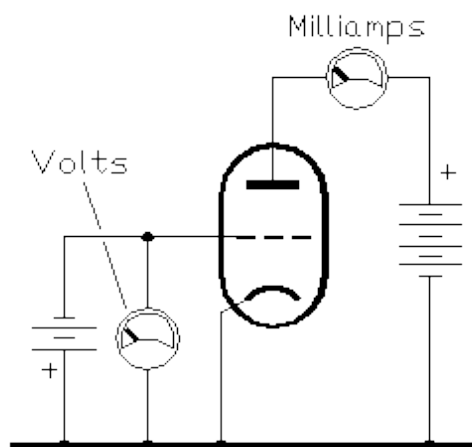
Pracovní bod elektronky je jednoznačně určen trojicí odpovídajících hodnot U_a , I_a a U_g (obvykle tyto údaje zjistíme z katalogu pro konkrétní elektronku). Pro tento pracovní bod definujeme anodový odpor v pracovním bodě vztahem:

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

2.3 Pracovní bod elektronkového zesilovače

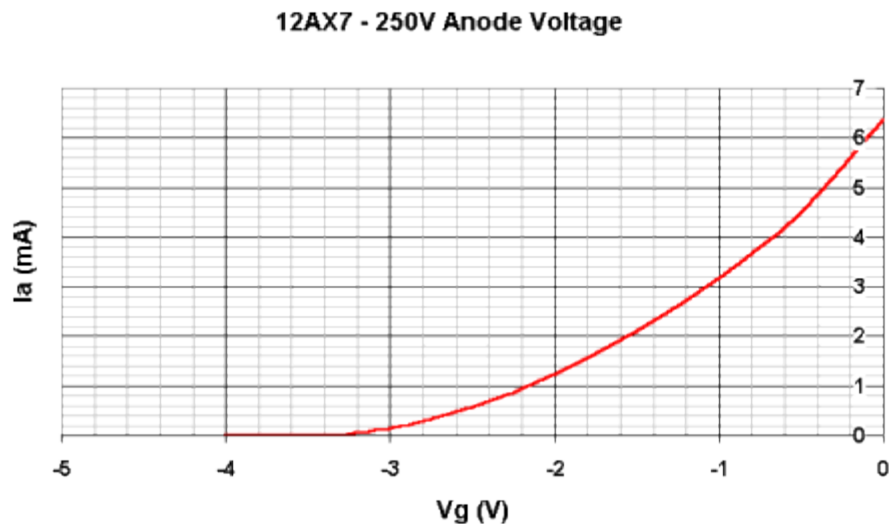
Na obr. 4 je znázorněno zapojení triody. Anoda bývá většinou napájena zdrojem o napětí od 100 V do 1 kV. V anodovém obvodu je zařazen miliampérmetr. V levé části obrázku je znázorněn zdroj napětí připojený mezi mřížku a katodu. Voltmetr měří velikost napětí přivedeného na mřížku. Napětí na mřížce musí mít zápornou hodnotu. Anodový proud bude klesat při vyšší hodnotě záporného napětí na mřížce.

Kdybychom na mřížku přiváděli nulové napětí, lze triodu považovat za diodu. Anodový proud bude odpovídat emisní schopnosti katody. Velikost anodového proudu můžeme ovlivnit také snížením žhavicího napětí. Čím bude katoda teplejší, tím vyšší anodový proud naměříme, protože bude emitovat větší množství elektronů. Se záměrnou změnou žhavení se můžeme setkat u některých zesilovačů určených pro zesílení signálu z elektrické kytary. U těchto zesilovačů bývá záporné předpětí výkonových elektronek kolem 40 V nebo i více a pro vstupní elektronky kolem 2 až 10 V. [2].



Obrázek 4 Schematické zapojení elektronky - triody [2]

Na obrázku 5 vidíme, že změnou mřížkového napětí můžeme měnit anodový proud. Necháme-li anodový proud procházet vhodně zvoleným anodovým odporem, vyvoláme malou změnou mřížkového napětí velkou změnu anodového napětí, a tak dostaneme nejjednodušší zesilovač.



Obrázek 5 Závislost anodového proudu na změně mřížkového napětí [2]

Tímto způsobem bývají řešeny obvody předzesilovačů. Předzesilovače se tedy konstruují ve třídě A. Jiné třídy se používají výjimečně, a to spíše ve vysokofrekvenční technice, kde je nutno zesilovat zároveň slabé i silné signály. Princip elektronek v předzesilovači a v koncovém stupni je obdobný s tím rozdílem, že koncové elektrony pracují s vyššími hodnotami anodových napětí a proudů. [2]

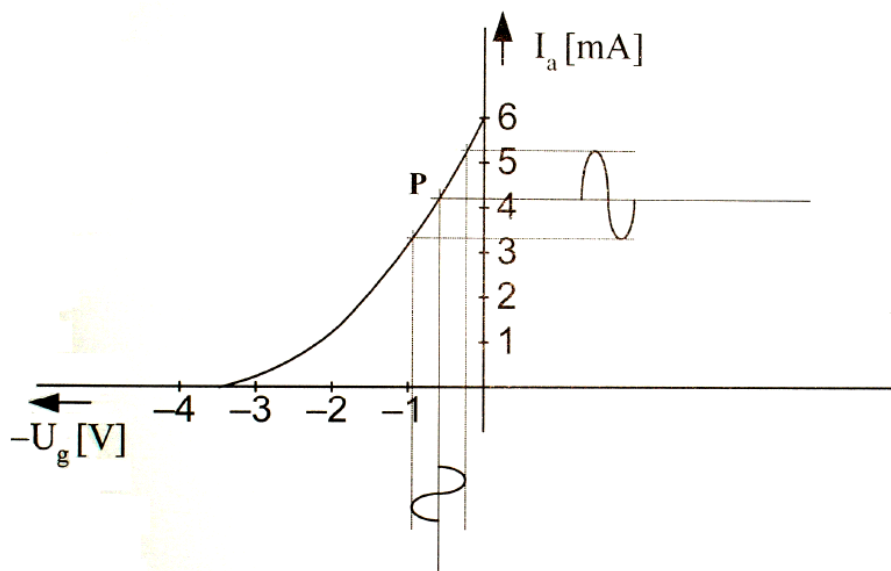
2.4 Třídy NF zesilovačů

Často se můžeme setkat na stránkách časopisů s problematikou týkající se tříd zesilovačů. Konkrétně s diskuzemi o tom, která třída je pro NF zesilovače nejlepší. Většina NF zesilovačů pracuje ve třídách A, B, nebo AB. [2]

2.4.1 Zesilovač třídy A

Na obr. 6 vidíme princip zesilovače ve třídě A. Pracovní bod P je umístěn uprostřed převodní charakteristiky. Při rozkmitu signálu se pracovní bod pohybuje v lineární části převodní charakteristiky. Vstupním signálem měníme anodový proud a na pracovním anodovém odporu vzniká výstupní signál, který bude oproti vstupnímu

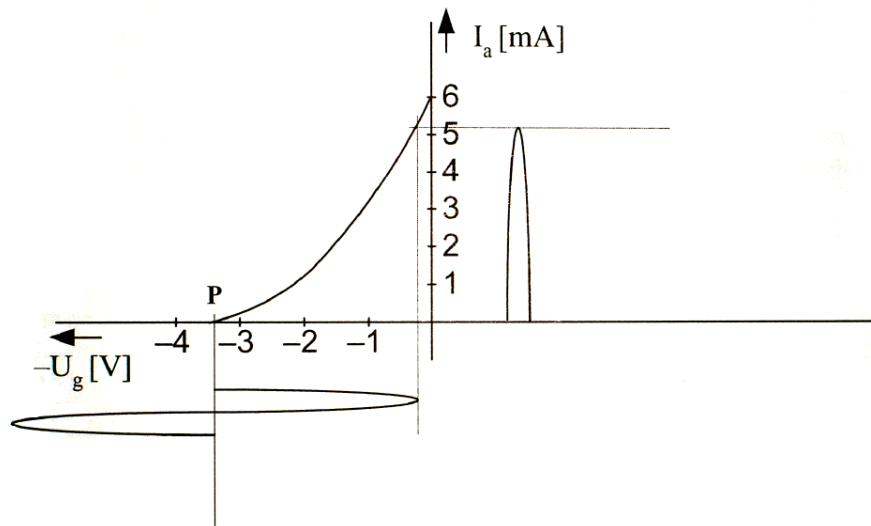
signálu zkreslený. Zkreslení bude tím menší, čím bude mít vstupní signál menší rozkmit. Proto třída A pracuje se zanedbatelným zkreslením pouze při velmi malých signálech. Toho se využívá u nízkofrekvenčních zesilovačů. Kladnou i zápornou půlvlnu vstupního signálu zpracuje pouze jeden aktivní elektronický prvek. Nevýhodou tohoto řešení je, že i v klidovém stavu protéká koncovým stupněm proud, který odpovídá nastavenému klidovému pracovnímu bodu P . [2]



Obrázek 6 Princip zesilovačů třídy A [1]

2.4.2 Zesilovač třídy B

Zesilovače ve třídě B zesilují každou půlvlnu zvlášť (viz obr. 7). Pracovní bod je nastaven těsně před bodem otevření elektronky. Na obrázku vidíme, jak je zesílena kladná půlvlna. Zápornou půlvlnu zesilujeme tak, že nejdříve obrátíme její polaritu fázovým invertorem osazeným například elektronkou ECC83 a výstup invertujeme vhodným zapojením výstupního transformátoru. Výhodou je mnohem vyšší účinnost zesilovače. Navíc zesilovač ve třídě A odebírá stále značný proud, i když není vůbec vybuzen, ve třídě B bez buzení žádný proud neprotéká. [2]

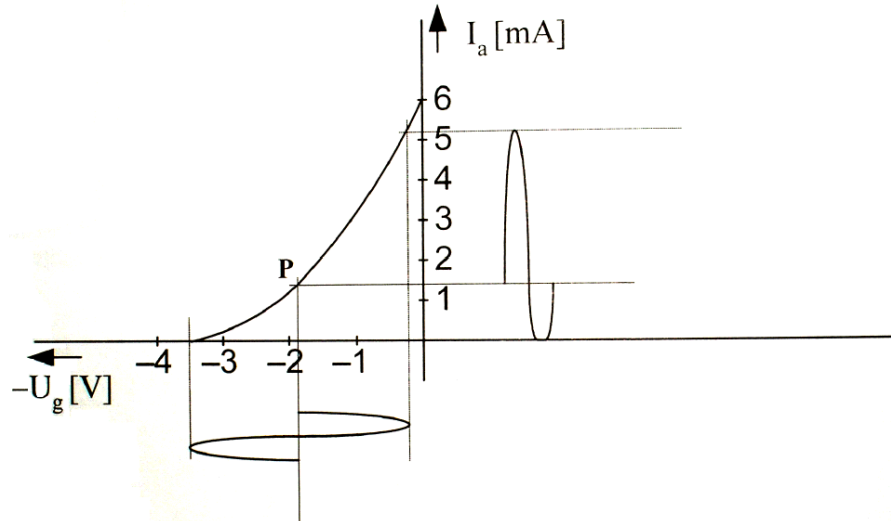


Obrázek 7 Princip zesilovačů třídy B [1]

Při nastavení klidového pracovního bodu P na počátek převodní charakteristiky vzniká při změně polaroty přechodové zkreslení. K tomuto zkreslení dochází, když se skládají jednotlivé půlvlny výstupního signálu, které jsou zesilovány samostatnými koncovými elektronkami. [2]

2.4.3 Zesilovač třídy AB

Pracovní bod nenastavíme na počátek převodní charakteristiky, ale dovolíme, aby výkonovým stupněm tekla jistý klidový proud. Při rozkmitu vstupního napětí U_g se výstupní napětí U_a dostane do nelineární části (viz obr. 8). V tomto případě je jedna půlvlna již hodně zkreslená, a proto je nutné připojit druhý aktivní prvek do tzv. protitaktního zapojení (angl. push - pull). V tomto zapojení zesiluje každý prvek pouze jednu půlvlnu. Nevýhodou tohoto řešení je vyšší zkreslení. Výhodou je dosažení vyšší účinnosti. [1]



Obrázek 8 Princip zesilovačů třídy AB [1]

3 Zkreslení NF zesilovačů

Zkreslení udáváme pomocí tzv. činitele harmonického zkreslení, který vyjadřuje procentní podíl vyšších harmonických signálů k celému signálu. Zkreslení není jednoduché změřit, protože potřebujeme sinusový generátor o vysoké spektrální čistotě, na výstupu zesilovače ostrý filtr a spektrální analyzátor. [2]

3.1 Přejchodové zkreslení signálu

Nejvíce nepříjemné zkreslení, zvané přechodové, je způsobeno třetí harmonickou vlnou. To se projevuje jako "chrastění" při malých hlasitostech (viz kapitola - třídy zesilovačů). Přejchodové zkreslení snižuje schopnost zesilovače přenést velmi malé dynamické signály, způsobuje subjektivní "zdrsnění" středů a výšek a zhoršuje prostorovost zvuku. Čím slabší signál a vyšší frekvence, tím více je zkreslení patrné. Na osciloskopu ho můžeme velmi dobře pozorovat při trojúhelníkovém signálu a napětí na výstupu kolem 1 V (viz obr. 9). Zkreslení měříme kmitočtem 10 kHz, protože na něm je až o řád větší než na 1kHz. [2]



Obrázek 9 Přechodové zkreslení trojúhelníkového signálu [2]

Průběh přechodového zkreslení zobrazuje červená křivka. V praxi můžeme ještě pozorovat zákmity způsobené charakterem zátěže.

3.2 Harmonické zkreslení

Harmonické zkreslení zesilovačů je způsobeno nelinearitou aktivních součástek. Nelinearitou vznikají vyšší harmonické frekvence, které jsou celistvými násobky vstupního signálu. Pro lidské ucho jsou především liché harmonické frekvence nepříjemné.

U klasických a Hi-Fi zesilovačů je zkreslení nežádoucí, ale u zesilovačů, které jsou určeny pro zesílení kytarového signálu, je toto harmonické zkreslení přímo vyžadováno a požadavkem uživatelů těchto aparátů je také možnost toto zkreslení regulovat. [2]

3.3 Intermodulační zkreslení TID

Toto zkreslení je také způsobeno nelinearitou aktivních součástek. V případě, že přivedeme na vstup zesilovače dva signály, můžeme na výstupu pozorovat zesílený signál vstupní frekvence f_1 a f_2 a také jejich kombinace f_1+f_2 , f_1-f_2 , $2f_1+f_1$, $2f_1+2f_2$, atd. [2]

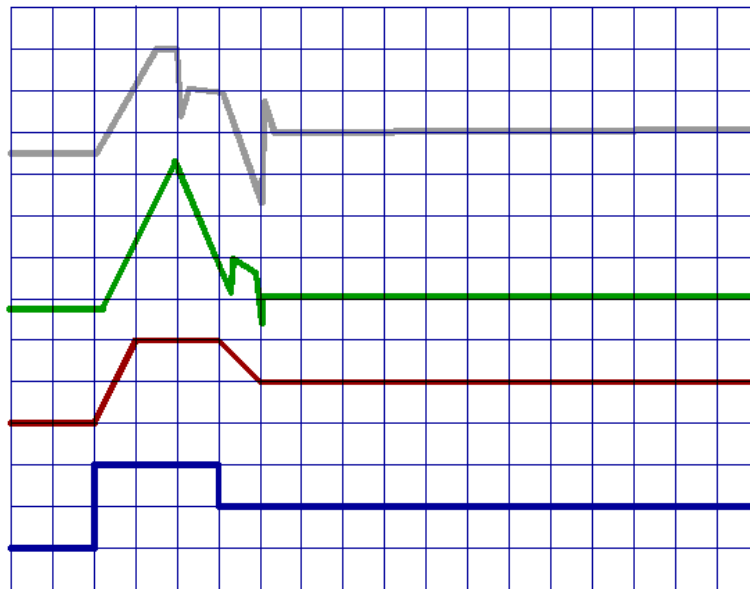
3.4 Zkreslení SID

Toto zkreslení vzniká v případě, že na vstup zesilovače přivedeme skokovou změnu napětí. Tato změna způsobí, že se signál na výstup dostane se zpožděním. Zpoždění udává parametr nazývaný rychlost přeběhu, který je označován jako SR (angl. Slew Rate).

Snížit zkreslení lze pomocí zpětné vazby, ale jen do strmosti signálu menší než je rychlost přeběhu zesilovače, pak se zkreslení prudce zvyšuje. Lepším řešením, jak snížit SID zkreslení, je správně navrhnout koncový stupeň zesilovače. U větších výkonů lze také použít vyšší napájecí napětí pro koncový stupeň.

3.5 Zkreslení TIM

Zkreslení TIM způsobí přítomnost záporné zpětné vazby a je svázáno se zkreslením SID - nízká rychlost přeběhu. Příčinou tohoto zkreslení je neschopnost zesilovače sledovat vstupní signál. Nastává převážně při buzení výškami. Tento jev se projevuje především při zesílení mluveného slova na sykavkách.



Obrázek 10 Zkreslení TIM [2]

Modrý průběh na obrázku 10 znázorňuje rychlou změnu vstupního signálu, která je pro zjednodušení znázorněna jako obdélníkový signál. Na zesilovači s nízkou rychlostí přeběhu by došlo na výstupu ke zkreslení vyjádřenému červenou křivkou.

Záporná zpětná vazba způsobí vznik překmitu, který je znázorněn jako zelený průběh. K tomu dochází z důvodu, že zpětná vazba má snahu dosáhnout opět obdélníkového průběhu na výstupu zesilovače. Z důvodu frekvenčně kompenzované zpětné vazby dojde k neadekvátnímu přebuzení koncového stupně. V signálu se vyskytnou špičky, které by ale ještě neměly na zvuk katastrofální následky, kdyby nedošlo k jejich limitaci, kterou znázorňuje průběh šedivé barvy. Limitace má na zvuk katastrofální vliv. U elektronkových zesilovačů se nepoužívají silné zpětné vazby, které by byly určeny pro eliminaci zkreslení. Převodní charakteristiky elektronek totiž nevykazují silné nelinearity, kvůli kterým by byl důvod zavedení silných zpětných vazeb. [3]

3.6 Zkreslení limitací

Při buzení elektronkového zesilovače dosahujeme postupně maximálního potenciálu. Při tomto potenciálu dochází k tomu, že zesilovač reaguje na vstupní signál menší změnou anodového proudu. To se projevuje kompresí signálu a dochází k tzv. limitaci. Limitace způsobuje, že elektronka není schopna na vzrůstající úroveň vstupního signálu reagovat a dochází tak k ořezání signálu. Elektronka nedokáže zvýšenou úroveň zesilovat. U tranzistorů dochází k ostré limitaci. Zesilovač s tranzistory zesiluje vstupní signál až do určitého maxima a až poté dojde k limitaci. Tyto dva rozdílné způsoby zkreslení limitací jsou zároveň zdrojem odlišných harmonických kmitočtů. Zatímco tranzistor produkuje liché harmonické násobky, elektronkové zkreslení je zdrojem násobků sudých. Toto elektronkové zkreslení všeobecně zní přirozeněji než tranzistorové. [3]

4 Problematika elektronkových zesilovačů

Elektronka jako první aktivní elektronický prvek byla využívána k mnoha účelům. Postupem času byl tento prvek pro většinu konstrukcí nevyhovující, a proto byla elektronka nahrazena tranzistory a později operačními zesilovači. Nevýhody využívání elektronek v praxi jsou zřejmé již ze samotné konstrukce. Ve většině případů se jedná o skleněnou baňku s několika elektrodami. Z toho vyplývá, že elektronka je náchylná na mechanické poškození. Některé literatury dokonce uvádějí, že elektronky je vhodné v zesilovači osazovat ve vzpřímené poloze, aby se vlákna a mřížky uvnitř elektronky neprověsily. Dalším problémem je ve většině případů elektronkových zesilovačů nutnost dvou transformátorů. I přes tyto zdánlivé nevýhody nacházejí

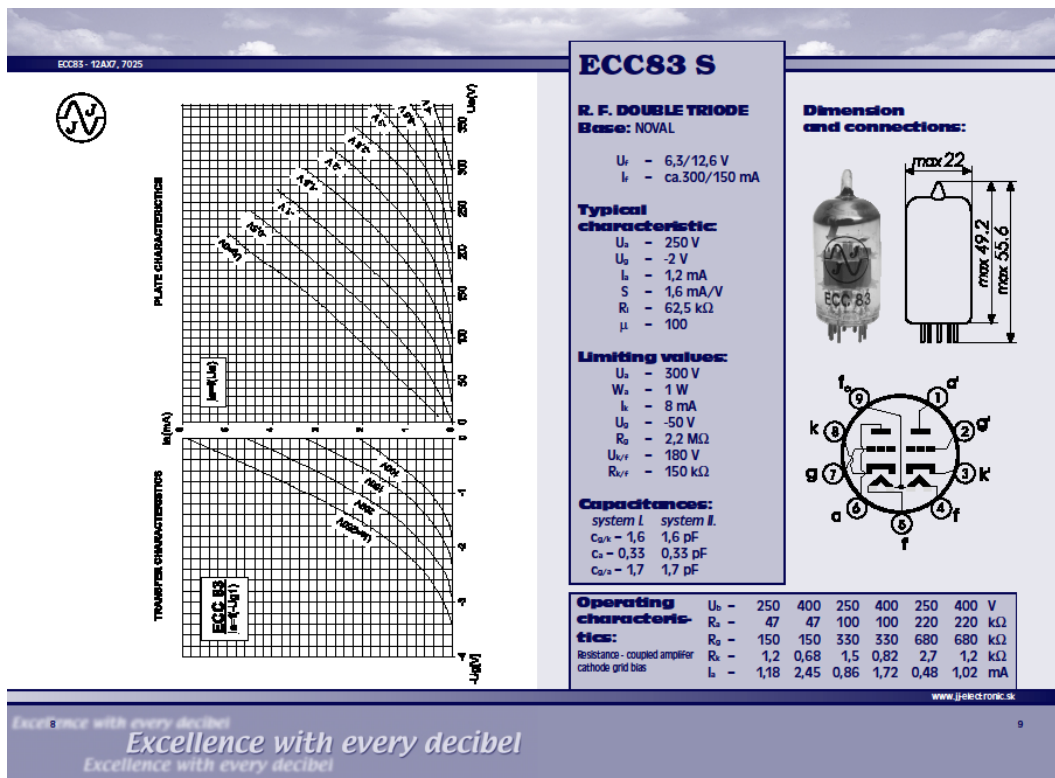
elektronkové zesilovače své zastánce a dokonce se, převážně ve firmách vyrábějících zesilovače pro zesílení kytarového signálu, pracuje na jejich dalším vývoji.

4.1 Žhavení elektronek

Aby elektronka dokázala pracovat správně, je nutné ji žhavit. V katalogových listech se dočteme, jaké napájecí napětí a proud je potřeba ke žhavení příslušné elektronky. Pro správnou funkci je nutné toto napětí udržet v toleranci $\pm 5\%$.

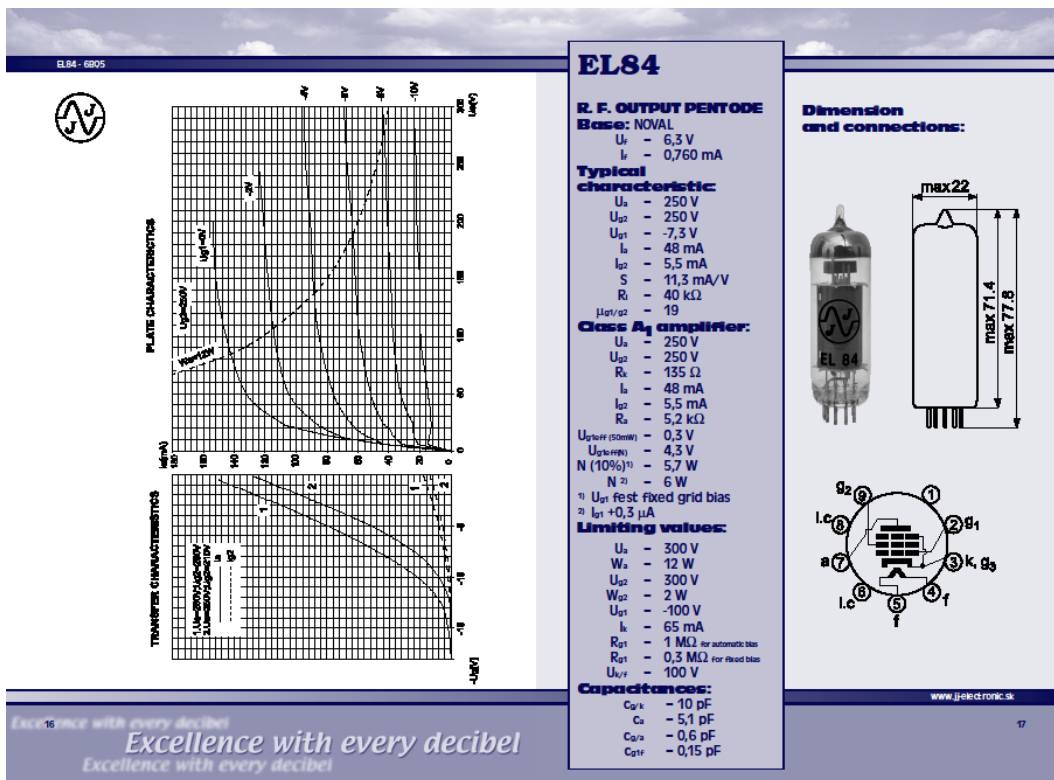
Na obrázku 11 vidíme vlastnosti elektronky ECC83. Jedná se o elektronku, která má v jedné skleněné baňce dvě kompletní soustavy triod (elektronka s jednou řídicí mřížkou). Tato elektronka se velice často využívá k zesílení audio signálu. Konkrétně v předzesilovacím stupni zesilovače.

Na katalogovém listu vidíme, že ECC83 má dvě možnosti žhavení. Vzhledem k tomu, že tato elektronka obsahuje dvě soustavy triod, je potřeba dodávat příslušné napětí dvěma žhavicím vláknům. Ze schematické značky je patrné, že vlákna jsou zapojena sériově. Vlákna jsou z baňky vyvedena na piny s označením f a číslem 4 a 5. Spojení vláken je označeno písmenem f_s a číslem 9.



Obrázek 11 Katalogový list elektronky - triody ECC83[8]

Pro žhavení obou triod je možné využít předepsané střídavé napětí $U_f=6,3$ V. V tom případě napětí přivedeme na vodivě propojené piny 4 a 5 proti pinu 9. Toto střídavé napětí může způsobit brum v signálové cestě zesilovače. Z hlediska odstranění brumu je výhodnější elektronky v předzesilovacím stupni žhavit stejnosměrným stabilizovaným napětím $U_f=12,3$ V. V případě žhavení elektronky ECC83 střídavým napětím $U_f=6,3$ V je odběr $I_f=0,3$ A a v případě žhavení elektronky stejnosměrným napětím $U_f=12,3$ V je odběr $I_f=0,15$ A. Pro žhavení elektronek určených do koncových stupňů nízkofrekvenčních zesilovačů se používá především střídavé napětí $U_f=6,3$ V (viz obr. 12).

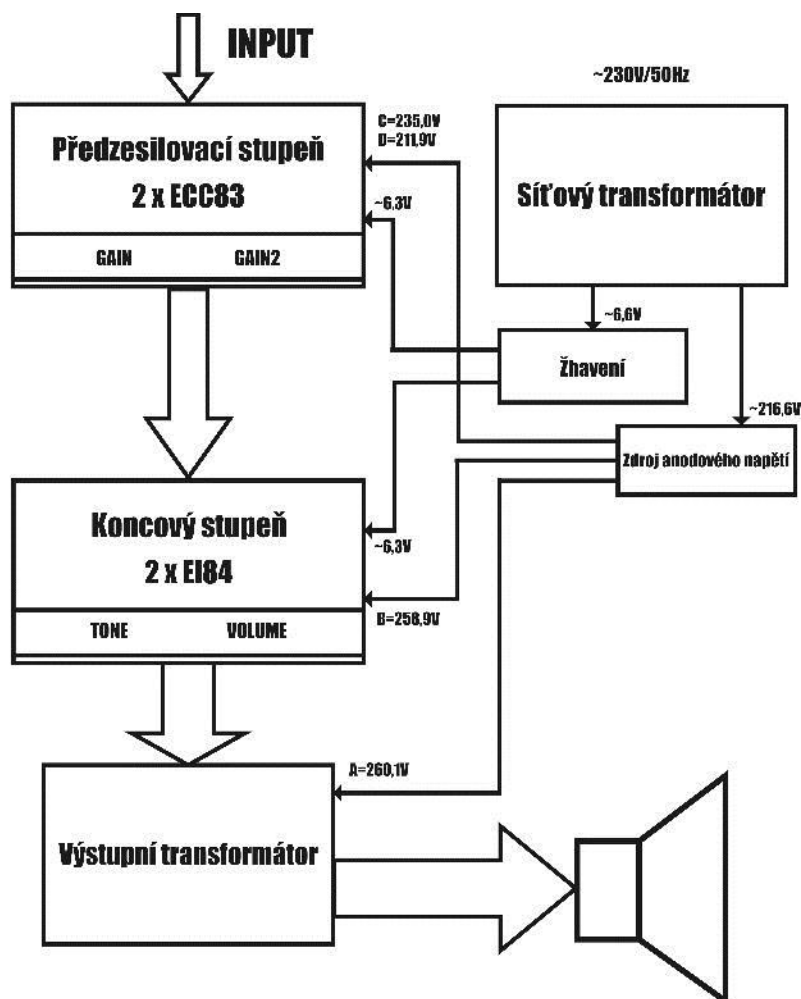


Obrázek 12 Katalogový list elektronky - pentoda EL84 [8]

5 Návrh zesilovače

Na obrázku 13 je uvedeno blokové schéma elektronkového zesilovače. Navazující kapitoly se podrobněji zabývají konstrukcí a zpracováním jednotlivých částí zesilovače.

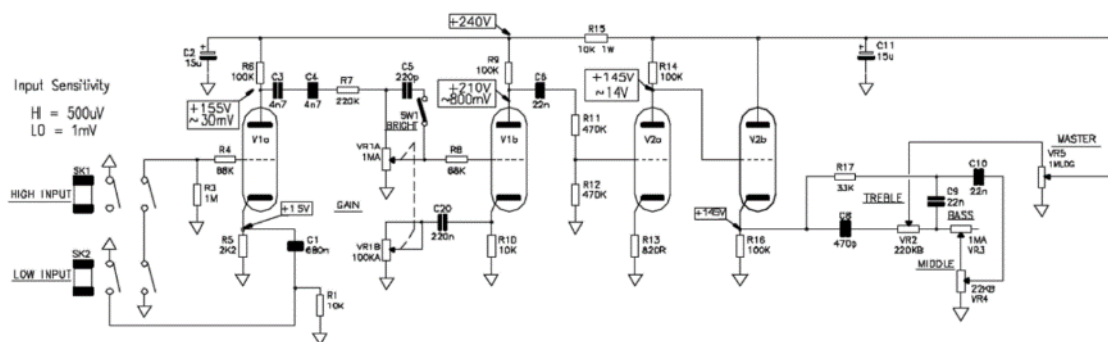
V blokovém schématu je znázorněn průchod signálu elektrické kytary přes jednotlivé bloky zesilovače a napájecí napětí dodávané do jednotlivých částí zapojení.



Obrázek 13 Blokové schéma zesilovače

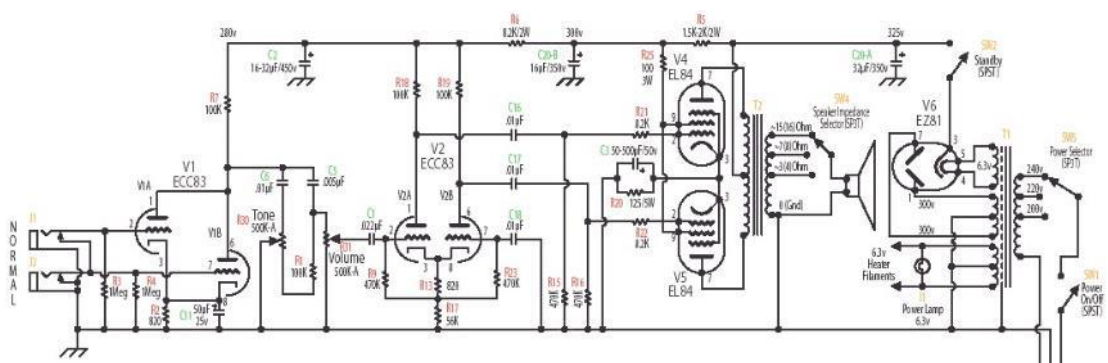
Při návrhu zesilovače byla použita různá známá zapojení, která byla vzájemně kombinována a upravována. Nejprve bylo sestaveno provizorní zapojení na zkušební desce plošných spojů a pájecí očka a byly měřeny vlastnosti zapojení. Původním záměrem bylo sestavit zesilovač, který bude určený pro zesílení přehrávané hudby. Po několika pokusech a měřeních byl tento úmysl přehodnocen a byl sestrojen zesilovač určený pro zesílení signálu z elektrické kytary, a to především z důvodu, že na procházejícím signálu lze mnohem lépe pozorovat typické požadované zkreslení elektronek.

Na obrázku 14 je schéma předzesilovače elektronkového zesilovače Laney LC15. Při základní konstrukci navrženého zesilovače je využito toto schéma jako inspirace.



Obrázek 14 Schéma kytarového zesilovače Laney LC15[5]

Na obrázku 15 je schéma elektronkového zesilovače od firmy Marshall určeného pro zesílení signálu z elektrické kytary. Tento zesilovač se osazuje již mnoho let do komba (kabinet zesilovače s reproduktorem) a mezi kytaristy je poměrně oblíbený. Při základní konstrukci jsem vycházel taktéž ze zapojení tohoto legendárního "malého" kytarového zesilovače.



Obrázek 15 Schéma kytarového zesilovače Marshall 18Watt[6]

Zkoumáním zapojení lampových kytarových zesilovačů se zabývám již delší dobu a zjistil jsem, že většina zesilovačů je postavena velice podobně. Jednotlivé výrobky se pak od sebe liší kvalitou použitých součástek, hodnotami jednotlivých součástek, jiným uspořádáním daných stupňů předzesilovače na cestě zpracování signálu a případným doplněním dalších drobných prvků v zapojení. Při prvním zkonstruování byl sestaven zesilovač na zkušební desce plošných spojů a testovány různé kombinace známých zapojení.

5.1 Schéma zesilovače a zdroje napětí

Na obrázku 16 je schéma zkonstruovaného zesilovače. V předzesilovacím stupni byly použity léty ověřené elektronky s označením ECC83 na evropském trhu a 12AX7 na americkém trhu. První stupeň, trioda V1A, zesiluje signál z kytary. Signály z elektrické kytary mohou mít odlišnou sílu, a proto v druhém stupni, trioda V1B, byl osazen předzesilovač dvěma potenciometry pro řízení zisku - potenciometr P1 a P2. Nastavením těchto potenciometrů lze regulovat potřebné zkreslení kytarového signálu. Potenciometr P2 je umístěn na zadním panelu zesilovače a lze jím přednastavit signál podle použité kytary a síly signálu z použitých snímačů. Potenciometrem P1 pak regulujeme pouze chtěné zkreslení.

Za potenciometrem P2 je umístěn kondenzátor C13, na který je připojen CINCH, který je umístěn na zadním panelu zesilovače a označen Line IN/OUT. Tento bod byl do zapojení umístěn z důvodu možnosti měření a pozorování signálu procházejícího přes předzesilovač nebo koncový stupeň. Zdroj signálu je připojen buď na vstup zesilovače a pozorován na výstupu Line OUT nebo je zdroj signálu připojen na Line IN a následně pozorován na výstupu zesilovače. Tím je zajištěna možnost samostatného pozorování signálu procházejícího předzesilovačem nebo koncovým stupněm. Tento konektor také umožňuje připojit zesilovač ke zvukové kartě počítače a zaznamenat signál kytary z předzesilovacího stupně, případně se nechá připojit jiný koncový zesilovač. Stejně tak lze k tomuto konektoru Line IN/OUT připojit jakýkoliv slabý signál (např. z mobilního telefonu, mixážního pultu, MP3 přehrávače) a zesílit ho do reproduktorové soustavy.

Poté signál prochází přes dvě triody označené V2A a V2B, které v zesilovači slouží jako zesilovací stupeň, budič a zároveň invertor pro koncový stupeň. Na triodách se zesílí vždy jedna půlvlna opačné polarity procházejícího signálu a ten je následně přiváděn na koncové elektronky. Dochází tak ke znásobení zesilovacího účinku. Mřížky G2 obou pentod jsou zapojeny na příslušnou odbočku transformátoru Tr2. Impedance primárního vinutí výstupního transformátoru Tr2 musí odpovídat katalogovým hodnotám zatěžovacího odporu v anodě.

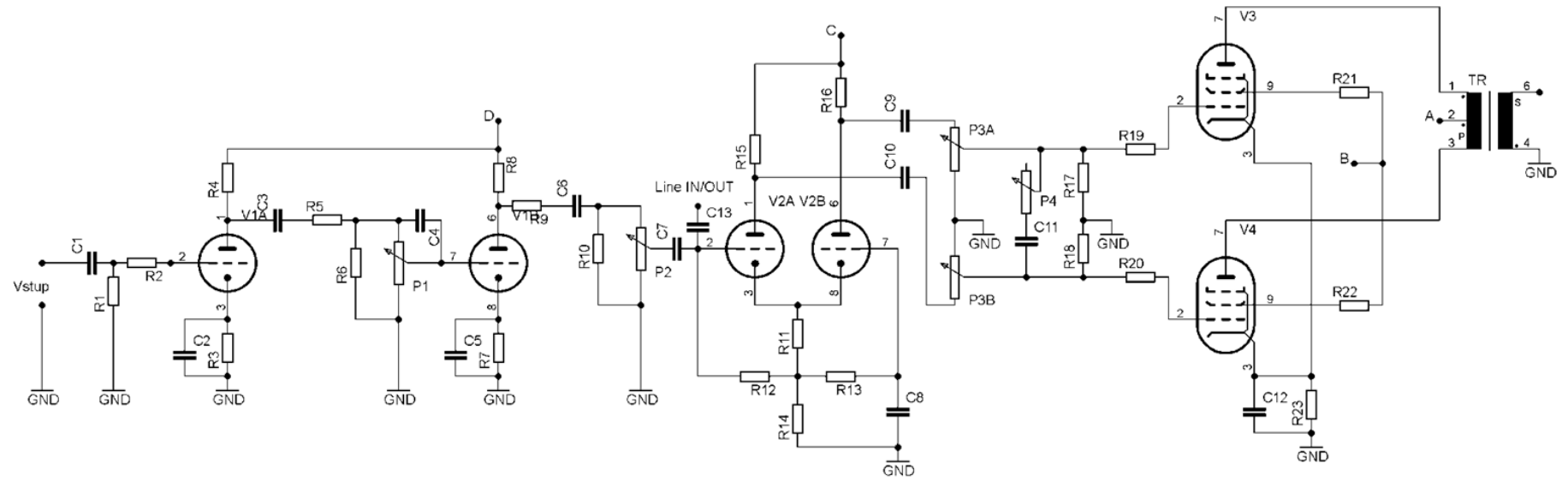
Na obrázku 17 je vykresleno schéma zdroje napětí zesilovače. Pro správnou funkci elektronek je potřeba dodávat anodové napětí $U_a=250$ V. Transformátor 1

dodává na sekundárním vinutí napětí $U=242$ V bez zatížení. V případě, že je zesilovač v provozu a transformátor je zatížen, klesá napětí na $U=216,6$ V. Toto napětí je usměrněno diodami 1N4007 s označením D1 - D4. Poté je napětí upraveno pomocí rezistorů na požadované hodnoty. (viz tabulka 1)

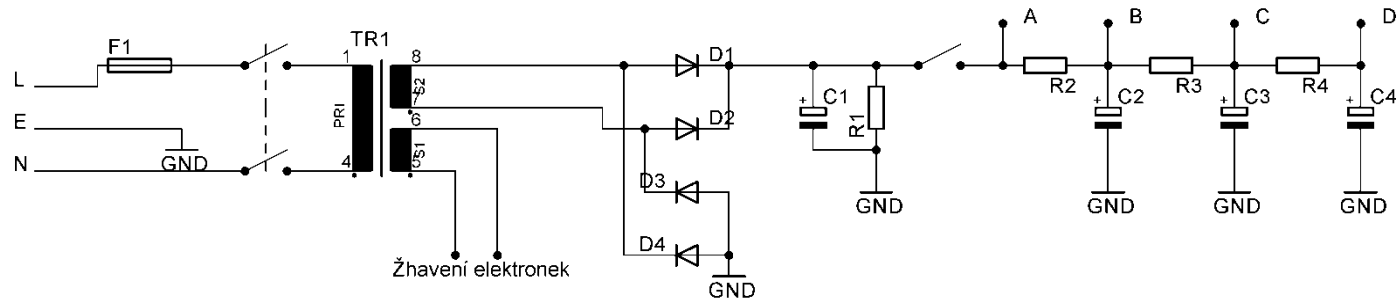
Bod měření	Napětí bez zátěže [V]	Napětí se zátěží [V]
A	332,9	260,1
B	332,5	258,9
C	332,8	235,0
D	332,3	211,9

Tabulka 1 Naměřené hodnoty napětí napájecího zdroje zesilovače

Ve zdroji napětí je několik elektrolytických kondenzátorů určených k vyfiltrování napětí. Tyto kondenzátory musí být přizpůsobeny napětí zdroje, a proto jsou zde použity kondenzátory určeny pro napětí $U=450$ V.



Obrázek 16 Schéma zkonstruovaného zesilovače

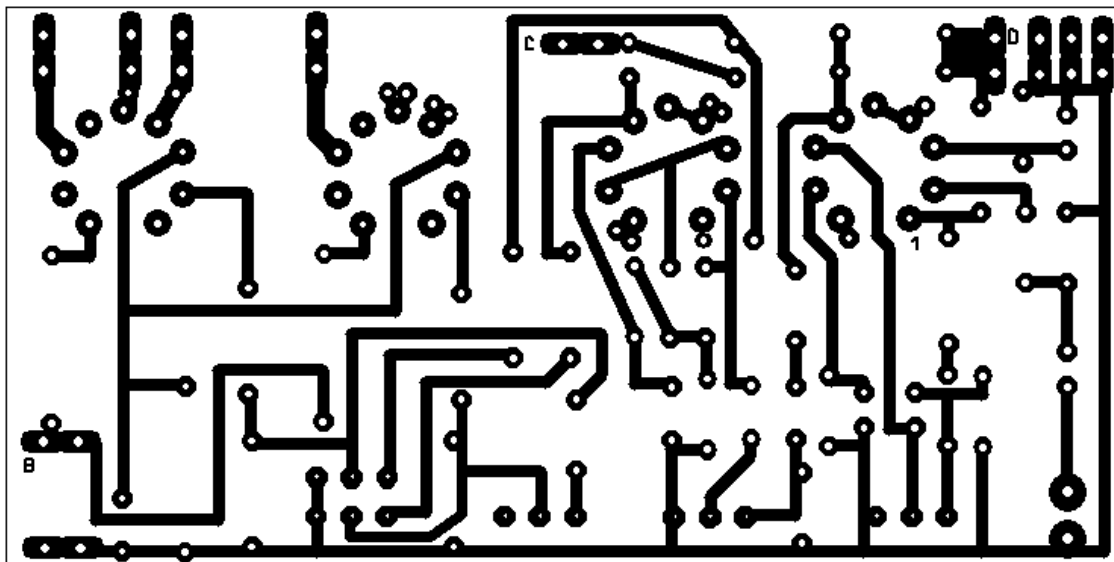


Obrázek 17 Schéma zdroje napájecího napětí zkonstruovaného zesilovače

5.2 Návrh desek plošných spojů

Podle schématu bylo navrženo několik verzí plošných spojů elektronkového zesilovače. Při prvních návrzích se vyskytlo několik problémů - elektronky, které procházely vyvrtanými otvory šasi zesilovače, byly příliš blízko u sebe a předávaly by si vytvořené teplo. Tím by mohlo docházet k jejich zbytečnému přehřívání.

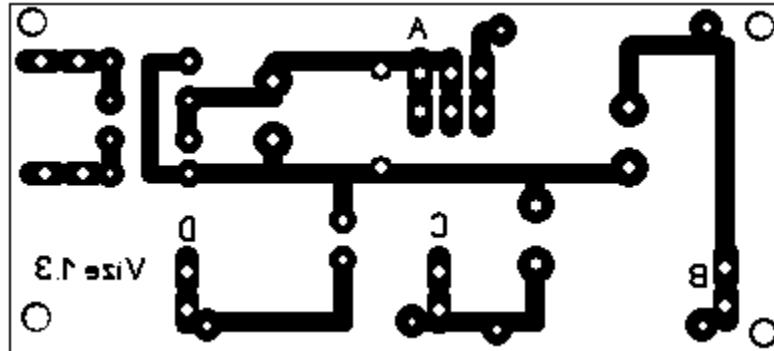
Dále bylo řešeno vyvedení potřebných potenciometrů a konektorů. Na desce plošných spojů jsou rozteče jednotlivých bodů připraveny pro osazení potenciometrů přímo do desky, ale v zesilovači jsou vyvedeny na vodiče. To je z důvodu optimálního rozmístění řídicích prvků na čelní straně zesilovače.



Obrázek 18 Návrh desky plošných spojů elektronkového zesilovače

Deska plošných spojů byla navržena v programu Eagle a následně vytištěna na pauzovací papír. Na cuprexitovou desku o rozměrech 160 x 80 mm byla nanášena fotocitlivá vrstva pomocí fotokopírovacího laku pro desky plošných spojů POSITIV 20. Na plošný spoj byl položen pauzovací papír s vytisknutou předlohou a pomocí reflektoru o výkonu 150 Wattů byla destička po dobu 12 minut osvětlena ze vzdálenosti 25 cm. Po osvětlení byla deska plošných spojů ponořena do VÝVOJKY pro pozitivní fotoemulzi obsahující 1,5 % hydroxidu sodného a následně do LEPTACÍHO ROZTOKU určeného pro výrobu plošných spojů. Z vyleptaného plošného spoje byly odstraněny zbytky fotokopírovacího laku pomocí jemného brusného papíru a vyvrtány díry pro osazení součástek.

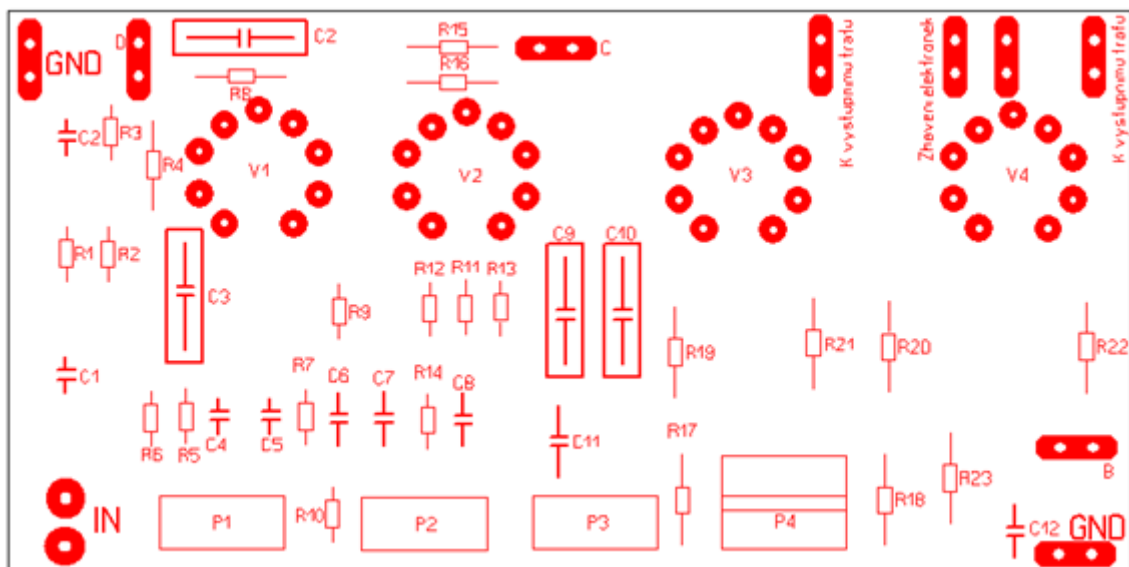
Na obrázku 19 je návrh desky plošných spojů pro napájecí část. Na této desce jsou umístěny usměrňovací diody a elektrolytické kondenzátory pro napětí $U=450\text{ V}$, které mají větší rozměry. Dále byly při návrhu zohledněny rozměry výkonových rezistorů.



Obrázek 19 Návrh desky plošných spojů zdroje napájení

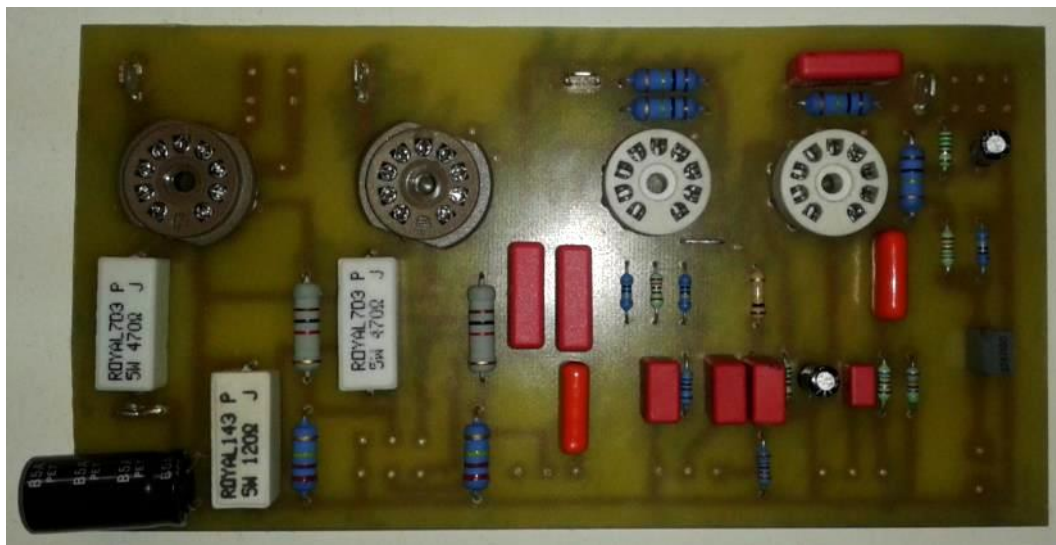
5.3 Osazovací plán desek plošných spojů

Při osazování a návrhu desek plošných spojů bylo důležité zvážit, kde budou umístěny výkonové rezistory a další součástky větších rozměrů. Patice elektronek bylo potřeba umístit co nejdál od sebe, aby si elektronky navzájem nepředávaly vytvořené teplo. Propojky s deskou zesilovače a transformátory jsou řešeny pomocí lankových vodičů a konektorů typu FASTON.



Obrázek 20 Osazovací plán desky plošných spojů zesilovače

Na obrázku 21 je fotografie osazené desky zesilovače. Potenciometry, vstupní konektor typu JACK a transformátory jsou připojeny pomocnými vodiči.



Obrázek 21 Osazená deska plošných spojů zesilovače



Obrázek 22 Osazená deska napájecího zdroje

5.4 Rozpiska součástek

Většina součástek byla pořízena v internetovém obchodu www.ges.cz., který se jako jeden z mála v České republice specializuje i na součástky a komponenty pro stavbu a opravu elektronických zařízení. Sortiment není tak rozsáhlý jako u zahraničních internetových obchodů, ale převážné množství součástek potřebných pro sestavení zesilovače bylo skladem.

Seznam součástek zesilovače

R1	1M
R2	68k
R3	1,5k
R4	100k/2W
R5	68k
R6	470k
R7	1,5k
R8	100k/2W
R9	100k
R10	220k
R11	1,2k
R12	1M
R13	1M
R14	47k
R15	100k/2W
R16	100k/2W
R17	220k/2W
R18	220k/2W
R19	1,5k/2W
R20	1,5k/2W
R21	470Ω/5w
R22	470Ω/5w
R23	120Ω/5W

C1	0,22μF/100V
C2	22μf/50V - el.
C3	1nF/600V
C4	100pF/100V
C5	22μF/50V - el.
C6	47nF/630V
C7	47nF/630V
C8	47nF/630V
C9	100nF/630V
C10	100nF/630V
C11	2,2nF/600V
C12	220μF/400V - el.
C13	47nF/630V

V1, V2	ECC83
V3, V4	EL84

P1	50K/L
P2	50K/L
P3	100K/L - dvojitý
P4	500K/L

Seznam součástek zdroje

D1, 2, 3, 4	1N4007
-------------	--------

R1	220k/1W
R2	150Ω/5W
R3	10k/5W
R4	15k/5W

C1	100μF/450V
C2	47μF/450V
C3	47μF/450V
C4	22μF/450V

5.5 Transformátory

V zesilovači jsou použity dva transformátory. Transformátor, který je určen pro napájení veškerých součástek zesilovače a výstupní transformátor.

Při výběru transformátorů bylo zváženo několik variant, kde získat transformátory s co nejlepšími vlastnostmi za přijatelnou cenu. Jednou z možností byla koupě v tuzemských internetových obchodech, ale bohužel prodejem součástek a komponent souvisejících s elektronkovými zesilovači se moc obchodů nezabývá. Zřejmě největší výběr elektronek a transformátorů určených do elektronkových zesilovačů má internetový obchod www.ges.cz (viz kapitola 5.4). Z nabídky těchto obchodů ale žádný z transformátorů zcela nevyhovoval potřebám zkonstruovaného zesilovače. Problém byl především u transformátoru určeného pro zdroj napětí.

Další možností bylo nechat si transformátory navinout podle vypočtených údajů. Cenová nabídka za zakázkové zhotovení transformátorů byla však příliš vysoká.

Pro zesilovač byly ve výsledku použity transformátory, které byly zakoupeny na serveru www.hudebnibazar.cz. Ačkoli se jednalo o použité součástky, svými parametry byly vhodné pro konstrukci tohoto zesilovače.

5.6 Použité elektronky

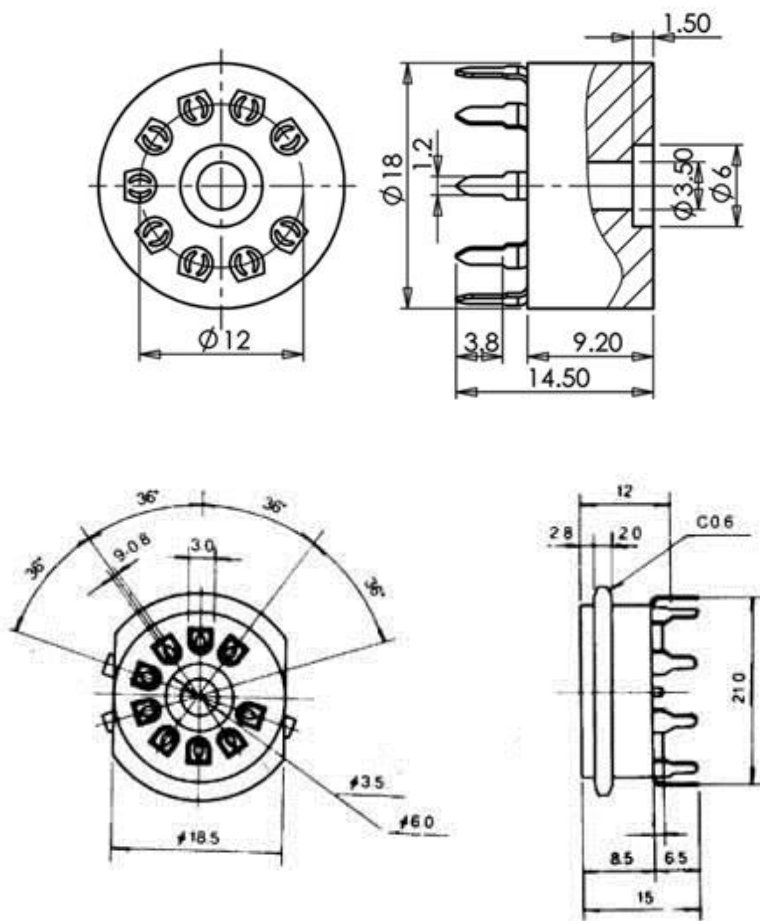
V zesilovači jsou použity 4 elektronky. V předzesilovacím stupni jsou dvě dvojité triody typu ECC83, které lze bez problému nahradit elektronkami 12AX7, což je ekvivalent této elektronky s americkým značením.

V koncovém stupni jsou použity dvě pentody typu EL84. Všechny elektronky jsou umístěny v patici typu NOVAL s vývody do plošného spoje (viz obrázek 23). Pro elektronky v předzesilovacím stupni jsou použity patice bílé barvy a pro elektronky v koncovém stupni patice hnědé barvy (viz obrázek 21). Tyto patice nejsou odlišné a použití jiných patic je pouze z důvodu nedostatku daného zboží na skladu internetového obchodu www.ges.cz v době objednávky.



Obrázek 23 Použité patice NOVAL s vývody do plošných spojů [7]

Na obrázku 24 je výkres rozměrů a roztečí použitých patic. Patice jsou vyrobeny z plastu.



Obrázek 24 Parametry použitých patic NOVAL[7]

5.6.1 Elektronky v předzesilovacím stupni

V předzesilovacím stupni jsou použity elektronky ECC83. Jedná se o dvojitou triodu - elektronka s jednou řídicí mřížkou. Tento typ elektronek se v audio zesilovačích využívá nejvíce. Všechny použité elektronky jsou od firmy JJ Electronic.



Obrázek 25 Elektronky typu ECC83 a EL84 - párová dvojice

5.6.2 Elektronky v koncovém stupni

Koncový stupeň zesilovače je typu push - pull, což znamená, že jedna elektronka zesiluje vždy jednu půlvlnu signálu. Pro docílení kvalitního zesílení je potřeba, aby měly použité koncové elektronky typu EL84 co možná nejvíce stejné vlastnosti. Prodejci elektronek nabízejí tzv. párované dvojice, případně i čtveřice elektronek, které mají téměř totožné vlastnosti. Některé parametry elektronek byly ověřeny pomocí měřicího přístroje Tesla BM 215.

6 Oživení zesilovače

Po osazení desek plošných spojů a důkladném zkontrolování celého zapojení podle schématu bylo pomocí multimetru překontrolováno, zda nejsou některé spoje zkratované. Do DPS zesilovače byly zapájeny potenciometry pro regulaci zisku, tónu a hlasitosti zesilovače, patice elektronek a konektory FASTON.

6.1 Oživení zdroje

Po důkladné kontrole desky plošných spojů zdroje byl připojen pomocí konektorů FASTON přívod střídavého napětí $U=242$ V od transformátoru 1. Nejprve byl ponechán vypínač STANDBY rozepnutý a bylo měřeno napětí na kondenzátoru C1 a rezistoru R1. Až po tomto ověření usměrňovače složeného ze čtyř diod 1N4007 byl sepnut STANDBY a měřeno napětí jednotlivých bodů zdroje napájení (A, B, C a D) - viz tabulka 1.

K DPS zesilovače byly připojeny vývody z druhého výstupního vinutí transformátoru 1, které je učené pro žhavení všech čtyř elektronek a bylo přeměřeno, zda je žhavicí napětí přivedeno na správné vývody elektronek. Tzn. u ECC83 na spojené piny s označením 4 a 5 proti vývodu s označením 9. U elektronek EL84 na piny s označením 4 a 5. Pro žhavení elektronek ECC83 lze použít i stejnosměrné napětí $U_f=12,6$ V, což vede k lepším vlastnostem zvuku z hlediska potlačení brumu výstupního signálu, a i když tato možnost nebyla využita, výsledný brum není nikterak rušivý. Elektronky jsou žhaveny střídavým napětím $U_f=6,3$ V. Předpokládaný odebíraný proud jedné elektronky ECC83 použité v předzesilovači je $I_f=300$ mA a pentody EL84 umístěné v koncovém stupni je $I_f=760$ mA. Celkový odběr proudu žhavení elektronek je tedy $I_f=2,16$ A.

6.2 Oživení signálové části

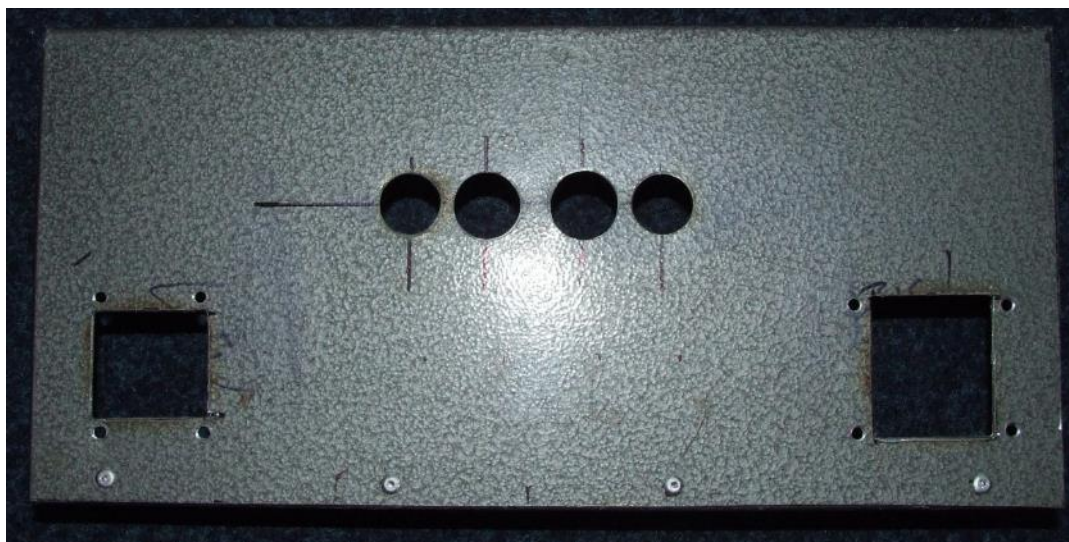
Po ověření funkčnosti, správného zapojení a změření všech potřebných napětí byl osazen zesilovač elektronkami. Na výstup zesilovače byl z důvodu možných problémů připojen nejprve reostat, na kterém bylo nastaveno $R_Z=8$ Ω odpovídající ideální zátěži výstupního transformátoru.

Po zapnutí vypínače POWER bylo ponecháno několik minut na žhavení všech elektronek, a poté byl zapnut STANDBY. Na výstup zesilovače byl připojen osciloskop a na vstup generátor signálu.

7 Mechanická konstrukce

Šasi zesilovače je zhotoveno z plechu o tloušťce 0,8 mm s potřebnými otvory pro elektronky, transformátory, potenciometry a další součásti zesilovače. U prvního

prototypu zesilovače byla hlavní deska plošných spojů přichycena na distančních sloupcích a elektronky procházely vyvrtanými otvory v plechu (obr. 26). Toto řešení bylo nahrazeno variantou, ve které je hlavní deska plošných spojů umístěna přímo na šasi zesilovače. Toto řešení vede k lepšímu náhledu do útrobu zesilovače přes přední ochrannou mřížku.



Obrázek 26 Šasi zesilovače

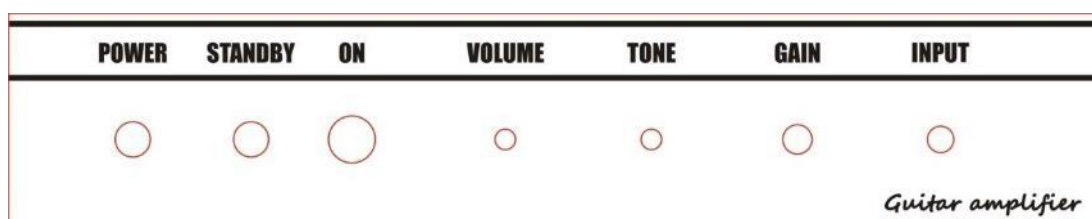


Obrázek 27 Částečně osazené šasi zesilovače

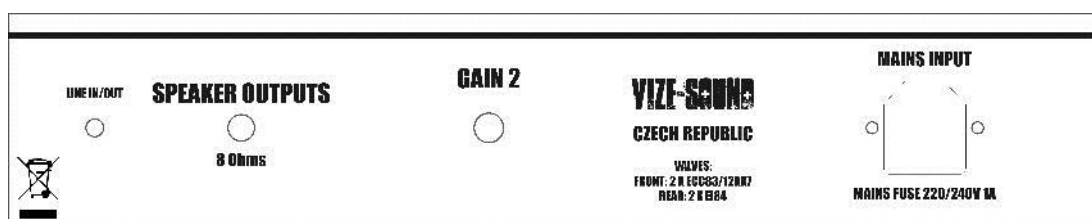
8 Návrh a realizace informativních panelů

Přední panel, zadní panel zesilovače a destička na zadní straně reproduktorové skříně byly zhotoveny na laserovém gravírovacím plotteru. Panely byly navrženy a nakresleny ve vektorovém grafickém editoru.

Panely jsou vyrobeny z plastové desky, která má na sobě stříbrnou vrstvu, která slouží jako imitace plechu. Laser tuto vrstvu propálí a tím vynikne černý plast.



Obrázek 28 Návrh předního panelu zesilovače



Obrázek 29 Návrh zadního panelu zesilovače



Obrázek 30 Návrh panelu reproduktorové skříně

9 Konstrukce reproduktorové skříně

Reproduktorová skříň je vyrobena z překližky o tloušťce 15 mm. Jednotlivé stěny jsou k sobě připevněny pomocí vrutů a lepidla na dřevěné podlahy. Celá skříň je potažena, stejně jako samotný zesilovač, koženkou. Zadní stěna je odnímatelná a připevněná vruty. Na zadní straně reproduktorové skříně je umístěn panel, na kterém jsou vygravírovány hlavní parametry reproduktoru a také jsou zde dva konektory typu JACK. Tyto konektory jsou paralelně propojeny a je tedy možné připojit další reproduktorovou skříň. Při použití více reproboxů je potřeba brát na vědomí, že zesilovač je přizpůsobený pro zátěž 8 Ω .



Obrázek 31 Reproduktorová skříň

9.1 Reproduktor Celestion TUBE 10

Reproduktorová skříň je osazena reproduktorem typu Celestion TUBE 10, určeným pro kytarové zesilovače, který disponuje požadovanými vlastnostmi. Běžně naladěná kytara má frekvenční rozsah od 82,41 Hz do 1174,62 Hz a těmito frekvencím musí být přizpůsobeny kytarové reproduktory. Celestion TUBE 10 je vhodný více pro vyšší tóny, což je dáno také jeho velikostí. (viz Graf 1)

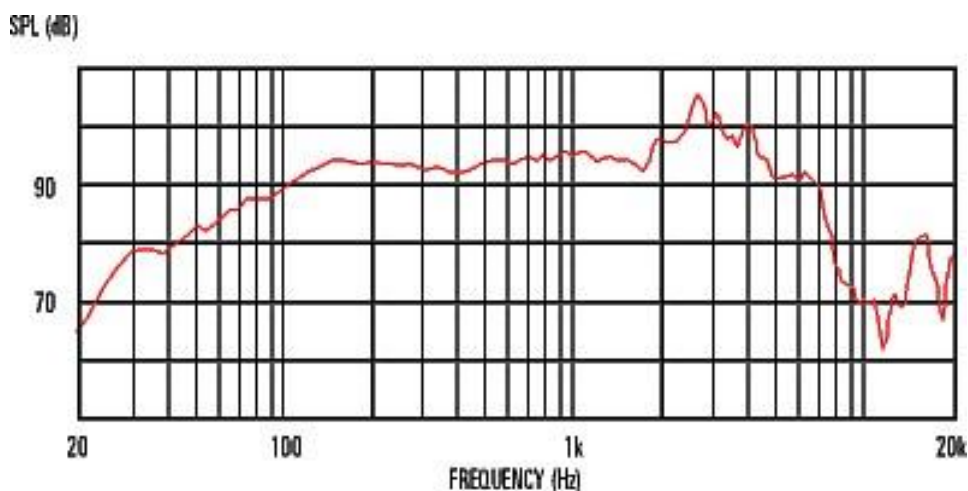


Obrázek 32 Použitý reproduktor [9]

Vlastnosti reproduktoru [9]

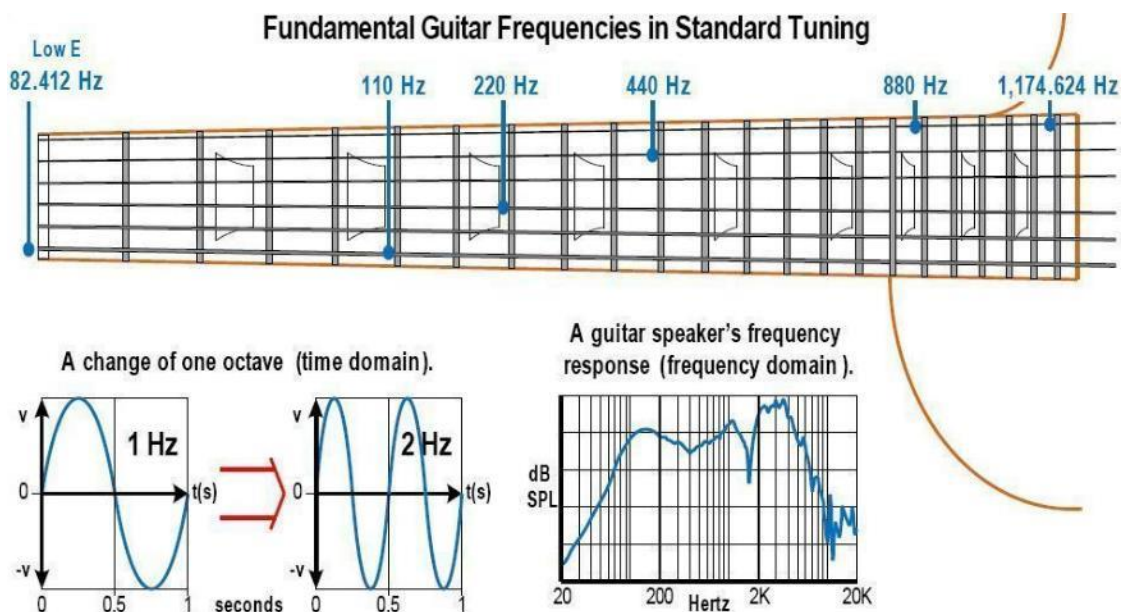
Velikost	10", 254 mm
Výkon	30 W
Impedance	8 Ω
Citlivost	94 dB
Frekvenční rozsah	85 – 5000 Hz
Průměr cívky	38,1mm
Typ magnetu.....	keramický
Váha	1,6 kg

Na grafu 1 je znázorněna citlivost použitého reproduktoru. Podle této charakteristiky je možné zjistit, které tóny elektrické kytary budou přenášeny lépe a které hůře. To je ve výsledku samozřejmě ovlivněno také konstrukcí, kvalitou a především nastavením zesilovače a elektrické kytary.



Graf 1 Citlivost použitého reproduktoru při různých frekvencích [9]

Na obrázku 33 jsou znázorněny frekvence, které je možné naměřit na výstupu elektrické kytary. Tyto frekvence nám udávají tón. Na hmatníku kytary zobrazeném na obrázku jsou vyznačeny frekvence 110 Hz, 220 Hz, 440 Hz a 880 Hz, které odpovídají tónu A.



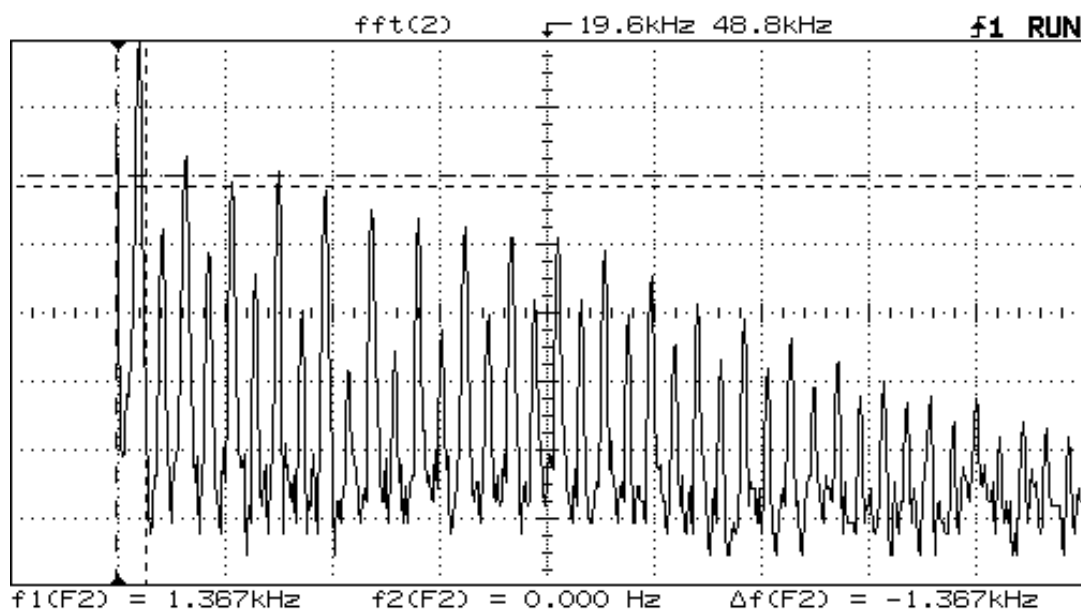
Obrázek 33 Frekvenční rozsah běžně naladěné elektrické kytary [převzato a upraveno z <http://www.ultimate-guitar.com/>]

10 Měření základních charakteristik

Na zesilovači bylo měřeno několik charakteristik a hodnot, které jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

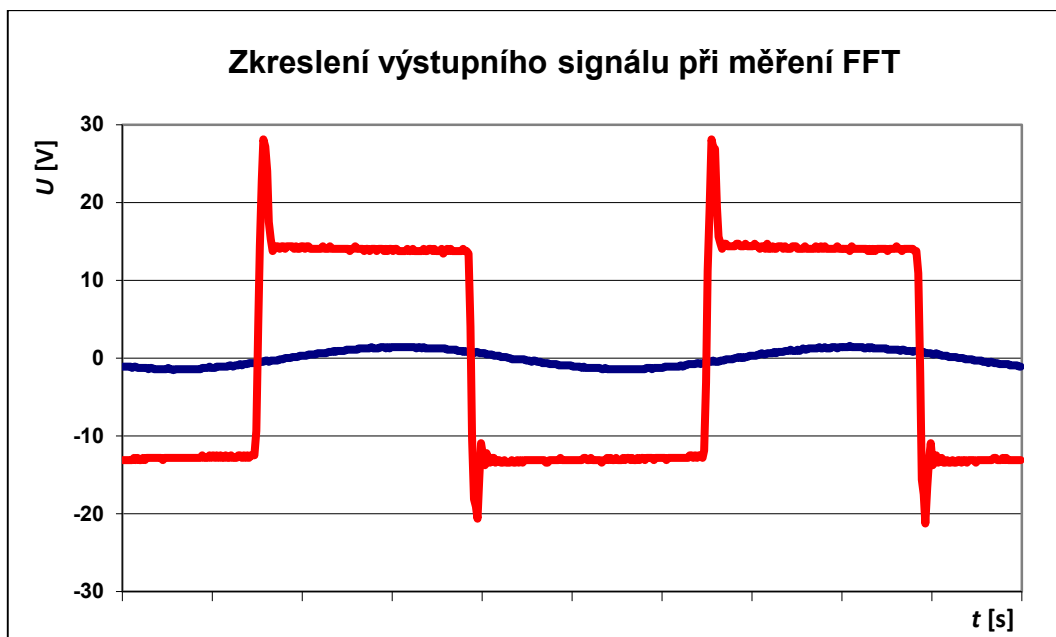
10.1 Fourierova řada výstupního signálu zesilovače

Na grafu 2 je zobrazen výsledek měření Fourierovy řady (FFT). Při měření byly všechny potenciometry nastaveny na maximální hodnotu, vstupní napětí $U_1=700$ mV a vstupní frekvence $f_1=1$ kHz. Z grafu je patrné, že sudé harmonické frekvence jsou menší. Graf na obrázku 2 je uložen přímo z digitálního osciloskopu HP.



Graf 2 Fourierova řada výstupního signálu zesilovače

Výstupní signál zesilovače byl při měření značně zkreslený (viz graf 3). Vstupní signál je zobrazen modrou a výstupní červenou čarou.

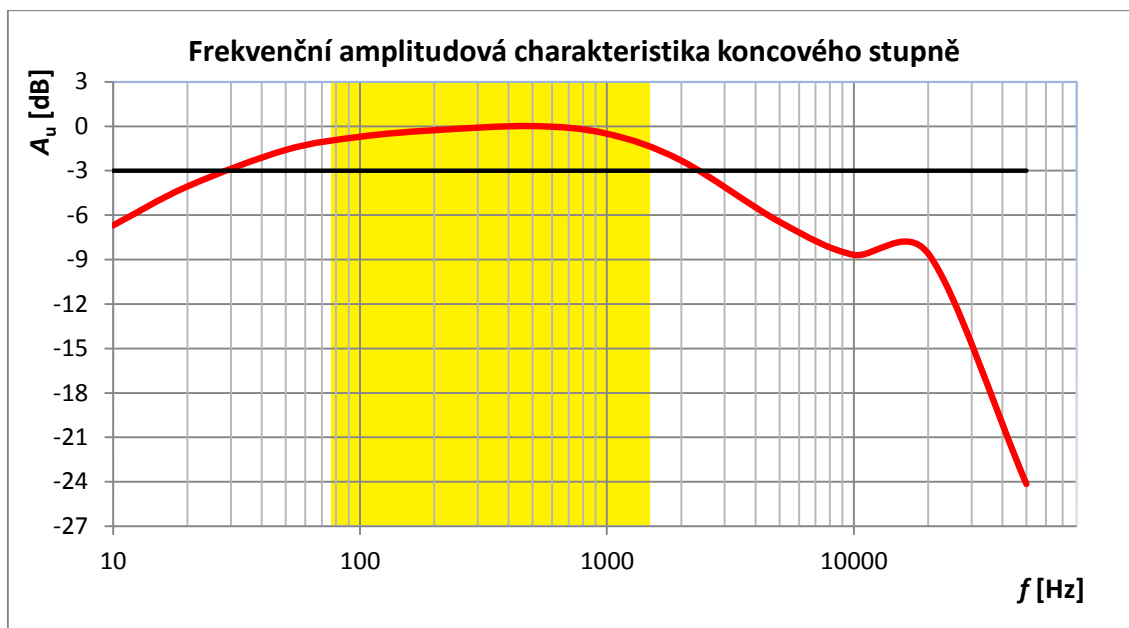


Graf 3 Zkreslení výstupního signálu při měření FFT

10.2 Měření amplitudové charakteristiky koncového stupně

Frekvenční amplitudová charakteristika byla měřena při konstantním vstupním napětí $U_1=0,707$ V. Graf je upraven tak, aby v nulové hodnotě osy x (A_u) byl vynesena bod s maximální hodnotou měřeného napětí $U_2=3,24$ V při frekvenci $f=500$ Hz.

Na amplitudové charakteristice koncového stupně je vynesena pokles signálu o $A_U=-3$ dB, který odpovídá poklesu výstupního napětí na polovinu. Zvýrazněná žlutá oblast vyznačuje přibližné frekvenční pásmo elektrické kytary. Z grafu je patrné, že v tomto pásmu není při žádné frekvenci pokles větší než o 3 dB.



Graf 4 Frekvenční amplitudová charakteristika koncového stupně

V tabulce 2 vidíme naměřené hodnoty výstupního napětí U_2 a vypočítanou hodnotu napěťového zesílení podle vzorce (8).

f [Hz]	U_2 [V]	A_u [dB]
20	2,03	-4,06
50	2,70	-1,60
100	2,99	-0,71
200	3,14	-0,27
500	3,24	0,01
1000	3,06	-0,50
2000	2,48	-2,31
5000	1,54	-6,45
10000	1,19	-8,68
20000	1,21	-8,59
50000	0,20	-24,15

Tabulka 2 Naměřené hodnoty koncového stupně

$$A_U = 20 \log \frac{U_2}{U_1} \quad (8)$$

10.3 Měření maximálního výstupního výkonu

Na kmitočtu $f=1$ kHz bylo postupně zvyšováno vstupní napětí U_1 a přitom byl pozorován tvar výstupního signálu na osciloskopu. Po zpozorování zkreslení výstupního signálu (ořezání části signálu), bylo odečteno výstupní napětí U_2 a dle vzorce (2) vypočten výstupní výkon P .

$$U_2=9,54 \text{ V}$$

$$R_z=8 \ \Omega$$

$$\underline{P=11,39 \text{ W}}$$

$$P = \frac{U^2}{R_z} \quad (9)$$

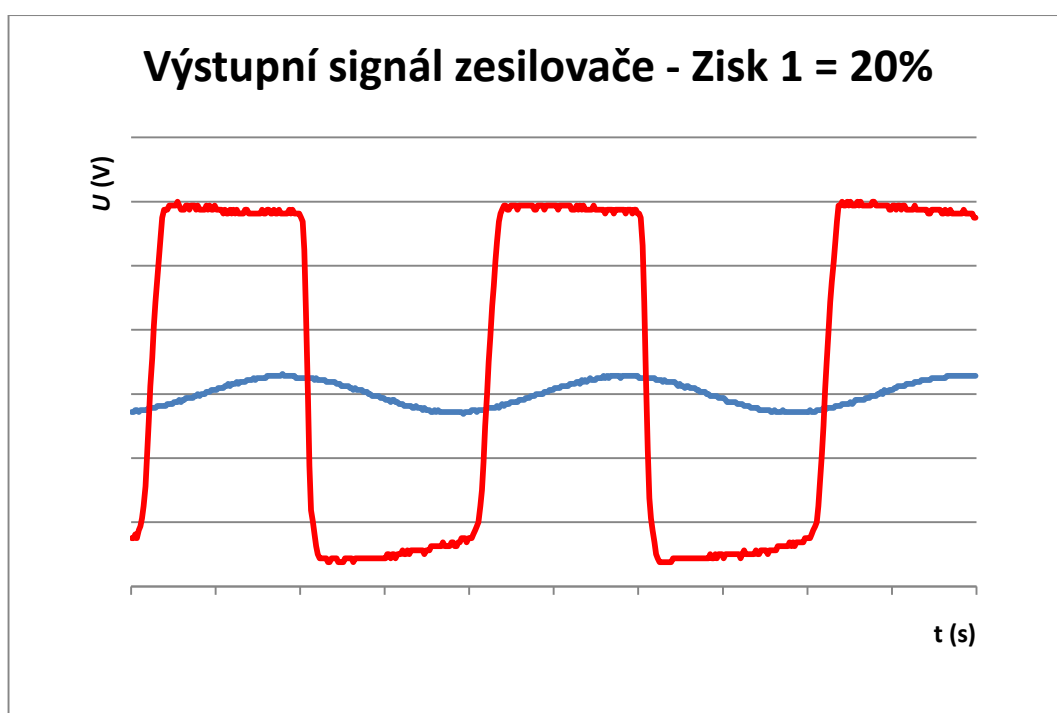
10.4 Měření základních vlastností elektronek pomocí přístroje Tesla BM215A

Všechny elektrony, které jsou použity v zesilovači, byly přeměřeny pomocí přístroje Tesla BM215A. Elektrony EL84 byly zakoupeny jako párová dvojice, tzn., že jejich vlastnosti by měly být totožné. Pomocí měřicího přístroje bylo ověřeno, že základní vlastnosti, které dokáže přístroj měřit, jsou opravdu téměř stejné (viz tabulka 3). V posledním řádku tabulky jsou uvedeny vypočtené hodnoty strmosti. Podle katalogových listů má mít elektronka ECC83 strmost $S=1,6$ mA/V a EL84 $S=48$ mA/V. Tyto hodnoty přibližně souhlasí s naměřenými hodnotami. Je potřeba brát v úvahu, že přístroj Tesla BM215A je určen především ke kontrole funkčnosti elektronek, a proto nejsou všechny naměřené hodnoty 100% přesné, ale spíše orientační.

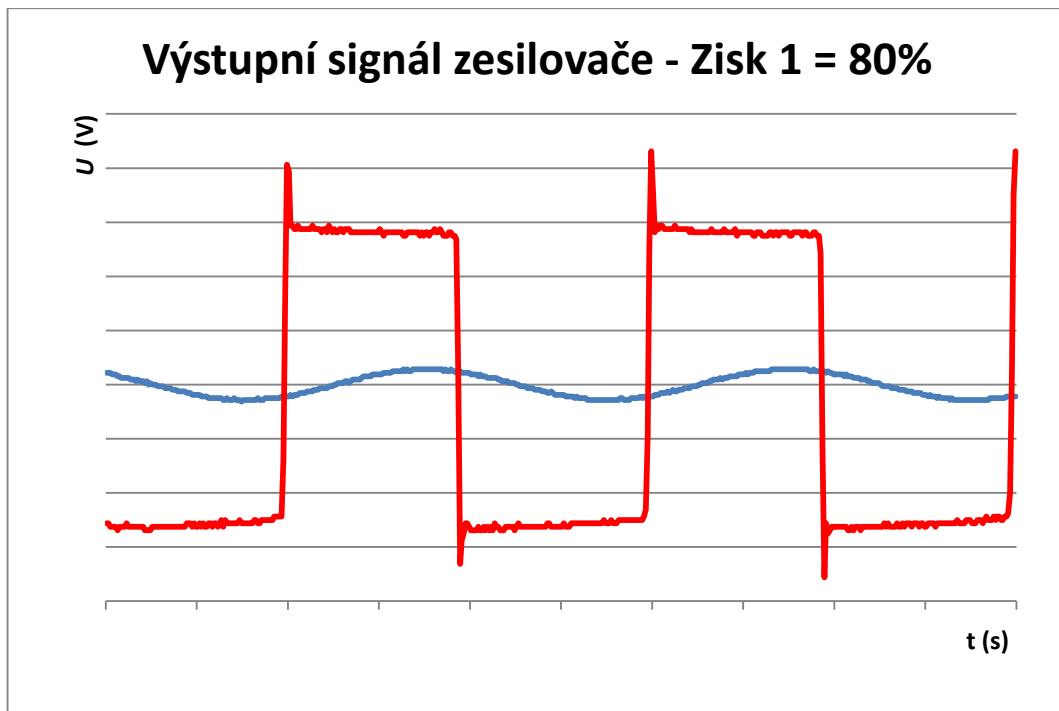
	ECC83				EL84	
	A1 - první trioda ve společné baňce A2 - druhá trioda ve společné baňce				1	2
	A1	A2	A1	A2		
	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]	[mA]
Vakuum	2,4	2,6	2,3	2,2	59,0	61,0
Ia	2,3	2,5	2,1	1,9	57,0	59,0
S - naměřeno	0,6	0,7	0,6	0,6	43,5	44,0
S - vypočteno	1,7	1,8	1,5	1,3	13,5	15,0

10.5 Vliv potenciometru „Zisk 1“ na procházející signál

Při tomto měření bylo pozorováno zkreslení výstupního signálu v závislosti na frekvenci. V prvním měření byl potenciometr "Zisk 1" nastaven na 20 % svého pásma a v druhém měření na 80 %. Následně byla měněna vstupní frekvence a pozorován signál.



Graf 5 Zkreslení výstupní signálu - $f=500$ Hz



Graf 6 Zkreslení výstupní signálu - $f=500$ Hz

10.6 Použité měřicí přístroje

- Generátor funkcí HC TD 4510
- Školní generátor funkcí Tesla NG1.81
- Digitální osciloskop HP 54600B
- Digitální osciloskop UNI-T UT20225C

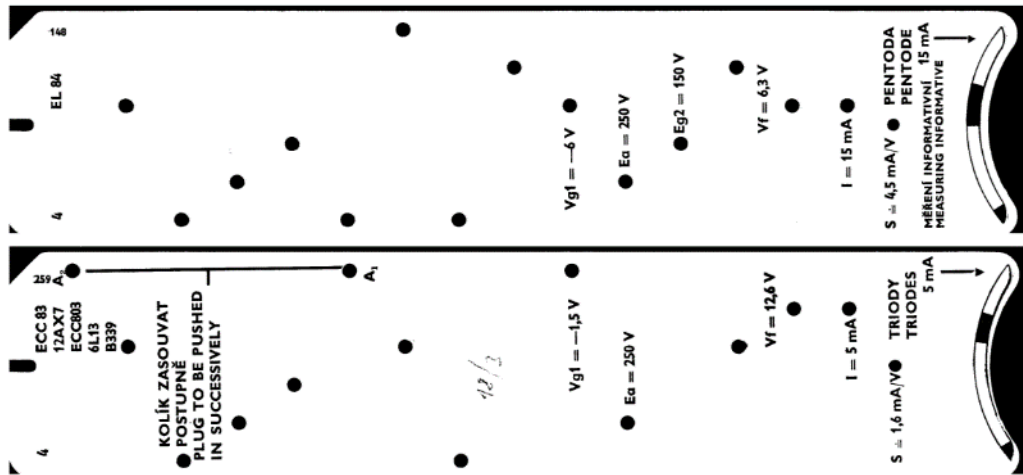
11 Zkoušeč elektronek TESLA BM215A

Zkoušeč elektronek Tesla BM215A je určen pro testování základních vlastností všech běžně používaných typů elektronek. Zkoušeč je zkonstruován jako přenosný kufřík obsahující mimo samotného přístroje i veškeré příslušenství. Pomocí tohoto přístroje je možné velice rychle zjistit závady elektronek.

11.1 Postup měření

Při ověřování funkčnosti elektronek na přístroji TESLA BM215A je nejprve potřeba vybrat jednu z příslušných dodávaných karet. Nastavení všech hodnot

elektronek je u tohoto přístroje velice důmyslně vymyšleno a jednotlivá potřebná napětí si volíme pomocí zasunutí kolíčků do příslušného otvoru v papírové kartě (viz obr. 34). Mezi kartami najdeme i mnoho elektronek, které jsou v dnešní době spíše raritou.



Obrázek 34 Karty elektronek ECC83 a EL84

Po nastavení příslušných napětí a proudů vložíme měřenou elektronku do příslušné patice. Jednotlivé patice jsou očíslovány a na každé z měřících karet je uvedeno číslo správné patice. Poté zapneme přístroj otočným přepínačem (na obrázku 31 označen jako 1) do polohy ZKRATY a pomocí otočného přepínače (na obrázku 31 označen jako 2) kontrolujeme celistvost žhavicího vlákna a případné zkraty mezi jednotlivými elektrodami elektronky. Přístroj obsahuje jeden analogový panelový měřič. V případě, že by mezi některými elektrodami byl zkrat, ručička se prudce přesune do nulové oblasti stupnice.

Pokud přístroj nehlásí žádné zkraty, můžeme přepnout na další polohu přepínače s označením 1 - NAŽHAV. KONTROLA. V této poloze je potřeba nechat elektronku alespoň 30 vteřin "nažhavit". Pokud bychom pustili anodové napětí současně s žhavicím napětím, zkracujeme životnost elektronky, respektive její schopnost emise katody.

Po nažhavení elektronky přepneme na další polohu přepínače - VAKUUM. V případě, že elektronka má vadné vakuum, zvýší se anodový proud asi o 10 % oproti hodnotě v další poloze přepínače - I_a . Pokud jsou hodnoty v obou polohách stejné, je vakuum v pořádku. Většinou vadné vakuum poznáme podle getru rozprášeného po stěnách baňky, který má šedobílou barvu. Getr je materiál, který je umístěn v elektronce a váže na sebe při určitých podmínkách atomy nebo molekuly plynu,

a tím zlepšuje vlastnosti vakua. Jedná se o stříbrnou barvu v horní části většiny elektronek, která se v případě porušení baňky a tím i narušení vakua, mění v bílý prášek.

Další poloha na přepínači 1 je Ia - anodový proud. Na analogovém měřiči jsou dvě stupnice 0 - 5 a 0 - 15. Na každé kartě je šipkou a hodnotou udáno, kterou stupnicí máme využít a jaká hodnota připadá na jeden dílek stupnice. Například pro elektrony EL84 je platná stupnice 0 - 150 mA. Dále je na kartě vyznačeno, v jakém rozmezí by se měla ručička přístroje nacházet (viz obrázek 35). Měřením anodového proudu u pentod můžeme alespoň přibližně párovat jednotlivé elektrony.



Obrázek 35 Detailní pohled na analogový měřič a měřicí kartu

Poslední polohou přepínače 1 je S - strmost. (viz kapitola 2.2 Základní vlastnosti elektronek). Tento parametr zjistíme pomocí odečtení rozdílu proudu v poloze Ia a S. Na každé kartě je opět uvedeno, o jakou ideální hodnotu se jedná u každé elektrony. (viz obrázek 35 - $S=6 \text{ mA/V}$)

11.2 Technické parametry

Technické parametry zkoušeče elektronek TESLA BM215A. [4]

Anodové napětí: 0 až 300 V

Stupňování anodového napětí E_a max a napětí stínící mřížky E_{g2} max: 0, 20, 50, 100, 150, 250, 300 V \pm 5% při síťovém napětí 220 V a zatížení do 0,1 A

Stupňování předpětí první mřížky V_{g1} : 0; 1,5; 3; 6; 12; 24; 48 V
 \pm 3% při síťovém napětí 220 V bez odběru

Stupňování rozsahů měřicího přístroje I max: 1,5; 5; 15; 50; 150; 500 mA

Žhavicí napětí: z napětí na zdírkách "vf" propoj. přepínače 0; 0,5; 1; 9,3; 20; 40; 60 V
lze sestavit žhavicí napětí pro většinu světových elektronek s přesností \pm 5 % maximální dovolené zatížení pro napětí do 25 V je 2 A, nad 25 V - 0,3 A

Napájení: 220 nebo 120 V, 50 Hz

Spotřeba: cca 15 W + spotřeba žhavené elektronky

Jištění: tavné pojistky: pro 220 V - 0,6 A; pro 120 V - 1 A; anodové - 0,1 A

Rozměry: 230 x 240 x 340 mm

Váha: cca 15 kg



Obrázek 36 Zkoušeč elektronek Tesla BM 215

12 Základní parametry zkonstruovaného zesilovače

- Výstupní výkon zesilovače: 11,39 W
- Výstupní impedance: 8 Ω
- Napájecí napětí: 220 - 240V SS
- Elektronky
 - FRONT: 2 x ECC83/12AX07
 - REAR: 2 x EL84
- Hmotnost: 5,2 kg

12.1 Fotodokumentace

Na obrázku 37 je první kompletně zkonstruovaný zesilovač na DPS. Předchozí návrhy byly zkonstruovány na pájecí očka a pomocné DPS.



Obrázek 37 Jeden z prvních prototypů zesilovače

Na obrázku 38 je konečné řešení umístění hlavní DPS na šasi zesilovače. První způsob řešení, u kterého procházely elektronky šasim zesilovače a DPS byla uchycena na distančních sloupcích, se neosvědčil. (viz obr 25)



Obrázek 38 Finální řešení uchycení DPS

Zesilovač i reproduktorová skříň jsou potaženy koženkou červené barvy, opatřeny ochrannými kovovými rohy a ochrannou kovovou mřížkou (viz obrázek 39).



Obrázek 39 Finální vzhled zesilovače a reproduktorové skříně

12.2 Záznam zvuku zesilovače

Po dokončení zesilovače bylo provedeno několik záznamů zvuku. Pro nahrávání byl použit kondenzátorový mikrofon SAMSON C01, mixážní pult Allen&Heath ZED10FX, kytara Fender Jaguar HH a software Audacity 1.3 Beta.

Použitý mikrofon SAMSON nepatří mezi nejkvalitnější, ale pro záznam zvuku zesilovače je dostačující. Je určen především do domácích nahrávacích studií pro zpěv, akustickou kytaru, kytarové aparatury a také jako overhede (mikrofon pro snímání zvuku činelů) pro bicí soupravu.

Vlastnosti mikrofону SAMSON C01 [11]

Typ: kondenzátorový

Směrová charakteristika: hyperkardioida

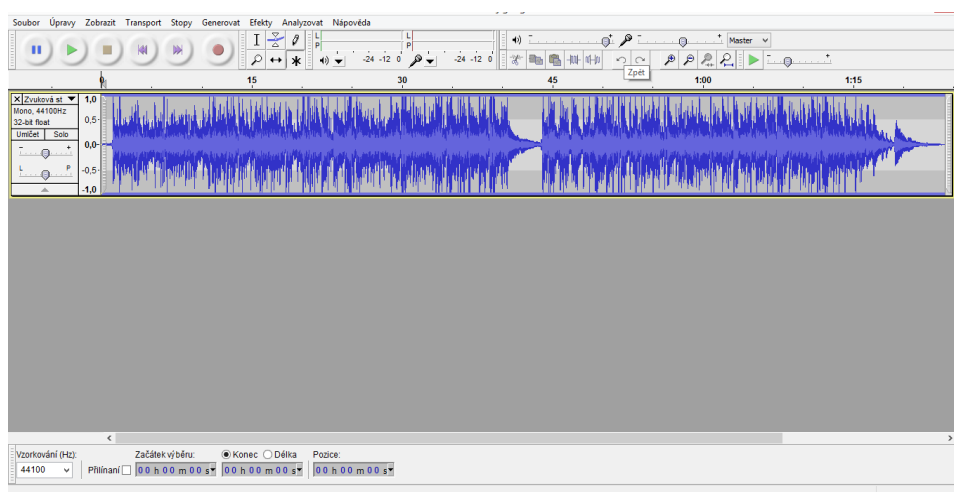
Frekvenční rozsah: 30 Hz - 18 kHz

- SPL: 136dB
- Impedance: 200 Ohm
- Napájení: Fantom 36-52V
- Váha: 900g

Použitý mixážní pult disponuje dvěma stereo vstupy a čtyřmi mikrofonními vstupy s možností nastavení úrovně vybuzení pomocí potenciometru GAIN, tří-pásmovými korekcemi a nastavením úrovně hlasitosti jednotlivých kanálů. Mixážní pult dále disponuje tzv. fantomovým napájením $U=48\text{ V}$, které je nezbytné při používání kondenzátorových mikrofonů. Digitalizace audio signálu byla provedena přímo přes zvukovou kartu, která je integrována v mixážním pultu.

Vlastnosti mixážního pultu Allen&Heath ZED10FX [11]

- Efektová jednotka s 16 typy efektů
- 12 - segmentový LED indikátor úrovně na výstupu
- Konektory hlavního stereo výstupu: XLR
- USB 1.1 rozhraní pro propojení s počítačem (nahrávání, přehrávání, externí efekty)
- Frekvenční rozsah: 10 Hz - 30 kHz (+0,5/-1 dB)
- Převodníky USB: 16bit / 44,1 nebo 48kHz
- Celková hmotnost: 3,3 kg



Obrázek 40 Software pro záznam zvuku do PC - Audacity

K záznamu zvuku do počítače byl použit software Audacity 1.3 Beta (viz obrázek 40). Jedná se o jednoduchý a přehledný program sloužící k záznamu zvuku a následné editaci stop. Tento program je ve verzi Beta volně šiřitelný a s použitým mixážním pultem bez problémů spolupracuje. Celý projekt z Audacity lze exportovat do známých audio formátů.

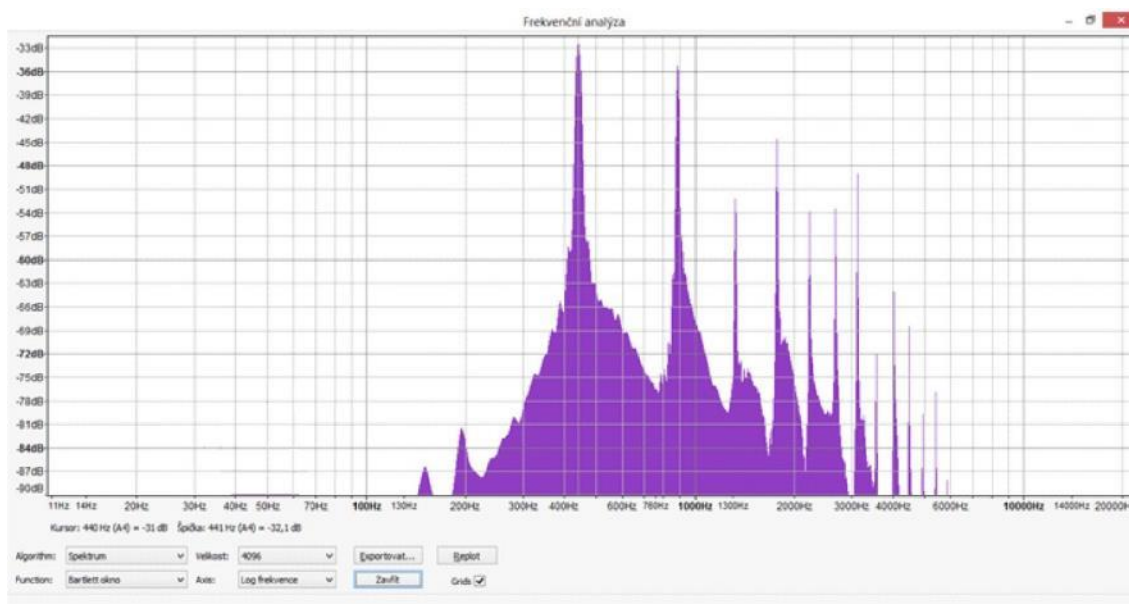


Obrázek 41 Záznam zvuku zesilovače

Celkem bylo nahráno 12 záznamů. Čtyři záznamy jsou vždy stejné melodie zahrané na elektrickou kytaru. Zesilovač i kytara jsou vždy stejně nastaveny a mění se pouze vybudení zesilovače potenciometrem GAIN 1. Ostatní korekce zesilovače jsou nastaveny na polovinu své dráhy. GAIN 1 je postupně nastaven na čtvrt, půl, tři čtvrtě a celé rozmezí své dráhy. Výsledné záznamy jsou uloženy na příloženém CD-ROMu diplomové práce.

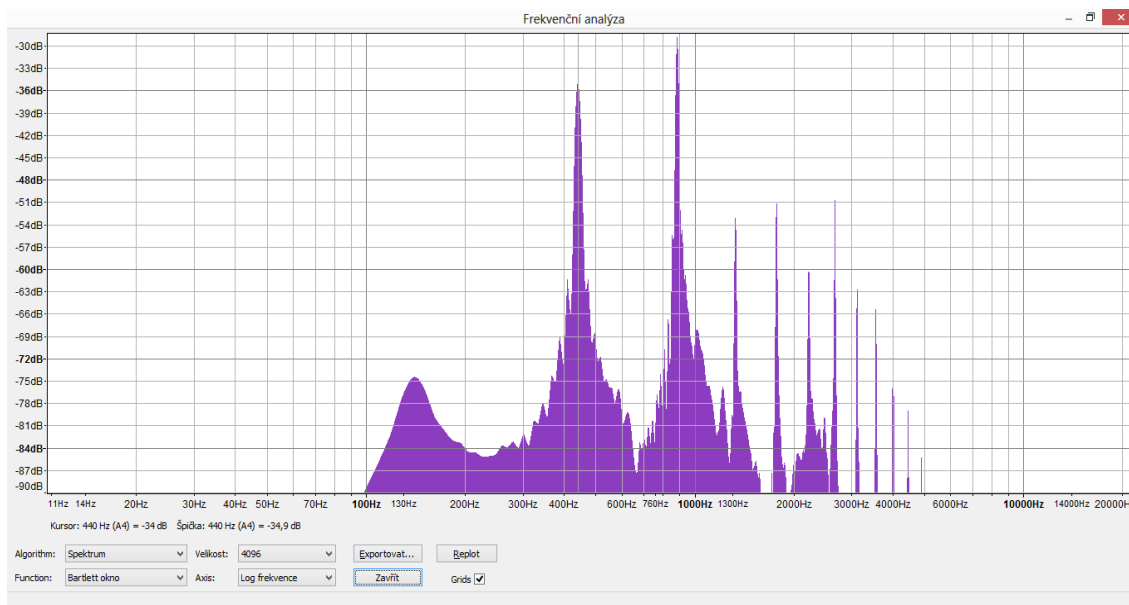
Program Audacity disponuje několika nástroji, pomocí kterých je možné analyzovat zaznamenaný signál. Velice užitečný je nástroj - vykreslit spektrum. Software analyzuje daný signál a vykreslí graf závislosti zesílení na frekvenci. U frekvenční analýzy je možné nastavit několik parametrů vykreslení, a to možnost volby lineární nebo logaritmické osy, velikost dílků grafu apod. Data lze také vyexportovat a použít například v tabulkovém procesoru.

Pomocí uvedeného mixážního pultu a mikrofону bylo zaznamenáno několik zvuků, u kterých byla vygenerována frekvenční analýza. Na grafu 7, 8 a 9 jsou znázorněny analýzy frekvence 440 Hz, která odpovídá tzv. komornímu tónu, který se používá pro ladění hudebních nástrojů.

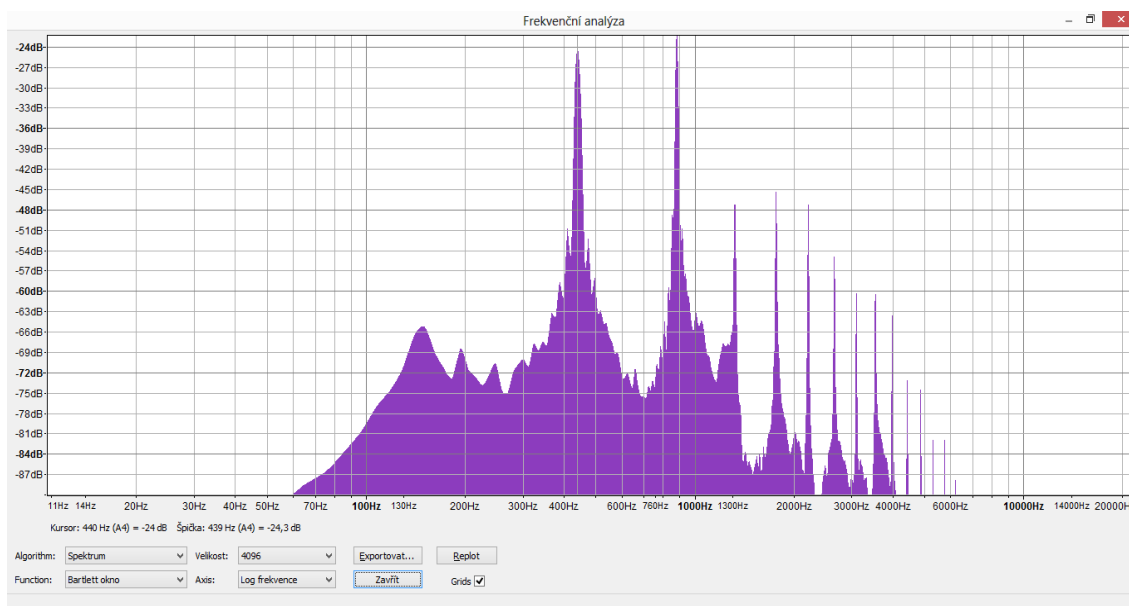


Graf 7 Frekvenční analýza - komorní tón (440 Hz), nezkraslený zvuk

Na grafu 8 je znázorněn signál, který je do Audacity zaznamenán pomocí mikrofonu a zvukové karty v mixážním pultu. Při tomto záznamu byly všechny potenciometry nastaveny na polovinu a GAIN1 na čtvrtinu své dráhy. Při záznamu signálu pro vykreslení analýzy na grafu 9 byl potenciometr GAIN1 nastaven na maximální hodnotu své dráhy. Při porovnání grafů je patrné, že při druhém a třetím záznamu došlo k zesílení signálu.

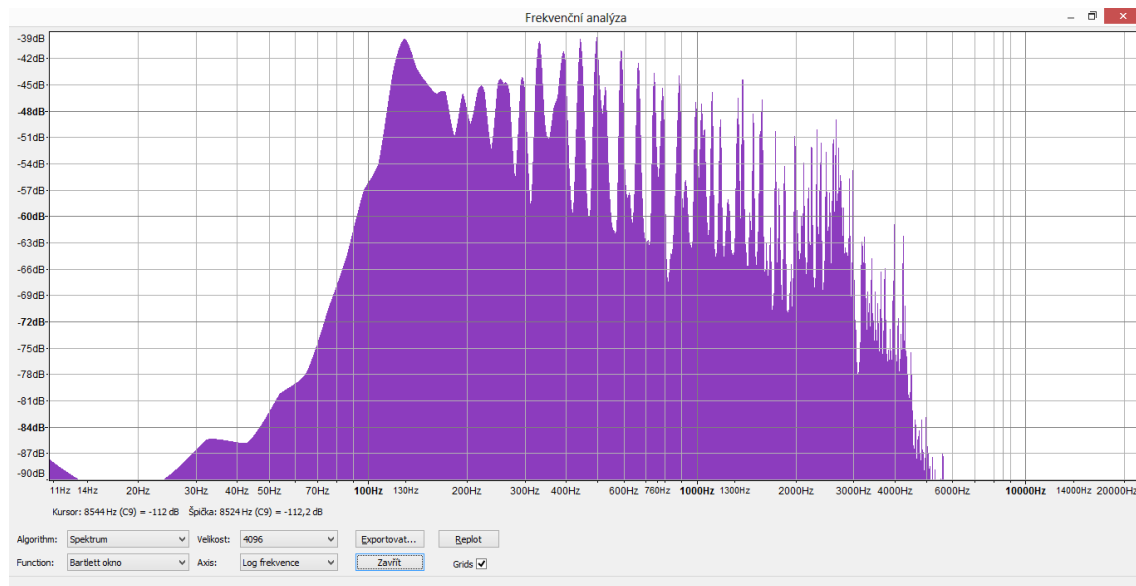


Graf 8 Frekvenční analýza - komorní tón (440 Hz), potenciometr GAIN1 nastaven na polovinu své dráhy

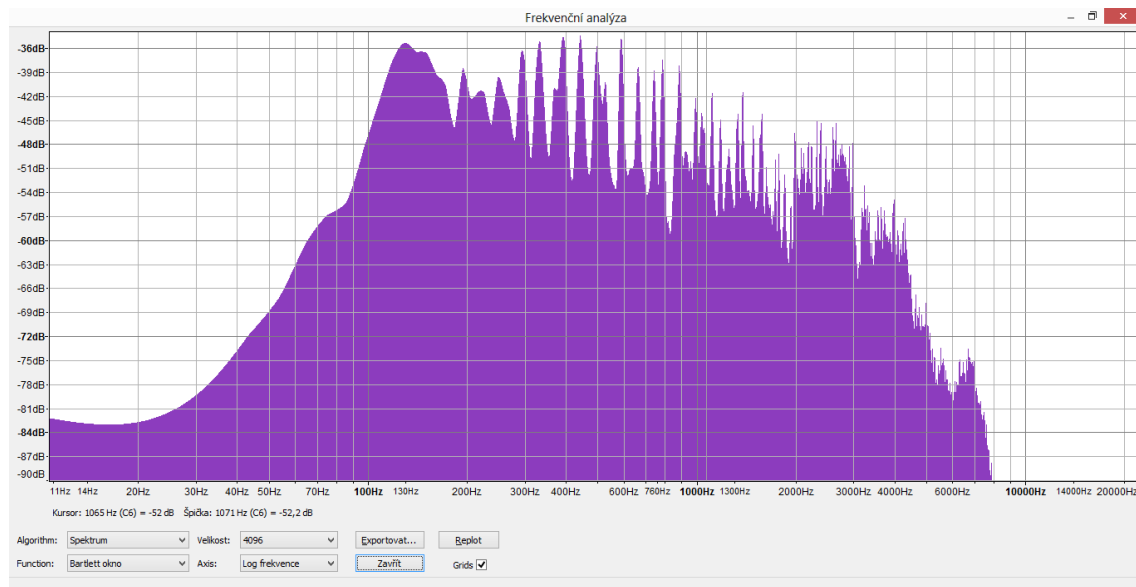


Graf 9 Frekvenční analýza - komorní tón (440 Hz), potenciometr GAIN1 nastaven na plnou hodnotu své dráhy

Na grafu 10 a 11 je znázorněna analýza nahrávek s označením B1 a B4 (viz příložený CD-ROM diplomové práce). Při otočení potenciometru GAIN1 na vyšší hodnotu dochází k částečnému zesílení některých frekvencí a také k rozšíření celého frekvenčního spektra zaznamenávaného signálu. Tím se mění barva tónů elektrické kytary.



Graf 10 Frekvenční analýza - nahrávka B1 (viz CD-ROM), potenciometr GAIN1 nastaven na jednu čtvrtinu hodnoty své dráhy



Graf 11 Frekvenční analýza - nahrávka B4 (viz CD-ROM), potenciometr GAIN1 nastaven na plnou hodnotu své dráhy

13 Závěr

Při zpracování diplomové práce byl největší důraz kladen na zkonstruování elektronkového zesilovače určeného pro zesílení signálu z elektrické kytary. Cílem práce bylo sestrojít prototyp (model) elektronkového zesilovače, který bude sloužit jako ukáзка konstrukce zesilovačů tohoto druhu a oživit základní informace o technologii elektronek, která v poslední době zažívá opět nárůst zájmu, především z důvodu prozatím nenahraditelných vlastností charakteru zpracování zvuku. Ačkoliv v sortimentu obchodů zabývajících se prodejem audio techniky nalezneme elektronkové zesilovače v celkem široké nabídce, o jejich zapojení a možných problémech vzniklých při jejich konstrukci již v dnešní době není tolik známo. To je zapříčiněno především tím, že v minulosti, kdy se elektrony využívaly nejvíce, nebyl k dispozici internet a tak je většina informací o této problematice dostupná převážně v knižní podobě. Jedna z mála knih s tímto zaměřením je "Lampárna anebo co to zkusit s elektronekami?" z roku 2004 [1] a několik málo článků v odborných časopisech.

Původně bylo zamýšleno sestrojít elektronkový zesilovač určený pro zesílení signálu z libovolného zdroje, jako například z PC, televizoru, mobilního telefonu apod., s možností pozorování signálu v různých částech zapojení. Prototyp takového zesilovače byl sestrojen, ale při sledování procházejícího signálu nebylo zkreslení nikterak atypické a příliš zajímavé, a proto jsem se začal zabývat konstrukcí zesilovače pro elektrickou kytaru, u kterého je žádoucí zkreslení signálu pomocí elektronek dostatečně viditelné. Po nastudování několika zapojení zesilovačů známých firem, které se zabývají výrobou a vývojem těchto zesilovačů, jsem zjistil, že základní zapojení se od sebe příliš neliší a rozdíl mezi zesilovači spočívá pouze v několika aspektech. Je to především kvalita použitých součástek, poskládání jednotlivých stupňů předzesilovače a případné další funkce zesilovače - počet vstupních kanálů, efektové smyčky apod.

Zesilovač jsem nejprve sestrojil na zkušební desku s pájecími oky a další pomocné DPS. U tohoto prototypu jsem několikrát měnil jednotlivé části zapojení a také hodnoty součástek, až jsem dospěl ke stabilnímu zapojení a požadovanému charakteru zkreslení procházejícího signálu. Pomocí osciloskopu jsem sledoval signál procházející různými místy zapojení. Po tomto testování jsem usoudil, že žádoucí zkreslení a zesílení je nejzajímavější pozorovat buď v části předzesilovače při zapojení

vstupního signálu přímo do vstupu zesilovače a pozorování výstupního signálu na konektoru s označením LINE OUT nebo na výstupu zesilovače při zapojení vstupního signálu do konektoru s označením LINE IN. I u koncového stupně lze pozorovat určité zkreslení signálu, které se také podílí na výsledném charakteru zvuku elektrické kytary.

Další částí diplomové práce byla kapitola věnovaná porovnání charakteru audio zesilovače s použitím elektronek oproti zesilovači s integrovanými obvody. Názor na charakter zesílení zvuku, především kytaristů a odborníků zabývajících se HiFi technikou, je takový, že integrované obvody a tranzistory nemohou nahradit typický charakter zpracování audio signálu pomocí elektronek. Předpokladem reálných a objektivních výsledků při porovnání těchto dvou technologií je důležitý výběr zapojení zesilovače s integrovanými obvody, což je z důvodu charakteru zkonstruovaného zesilovače problematické a výsledky porovnání by neměly požadovanou vypovídající hodnotu. Pro objektivní měření by bylo nutné, aby se tyto zesilovače rovnaly v co nejvíce parametrech. Vzhledem ke konstrukci elektronkového zesilovače s poměrně vysokým zkreslením by se zesilovač s integrovanými obvody mohl shodovat pouze z hlediska výstupního výkonu a několika dalších, z hlediska měření nepříliš podstatných parametrů.

Zkonstruovaný elektronkový zesilovač je svým charakterem zkreslení vhodný téměř pro jakýkoliv hudební styl a především zvuk při menším nastavení vybuzení je příjemný na poslech. Zesilovač byl testován s několika typy elektrických kytar a pomocí potenciometru s označením GAIN 2 byla vždy nastavena vhodná úroveň vybuzení v závislosti na síle signálu z elektrické kytary, který je závislý na použitých snímačích a použité elektronice v kytaře. Některé kytary disponují tzv. aktivní elektronikou, která je vybavena i předzesilovačem obsahujícím aktivní elektronické prvky. Výkon zesilovače není příliš vysoký, ale i přesto je dostačující pro přehlušení akustické bicí sady, což je u některých zesilovačů problém.

V rámci vypracování diplomové práce jsem navrhl a zkonstruoval plně funkční elektronkový zesilovač s možností náhledu na jednotlivé součástky a komponenty uvnitř přístroje - v horní části je možnost náhledu přes ochrannou mřížku a ve spodní části přes plexisklo s vygravírovaným schématem. Tato úprava umožňuje použití zesilovače jako vzorového modelu. Ke zkonstruovanému zesilovači jsem vyrobil

i reproduktorovou skříň a osadil ji reproduktorem určeným pro zesílený signál z elektrické kytary. Celá sestava je koncipována do stejného vzhledu a aktivně ji využívám při hraní v hudební skupině.

Seznam použitých zdrojů

- [1] VLACH, J. Lampárna aneb Co to zkusit s elektronkami? Praha: BEN, 2004.
- [2] *Stránky o elektronice, ozvučování a zesilovačích* [online]. 24. 12. 2002 [cit. 2013-09-15]. Dostupné z: <http://www.zesilovace.cz/>
- [3] *Zkreslení u AUDIO zesilovačů* [online]. 1.8.2010 [cit. 10.10.2013]. Dostupné z: <http://www.federmann.cz/>
- [4] TESLA, Tesla BM 215A - Návod k obsluze. Praha: Kovo - Czechoslovakia.
- [5] *LANEY LC15 LC15R SCH Service Manual, schematic*[online]. 19.2.1997 [cit. 15.11.2013]. Dostupné z: <http://elektrotanya.com/>
- [6] 18watt Schematics, etc. [online]. 14.7.2002 [cit. 15.11.2013]. Dostupné z: <http://mhuss.com/>
- [7] *Elektronková patice noval GES-ELECTRONICS* [online]. [cit. 15.09.2013]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/cz/>
- [8] *JJ-Electronic - Vacuum tubes, Capacitors, Amplifiers - Preamplifying tubes* [online]. [cit. 26.09.2013]. Dostupné z: <http://www.jj-electronic.com/>
- [9] *Celestion G10-30 Tube 30W 10" Guitar Speaker;*[online]. 2011 [cit. 14.11.2013]. Dostupné z: <http://www.bluearan.co.uk>
- [10] *The Audible Frequency Range And Describing Ton* [online]. 27.10.2011 [cit. 16.10.2013]. Dostupné z: <http://www.ultimate-guitar.com>
- [11] *Kytary a hudební nástroje | Elektrické kytary | AUDIOTEK MEGASTORE* [online]. 2010 [cit. 18.10.2013]. Dostupné z: <http://www.audiotek.cz/>

Seznam zkratek

Hi-Fi (High fidelity) - pojem označující vysokou věrnost reprodukce akustického signálu

NF – nízkofrekvenční

SR (Slew Rate) - rychlost přeběhu zesilovače

FFT - Fast Fourier Transformation

DPS - deska plošných spojů

SPL - sound pressure level - hladina akustického tlaku

P_{out} - výstupní výkon

U_g - mřížkové napětí

U_f - žhavicí napětí

P_z - zdánlivý výkon

A_u - zesílení

f - frekvence

U_{in} - vstupní napětí

U_{out} - výstupní napětí

P_{max} - maximální výkon

R_z - zatěžovací odpor

R_{in} - vstupní odpor

THD - harmonické zkreslení

Seznam obrázků

Obrázek 1 Elektronka - trioda [1]	8
Obrázek 2 Základní zapojení triody [1]	8
Obrázek 3 Modelová charakteristika elektronky s jednou mřížkou - triody [1].....	9
Obrázek 4 Schematické zapojení elektronky - triody [2]	11
Obrázek 5 Závislost anodového proudu na změně mřížkového napětí [2].....	12
Obrázek 6 Princip zesilovačů třídy A [1]	13
Obrázek 7 Princip zesilovačů třídy B [1].....	14
Obrázek 8 Princip zesilovačů třídy AB [1].....	15
Obrázek 9 Přejížděcí zkreslení trojúhelníkového signálu [2]	16
Obrázek 10 Zkreslení TIM [2].....	17
Obrázek 11 Katalogový list elektronky - triody ECC83[8].....	20
Obrázek 12 Katalogový list elektronky - pentoda EL84 [8].....	21
Obrázek 13 Blokové schéma zesilovače.....	22
Obrázek 14 Schéma kytarového zesilovače Laney LC15[5].....	23
Obrázek 15 Schéma kytarového zesilovače Marshall 18Watt[6].....	23
Obrázek 16 Schéma zkonstruovaného zesilovače	26
Obrázek 17 Schéma zdroje napájecího napětí zkonstruovaného zesilovače	26
Obrázek 18 Návrh desky plošných spojů elektronkového zesilovače	27
Obrázek 19 Návrh desky plošných spojů zdroje napájení	28
Obrázek 20 Osazovací plán desky plošných spojů zesilovače	28
Obrázek 21 Osazená deska plošných spojů zesilovače	29
Obrázek 22 Osazená deska napájecího zdroje	29
Obrázek 23 Použité patice NOVAL s vývody do plošných spojů [7]	32
Obrázek 24 Parametry použitých patic NOVAL[7]	32
Obrázek 25 Elektronky typu ECC83 a EL84 - párová dvojice.....	33
Obrázek 26 Šasi zesilovače.....	35
Obrázek 27 Částečně osazené šasi zesilovače	35
Obrázek 28 Návrh předního panelu zesilovače	36
Obrázek 29 Návrh zadního panelu zesilovače	36
Obrázek 30 Návrh panelu reproduktorové skříně.....	36
Obrázek 31 Reproduktorová skříň	37
Obrázek 32 Použitý reproduktor [9]	38

Obrázek 33 Frekvenční rozsah běžně naladěné elektrické kytary [převzato a upraveno z http://www.ultimate-guitar.com/]	39
Obrázek 34 Karty elektronek ECC83 a EL84	46
Obrázek 35 Detailní pohled na analogový měřič a měřicí kartu	47
Obrázek 36 Zkoušeč elektronek Tesla BM 215.....	48
Obrázek 37 Jeden z prvních prototypů zesilovače.....	49
Obrázek 38 Finální řešení uchycení DPS	50
Obrázek 39 Finální vzhled zesilovače a reproduktorové skříně	51
Obrázek 40 Software pro záznam zvuku do PC - Audacity	52
Obrázek 41 Záznam zvuku zesilovače.....	53

Seznam grafů

Graf 1 Citlivost použitého reproduktoru při různých frekvencích [9].....	39
Graf 2 Fourierova řada výstupního signálu zesilovače.....	40
Graf 3 Zkreslení výstupního signálu při měření FFT	41
Graf 4 Frekvenční amplitudová charakteristika koncového stupně.....	42
Graf 5 Zkreslení výstupní signálu - $f=500$ Hz	44
Graf 6 Zkreslení výstupní signálu - $f=500$ Hz	45
Graf 7 Frekvenční analýza - komorní tón (440 Hz), nezkreslený zvuk.....	54
Graf 8 Frekvenční analýza - komorní tón (440 Hz), potenciometr GAIN1 nastaven na polovinu své dráhy.....	55
Graf 9 Frekvenční analýza - komorní tón (440 Hz), potenciometr GAIN1 nastaven na plnou hodnotu své dráhy.....	55
Graf 10 Frekvenční analýza - nahrávka B1 (viz CD-ROM), potenciometr GAIN1 nastaven na jednu čtvrtinu hodnoty své dráhy.....	56
Graf 11 Frekvenční analýza - nahrávka B4 (viz CD-ROM), potenciometr GAIN1 nastaven na plnou hodnotu své dráhy	56