



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Konstrukce zesilovače pro kytaru

Autor práce: Stanislav Bouzek
Vedoucí práce: Ing. Jan Hrubý

Plzeň 2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Stanislav BOUZEK**
Osobní číslo: **E10B0286P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Konstrukce zesilovače pro kytaru**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte možnosti obvodových řešení zesilovače.
2. Navrhněte dané zařízení.
3. Zařízení realizujte a ověřte jeho parametry.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

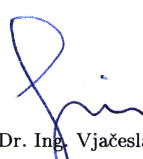
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Hrubý**
Katedra technologií a měření
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jan Hrubý**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**



L.S.


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh a konstrukci elektronkového zesilovače určeného pro elektrofonickou kytaru. Zesilovač má dva kanály, efektovou smyčku, koncový zesilovač s výkonem pro použití v domácích nebo studiových podmínkách a polovodičový usměrňovač. První část práce obsahuje teoretický úvod do problematiky nástrojových zesilovačů a popis používaných řešení u komerčně vyráběných zesilovačů. Další částí je návrh jednotlivých bloků zesilovače. V závěru jsou shrnuty výsledky po testování zesilovače.

Klíčová slova

elektronka, trioda, pracovní bod, elektronkový zesilovač, výkonová brzda

Abstract

Bouzek, Stanislav. *Construction of amplifier for guitar* [*Konstrukce zesilovače pro kytaru*]. Pilsen, 2013. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Jan Hrubý

This bachelor thesis deals with the design and construction of vacuum tube amplifier for electrophonic guitar. The amplifier has two channels, the effects loop, power amplifier with performance for using at home or in studio and semiconductor rectifier. The first section contains theoretical introduction to the instrumental amplifiers issue and solution description commonly used in commercially produced amplifiers. Another section is focused on amplifier blocks design. Testing amplifier results are discussed in the end.

Keywords

vacuum tube, triode, operating point, vacuum tube amplifier, power brake

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 6. června 2013

Stanislav Bouzek

.....

Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam symbolů a zkratek	ix
1 Úvod	1
2 Kytarové aparatury	3
2.1 Části nástrojového ozvučovacího řetězce	3
2.2 Vývoj	5
2.3 Koncepce navrhovaného zařízení	6
3 Používaná obvodová řešení elektronkových zesilovačů	7
3.1 Koncové stupně	7
3.2 Zdroje anodového napětí	9
3.3 Předzesilovače	10
4 Návrh zařízení	11
4.1 Návrh předzesilovače	11
4.1.1 Zapojení triody se společnou katodou	12
4.1.2 Přímo vázaný katodový sledovač	15
4.1.3 Katodový sledovač s odporově kapacitní vazbou	16
4.2 Obvody ovlivňující kmitočtovou charakteristiku	16
4.2.1 Vazební kondenzátor	17
4.2.2 Blokovací kondenzátor	17
4.2.3 Parazitní kapacity	18
4.2.4 Obvod pro potlačení nízkých kmitočtů pro nízké hodnoty nastavení potenciometru “gain”	19
4.2.5 Korekční obvody	19
4.3 Šum zesilovače	21
4.4 Návrh koncového stupně	22
4.4.1 Možnosti snížení výstupního výkonu	23

4.5	Návrh napájecího zdroje	25
4.5.1	Část nízkého napětí	25
4.5.2	Část vysokého napětí	27
4.6	Návrh přepínací logiky	30
5	Konstrukce zařízení	32
5.1	Geometrické uspořádání	32
5.2	Chlazení zařízení	34
5.3	Zemnění	34
5.4	Výběr součástek	34
6	Závěr	36
	Reference, použitá literatura	38
	Přílohy	40
A	Schémata zapojení	40
B	Tabulky	45
C	Desky plošných spojů	48
D	Fotografie dokončeného zařízení	49

Seznam obrázků

2.1	Konstrukce pasivních kytarových snímačů	4
2.2	Amplitudová frekvenční charakteristika reproduktoru Celestion Vintage 30, převzato z [4]	5
3.1	Poloha pracovního bodu, převzato z [10]	8
4.1	Zapojení triody se společnou katodou	12
4.2	Nastavení pracovního bodu triody, V-A charakteristika převzata z [12] . . .	14
4.3	Zapojení katodového sledovače	16
4.4	Zapojení katodového sledovače s odporově kapacitní vazbou	16
4.5	Obvod s vazební kondenzátorem	17
4.6	Závislost zesílení triody na použité kapacitě blokovacího kondenzátoru, převzato s úpravami z [11]	18
4.7	Frekvenční charakteristika obvodu potenciometru s útlumem nízkých frekvencí v závislosti na různém nastavení potenciometru	20
4.8	Zapojení obvodu potenciometru s útlumem nízkých frekvencí	20
4.9	Frekvenční charakteristika korektoru prvního kanálu	20
4.10	Frekvenční charakteristika korektoru druhého kanálu	21
4.11	Schémat zapojení koncového stupně	22
4.12	Nastavení pracovního bodu koncové elektronky, V-A charakteristika převzata z [14]	23
4.13	Zapojení výkonové brzdy	24
4.14	Zapojení výstupu Slave Out	25
4.15	Zapojení umělé zátěže	25
4.16	Vnitřní zapojení předzesilovacích elektronek typu ECC82/83, převzato z [12]	25
4.17	Schéma zapojení napájecího zdroje - část nízkého napětí	27
4.18	Náhradní schéma pro výpočet napájecího napětí koncového stupně	28
4.19	Schéma zapojení napájecího zdroje - část vysokého napětí	29
4.20	Schéma zapojení primární strany napájecího transformátoru	30
4.21	Schéma zapojení přepínací logiky	31
5.1	Rozmístění bloků zařízení	33
5.2	Přední panel	33

5.3	Zadní panel	33
A.1	Schéma zapojení prvního kanálu předzesilovače	40
A.2	Schéma zapojení druhého kanálu předzesilovače	41
A.3	Schéma zapojení efektové smyčky	42
A.4	Schéma zapojení koncového stupně	42
A.5	Schéma zapojení napájecího zdroje	43
A.6	Schéma zapojení přepínací logiky	44
C.1	Návrh desek plošných spojů	48
D.1	Pohled na sestavené zařízení - přední	49
D.2	Pohled na sestavené zařízení - zadní	50
D.3	Pohled do otevřeného zařízení 1	50
D.4	Pohled do otevřeného zařízení 2	51

Seznam tabulek

4.1	Srovnání vlastností při použití různých anodových odporů, převzato z [11]	13
4.2	Převodní poměry výstupního transformátoru	23
4.3	Parametry vinutí napájecího transformátoru	30
B.1	Naměřené a vypočítané hodnoty pro předzesilovač	45
B.2	Vypočítané hodnoty mezních frekvencí pro vazební články	45
B.3	Vypočítané hodnoty mezních frekvencí pro filtry typu horní propust v katodách elektronek	46
B.4	Rozpis součástek	47

Seznam symbolů a zkratek

dB/1 m/1 W	Charakteristická citlivosti reproduktoru. Hladina akustického tlaku 1 m od reproduktoru, v ose reproduktoru, při příkonu 1 Watt.
Hi-Fi	High Fidelity. Označení kvalitních zařízení určených pro věrný poslech.
SPL	Sound Pressure Level. Hladina akustického tlaku.
EI	Geometrický tvar plechů pro jádra transformátorů
OTL	Output Transformer-Less. Označení pro zesilovače bez výstupního transformátoru.
RC	Jednobran/dvojbran složený z rezistorů a kondenzátorů.
LR	Jednobran/dvojbran složený z rezistorů a cívek.
ECC	České označení elektronek s nepřímým žhavením 6,3 V a dvěma triodami s jedné baňce.
12a'7	Celosvětové označení elektronek s nepřímým žhavením 6,3 V a dvěma triodami s jedné baňce.
LED	Light Emitting Diode. Svítivá dioda.
HW emulace	Hardware. Emulace reproduktoru pomocí samostatně funkčních analogových nebo digitálních obvodů.
SW emulace	Software. Emulace reproduktoru pomocí programu spuštěného ve výpočetním systému.
E1A	Označení pro elektronky použité ve schématu - číslo udává označení elektronky, písmeno triodu.
A_u, μ	Napěťové zesílení.
U_a	Napětí mezi anodou a katodou elektronky.
U_n	Napájecí napětí.
U_g	Napětí na řídicí mřížce elektronky.
I_a	Proud procházející elektronkou v klidovém stavu.
$I_a \max$	Maximální proud procházející elektronkou.
R_i	Vnitřní odpor elektronky.
R_p	Pracovní odpor pro elektronku.
R_a	Rezistor připojený na anodu elektronky.
R_k	Rezistor připojený na katodu elektronky.

S	Strmost.
f_m	Mezní, zlomová frekvence komplexního jednobranu/dvojbranu s útlumem 3 dB.
VT	Výstupní transformátor.
p	Převodní poměr transformátoru.
Z_p	Impedance na primární straně transformátoru.
Z_s	Impedance na sekundární straně transformátoru.
i_c	Proud kondenzátorem.
Δu_c	Zvlnění napětí na kondenzátoru.
P_z	Ztrátový výkon na stabilizátoru.
U_{in}	Vstupní usměrněné napětí.
U_{out}	Výstupní stabilizované napětí.
I_{out}	Výstupní proud ze stabilizátoru do zátěže.
FET	Field Effect Transistor. Tranzistor řízený polem.
FS	Foot Switch. Nožní ovladač funkcí zesilovače.
PE	Ochranný vodič.
SK	Zapojení elektronky se společnou katodou.

1

Úvod

I přes dnešní poměrně širokou nabídku zařízení pro elektrofonické (častěji označované jen jako elektrické) kytary, je výběr kytarové aparatury složitý, na výsledném zvuku se projevuje každá část řetězce a každý kytarista má vlastní názor na dokonalý zvuk. V poslední době se rozšiřuje i nabídka nízkovýkonových elektronkových zesilovačů určených pro domácí nebo studiové použití. Levná, komerčně vyráběná zařízení jsou ale často jen velmi jednoduchých zapojení s minimem ovládacích prvků a tedy úzkou škálou možných zvukových variací. Cílem práce je návrh a konstrukce prototypu dvoukanálového zesilovače s širokou škálou zvukových možností, s výkonem dostatečným pro domácí nebo studiové použití a efektovou smyčkou. Celé zařízení bude sestavené v šasi o rozměrech 2U šuplíku standardizovaného systému rack. Podobně vybavených komerčně vyráběných zařízení není mnoho, o něco více se vyrábí samostatné předzesilovače a koncové zesilovače, jejich cena se ale pohybuje v desítkách tisíc, viz například [7].

Konstrukce elektronkových zařízení pro audio techniku je, v dnešní době polovodičových součástek, pro velké množství nevýhod, jistým přežitkem. Vakuové elektronky se ale stále používají v některých odvětvích a to pro svůj nezaměnitelný zvuk. Hlavními oblastmi použití jsou kvalitní zesilovače pro poslechovou Hi-Fi techniku, studiová zařízení a nástrojové zesilovače pro elektrofonické kytary a baskytary. První zesilovače určené přímo pro elektrické kytary byly navrženy a vyráběny Leo Fenderem v 50. letech 20. století. Od 60. let začali kytaristé ve velké míře používat zkreslený zvuk s obsahem vyšších harmonických, který je ostřejší, objemnější a má delší dozvuk tónu. Díky všem těmto novým vlastnostem zvuku se kytara stala z doprovodného nástroje sólovým. V průběhu vývoje se některé modely staly tak populárními, že se v téměř nezměněné podobě vyrábějí dodnes.

Prakticky jedinou, dnes vydávanou, českou literaturou je kniha Lampárna - aneb Co to zkusit s elektronkami? od Jaroslava Vlacha [10]. Popisuje základní teorii funkce elektronek a základních zapojení, obsahuje ale chyby. Rozsáhlejší česky psanou literaturou je kniha Věrný zvuk od Jaroslava Lukeše z roku 1962 [9], zabírající se kompletním návrhem poslechových aparatur. V dnešní době je na internetu dostupných mnoho anglicky psaných stránek o návrhu kytarových zesilovačů, z nespočetného množství například [2] s kompletními, jednoduchými projekty nebo [1] s popisem návrhu jednotlivých bloků zesilovače.

Mnoho užitečných informací je k nalezení i na českých a zahraničních diskuzních fórech, kde sami stavitelé řeší praktické problémy. Celá práce je rešerší uvedených zdrojů v kombinaci s praktickými zkušenostmi z předchozích konstrukcí elektronkových zesilovačů.

2

Kytarové aparatury

2.1 Části nástrojového ozvučovacího řetězce

Periodický a neharmonický signál vycházející ze snímače elektrofonické kytary je nutné zesílit a pro velkou část stylů, kde se dnes elektrické kytary prosazují, i přebudit a frekvenčně upravit. Výsledný zabarvený zvuk, který obsahuje větší množství vyšších harmonických složek, se pak označuje jako zkreslený. Toto vyžadované zkreslení může vznikat buď jen v předzesilovači nebo i v koncovém zesilovači.

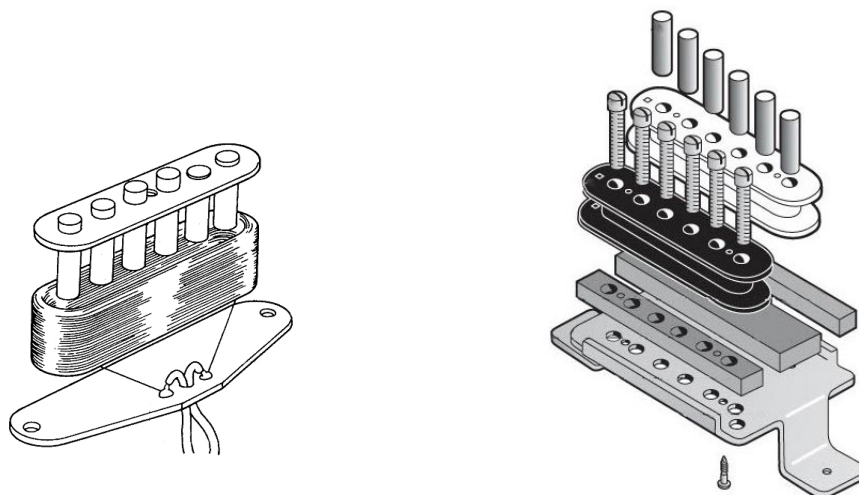
Kmit strun kytary je snímán nejčastěji elektromagnetickým snímačem. Skládá se z cívky o velkém počtu závitů, vinutých slabým drátem na magnetickém jádře. To je feritové (tyto snímače jsou obchodně označovány jako keramické) nebo ze slitiny AlNiCo a má většinou takový počet pólových nástavců jako je počet strun kytary. Celý snímač je konstruován v plastovém krytu. Do snímače se indukují napětí vlivem kmitu struny, ta musí být samozřejmě kovová. Velikost indukovaného napětí je dána vztahem (2.1).

$$u_i = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad [V] \quad (2.1)$$

Kde u_i je indukované napětí, N počet závitů cívky a $\frac{d\Phi}{dt}$ změna magnetického toku vyvolaná kmitem struny.

Nejjednodušší snímač je jednocívkový, anglicky označovaný Single Coil. Kromě napětí indukovaného strunou jsou ale snímána i parazitní rušivá pole z okolního prostředí - například síťová frekvence 50Hz z domovních rozvodů nebo různých napájecích zdrojů (často označováno jako brum) nebo hodinové signály v moderní elektronice.

Právě z důvodů eliminace brumu byl vytvořen další typ snímače - Humbucker - dvoucívkový snímač. Je konstruován jako dvě cívky vinuté na stejném jádře zapojené s opačnou polaritou. Jednocívkové snímače mají výraznější výšky a jejich výstupní signál je obecně slabší. Dvoucívkové snímače mají naopak plnější zvuk, hlavně v oblasti basových a středových frekvencí, výstupní signál je silnější. Se zapojením cívek humbuckerů je navíc možné experimentovat a získat tak mnoho zvukových možností. Toto jsou základní pasivní snímače, s vývojem a miniaturizací elektroniky se začaly vyrábět snímače tzv. ak-



(a) jednocívkový snímač, převzato s úpravami z [5]

(b) dvoucívkový snímač, převzato s úpravami z [6]

Obr. 2.1: Konstrukce pasivních kytarových snímačů

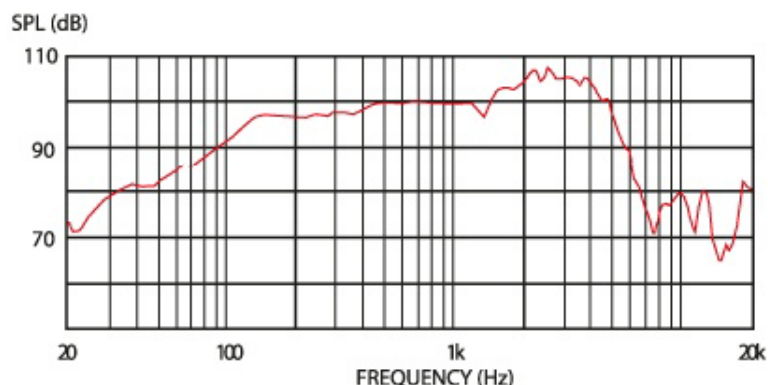
tivní. Výstupní signál je přímo v pouzdře snímače zesilován a frekvenčně upraven. Silnější signál vedený ze snímače je méně náchylný na okolní rušivé vlivy, což je výhodou hlavně pokud je kytara připojena k velmi citlivému zesilovači (s velkým zesílením). Slabší jednocívkové snímače s AlNiCo magnety se nejčastěji používají v měkčích stylech, v moderních, metalových stylech nachází svoje uplatnění buď silné dvoucívkové snímače s keramickými magnety nebo snímače aktivní.

Hlavně u akustických kytar se používají snímače pracující na piezoelektrickém principu - pohyb struny je mechanicky snímán a je piezoelektrickým článkem měněn na elektrický signál. Ten je ale velmi slabý a tak bývá přímo v těle kytary vestavěný zesilovač, často s ovládáním výstupní hlasitosti a základními korekčními obvody.

Samotný zesilovač se dělí z hlediska zpracování zvukového signálu na dvě základní části – předzesilovač a koncový (výkonový) zesilovač. Funkcí předzesilovače je čistě zesílit nebo přebudit signál z kytary a frekvenčně ho upravit podle požadavků a vkusu kytaristy. Zesilovače s více předzesilovači se nazývají vícekanálové. Koncový zesilovač zesiluje signál z předzesilovače na výkon potřebný pro další konkrétní využití, od jednotek po stovky wattů. Jednotlivé bloky zesilovače budou podrobněji popsány v kapitole 3.

Na výsledný zvuk má velký vliv i zbytek řetězce. Kromě efektových krabiček, zapojených buď před aparát nebo do efektové smyčky zesilovače, je to hlavně připojená reproduktorová soustava. Reprodukory určené ke kytarovým zesilovačům jsou většinou o průměru 12 palců s frekvenčním rozsahem 80 Hz – 5 kHz a vysokou citlivostí kolem 100 dB/1 m/1 W. Jejich frekvenční charakteristika je, na rozdíl od reproduktorů používaných v Hi-Fi technice, značně nerovná a tak je výsledný zvuk s různými použitými reproduktory odlišný. Na zvuku se samozřejmě podílí i konstrukce ozvučnice. Používají se nejčastěji ozvučnice osazené jedním, dvěma nebo čtyřmi 12 palcovými reproduktory a

to buď uzavřené nebo otevřené, někteří výrobci experimentují i s bassreflexovými ozvučnicemi. Materiálem pro výrobu ozvučnic je hlavně překližka o síle do 20 mm.



Obr. 2.2: Amplitudová frekvenční charakteristika reproduktoru Celestion Vintage 30, převzato z [4]

Uzavřením zesilovače do ozvučnice vzniká takzvané “kombo”. Ta jsou vyráběna hlavně se zesilovači menších výkonů a často osazována i menšími reproduktory, než jsou výše zmíněné 12 palcové. Ty mají ale značně specifický zvuk a nedosahují zvukových kvalit velkých reproduktorů, a to ani na nízkých, domácích hlasitostech. U menších komb je výhodou přenositelnost, u komb s výkonem od 50 W se ale tato výhoda ztrácí. Další nevýhodou je úzká směrovost jednoho reproduktoru a proto se pro pódiové použití častěji volí samostatný zesilovač s reproboxem osazeným dvěma nebo čtyřmi reproduktory.

2.2 Vývoj

Jako první se k čistému zesílení používaly klasické elektronkové zesilovače určené pro věrný poslech, s minimem ovládacích prvků – ovladačem hlasitosti a případnou ovladatelnou frekvenční korekcí – tónovou clonou nebo jednoduchým dvoupásmovým korektorem. Postupem času byly vyráběny elektronkové zesilovače s větší variabilitou nastavení výsledného tónu, určené přímo pro elektrické kytary.

S ústupem elektronek a vývojem polovodičové elektroniky se v kytarových zesilovačích začaly používat tranzistory – ať už bipolární nebo, hlavně v poslední době, unipolární. Tranzistory se osazují jak v předzesilovačích, tak v koncových zesilovačích. Hlavní výhodou oproti elektronkovým zesilovačům je cena polovodičových součástek, účinnost tranzistorových zařízení (nepotřebují žhavení) a mechanická odolnost. Hlavní využití tranzistorových zesilovačů je v žánrech využívajících čisté zesílení zvuku nástroje bez nežádoucího zkreslení (například zesílení elektroakustických kytar). Vyrábí se mnoho zesilovačů používajících jen polovodičové prvky a produkujících zkreslený zvuk, pro většinu kytaristů jsou ale elektronkové zesilovače zvukově líbivější, a to i přes mnoho jejich nevýhod.

Při použití tranzistorů a elektronek v signálové cestě vznikne zesilovač obchodně nazývaný jako hybridní, často označovaný také jako pololampový. Spojení technologií umožňuje využití výhod obou druhů zesilovačů, opravdu kvalitních, dnes používaných zapojení je ale málo. Velká část aktuálně prodávaných hybridních zesilovačů je jen marketingovým tahem výrobců. Jde o zapojení tranzistorových zesilovačů ve spojení s jednou elektronkou (jen zcela ojediněle i více) v předzesilovači. Zvukové rozdíly oproti klasickým tranzistorovým zesilovačům jsou často minimální.

Záležitostí posledních let jsou digitální modelingové zesilovače. Většina z nich je tranzistorová nebo hybridní, ale navíc obsahují digitální procesor. Ten modeluje charakteristiku legendárních zesilovačů. Takový zesilovač nabízí velké množství zvukových možností, včetně možnosti integrovaných digitálních efektů. Velký vliv na výsledný zvuk má kvalita simulace. Pro některá použití je nevýhodou menší dynamika zvuku a reakce zesilovače na hru, nespornou výhodou jsou ale malé rozměry, nízká váha a rozsáhlé zvukové možnosti.

2.3 Koncepce navrhovaného zařízení

Z výše uvedených důvodů bude navrhovaný zesilovač elektronkový. Bude určen pro domácí a studiové použití, ne pro pódiové hraní, dostatečný výkon tedy bude několik wattů. Předzesilovač bude zaměřen hlavně na zkreslené zvuky a bude mít dva samostatné okruhy. První určený na čistější a méně zkreslené zvuky z období 60-70 let, druhý určený pro moderní metalové zkreslení. Mezi předzesilovač a koncový zesilovač bude umístěna efekto-
vá smyčka s regulací výstupní úrovně. Jejím úkolem je impedančně přizpůsobit předzesilovač k připojeným efektům a následně signál z efektu opět zesílit na úroveň vhodnou pro další část zesilovače, v tomto případě koncový zesilovač.

3

Používaná obvodová řešení elektronkových zesilovačů

3.1 Koncové stupně

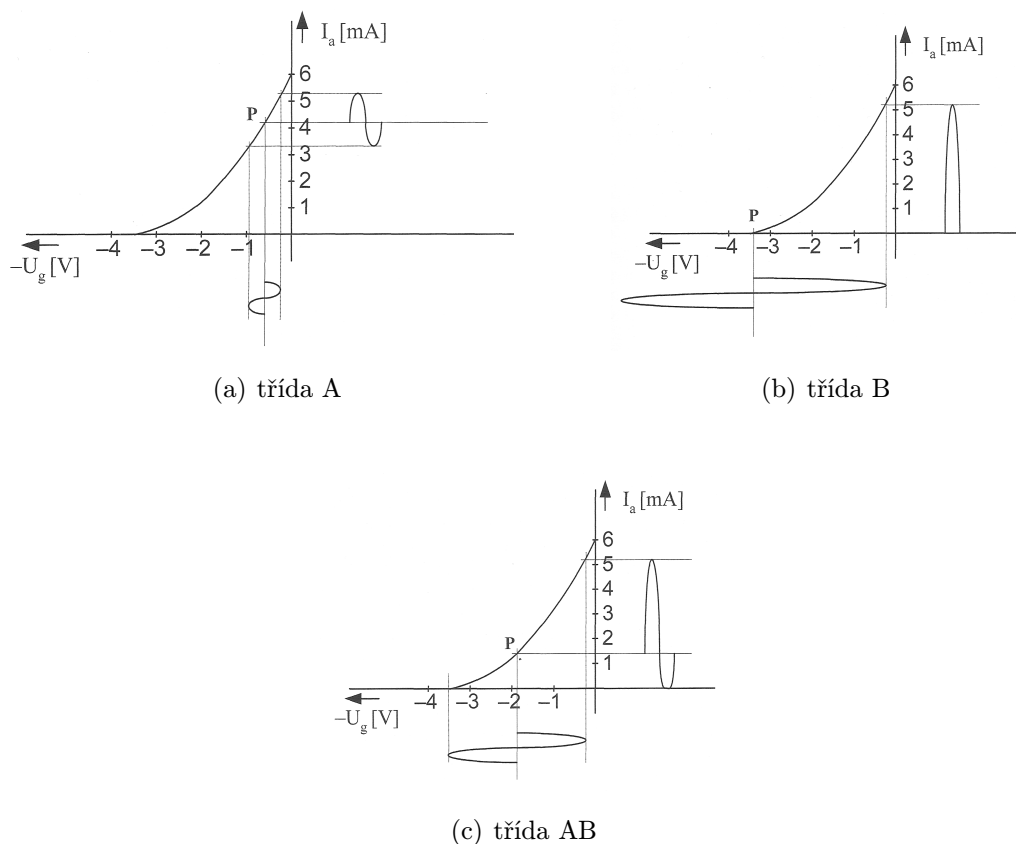
Informace v této kapitole jsou čerpány převážně z [10], [9] a [8]. Hlavním účelem koncových zesilovačů je výkonové zesílení vstupního signálu z předzesilovače nebo jiného zdroje. Na zesilovače určené pro elektrické kytary jsou kladeny mnohem menší nároky než na zesilovače používané v Hi-Fi i běžné poslechové technice, některé druhy zkreslení signálu jsou dokonce vyžadovány.

Nízkofrekvenční zesilovače lze z hlediska polohy pracovního bodu koncového prvku rozdělit do tříd A, B, AB a speciální D. Zesilovač ve třídě D pracuje v pulzním režimu, výkonové tranzistory pracují jen ve dvou stavech (elektronky se nepoužívají) – zcela otevřeném nebo zcela uzavřeném. Frekvence spínání je mnohonásobně vyšší než maximální frekvence signálu, na výstupu obvodu je filtr typu dolní propust, který nežádoucí vysoké frekvence odfiltruje. Řídící signál je dán pulzně šířkovou modulací, řízenou vstupním signálem. Jeho výhodou je velká účinnost a malé rozměry. Pro nástrojové zesilovače jsou hodnoty nežádoucího zkreslení zanedbatelné. Zesilovače ve třídě D se ale teprve rozšiřují a využití pro kytarové aparatury o výkonech maximálně 100 Wattů je minimální. Větší využití nacházejí tyto zesilovače v ozvučovací technice, kde jsou požadovány výkony v řádech kW.

Koncové zesilovače ve třídě A mají nastavený velký klidový proud. Jejich pracovní bod se i při maximálním rozkmitu vstupního signálu pohybuje v lineární části charakteristiky a elektronka je i při minimální hodnotě signálu otevřená, takže jí protéká proud. Z toho vyplývají výhody i nevýhody třídy A. Hlavní nevýhodou je nízká účinnost. Pro jednočinné, tzv. single ended zesilovače s jednou pentodou nebo svazkovou tetrodou jde o hodnoty 30 – 40 %. Výstupní transformátor na jádře typu EI musí být navržen se vzduchovou mezerou a pro sycení stejnosměrným proudem, což se projeví na větších rozměrech a váze. Výhodou je naopak nízké zkreslení, samozřejmě v případě, že se pracovní bod pohybuje v lineární

části charakteristiky, a jednoduchost zapojení.

Zesilovač ve třídě B potřebuje k zesílení sinusového (obecně střídavého) signálu dva prvky, z nichž jeden zesiluje kladnou a druhý zápornou půlvlnu (periodu). Koncové prvky tedy vedou jen v jedné půlperiodě signálu, v druhé jsou zcela uzavřeny, tím je dána hlavní výhoda třídy B - mnohem vyšší účinnost než u třídy A (až 60 %). Nevýhodou je značné nelineární zkreslení pro slabé signály v okolí přechodu mezi jednotlivými půlvlnami – pracovní bod se pohybuje v nelineární části charakteristiky. Tuto nevýhodu řeší nastavení pracovních bodů blíže třídě A – tzv. třída AB – pracovní bod je nastaven tak, aby ještě nezasahoval do nelineární části charakteristiky. Pro slabé signály jsou otevřené oba koncové prvky a zesilovač pracuje jako ve třídě A, až pro silné signály přejde do třídy B. To se samozřejmě projeví na nižší účinnosti, ale výhodou je nižší přechodové zkreslení oproti třídě B. Jde tak o nejpoužívanější nastavení pracovního bodu u elektronkových zesilovačů s výkonem vyšším než 10 W. Je nutné vybírat koncové prvky s co nejpodobnějšími vlastnostmi, tzv. párované, aby byly obě půlvlny zesilovány se stejnými parametry. Jistou komplikací u koncových zesilovačů ve třídě B a AB, anglicky nazývaných push-pull, je nutnost získat k původnímu signálu ještě signál fázově obrácený, což vede na složitější zapojení. Tento přidaný obvod se nazývá fázový invertor. Dnes se používá hlavně zapojení invertoru s rozdělenou zátěží nebo s katodovou vazbou.



Obr. 3.1: Poloha pracovního bodu, převzato z [10]

Výstupní impedance běžně používaných elektronek je v řádech jednotek $k\Omega$, naopak

impedance reproduktorů je běžně 4, 8 nebo 16 Ω . Pro co nejlepší přenos výkonu do zátěže je tak nutné výstup elektronkového zesilovače s reproduktorem impedančně přizpůsobit a oddělit stejnosměrné napájecí napětí anod koncových elektronek. Nejpoužívanější je přizpůsobení pomocí výstupního transformátoru. Ten v reálném případě není ideální, takže zásadně ovlivňuje výsledný zvuk, dva identické zesilovače s různými výstupními transformátory určitě nehrají stejně. Návrh a výroba kvalitního výstupního transformátoru je značně složitá, neboť je nutné dodržet mnoho důležitých parametrů.

Druhou možností jsou tzv. OTL zesilovače, ty místo transformátoru používají na výstupu kondenzátory. Pro přenos nízkých kmitočtů ale musí mít kondenzátory značnou kapacitu (až 2000 μF) a jsou kladeny vysoké nároky na jejich kvalitu. Oproti běžným zesilovačům s výstupním transformátorem se používají typy elektronek s nižší výstupní impedancí. Použití takových zesilovačů je hlavně v Hi-Fi technice, nástrojové zesilovače se takto prakticky nevyrábí.

Důležitou částí obvodu koncového zesilovače, mající podstatný vliv na výsledný zvuk, je obvod záporné zpětné vazby ze sekundárního vinutí výstupního transformátoru. V některých případech nemusí být vůbec zavedena, se zavedenou zpětnou vazbou má ale koncový zesilovač nižší zkreslení, nižší výstupní impedanci, vyšší vstupní impedanci a širší přenášené pásmo. Do zpětné vazby lze také zařadit frekvenční korektory, téměř u všech dvoučinných zesilovačů se používá obvod presence, regulující vyšší pásmo kmitočtů, někdy i obvod regulující hloubky.

3.2 Zdroje anodového napětí

Anody běžně používaných elektronek se provozují na vysokém stejnosměrném napětí, přibližně od 200V do 500V, někdy i více. Napájecí zdroj by měl být ideálně zdrojem napěťovým, tedy dodávat konstantní napětí při jakémkoliv odebíraném proudu. Klasické řešení napájecího zdroje elektronkových zesilovačů používá napájecí transformátor, následné usměrnění buď elektronkovými nebo polovodičovými diodami a vyhlazení pomocí RC nebo LR filtrů. Před polovodičovými diodami byly k usměrnění používány elektronkové diody v zapojení dvoucestného usměrňovače, napájecí transformátor musel mít dvě symetrická vysokonapěťová sekundární vinutí. Toto řešení se v některých zesilovačích používá dodnes. Usměrňovací elektronky se vyrábí jako dvě diody v jedné baňce. Tyto měkčí zdroje se používají hlavně pro zesilovače konstruované ve stylu aparátů ze 60. a 70. let a velkou měrou se podílí na jejich charakteristickém zkreslení. Usměrňovací elektronky mohou být zatěžovány jen určitou kapacitou, aby nabíjecí proudy nebyly příliš velké. Tento problém se dá částečně vyřešit zařazením tlumivky (cívky s velkou vlastní indukčností - běžně jednotky až desítky H) do obvodu zdroje. Po příchodu polovodičových křemíkových diod se začalo používat můstkové zapojení usměrňovače se 4 diodami a stačí tak transformátor s jedním vysokonapěťovým sekundárním vinutím. K vyhlazení se používají kondenzátory o velkých kapacitách, toto zapojení se používá hlavně u zesilovačů

s moderním zvukem nebo z důvodu šetření nákladů.

3.3 Předzesilovače

Původní funkcí předzesilovače bylo zesílit signál pro vybuzení koncového stupně. Postupně přibyl ovladač tónové clony (jednoduchý RC článek s potenciometrem zapojený jako laditelná dolní propust) nebo dvoupásmové Hi-Fi korekce s ovladači basů a výšek. Vývoj došel až k použití třípásmových korekcí různých zapojení, případně i složitějších grafických equalizérů. Většinou jsou korekce pasivní. Hlavně u zesilovačů moderní konstrukce je předzesilovač tou částí obvodu, kde se z největší části tvoří charakter výsledného zvuku a dochází zde především ke zkreslení vstupního signálu. Dnes se nejčastěji jako zesilovací prvky používají triody z řady ECC, v západním světě označované jako 12a7. Jednotlivé typy se liší hlavně zesilovacím činitelem v rozsahu od 20 do 100. V malém množství zesilovačů se pro svůj typický zvuk a vysoké zesílení dodnes používají pentody EF86, dříve hojně používané v Hi-Fi předzesilovačích.

Pro větší zvukové možnosti se využívá připojování nebo odpojování některých částí obvodu, které mají zásadní vliv na zvuk. Může jít o samotné kondenzátory, tvořící seriové či paralelní RC člány na různých místech obvodu (například ve vazebních obvodech mezi jednotlivými stupni nebo v korekčních obvodech) nebo o připojování celých obvodů zesilovacích stupňů. Složitější předzesilovače s velkými zvukovými možnostmi mohou být složeny z několika samostatných předzesilovačů, mezi kterými je možné přepínat. Realizace přepínání je další důležitou částí samotného zesilovače, při nevhodném návrhu může dojít k několika zásadním problémům, hlavně v oblasti rychlosti a hlučnosti přepnutí. Například při použití nekvalitních relé pro přepínání signálové cesty může docházet k "lupnutí" v okamžiku přepnutí. To je zapříčiněno mechanickým přepnutím nedokonalých kontaktů relé, které není okamžité. Lupnutí při přepnutí lze řešit tlumícím obvodem zařazeným na výstupu předzesilovače, který zkratuje výstup předzesilovače na zem v okamžiku přepnutí. Pokud by ale bylo utlumení příliš dlouhé, při přepnutí by místo lupnutí bylo ticho a to může být také nevhodné. Proto se v poslední době používají na přepínání signálové cesty hlavně optočleny typu LED-fotoodpor nebo LED-fototranzistor, realizace takového obvodu je popsána v bodě 4.6. Optočleny při přepnutí mění plynule odpor části zapojené v obvodu a k rušivým jevům při přepnutí nedochází. Pokud se mezi sebou přepínají jednotlivé předzesilovače, je nutné právě nepoužívaný předzesilovač tlumit, aby nedocházelo k přeslechům mezi obvody.

4

Návrh zařízení

4.1 Návrh předzesilovače

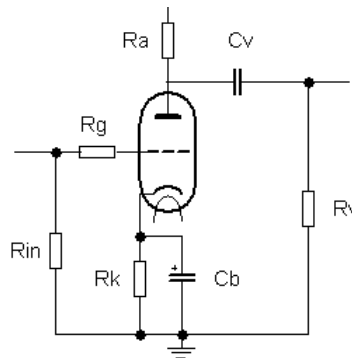
Předzesilovač navrhovaného zařízení bude mít dva samostatné přepínatelné kanály a efektovou smyčku. První kanál bude navržen ve stylu starých britských zesilovačů ze 60. let, zaměřených na čistý a lehce zkreslený zvuk. Bude obsahovat dvě zesilovací triody a jeden katodový sledovač pro napájení frekvenčního korektoru typu Vox. Na předním panelu bude ovládání úrovně signálu na mřížku druhé triody (Volume), přepínač vazebního kondenzátoru mezi 1. a 2. triodou (Normal/Bright), regulace výšek (Treble), hloubek (Bass) a výstupní koncové hlasitosti předzesilovače (Master). Kanál bude označen jako vintage.

Druhý kanál bude produkovat moderní metalový zvuk s charakterem amerických zesilovačů, který tvoří hlavně zapojení tzv. cold biased triody na třetí pozici v předzesilovači. Celkem bude mít 4 zesilovací triody a jednu zapojenou jako katodový sledovač pro napájení frekvenčního korektoru typu Marshall. Ovládacími prvky na předním panelu bude opět regulace úrovně signálu na mřížku druhé triody (Gain), regulace hloubek (Bass), středních kmitočtů (Middle), výšek (Treble), vyšších kmitočtů (Presence) a celkové hlasitosti kanálu (Volume). Oba kanály bude možné přepínat spínačem na předním panelu (vintage/modern) nebo připojeným nožním přepínačem. Do předzesilovače byly vybrány elektronky s vysokým zesílením typu ECC83/12ax7 [12], do efektové smyčky ECC82/12au7 [13] s nižším zesílením, které na této pozici dostačuje.

Mezi předzesilovač a koncový zesilovač bude vřazena sériová efektová smyčka. Její první trioda bude zapojena jako katodový sledovač s odporově kapacitní vazbou. Toto zapojení je vhodné pro připojení zátěže s nízkou impedancí (běžná podlahová zařízení jsou navržena přímo pro výstup kytarového snímače). Druhá trioda výstupní signál z efektové pedálů zesílí na úroveň potřebnou pro vybuzení koncového stupně. Na předním panelu bude možné ovládat úroveň signálu vystupujícího ze smyčky, to má několik výhod - při běžném provozu umožní regulaci celkové hlasitosti zařízení. Druhou výhodou je možnost regulace výstupního signálu pokud bude ze zařízení používána jen předzesilovací část, například pro tiché nahrávání s HW nebo SW emulací koncového zesilovače a reproboxu.

4.1.1 Zapojení triody se společnou katodou

Teoretické informace pro tuto část jsou čerpány především z [17] a [11]. Toto zapojení triody jako zesilovacího stupně je základní, nejjednodušší a tak i nejpoužívanější. Protože katodový odpor je společný jak pro vstupní tak výstupní část elektronky, je označováno jako zapojení se společnou katodou. Ukázkový návrh je proveden pro první triodu E1A prvního kanálu, při návrhu se nejčastěji vychází z katalogových údajů a naměřených volt-ampérových charakteristik, návrh je tak realizován graficko-početní metodou. Vzhledem k velmi vysoké vstupní impedanci triody je vstupní odpor zařízení přibližně dán hodnotou rezistoru R101. Hlavními parametry při reálném návrhu předzesilovače jsou napěťové



Obr. 4.1: Zapojení triody se společnou katodou

zesílení (4.1), vnitřní odpor elektronky (4.2) a strmost (4.3). Strmost udává o kolik mA se změní anodový proud při změně U_g o 1 V. Pro zesilovač požadujeme elektronku s vysokou strmostí.

$$A_u = \mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} \mid I_a = konst \quad [- , V] \quad (4.1)$$

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \mid U_g = konst \quad [k\Omega, V, A] \quad (4.2)$$

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \mid U_a = konst \quad [mA/V, mA, V] \quad (4.3)$$

Při samotném návrhu zesilovacího stupně uvažujeme nejprve statický stav, kdy na řídicí mřížku není přiveden žádný signál, případně je spojena se zemí, v obvodu teče pouze stejnosměrný proud. Kondenzátory C_v a C_b mají v tom případě nekonečně velkou reaktanci a můžeme je nahradit rozpojeným obvodem. Jako první je zvoleno napájecí napětí 300 V, vzhledem k tomuto vysokému napětí zdroje a přesnosti použité metody, je možné zanedbat úbytek napětí na katodovém rezistoru (kolem 1 V) a napsat zjednodušený vztah (4.4) pro součet napětí ve smyčce výstupní části obvodu. Vstupní část obvodu můžeme

vzhledem k velmi vysokému vstupnímu odporu řídicí mřížky (a tedy velmi nízkému proudu ve vstupním obvodu) zanedbat.

$$U_n = U_a + R_a \cdot I_a \quad [V, k\Omega, mA] \quad (4.4)$$

Dalším bodem je výběr vhodné velikosti anodového odporu R_a . Nejčastěji se volí hodnoty od 47 k Ω do 220 k Ω (tedy v řádu vnitřního odporu elektronky). Velikost anodového odporu udává sklon zatěžovací přímky ve statickém stavu. To má vliv na rozkmit zesíleného signálu, resp. zesílení triody a množství zkreslení 2. harmonické složky zesíleného signálu (viz tabulka (4.1)). S menším anodovým odporem je strmota přímky větší, to udává menší zesílení a větší zkreslení 2. harmonické. Trioda E1A je vstupní triodou prvního kanálu, který je určen hlavně pro čisté zvuky, je požadováno nízké zkreslení a vysoké zesílení, je tedy vybrán anodový odpor 220 k Ω .

Hodnota anodového odporu	napěťové zesílení	maximální rozkmit	zkreslení 2. harmonické složky
47 k Ω	43	130 V	7,7 %
100 k Ω	60	180 V	4,3 %
220 k Ω	68	205 V	3,7 %

Tab. 4.1: Srovnání vlastností při použití různých anodových odporů, převzato z [11]

Nyní je možné určit dva krajní body pro sestavení zatěžovací přímky (obrázek 4.2 - červeně). Bod A má souřadnice $U_a = 0$ V; I_a max, proud I_a max se vypočte pro $U_a = 0$ podle vztahu (4.5). Bod B má souřadnice $U_a = U_n$; $I_a = 0$ mA.

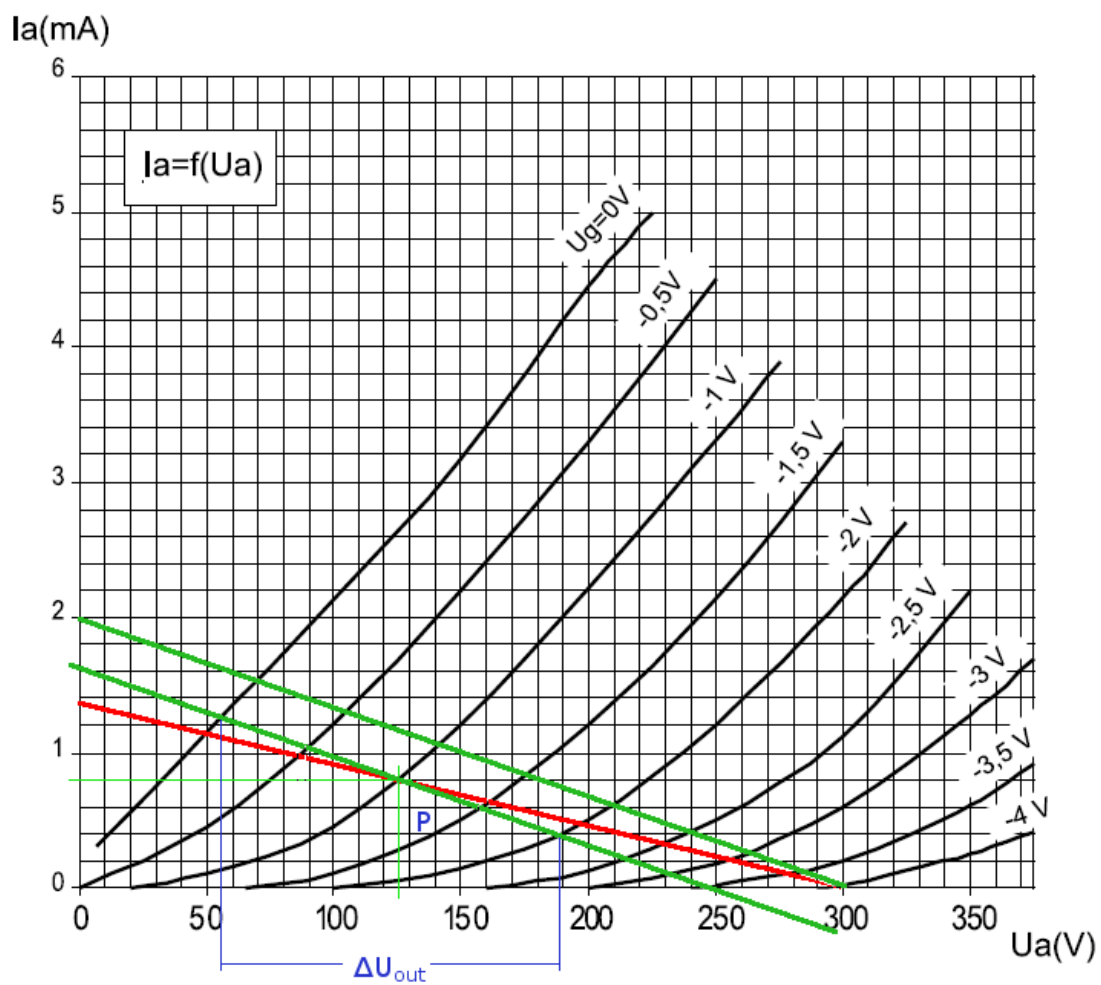
$$I_a \text{ max} = \frac{U_n}{R_a} \quad [mA, V, k\Omega] \quad (4.5)$$

Katodový odpor nastavuje tzv. záporné předpětí, vstupní signál je uvažován s rozkmitem maximálně 2 V, zvoleno je $U_{g1} = -1$ V, v místě průsečíku odpovídající volt-ampérové charakteristiky a zatěžovací přímky je vyznačen pracovní bod P. Podle vztahu (4.6) je dopočtena velikost katodového odporu pro zvolený pracovní bod.

$$R_k = \frac{|-U_{g1}|}{I_a} \quad [k\Omega, V, mA] \quad (4.6)$$

Vypočtená hodnota je 1,25 k Ω , vybrána je nejbližší vyšší hodnota z řady E12 - 1,5 k Ω .

Vnitřní odpor elektronky je určen z anodových charakteristik, podle vztahu (4.2) jde o podíl změny napětí vůči změně proudu v okolí pracovního bodu pro U_g konstantní. Vnitřní odpor lze určit z rovnice tečny k anodové charakteristice v pracovním bodě. Pracovní bod ale jen velmi zřídka leží na průsečíku anodových charakteristik a zatěžovací přímky, častěji se nachází mezi dvěma charakteristikami - pak je vnitřní odpor určen průměrnou hodnotou z odporů určených ze dvou sousedních charakteristik.



Obr. 4.2: Nastavení pracovního bodu triody, V-A charakteristika převzata z [12]

Pro výpočet dynamických parametrů triody jsou kondenzátory C_v a C_b považovány za zkrat (vůči střídavému signálu mají minimální reaktanci). Do výpočtu se projeví i vazební rezistor R_v . Ten tvoří v paralelní kombinaci s rezistorem R_a nový pracovní odpor R_p . Stejně jako při návrhu statické zatěžovací přímky je spojnicí dvou bodů určena dynamická zatěžovací přímka (obrázek 4.2 - zeleně), v pracovním bodě P je sestrojena její rovnoběžka. Z dynamické zatěžovací přímky můžeme odečíst rozkmit výstupního napětí ΔU_{out} (obrázek 4.2 - modře), pro vstupní napětí $\Delta U_{in} = 2$ V (od $U_{g1} = 0$ do $U_{g1} = -2$ V). Z těchto hodnot vypočteme podle vztahu (4.7) napěťové zesílení triody.

$$A_u = \frac{\Delta U_{out}}{\Delta U_{in}} \quad [- , V] \quad (4.7)$$

V případě triody E1A $A_u = 68$, tohoto zesílení ale bude dosaženo pouze s použitím blokovacího kondenzátoru (viz 4.2.2). Zesílení lze určit i početně ze vztahu (4.8), převzato z [17].

$$A_u = -\mu \frac{R_p}{R_p + R_i} \quad [- , - , k\Omega] \quad (4.8)$$

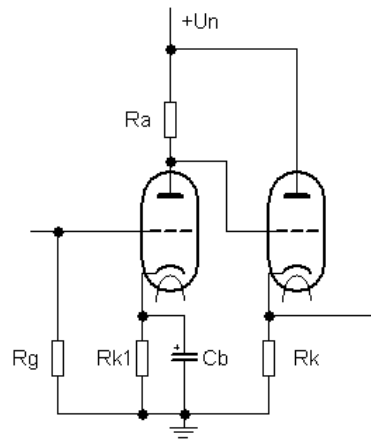
4.1.2 Přímo vázaný katodový sledovač

Zařazením pracovního odporu mezi katodu elektronky a zem a připojením napájecího napětí přímo na anodu elektronky vznikne zapojení nazývané katodový sledovač. Příklad zapojení je na obrázku 4.3 (triody E2A a E4A). Uváděné vztahy jsou převzaty z [9]. Napěťové zesílení tohoto zapojení je dáno vztahem (4.9) a je vždy menší než 1. Katodový rezistor ve sledovači se běžně volí stejný jako anodový odpor předchozího stupně, není to však podmínkou. Vnitřní odpor elektronky je uvažován shodný s pracovním, tentokrát katodovým, odporem. Výsledný vztah (4.10) ukazuje, že katodový sledovač má velmi nízkou výstupní impedanci (oproti zapojení se společnou katodou), nemá tedy při připojení malé zatěžovací impedance negativní vliv na vysoké kmitočty, proto bude použit k napájení frekvenčních korektorů obou kanálů.

$$A_u = \frac{\mu \cdot R_k}{R_i + (\mu + 1) \cdot R_k} \quad [- , - , k\Omega] \quad (4.9)$$

$$R_{out} = \frac{\frac{1}{S} \cdot R_k}{\frac{1}{S} + R_k} \quad [k\Omega, mA/V, k\Omega] \quad (4.10)$$

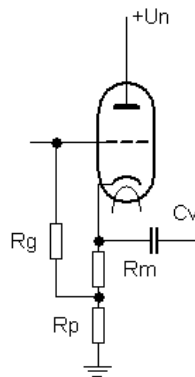
Na pozici triody E4A bude použita elektronka typu 12ax7/ECC83 s parametry: $\mu = 100$, $R_i = 80$ k Ω , $S = 1,6$ mA/V a katodový rezistor o hodnotě 47 k Ω . Z uvedených vzorců (4.9 a 4.10) vyjde zesílení $A_u = 0,97$ a výstupní odpor 624 Ω . Zesílení katodového sledovače je možné pro další návrh považovat za 1.



Obr. 4.3: Zapojení katodového sledovače

4.1.3 Katodový sledovač s odporově kapacitní vazbou

Návrh zapojení probíhá opět graficko-početní metodou jako v případě zapojení SK. Zapojení bude použito jako výstupní stupeň efektové smyčky (nutný nízký výstupní odpor), osazen bude elektronkou typu 12au7/ECC82. Zvolíme pracovní odpor R_p (v katodě elektronky) $18\text{ k}\Omega$, zdroj napětí U_n je opět 300V . Sestrojíme pracovní přímku, pro zvolený pracovní bod (tak aby na pracovním odporu byl úbytek $1/4$ až $1/2$ napájecího napětí), odečteme odpovídající mřížkové předpětí U_{g1} a proud. Z těchto hodnot vypočítáme potřebnou hodnotu odporu R_m . Zapojení je na obrázku 4.4.



Obr. 4.4: Zapojení katodového sledovače s odporově kapacitní vazbou

4.2 Obvody ovlivňující kmitočtovou charakteristiku

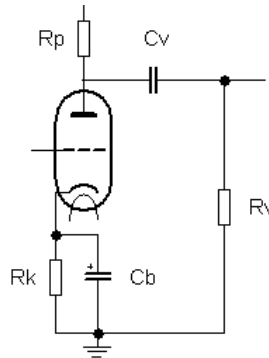
Nároky na úpravu kmitočtové charakteristiky kytarového zesilovače jsou zcela odlišné od nároků na poslechová zařízení, u kterých je kladen důraz hlavně na věrnost přenosu. Tyto obvody mají u kytarových zesilovačů velký vliv na výsledný charakter zvuku zesilovače. Frekvenční rozsah základních tónů kytary je při běžném ladění od 82 Hz do $1,3\text{ kHz}$,

horní mez vyšších harmonických složek bývá omezena na 5 kHz - harmonické složky se ale samozřejmě projevují v celém slyšitelném pásmu i mimo něj. Návrh vhodných filtračních obvodů je čistě záležitostí konstruktéra daného zařízení. Běžné reproduktory pro kytarové aparatury mají rozsah od 80 Hz do 5 kHz. Čerpáno bylo převážně z [17], [9] a [1].

4.2.1 Vazební kondenzátor

Stejnoseměrná složka napětí mezi dvěma stupni zesilovače je oddělena vazebním kondenzátorem. Jeho zapojením do obvodu je ovlivněna frekvenční charakteristika - s vnitřním, pracovním a vazebním odporem tvoří horní propust. Mezní frekvence RC horní propusti, kde dochází k útlumu o 3 dB, se vypočte podle vztahu (4.11).

$$f_m = \frac{1}{2\pi \cdot C_v \cdot \left(\frac{R_p \cdot R_i}{R_p + R_i} + R_v\right)} \quad [Hz, F, \Omega] \quad (4.11)$$



Obr. 4.5: Obvod s vazebním kondenzátorem

U prvního kanálu bude možné měnit přepínačem mezi dvěma hodnotami vazebních kondenzátorů mezi triodami E1A a E2A. Pro použití na čisté zvuky bude výsledná velikost vazebního kondenzátoru 10,5 nF (dána paralelní kombinací 500 pF a 10 nF kondenzátoru). Dolní mezní frekvence tedy bude $f_m = 27$ Hz. Pro zkreslené zvuky kde není požadováno zkreslení basové složky signálu bude vazební kondenzátor pouze 500 pF, to odpovídá $f_m = 576$ Hz. Výsledný zvuk v tomto módu bude tenčí a ostřejší. U druhého kanálu opět není požadováno zkreslení basové složky signálu, vazební kondenzátor mezi prvními dvěma stupni bude opět nižší hodnoty (2,2 nF, $f_m = 69$ Hz). Mezi dalšími stupni jsou voleny hodnoty 22 nF, to odpovídá f_m kolem 20 Hz a níže.

4.2.2 Blokovací kondenzátor

Katodový rezistor funguje v zapojení se společnou katodou jako záporná zpětná vazba a snižuje zesílení triody. Pokud chceme dosáhnout teoreticky vypočteného nejvyššího zesílení je možné přidat paralelně ke katodovému rezistoru kondenzátor o vhodné kapacitě,

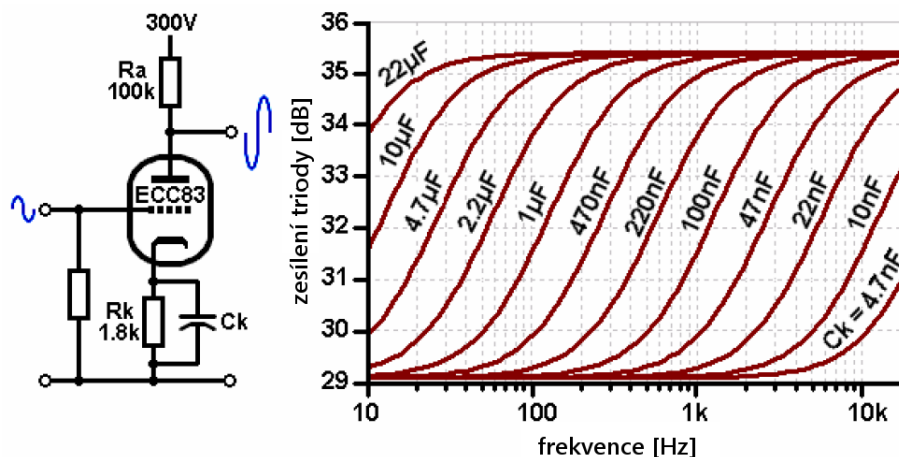
ten se pro střídavé signály chová jako zkrat - má velmi malou reaktanci. Vznikne tak horní propust s mezním kmitočtem f_m , který se vypočte podle vztahu (4.12)

$$f_m = \frac{1}{2\pi \cdot C_k \cdot R_k} \quad [Hz, F, \Omega] \quad (4.12)$$

Pokud požadujeme zesílení celého přenášeného frekvenčního pásma, dosadíme za f_m o dekádu nižší kmitočet než je nejnižší přenášený kmitočet - 8 Hz. Výpočet kapacity je proveden pro triodu E1A, ze vztahu (4.12) je vyjádřena potřebná kapacita kondenzátoru (4.13).

$$C_k = \frac{1}{2\pi \cdot f_m \cdot R_k} \quad [F, Hz, \Omega] \quad (4.13)$$

Vypočtená kapacita je $13,3 \mu F$, použit bude kondenzátor $22 \mu F$ - vyšší hodnota nevádí, mezní kmitočet se posune níže, hodnota $22 \mu F$ bude použita i v druhé triodě prvního kanálu. U druhého kanálu není požadováno zkreslení dolní basové složky signálu. Z tohoto důvodu budou použity blokovací kondenzátory o hodnotách $1 \mu F$ a 470 nF . Závislost zesílení triody na použité kapacitě blokovacího kondenzátoru je na obrázku 4.6.



Obr. 4.6: Závislost zesílení triody na použité kapacitě blokovacího kondenzátoru, převzato s úpravami z [11]

4.2.3 Parazitní kapacity

Celková parazitní kapacita působící negativně hlavně na přenos vysokých kmitočtů je dána vztahem (4.14).

$$C_p = C'_{gk} + C_a + C_{g1} + C_s \quad [pF] \quad (4.14)$$

Kde C'_{gk} - Millerova kapacita působící mezi mřížkou a katodou, C_a - výstupní kapacita předchozího stupně, C_{g1} - vstupní kapacita elektronky, C_s - kapacita vedení a spojů.

Millerova kapacita je přepočítána z kapacity mezi řídicí mřížkou a anodovou, uváděnou v katalogu k elektronce, a je hlavní složkou parazitní kapacity. Pro zapojení SK se

Millerova kapacita vypočte ze vztahu (4.15). Z tohoto vztahu je vidět, že zásadní vliv má napěťové zesílení dané triody. Z tohoto důvodu je u katodových sledovačů Millerova kapacita o několik řádů nižší, její vliv je znatelně menší a proto je možné ji při výpočtech zanedbat. Kapacita vedení a spojů závisí na kvalitě a technologii spojů, pro výpočty bude použita průměrná hodnota 20 pF.

$$C'_{gk} = C_{ga}(1 + A_u) \quad [pF, -] \quad (4.15)$$

Vypočtená parazitní kapacita pro 2. triodu E2A prvního kanálu je přibližně 125 pF. Pro vstupní triody obou kanálů bude na mřížku připojen rezistor o hodnotě 68 kΩ, spolu s Millerovou kapacitou vytvoří dolní propust s horní mezní frekvencí na úrovni horního konce slyšitelného pásma (cca 23 kHz), ta zamezí zpracování nadslyšitelných frekvencí - u zařízení bez této korekce může v krajním případě docházet k demodulaci radiového vysílání.

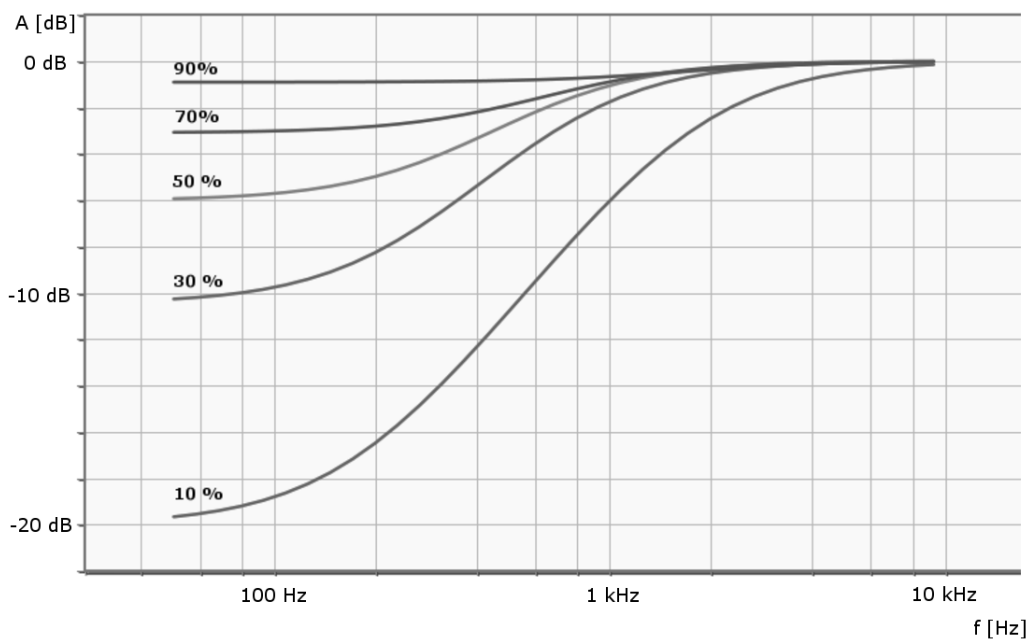
4.2.4 Obvod pro potlačení nízkých kmitočtů pro nízké hodnoty nastavení potenciometru “gain”

Pro větší čitelnost tónu při nižších hodnotách nastavení zkreslení/zesílení se mezi vstupní pin a jezdec potenciometru přidává kondenzátor o kapacitě v řádu stovek pF (schéma zapojení - obrázek 4.8). Tím je vytvořen laditelný filtr, který pro nízké hodnoty nastaveného zkreslení tlumí nízké kmitočty, pro vysoké hodnoty má naopak minimální vliv. Tento obvod částečně kompenzuje negativní vliv parazitních kapacit na vyšší kmitočty. Frekvenční charakteristika zapojení potenciometru “gain” u druhého kanálu je na obrázku 4.7. Průběhy byly nasimulovány v programu Circuit Lab.

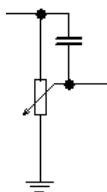
4.2.5 Korekční obvody

Korekční obvody - jinak také equalizéry - jsou soustavou různých RC filtrů. Dovolují pomocí proměnných členů (nejčastěji potenciometrů) měnit časové konstanty jednotlivých filtrů a nastavovat tak jejich mezní frekvence. V kytarových zesilovačích je několik základních zapojení, která využívá převážná většina výrobců. Matematický popis těchto obvodů by byl značně složitý a nepřehledný, pro představu funkce poslouží mnohem lépe frekvenční charakteristiky pro různá nastavení, průběhy byly převzaty z programu Tone Stack Calculator v1.3. Pro první kanál bude použit dvoupásmový kmitočtový korektor typu Vox, ten má už základní útlum poměrně vysoký a rozsah nastavení široký. Na obrázku 4.9 jsou vykresleny průběhy pro tři z mnoha možných nastavení:

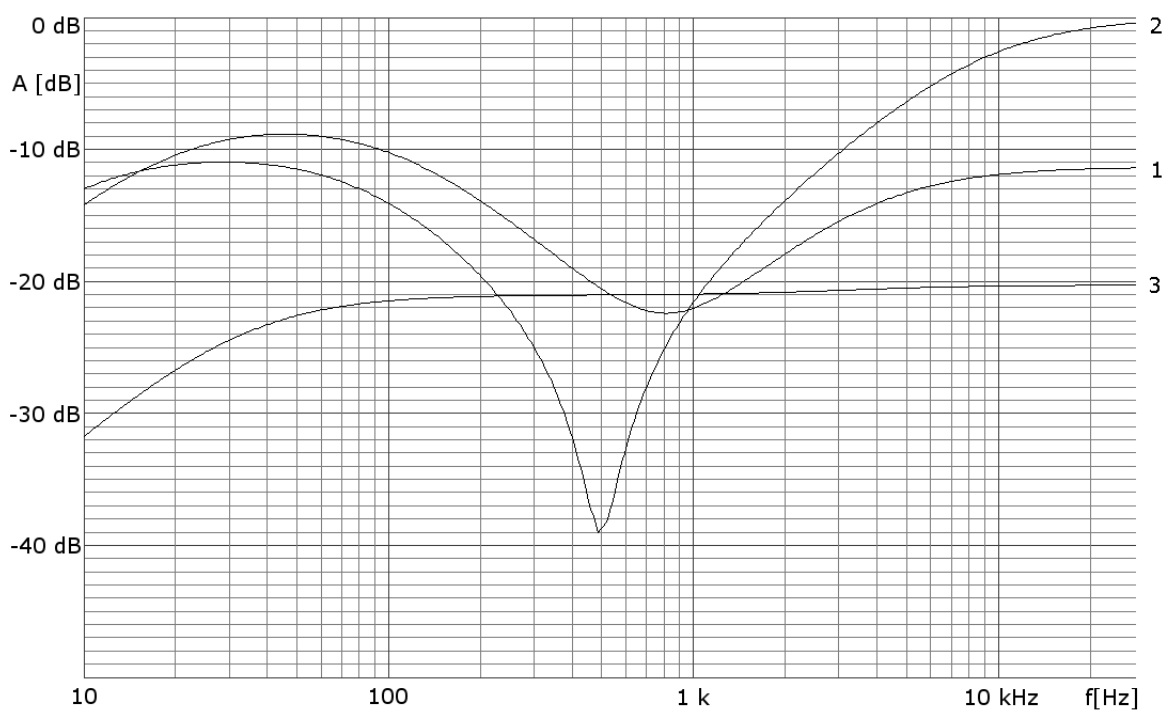
- 1) hloubky 1/2, výšky 1/2
- 2) hloubky max, výšky max
- 3) hloubky min, výšky min



Obr. 4.7: Frekvenční charakteristika obvodu potenciometru s útlumem nízkých frekvencí v závislosti na různém nastavení potenciometru



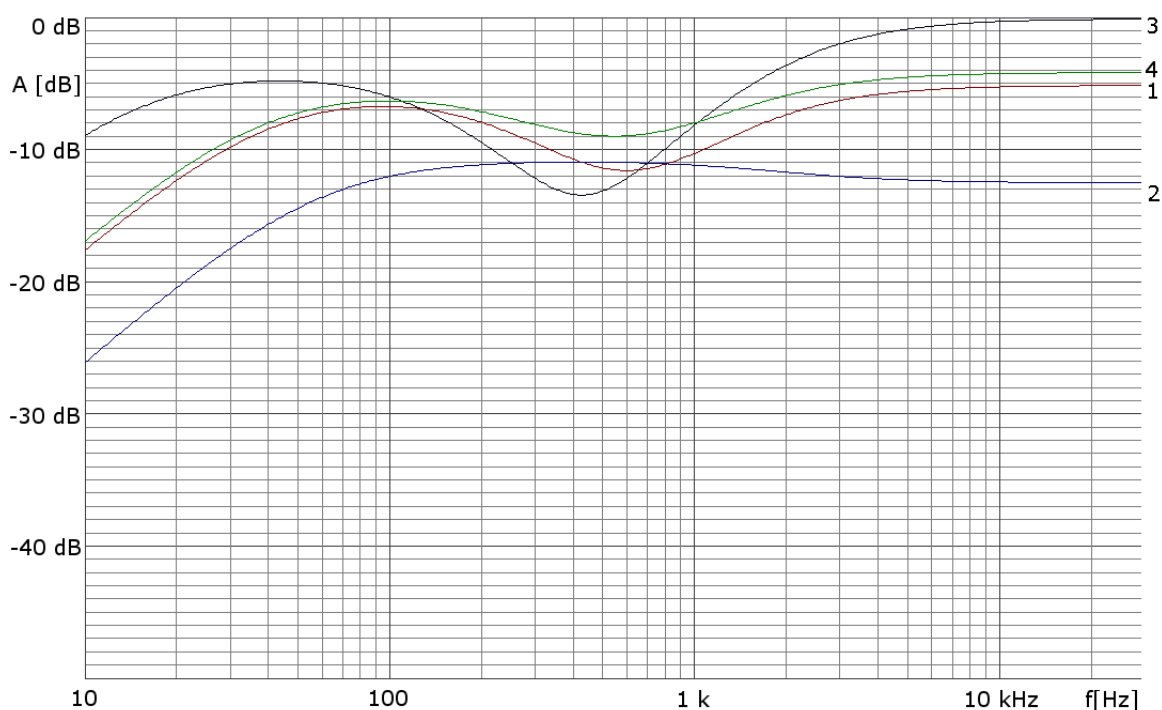
Obr. 4.8: Zapojení obvodu potenciometru s útlumem nízkých frekvencí



Obr. 4.9: Frekvenční charakteristika korektoru prvního kanálu

Pro druhý kanál je zvolen třípásmový kmitočtový korektor typu Marshall. Proti korektoru v prvním kanálu má menší základní útlum a nemá tak zásadní vliv jednotlivých ovládacích prvků. Na obrázku 4.10 je opět vykresleno několik možných průběhů s tímto nastavením ovládacích prvků:

- 1) hloubky 1/2, středy 1/2, výšky 1/2
- 2) hloubky min, středy 1/2, výšky min
- 3) hloubky max, středy 1/2, výšky max
- 4) hloubky 1/2, středy max, výšky 1/2



Obr. 4.10: Frekvenční charakteristika korektoru druhého kanálu

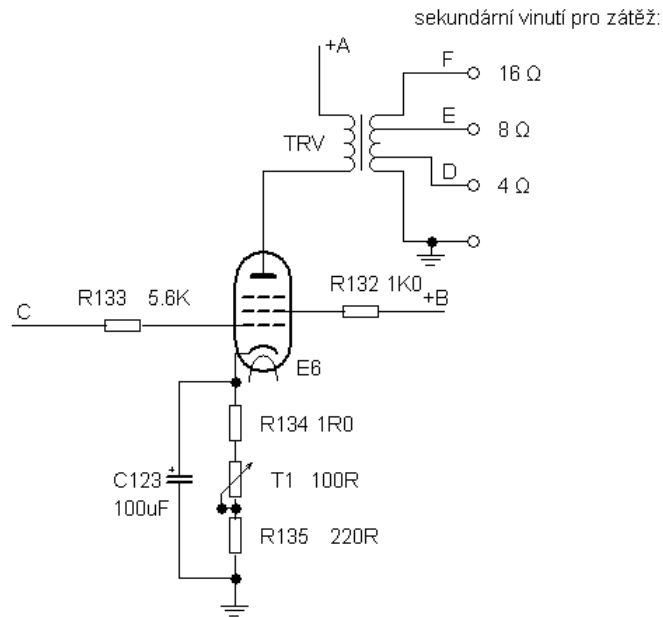
Korekční obvod pro druhý kanál bude navíc obsahovat článek “presence” tvořený potenciometrem P10, rezistorem R140 a kondenzátorem C119. Funguje jako laditelná dolní propust pro regulaci množství vyšších kmitočtů. U dvoučinných zesilovačů je článek s touto funkcí běžně zařazen do zpětné vazby ze sekundárního vinutí VT.

4.3 Šum zesilovače

Šum v zařízení lze rozdělit do dvou hlavních skupin - tepelný Johnsonův šum a výstřelkový šum aktivních prvků. Vzhledem k zapojení druhého kanálu (více zesilovacích stupňů) je očekáván nižší výsledný odstup signál/šum než u prvního kanálu, kde by měl být šum téměř neslyšitelný. Tepelný šum se vyskytuje prakticky na všech součástkách, vlivem nerovnoměrného pohybu elektronů v materiálu - u rezistorů vzniká tzv. šumové napětí, projeví se hlavně u stupňů s vysokým zesílením.

4.4 Návrh koncového stupně

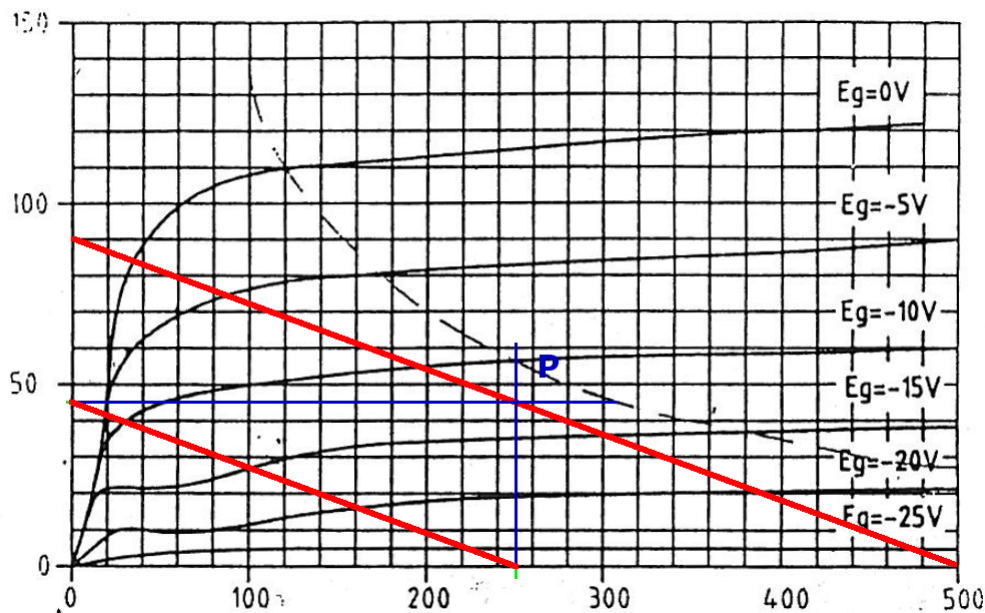
Do koncového stupně byla vybrána oktalová výkonová svazková tetroda 6V6, vyráběná již od roku 1937 a stále osazovaná hlavně v kytarových zesilovačích. Zapojení bylo převzato z [3] Maximální katalogem [15] udávaný výkon pro jednočinné zapojení ve třídě A je 4,5 W což je pro tuto aplikaci více než dostatečné. Jednoduché zapojení koncové elektronky ve třídě A je na obrázku A.4.



Obr. 4.11: Schémata zapojení koncového stupně

Sériovou kombinací rezistorů R134, R135 a trimrem T1 je nastaven pracovní bod. Rezistor R134 je měřicím rezistorem - připojením voltmetru na jeho vývody v klidovém stavu měříme napětí v mV, které přímo odpovídá proudu protékajícímu elektronkou, nastavením výkonového trimru T1 lze tento proud měnit a nastavit tak přesně pracovní bod koncového stupně (obrázek 4.12). Katalog uvádí pro anodové napětí 250 V hodnoty napětí na mřížce $U_{g1} = -12,5$ V a proud $I_a = 45$ mA, tomu by odpovídal katodový rezistor o velikosti 277Ω . Paralelní elektrolytický kondenzátor C123 tvoří s rezistorem R134 paralelní RC horní propust s útlumem 3 dB a mezní frekvencí 6 Hz, větší vliv na spodní hranici šířky pásma má ale výstupní transformátor, takže hodnota kondenzátoru by mohla být i nižší. Mřížkový rezistor R133 tvoří společně s vstupními kapacitami a Müllerovou kapacitou dolní propust. Mřížka G2 je přes odpor R132 připojena k napájecímu zdroji, anoda koncové elektronky je připojena přes výstupní transformátor. Katalogem udávaný vnitřní odpor elektronky v tomto zapojení je 52 k Ω , výstupní odpor pak 5 k Ω . Výstupní transformátor musí připojenou reproduktorovou soustavu transformovat na tuto zatěžovací impedanci. Vzhledem k použití koncového stupně není zavedena zpětná vazba.

Návrh a samotná výroba výstupního transformátoru je složitá a zdlouhavá, odpovídající transformátor bude z těchto důvodů zakoupen u firmy Tronic, v provedení EI trans-



Obr. 4.12: Nastavení pracovního bodu koncové elektronky, V-A charakteristika převzata z [14]

formátoru se vzduchovou mezerou zalitého v plastovém pouzdře, s vývody pro pájení, maximálním napětím na primární straně vinutí 500 V, maximálním přenášeným výkonem 7 W a dolní hranicí šířky pásma 60 Hz. Sekundární vinutí výstupního transformátoru bude mít odbočky pro připojení všech dnes běžně používaných reproduktorů - 4, 8 a 16 Ω . Převodní poměry pro jednotlivá vinutí lze vypočítat podle vztahu (4.16), výsledné hodnoty jsou v tabulce 4.2.

$$p = \sqrt{\frac{Z_p}{Z_s}} \quad [- , \Omega] \quad (4.16)$$

Připojený reproduktor	převodní poměr
4 Ω	35,35
8 Ω	25
16 Ω	17,67

Tab. 4.2: Převodní poměry výstupního transformátoru

4.4.1 Možnosti snížení výstupního výkonu

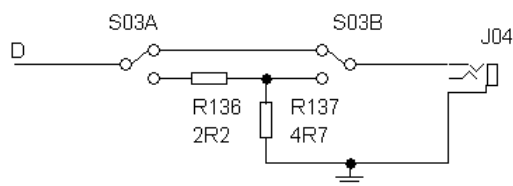
Elektronkový koncový stupeň má pevně nastavené zesílení a nejlepšího zvuku dosahuje při vysokém vybuzení blížícímu se limitaci. Při výstupním výkonu přibližně 4 W a při použití kytarových reproduktorů o citlivosti kolem 100 dB už ale jde o hlasitost nevhodnou pro domácí použití (hlavně z důvodu rušení okolí). Tímto problémem se zabývá mnoho výrobců už řadu let, možností řešení je mnoho, ale prakticky všechny mají vliv i na zvuk. Nejjednodušší možností snížení výkonu elektronkového zesilovače je přepojení koncových

elektronek do tzv. triodového režimu. Mřížkový odpor G2 se místo k napájecímu zdroji připojí k anodě koncové elektronky, udávané snižte výkonu je asi o 40 %. Výsledná hlasitost není o mnoho nižší, zvuk přijde o část vyšších kmitočtů, pro dosažení původního zvuku je tedy nutné přenastavit korekce.

Další používanou možností bez nutnosti zásahu do obvodu zesilovače je výkonová brzda pracující na principu přeměny přebytečného výkonu na teplo. Jednoduše se zapojí mezi zesilovač a reprosoustavu, útlum bývá skokově regulovatelný na několik úrovní až na hodnoty kolem 10 %. Výkonové brzdy mění přebytečný výkon buď na serio-paralelních kombinacích výkonových rezistorů nebo rezistorů a cívek, vyšší modely mají i kmitočtové korekce pro potlačení negativního vlivu brzdy. Útlum při použití brzdy je tedy vcelku vysoký, nevýhodami je opět vliv na výsledný zvuk a přeměna výkonu na teplo, které je nutné odvádět do okolí.

Nejvýhodnější by bylo omezit už výkon dodávaný zesilovačem do zátěže, kromě již zmíněného přepínání pentoda/trioda se v poslední době objevila možnost regulace napájecího napětí anod a mřížek G2 koncových elektronek. Umožnil to vývoj a zlevnění výkonových tranzistorů schopných pracovat na napětí používaných ve zdrojích anodového napětí. Experimentálně se používá buď řízení vysokého napětí pro celý koncový stupeň nebo pouze pro mřížky G2 koncových elektronek. Údajně jde o regulaci výkonu s nejlepšími parametry (hlavně z hlediska zachování zvuková kvality), vývoj vhodných obvodů je ale stále v začátcích.

S ohledem na nízký výstupní výkon použité elektronky bude pro 4Ω výstup zesilovače použita jednoduchá výkonová brzda se serio-paralelní kombinací výkonových rezistorů, vzhledem k použitým hodnotám by mělo dojít k snížení výkonu dodávaného do reproduktoru přibližně na $1/4$, tedy kolem 1 W.

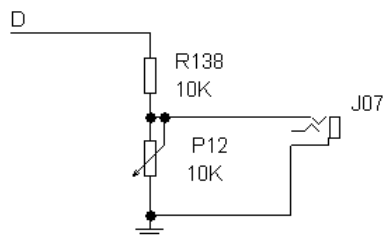


Obr. 4.13: Zapojení výkonové brzdy

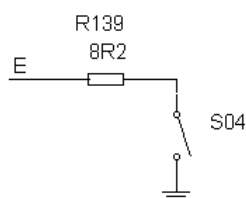
Pro potřeby propojení zesilovače s jiným zařízením je vytvořen výstup za výstupním transformátorem - tzv. Slave Out (toto označení vychází z dřívějších dob, kdy se koncerty ozvučovaly jen přímo nástrojovými zesilovači z pódia, které ale neměli dostatečný výkon. Stačilo tak jedno zařízení, na kterém si kytarista nastavil zvuk podle svého vkusu a další zesilovače byly připojeny do výstupu Slave Out a signál už jen čistě výkonově zesilovaly). Samozřejmostí je regulace úrovně výstupního signálu potenciometrem P12. Výhodou oproti signálu z efektové smyčky je vliv koncového stupně.

Pro tzv. tiché nahrávání z výstupu Slave Out (bez připojeného reproboxu, s použitím buď HW nebo SW emulací reproboxu) je možné na odbočku pro 8Ω zátěž připojit

spínačem S04 (Dummy Load) umělou zátěží. Vybrán byl 10 W rezistor o hodnotě $8,2 \Omega$ jako nejbližší hodnota. Rezistor samozřejmě není plnohodnotnou náhradou reproduktoru, ale pro správný provoz elektronkového zesilovače je nutné pracovat do zátěže o odpovídající velikosti.



Obr. 4.14: Zapojení výstupu Slave Out

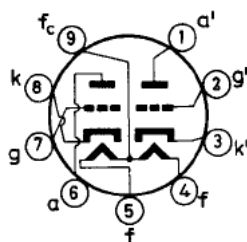


Obr. 4.15: Zapojení umělé zátěže

4.5 Návrh napájecího zdroje

4.5.1 Část nízkého napětí

Vybrané elektronky jsou nepřímou žhavené napětím 6,3 V. Koncová elektronka je žhavena ze zvláštního sekundárního vinutí transformátoru 6,3 V/0,5 A, přivedeného mezi piny 2 a 7. Elektronky v předzesilovači E5 (efektová smyčka) a E4 (katodové sledovače) jsou žhaveny také ze zvláštního vinutí 6,3 V/0,6 A. Žhavení je připojeno paralelně k oběma elektronkám, jeden pól na piny 4 a 5 a druhý na pin 9 - každá trioda v elektronce má vlastní žhavicí vinutí (obrázek 4.16).



Obr. 4.16: Vnitřní zapojení předzesilovacích elektronek typu ECC82/83, převzato z [12]

Vzhledem k vzdálenosti žhavicího vinutí a samotného zesilovacího systému triody dochází při žhavení střídavým napětím k indukovaní rušivého signálu o frekvenci 50Hz do zesilovaného signálu. K eliminaci tohoto jevu slouží tzv. odbrumovače. Existuje mnoho způsobů realizace. Vybrán byl jednoduchý a funkční způsob - vytvoření umělého středu vinutí pomocí dvou 100 Ω odporů a jeho uzemnění. Toto řešení ale nemusí stačit, pokud je na elektronku přiváděn velmi slabý signál a je nastaveno vysoké zesílení. Pak je nejlepším způsobem žhavení stejnosměrným stabilizovaným napětím. Elektronky ECC82/83 umožňují žhavení i napětím 12,6 V - žhavicí napětí se připojí na piny 4 a 5, tím dojde k zapojení žhavicích vinutí obou triod do série. Pro stabilizaci napětí bude použit stabilizátor řady 7812 v 2 A verzi, mezi pin 2 a zem bude vřazena křemíková dioda 1N4007, dojde k zvýšení výstupního napětí stabilizátoru o úbytek na diodě a výstupní napětí stabilizátoru bude v 5 % toleranci pro žhavení elektronek. Z výše uvedených důvodů budou elektronky E1, E2 a E3 žhaveny stabilizovaným napětím 12,6V, celkový odběr elektronek je 450 mA. Jedná se prakticky o katalogové zapojení stabilizátoru. Pro co nejmenší zvlnění výstupního napětí budou použity elektrolytické kondenzátory o vysoké kapacitě - filtrační kondenzátor za můstkovým usměrňovačem 10 mF. Zvlnění před stabilizátorem by při odběru proudu 0,45 A bylo podle vztahu (4.17) přibližně 0,45 V.

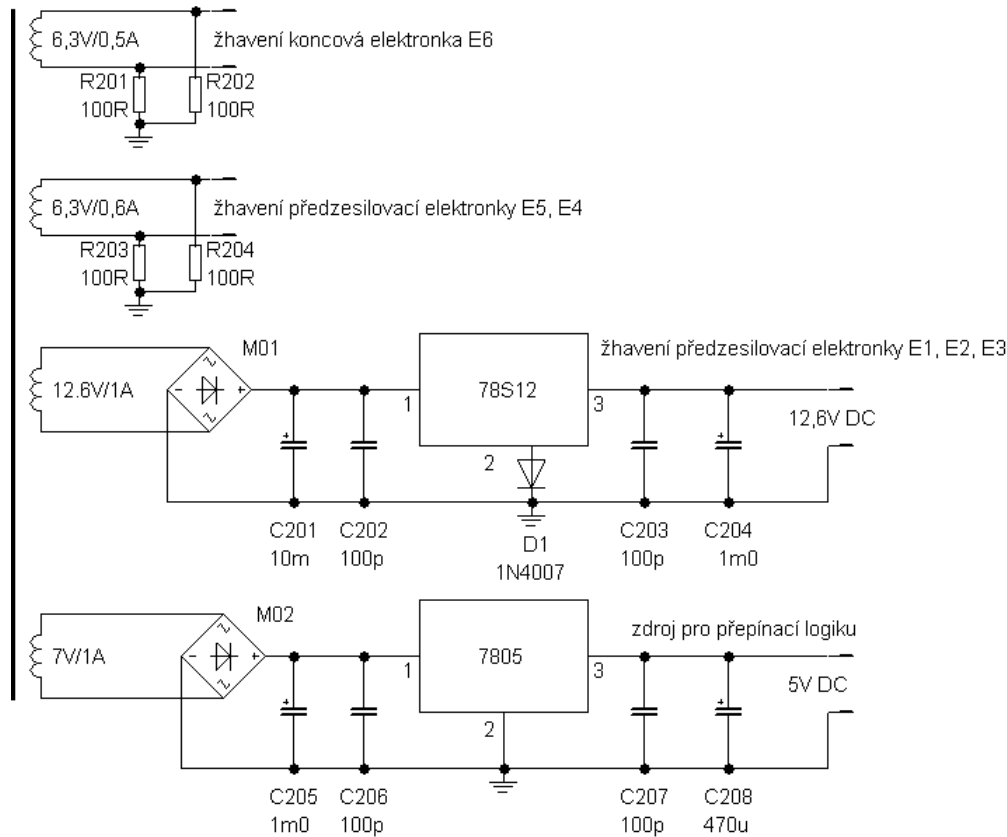
$$\Delta u_c = \frac{i_c}{f \cdot C} \quad [V, A, Hz, F] \quad (4.17)$$

Stabilizátor má typicky útlum zvlnění více jak 50 dB (316 x nižší zvlnění na výstupu proti vstupu). Výsledné zvlnění je tedy kolem 1,5 mV, což lze považovat za dostatečné vyhlazení. Minimální napětí pro správnou funkci stabilizátoru je 14,5 V, vzhledem k přidané diodě proti zemi, je vhodnější počítat minimálně s 15 V a úbytkem na diodách v usměrňovacím můstku 1,4 V. Potřebné střídavé napětí pro napájení usměrňovače je podle vztahu (4.18) přibližně 11,5 V. Vinutí je navrženo na 12,6 V/1 A - to umožňuje žhavení i bez stabilizace, přímo střídavým napětím a zároveň ponechává dostatečnou proudovou rezervu pro možné připojení dalších předzesilovacích elektronek, samozřejmě za cenu vyššího úbytku na stabilizátoru a tedy větších nároků na jeho chlazení. Ztrátový výkon na stabilizátoru lze vyjádřit vztahem (4.19), pro dané hodnoty vychází $P = 1,6$ W. Stabilizátor bude umístěn na chladiči.

$$U_{n\ st} = \frac{U_{n\ ss}}{\sqrt{2}} \quad [V] \quad (4.18)$$

$$P_z = (U_{in} - U_{out}) \cdot I_{out} \quad [W, V, A] \quad (4.19)$$

Pro napájení přepínací logiky a signalizačních prvků je navržen stabilizovaný zdroj 5 V/1 A se stabilizátorem 7805. Signálová relé se vyrábí na různá napájecí napětí v rozsahu 5 až 24 V, optočleny s LED potřebují k funkci zpravidla méně než 2 V, napětí 5 V je tedy dostatečné, navržený proudový odběr je také dostatečně dimenzován pro další možný rozvoj zařízení.



Obr. 4.17: Schéma zapojení napájecího zdroje - část nízkého napětí

4.5.2 Část vysokého napětí

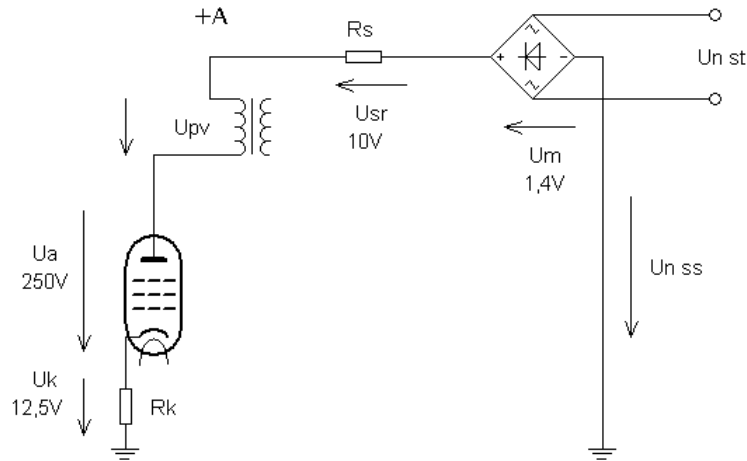
Zdroj anodového napětí elektronek bude rozdělen na dvě části - zdroj pro koncovou elektronku a zdroj pro předzesilovací elektronky. Důvodem je možnost úplného vypnutí části pro koncovou elektronku a používání jen předzesilovače. Také to umožní napájení koncového stupně a předzesilovací části různými hodnotami napětí.

Napájecí napětí pro anodu i mřížku G2 koncové elektrony je podle datasheetu 250 V, proudové odběry v klidovém stavu 45 mA a 5,5 mA. Do náhradního obvodu pro výpočet střídavého napětí je nutné započítat i úbytky na dalších částech obvodu - diodách v usměrňovači, srážecím rezistoru, výstupním transformátoru a katodovém rezistoru. Přesná hodnota srážecího rezistoru R205 bude dopočtena po změření stejnosměrného odporu primární strany výstupního transformátoru (předpoklad 200 - 300 Ω), tak aby napětí anoda - katoda u elektrony E6 bylo 250V. Srážecí rezistor změkčuje zdroj, jeho hodnota bude v řádu stovek Ω . Vzhledem k vysokým filtračním kapacitám ale zůstává zdroj stále dostatečně tvrdý.

Z náhradního schématu se $+U_{n\ ss}$ vypočte podle vztahu (4.20)

$$U_{n\ ss} = U_m + U_{sr} + U_{pv} + U_a + U_k \quad [V] \quad (4.20)$$

Kde U_m - napětí na diodách v usměrňovači 1,4 V, U_{sr} - napětí na srážecím rezistoru ve zdroji, U_{pv} - napětí na primárním vinutí výstupního transformátoru, U_a - napětí mezi



Obr. 4.18: Náhradní schéma pro výpočet napájecího napětí koncového stupně

anodovou a katodou 250 V, U_k - napětí mezi katodou a zemí 12,5 V.

Velikost napětí usměrněného můstkovým diodovým usměrňovačem a vyhlazené filtračním kondenzátorem je rovna maximální hodnotě původního střídavého signálu. Výsledná hodnota střídavého napětí se vypočte podle vztahu (4.18).

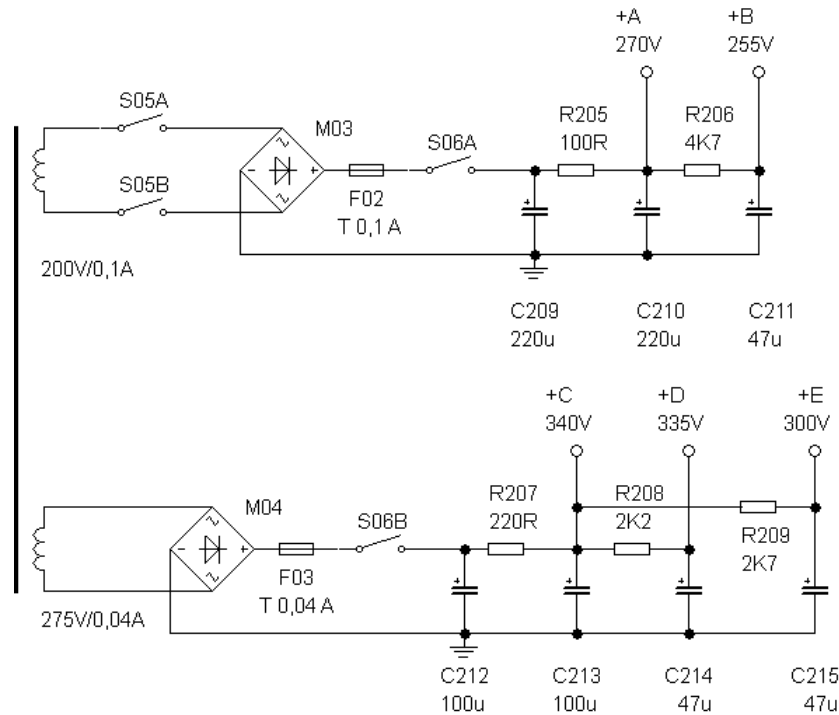
Proudový odběr anody koncové elektronky je v tomto zapojení podle katalogu v klidovém stavu 45 mA, maximální pak 47 mA, odběr mřížky G2 pak 5,5 mA v klidovém stavu, maximálně 7 mA při vybuzení. Celkový maximální odběr elektronky je tak 52,5 mA, s rezervou by dostačoval napájecí transformátor s sekundárním vinutím 200 V/60 mA, použitý napájecí transformátor bude vyroben se sekundárním vinutím 200 V/ 100 mA, to umožní případnou změnu výstupní elektronky.

Vlivem nedostatečného vyhlazení anodového napětí by mohlo docházet k přičtení 100 Hz signálu (50 Hz po usměrnění můstkovým zesilovačem) k zesilovanému signálu. Za dostatečné vyhlazení je pro jednočinné koncové stupně považováno zvlnění menší než 5% anodového napětí. Ze vztahu (4.17) je vyjádřena potřebná kapacita vztahem (4.21).

$$C = \frac{i_c}{f \Delta u_c} \quad [F, A, Hz, V] \quad (4.21)$$

Pro co možná nejlepší vyhlazení bude požadováno zvlnění 1%, frekvence vyhlazovaného průběhu bude 100 Hz a odebíraný proud maximálně 52,5 mA, kapacita filtračního kondenzátoru C209 tedy bude přibližně 200 μ F. Nejbližší vyráběnou hodnotou je 220 μ F, tato hodnota bude použita i u kondenzátoru C210, z něhož je vedeno napětí pro anodu koncové elektronky. Z kondenzátoru C211 je napájena mřížka G2 koncové elektronky, ta odebírá v klidovém stavu proud 5,5 mA. Úbytek na rezistoru R132 o hodnotě 1 k Ω je podle vztahu (4.22) přibližně 5,5 V.

$$U = R \cdot I \quad [V, \Omega, A] \quad (4.22)$$



Obr. 4.19: Schéma zapojení napájecího zdroje - část vysokého napětí

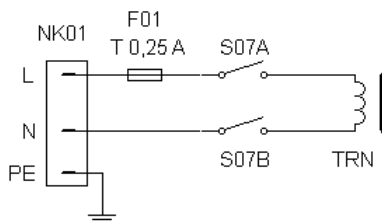
Napětí na C3 musí být 255,5 V, mezi C2 a C3 je zapojen rezistor R2, na kterém bude úbytek 24,5 V, po aplikaci Ohmova zákona vychází potřebný odpor rezistoru 4454Ω, použijeme nejbližší hodnotu 4,7 kΩ. Maximální proud do G2 E6 je 7 mA, nejvyšší ztrátový výkon na rezistoru R2 bude podle vztahu (4.23) 0,23 W, postačí tedy běžný 0,5 W rezistor.

$$P = R \cdot I^2 \quad [W, \Omega, A] \quad (4.23)$$

Zdroj vysokého napětí pro předzesilovací elektronky je navržen stejným způsobem, vinutí je navrženo na 275 V/40 mA. Vzhledem k tomu že elektronky obrací fázi zesilovaného signálu o 180°, je-li první trioda v maximum, druhá je v minimum atd. Výsledný odběr proudu je tedy prakticky poloviční.

U obou částí vysokonapěťového zdroje bude za usměrňovačem zařazena pojistka a příslušná část vypínače S06 (Stand By), umístěného na předním panelu zesilovače. Budou použity pomalé pojistky (vydrží počáteční proudový ráz při nabíjení filtračních kondenzátorů) podle velikosti proudu, na který je dimenzováno vinutí transformátoru. Část napájecího zdroje pro koncovou elektronku lze vypnout spínačem S05 (Power Amp) na zadním panelu zesilovače, funkční tak zůstane jen předzesilovač včetně efektové smyčky.

Primární část napájecího transformátoru je přes dvoupólový přepínač S07 připojena k napájecí síti 230 V/50 Hz. Na přívodu fáze je pomalá pojistka 250 mA. Parametry jednotlivých vinutí napájecího transformátoru jsou v tabulce 4.3. Napájecí transformátor bude s odpovídajícími parametry vyroben firmou Tronic v toroidním provedení, oproti EI transformátoru má několik výhod - rozměry, hmotnost, účinnost a vyzařování do okolí.



Obr. 4.20: Schéma zapojení primární strany napájecího transformátoru

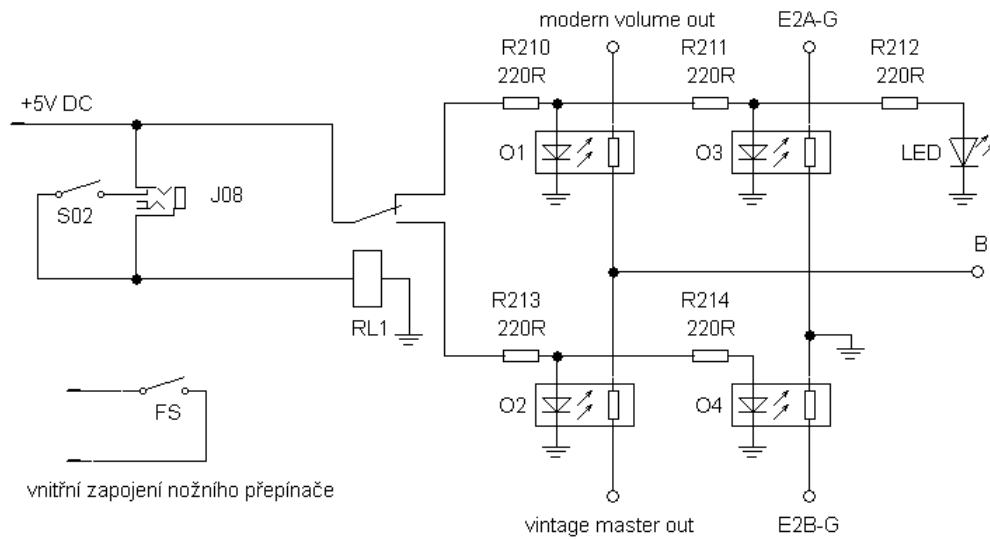
primární vinutí	230 V/60 VA
sekundární vinutí	
žhavení E6	6,3 V/0,5 A
žhavení E5, E4	6,3 V /0,6 A
zdroj 12,6V DC - žhavení E3, E2, E1	12,6 V/1 A
anodové napětí - koncový stupeň	200 V/0,1 A
anodové napětí - předzesilovač	275 V/0,04 A
zdroj 5V DC	7 V/1 A

Tab. 4.3: Parametry vinutí napájecího transformátoru

4.6 Návrh přepínací logiky

Jak už bylo popsáno dříve, přepínací logika musí být co nejrychlejší a co nejtišší. Samotné řešení se signálovými relé nemusí tyto požadavky splňovat, problémy může vyřešit tlumící obvod. V navrhovaném zařízení bude použito přepínání pomocí optočlenů. Nejčastěji se používá typ VTL5C1, obsahující LED a fotoodpor. Tyto optočleny jsou ale v ČR špatně dostupné, proto budou použity lépe dostupné a levnější H11F1 (LED-FET tranzistor), které požadavky obvodu splňují. FET tranzistor zařazený v obvodu má při osvětlení LED nízký odpor (datasheet [16] udává méně než 100 Ω), naopak pokud LED nesvítí, je odpor tranzistoru velmi vysoký (více než 300 M Ω).

Optočleny O1 a O2 propouští signál buď z prvního nebo druhého kanálu do vstupu efektové smyčky. Optočleny O3 a O4 zkratují jeden z kanálů na zem v době kdy není používán, zamezí se tak přeslechům mezi kanály. Například při používání druhého kanálu svítí LED v optočlenech O1 a O3, LED v optočlenech O2 a O4 nesvítí. Aktivita LED jednotlivých optočlenů je řízena relátkem RL1. To přepíná napájecí napětí LED připojených přes 220 Ω rezistory zajišťující správné nastavení napětí a proudu. Cívka relé se připojuje k napájecímu napětí přepínačem S02 nebo nožním přepínačem FS. Pro připojení nožního přepínače je použit jack konektor J08 s pomocnými kontakty. Pokud nebude zasunut konektor nožního přepínače bude aktivní přepínač S02 na předním panelu zařízení, po připojení nožního přepínače bude tento spínač neaktivní. Aktivita druhého kanálu bude signalizována červenou LED o průměru 3 mm, umístěnou na předním panelu zařízení.



Obr. 4.21: Schéma zapojení přepínací logiky

Celý systém přepínací logiky bude napájen stabilizovaným stejnosměrným napětím 5 V.

5

Konstrukce zařízení

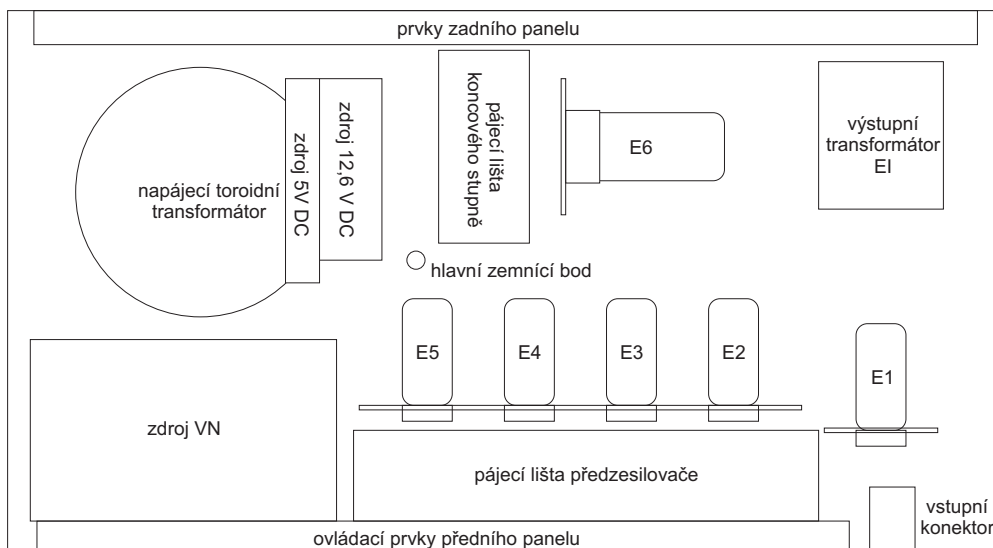
5.1 Geometrické uspořádání

Zařízení bude realizováno v plechové krabici o šířce 435 mm, hloubce 240 mm, výšce 88 mm (odpovídá rozměrům 2U rackové jednotky). Díky těmto rozměrům bude při použití vhodných úchytnů možná montáž do systému rack. Krabice bude vyrobena z dvou kusů 1,5 mm silného hliníkového plechu smontovaných vhodnými pomocnými profily.

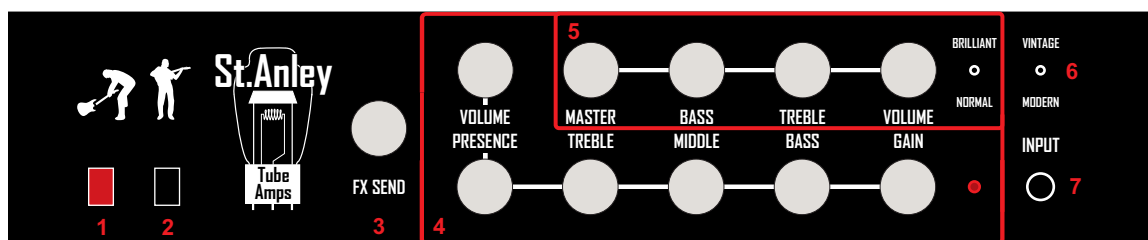
Rozmístění jednotlivých částí zařízení musí být systematické vzhledem k poloze ovládacích prvků na předním a zadním panelu, ale hlavně s ohledem na možné rušení mezi jednotlivými obvody. Napájecí a výstupní transformátor je nutné umístit tak, aby nedocházelo k indukovaní rušivých napětí do výstupního transformátoru. Při běžném použití EI transformátorů se jádra natáčejí o 90° a umísťují se co nejdále od sebe, indukci brumu mohou zabránit i stínící kryty transformátorů. Vzhledem k použití napájecího toroidního transformátoru s menším vyzařováním do okolí jsou tyto jevy částečně potlačeny, i tak bude ale výstupní EI transformátor umístěn co nejdále. Rozmístění jednotlivých bloků je na obrázku 5.1.

Elektronky budou umístěné ve vodorovné poloze, uchycené na L profilech. Vstupní elektronka E1 bude umístěna co nejbližší vstupnímu konektoru, snahou je co nejvíce zkrátit signálové cesty. Vzhledem k lepším možnostem ladění obvodu předzesilovače a koncového stupně budou příslušné součástky umístěny na pájecí liště, plošný spoj není pro účely prototypu příliš vhodný. Mřížkové odpory, u kterých je kladen velký důraz na délku signálové cesty budou pájeny přímo na patice elektronek, stejně jako obvody kolem vstupní elektronky E1. Frekvenčních korektory a další jednoduché obvody budou konstruovány přímo na příslušných potenciometrech nebo konektorech umístěných na panelech zařízení. Pro zdroje stabilizovaných napětí a přepínací logiku byly navrženy jednostranné plošné spoje C, zdroj anodového napětí bude postaven na univerzální vrtané desce.

Rozmístění a grafický návrh ovládacích panelů je na obrázcích 5.2 a 5.3. Motiv bude natištěn na 2 mm plastových panelech. Na krajích předního panelu budou madla pro přenášení. Budou použity krytky potenciometrů o průměru 21 mm a délce 16 mm.

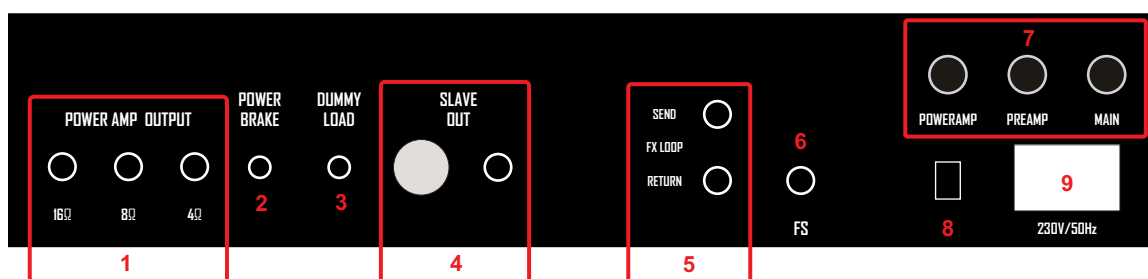


Obr. 5.1: Rozmístění bloků zařízení



Obr. 5.2: Přední panel

Popis ovládacích prvků předního panelu: 1 - hlavní vypínač, 2 - spínač anodového napětí, 3 - regulace výstupní úrovně efektové smyčky, 4 - ovládací prvky 2. kanálu, 5 - ovládací prvky 1. kanálu, 6 - přepínač kanálů, 7 - nástrojový vstup zesilovače.



Obr. 5.3: Zadní panel

Popis ovládacích prvků zadního panelu: 1- výkonové výstupy zesilovače, 2 - spínač pro aktivaci odporové výkonové brzdy pro 4 Ω výstup, 3 - spínač pro připojení umělé zátěže 8 Ω , 4 - výstup za výstupním transformátorem a regulace jeho úrovně, 5 - vstup a výstup efektové smyčky, 6 - vstup nožního přepínače, 7 - pojistky pro anodové napětí koncového stupně, předzesilovače a pojistka na primární straně napájecího transformátoru, 8 - vypínač anodového napětí koncového stupně, 9 - síťový napájecí konektor.

5.2 Chlazení zařízení

Vzhledem k příkonu a nízké účinnosti zesilovače bude nutné zajistit alespoň základní pasivní chlazení celého zařízení. V místě koncové elektronky, největšího zdroje tepla, bude ve spodním i horním dílu krabice vrtané odvětrávací pole o rozměrech 80 x 50 mm s otvory o průměru 6 mm. Pro použití mimo rackový systém bude zesilovač vybaven nožičkami o výšce 10 mm, které umožňují proudění vzduchu mezi dolním a horním odvětrávacím polem. Pokud by byl zesilovač umístěn do rackové skříně, bylo by pro dostatečné chlazení nejspíše nutné přidat boční odvětrávací plochy a tiché, pomaloběžné ventilátory.

5.3 Zemnění

Používá se mnoho způsobů zemnění zesilovačů. Správné zemnění je důležité ze dvou důvodů:

- 1) bezpečnostního - elektronková zařízení pracují na vysokém napětí, nesprávné zapojení nebo případná porucha by mohlo způsobit ublížení na zdraví nebo dokonce smrt, proto je nutné kvalitní spojení ochranného vodiče PE s kovovým chassis zařízení.
- 2) náchylnost zařízení k rušivým vlivům - vlivem zemních smyček nebo špatné kvality zemního spoje může být zesilovač náchylnější na vnitřní i vnější zdroje brumu a šumu. Vzhledem k vysoké citlivosti 2. kanálu je nutné se na správné zemnění obzvláště zaměřit. Zemnění bude provedeno do jednoho společného bodu na chassis zařízení. Nejdůležitější a dlouhé zemnicí spoje budou taženy Cu drátem o průměru 2,5 mm, ostatní pak Cu dráty o průměru 1,5 nebo 0,8 mm (jen krátké spoje). Spojením všech zemí do jednoho bodu se zamezí vzniku zemních smyček. Větší průřez vodičů není volen kvůli protékajícím proudům (ty tak vysoké nejsou), ale pro co nejnižší odpor zemního spojení. Připojení na chassis zařízení bude řešeno šroubem M4, jištěného pomocí vějířových podložek. Dalšími podložkami a matkou bude připevněn PE vodič, ke kterému budou připájeny další zemnicí vodiče. U stíněných vodičů (např. mezi obvody efektové smyčky a konektory na zadním panelu), bude vždy uzemněn jen jeden konec stínění vodiče.

5.4 Výběr součástek

Všechny součástky budou vybírány s ohledem na napěťové a výkonové zatížení - kondenzátory budou vybrány na příslušné provozní napětí, ve zdroji vysokého napětí, vazebních členech a korekčních obvodech minimálně na 400 V, ve stabilizátorech a katodách elektronek na odpovídající napětí. Pro hodnoty v řádech μF budou použity kondenzátory elektrolytické, v řádech nF svitkové a v řádech pF slídové, s výjimkou keramických kondenzátorů v obvodech stabilizátorů. Můstkové usměrňovače budou záměrně předimenzovány s ohledem na velké prvotní nabíjecí proudy filtračních kapacit. Použité rezistory budou voleny z výkonových keramických, uhlíkových a metalizovaných typů (ty mají menší šum

a jsou tedy vhodnější do obvodů s vysokým zesílením) s ohledem na výkonové zatížení. Na pozicích potenciometrů ovládajících hlasitost nebo citlivost budou použity logaritmické potenciometry, ty budou použity i na některých pozicích v korekčních obvodech - jsou svým průběhem vhodnější pro lepší nastavení výsledného tónu, ostatní potenciometry budou lineární. Propojení jednotlivých obvodů a součástek bude řešeno Cu drátovými nebo lankovými vodiči o průměru nejméně 0,8 mm, pouze spoje přepínací logiky budou vedeny 0,4 mm Cu drátem. Pro signálové spoje náchylné na vnější rušení bude použit stíněný koaxiální vodič. Jsou voleny vodiče s izolací vhodnou na provozní napětí.

6

Závěr

Zadáním práce byl návrh a konstrukce zesilovače pro kytaru. Po změření stejnosměrného odporu napájecího transformátoru byla dopočítána hodnota rezistoru R205 ve vysokonapěťové části napájecího zdroje na 100Ω . Schémata jednotlivých bloků (vytvořená v programu ProfiCAD) jsou v příloze A, rozpis součástek v tabulce B.4. V příloze D jsou fotografie dokončeného zařízení. V tabulkách B.1, B.2 a B.3 jsou pro úplnost teoretického popisu zapsány důležité vypočtené a naměřené hodnoty. Zesilovač byl testován a laděn s elektrickou kytarou z mahagonového dřeva, osazenou dvojicí dvoucívkových snímačů se silným výstupním signálem a s uzavřeným reproboxem osazeným dvěma 12 palcovými reproduktory typu Celestion Vintage 30 a Eminence Beta 12a.

Zesílení triody E5B, budící koncový stupeň, bylo sníženo změnou rezistoru v katodě na hodnotu $8,2 \text{ k}\Omega$. S původní hodnotou $2,2 \text{ k}\Omega$ a katodovým blokovacím kondenzátorem docházelo k silnému přebuzení koncového stupně. Šum koncového stupně a prvního kanálu je zanedbatelný, slyšitelný brum se projeví až při vytočení ovládacích potenciometrů na maximum. U druhého kanálu je šum hlasitější, při hraní ale neruší, slyšitelný je pouze pokud se na zesilovač nehraje - s touto vlastností bylo už při návrhu počítáno vzhledem k vysokému zesílení a počtu zesilovacích stupňů druhého kanálu. Pro více "vintage" zkraslení na prvním kanálu a pro použitelné zkraslení koncového stupně by byl vhodnější měkčí zdroj a usměrnění anodového napětí vakuovými diodami, to by ale naopak nemuselo být vhodné pro moderní, metalový zvuk na druhém kanálu. Skloubit tyto dva požadavky v jednom zesilovači je velmi náročné, řešením by byla možnost přepínání zmíněných druhů usměrňovačů. Mimo systém rack se pasivně chlazené zařízení nepřehřívá ani při dlouhodobém používání.

Přepínací logika pracuje dostatečně rychle a tiše, k "lupání" při přepnutí kanálů nedochází. Předpokládanou funkci plní i doplňkové obvody - výkonová brzda, umělá zátěž, výstup "Slave Out" za výstupní transformátorem. S použitím signálu z tohoto výstupu a vhodné SW simulace reproboxu bylo dosaženo velmi kvalitních kytarových nahrávek i v domácích podmínkách, kde by snímání reproboxu mikrofony tak kvalitní výsledky nepřineslo. Možnosti nastavení čistých i zkraslených zvuků jsou poměrně široké. Výkon dodávaný koncovým stupněm do reproboxu je pro zamýšlené domácí použití více než

dostatečný, potenciometr P11 (ovládání úrovně výstupního signálu z efektové smyčky) umožňuje plynulé nastavení celkové hlasitosti.

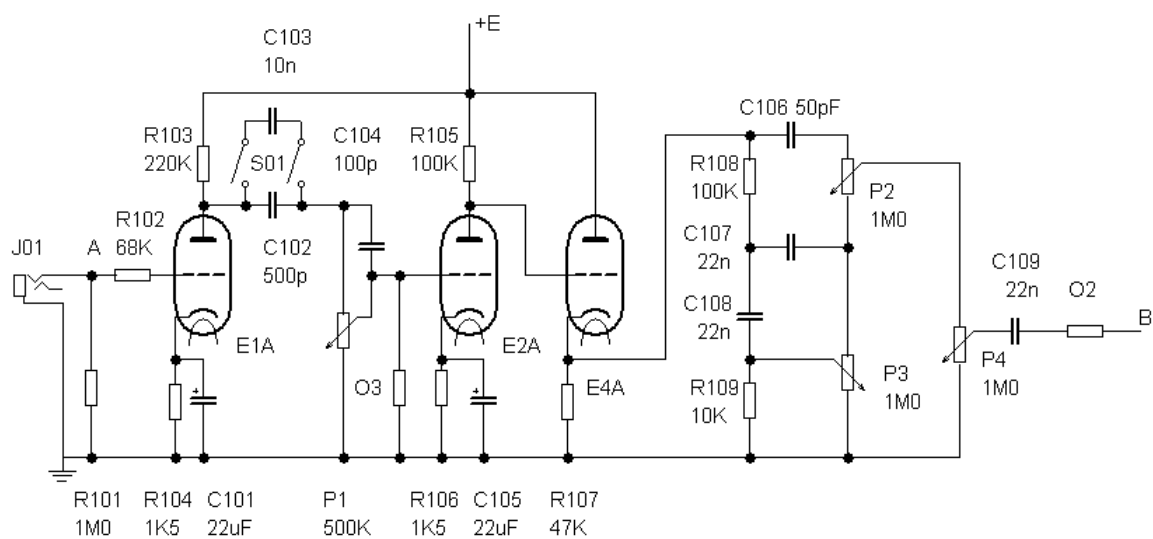
Literatura

- [1] BLENCOWES, Merlin. *The Valve Wizard* [online]. 2005, 26.1.2013 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://www.valvewizard.co.uk/>.
- [2] DOBERMAN MUSIC PRODUCTS. *AX84.com* [online]. 2013 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://ax84.com/>.
- [3] DOBERMAN MUSIC PRODUCTS *AX84.com : Poweramp Building Blocks* [online]. 2013 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://ax84.com/static/corepoweramps/5W`SE/AX84`5W`SE`Poweramp`Schematic.pdf>.
- [4] CELESTION. *Celestion.com: Vintage 30* [online]. 2013 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://celestion.com/product/1/vintage`30/>.
- [5] ROCKET MUSIC. *Rocket Music: Pickups* [online]. 2013 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://www.rocketmusic.net/cgi-bin/commerce.cgi?preadd=action&key=PUPS>.
- [6] STEWART-MACDONALD. *Steward MacDonald: Humbucker Pickup Kit* [online]. 2013 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://www.stewmac.com/freeinfo/Electronics/Pickup`building/i-5961.html>.
- [7] MUZIKER. *Muziker: Předzesilovače a rackové zesilovače* [online]. 2013 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://kytary.muziker.cz/kytarove-zesilovace/predzesilovace-a-rackove-zesilovace>.
- [8] PINKER, Jiří a KOUCKÝ, Václav. *Analogové elektronické systémy. 1. a 2. část. 4. vyd.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. 2 sv. ISBN 978-80-7043-917-3.
- [9] LUKEŠ, Jaroslav. *Věrný zvuk*. Praha: SNTL, 1962. ISBN 80-01-01150-X.
- [10] VLACH, Jaroslav. *Lampárna aneb Co to zkusit s elektronkami?* Praha: BEN, 2004. ISBN 80-7300-091-1.
- [11] BLENCOWES, Merlin. *Designing Valve Preamps for Guitar and Bass. Chapter 1: Fundamentals of Amplification*. Druhé vydání. Wem Publishing, 2012. ISBN-10 0956154522.

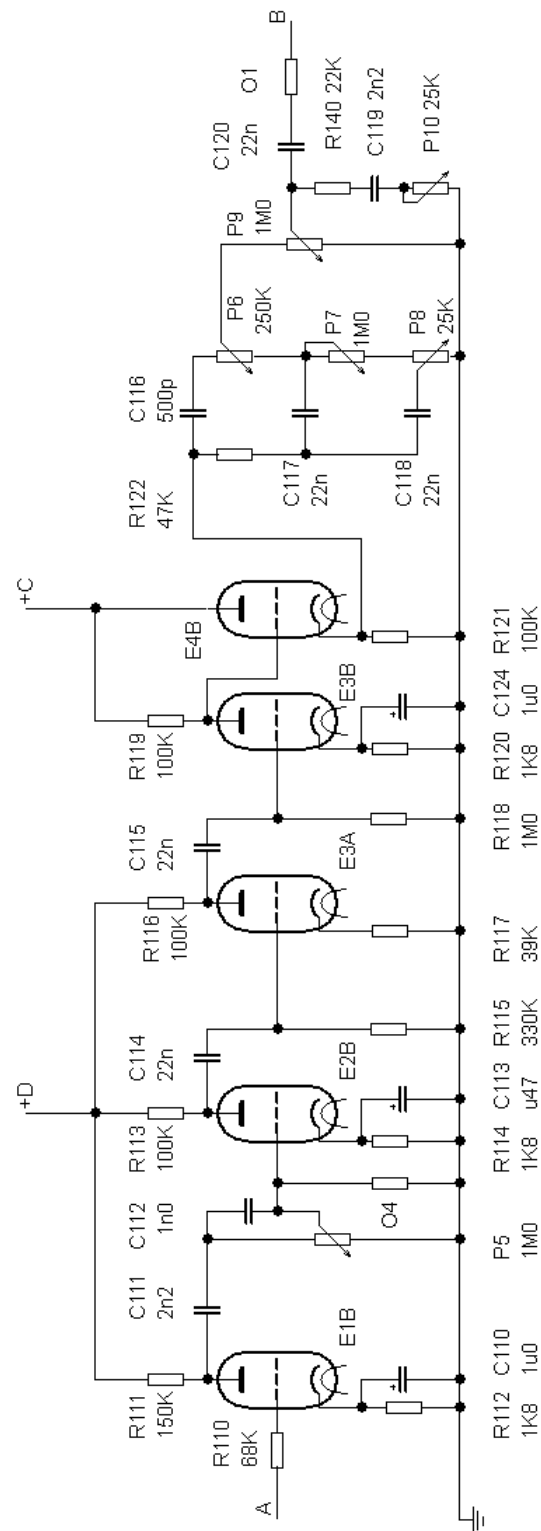
- [12] JJ ELECTRONIC. *ECC83S datasheet* [online]. 2010. Dostupné z: [http://www.jj-electronic.com/pdf/ECC% 2083% 20S.pdf](http://www.jj-electronic.com/pdf/ECC%2083%20S.pdf).
- [13] JJ ELECTRONIC. *ECC82 datasheet* [online]. 2010. Dostupné z: [http://www.jj-electronic.com/pdf/ECC9% 2082.pdf](http://www.jj-electronic.com/pdf/ECC9%2082.pdf).
- [14] ELECTRO HARMONIX. *6V6EH datasheet* [online]. 2011. Dostupné z: <http://www.svetlana.com/pdf/electro-harmonix/6v6eh.pdf>.
- [15] HIGH FIDELITY TUBES. *6V6 RFT datasheet* [online]. 2008. Dostupné z: <http://www.hifitubes.nl/weblog/wp-content/rft-6v6.pdf>.
- [16] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. *H11F1 datasheet* [online]. 2013. Dostupné z: <http://www.fairchildsemi.com/ds/H1/H11F1M.pdf>.
- [17] HRUBÝ, Jan. *Konstrukce předzesilovače pro elektrickou kytaru*. Plzeň, 2007. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací.

Příloha A

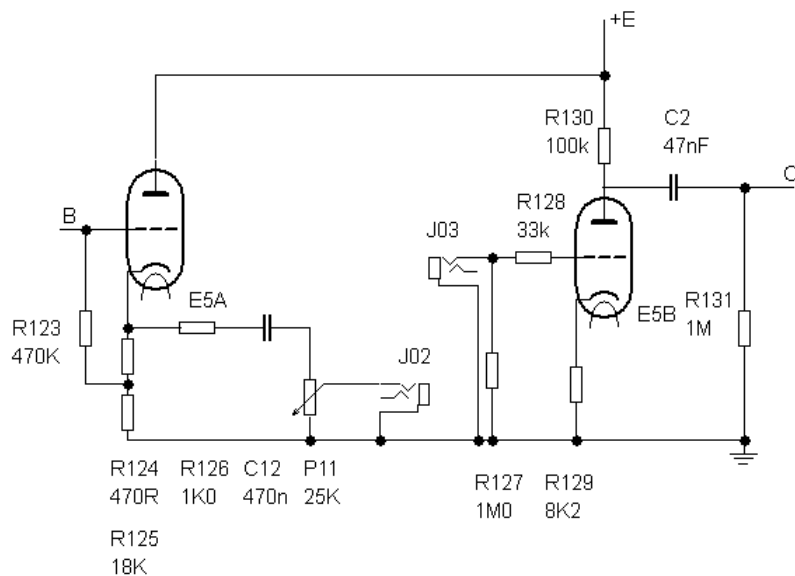
Schémata zapojení



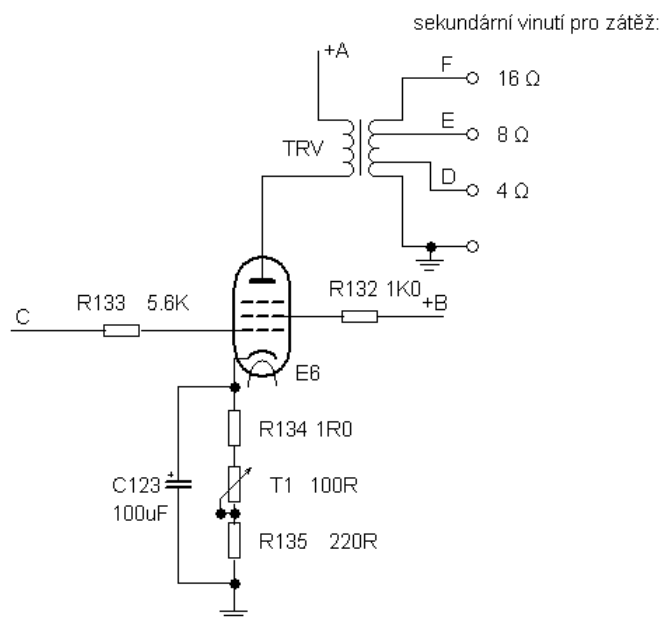
Obr. A.1: Schéma zapojení prvního kanálu předzesilovače



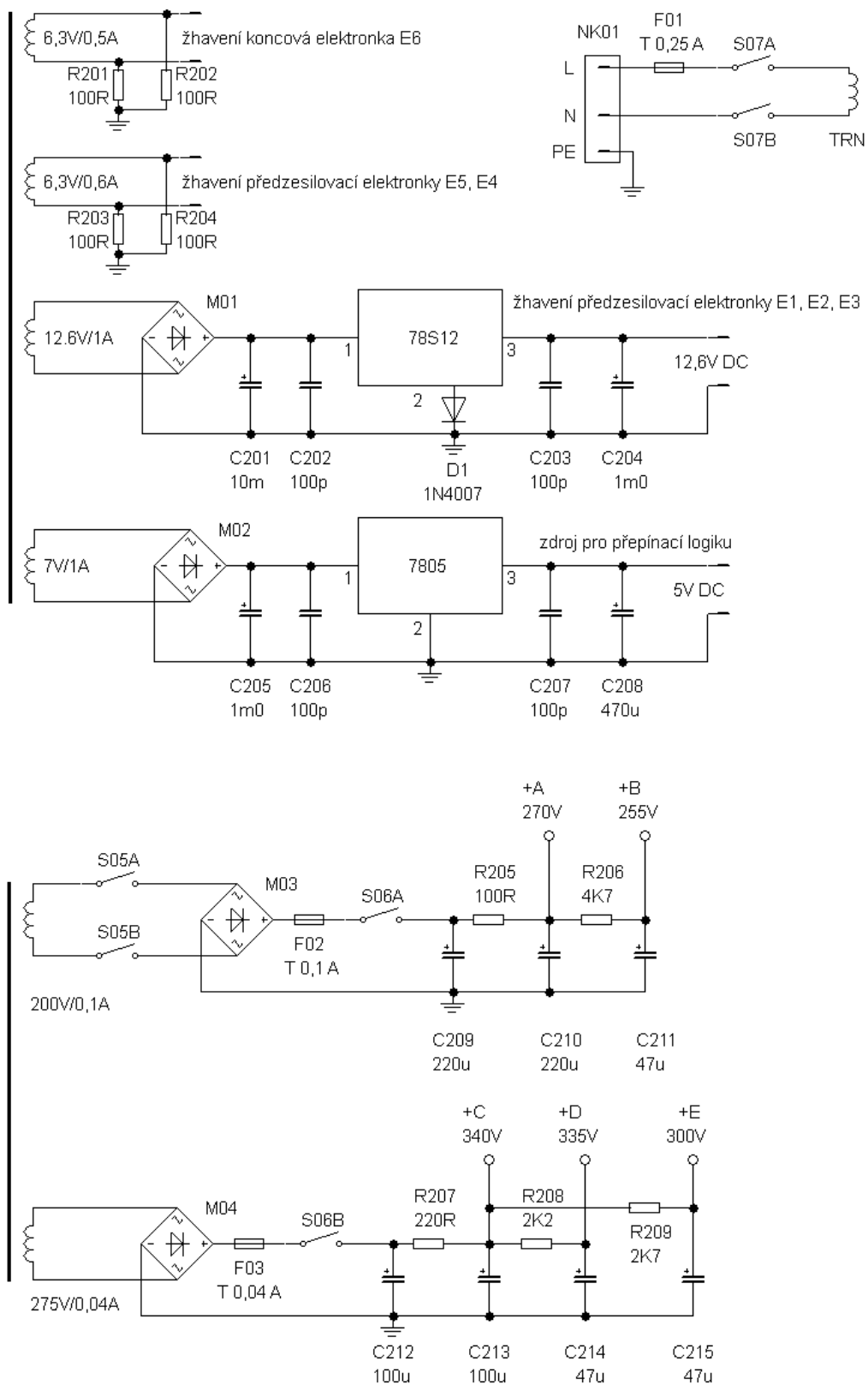
Obr. A.2: Schéma zapojení druhého kanálu předzesilovače



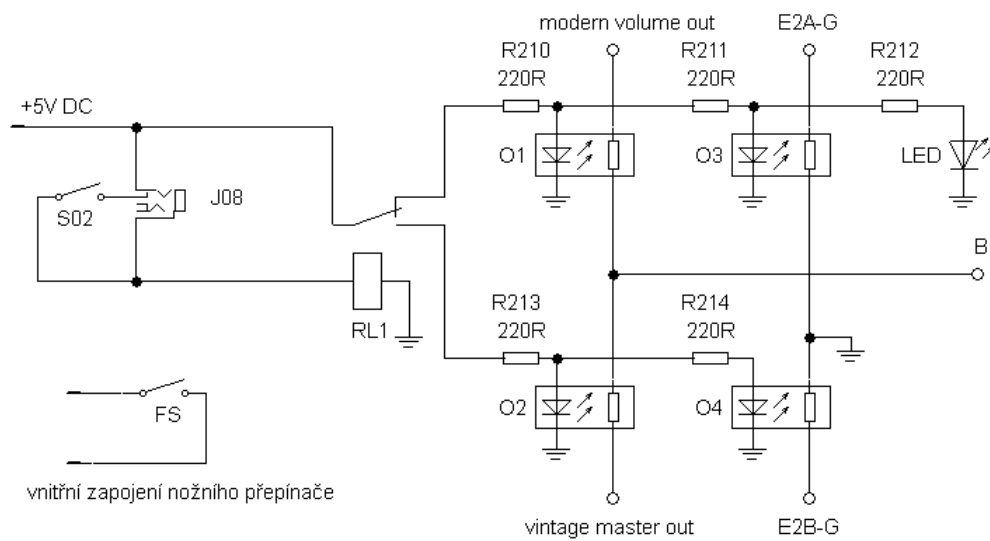
Obr. A.3: Schéma zapojení efektové smyčky



Obr. A.4: Schéma zapojení koncového stupně



Obr. A.5: Schéma zapojení napájecího zdroje



Obr. A.6: Schéma zapojení přepínací logiky

Příloha B

Tabulky

zdroj	volba	volba	volba	výpočet	výpočet	měření	měření	výpočet	graf	výpočet
	U_n [V]	R_a [k Ω]	R_k [k Ω]	$I_{a\ max}$ [mA]	I_a [mA]	U_k [V]	U_{ak} [V]	R_p [k Ω]	R_i [k Ω]	A_u [-]
E1A	300	220	1,5	1,36	0,77	1,15	135	153	80	65,5
E2A	300	100	1,5	3	0,91	1,37	175	100	67	60,0
E4A	300	0	47	6,38	3,77	177	123		47	1,0
E1B	335	150	1,8	2,23	0,93	1,68	194	130	80	62,0
E2B	335	100	1,8	3,35	1,06	1,9	232	77	67	54,0
E3A	335	100	39	3,35	0,10	3,87	324	91	200	2,4
E3B	340	100	1,8	3,4	0,99	1,78	236	100	80	56,0
E4B	340	0	100	3,4	2,40	240	105		100	1,0
E5A	300	0	18,5	16,21	5,68	105	195		18,5	1,0
E5B	300	100	8,2	3	2,04	16,75	223	91	6	6,0

Tab. B.1: Naměřené a vypočítané hodnoty pro předzesilovač

pozice	kondenzátor	C_v [pF]	rezistor	R_v [k Ω]	f_m [Hz]
E1A - E2A	C102	0,5	P1	500	576
E1A - E2A	C103	10,5	P1	500	27
E1B - E2B	C111	2,2	P5	1000	69
E2B - E3A	C114	22	R115	330	20
E3A - E3B	C115	22	R118	1000	7
E5A - E5B	C121	470	R126 + P11	26	8
E5B - E6	C122	47	R131	1000	3

Tab. B.2: Vypočítané hodnoty mezních frekvencí pro vazební články

pozice	kondenzátor	C_k [μ F]	rezistor	R_k [Ω]	f_m [Hz]
E1A	C101	22	R104	1500	5
E2A	C105	22	R106	1500	5
E1B	C110	1	R112	1800	88
E2B	C113	0,47	R114	1800	188
E3B	C124	1	R120	1800	88
E6	C123	100	R134 + R135 + T1	270	6

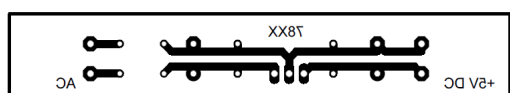
Tab. B.3: Vypočítané hodnoty mezních frekvencí pro filtry typu horní propust v katodách elektronek

R101	1M0	R201	100R	C201	10m/25V	S05 - S07	kolébkový
R102	68K	R202	100R	C202	100p		
R103	220K	R203	100R	C203	100p	RL1	M4-5-H
R104	1K5	R204	100R	C204	1m0/25V		
R105	100K	R205	100R	C205	1m0/16V	J01 - J08	stereo
R106	1K5	R206	4K7	C206	100p		jack
R107	47K	R207	220R	C207	100p	O1 - O4	H11F1
R108	100K	R208	2K2	C208	470u/16V		
R109	10K	R209	2K7/5W	C209	220u/440V	LED	červená
R110	68K	R210	220R	C210	220u/440V		3 mm
R111	150K	R211	220R	C211	47u/400V		
R112	1K8	R212	220R	C212	100u/450V	NK01	KES
R113	100K	R213	220R	C213	100u/450V		1/F63A
R114	1K8	R214	220R	C214	47u/400V	TRN	Tronic
R115	330K	R140	22k	C215	47u/400V		toroidní
R116	100K	C101	22u			TRV	Tronic
R117	39K	C102	500p	D1	1N4007		EI jádro
R118	1M0	C103	10n	M01, M02	KBU8J		
R119	100K	C104	100p	M03, M04	KBPC610W		
R120	1K8	C105	22u	F01	T 250 mA		
R121	100K	C106	50p	F02	T 100 mA		
R122	47K	C107	22n	F03	T 40 mA		
R123	470K	C108	22n				
R124	470	C109	22n	T1	100R/4W		
R125	18K	C110	1u0	P1	500K A		
R126	1K0	C111	2n2	P2	1M0 A		
R127	1M0	C112	1n0	P3	1M0 A		
R128	33K	C113	u47	P4	1M0 A		
R129	8K2	C114	22n	P5	1M0 A		
R130	100K	C115	22n	P6	250K B		
R131	1M0	C116	500p	P7	1M0 A		
R132	1K0	C117	22n	P8	25K B		
R133	5K6	C118	22n	P9	1M0 A		
R134	1R0	C119	2n2	P10	25K B		
R135	220R	C120	22n	P11	25K A		
R136	2R2/5W	C121	470n	P12	10K A		
R137	4R7/5W	C122	47n				
R138	10K	C123	100u	S01, S02	páčkový, mini		
R139	8R2/5W	C124	1u0	S03, S04	páčkový, velký		

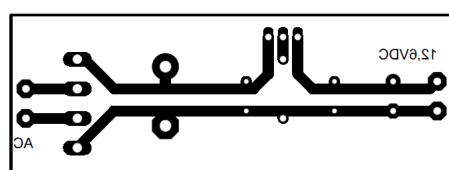
Tab. B.4: Rozpis součástek

Příloha C

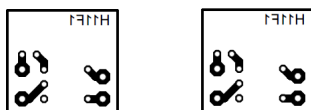
Desky plošných spojů



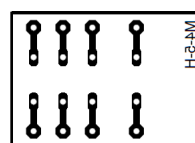
(a) pro zdroj napětí 5V DC



(b) pro zdroj napětí 12,6V DC



(c) pro dva optočleny H11F1



(d) pro signálové relé M4-5-H

Obr. C.1: Návrh desek plošných spojů

Příloha D

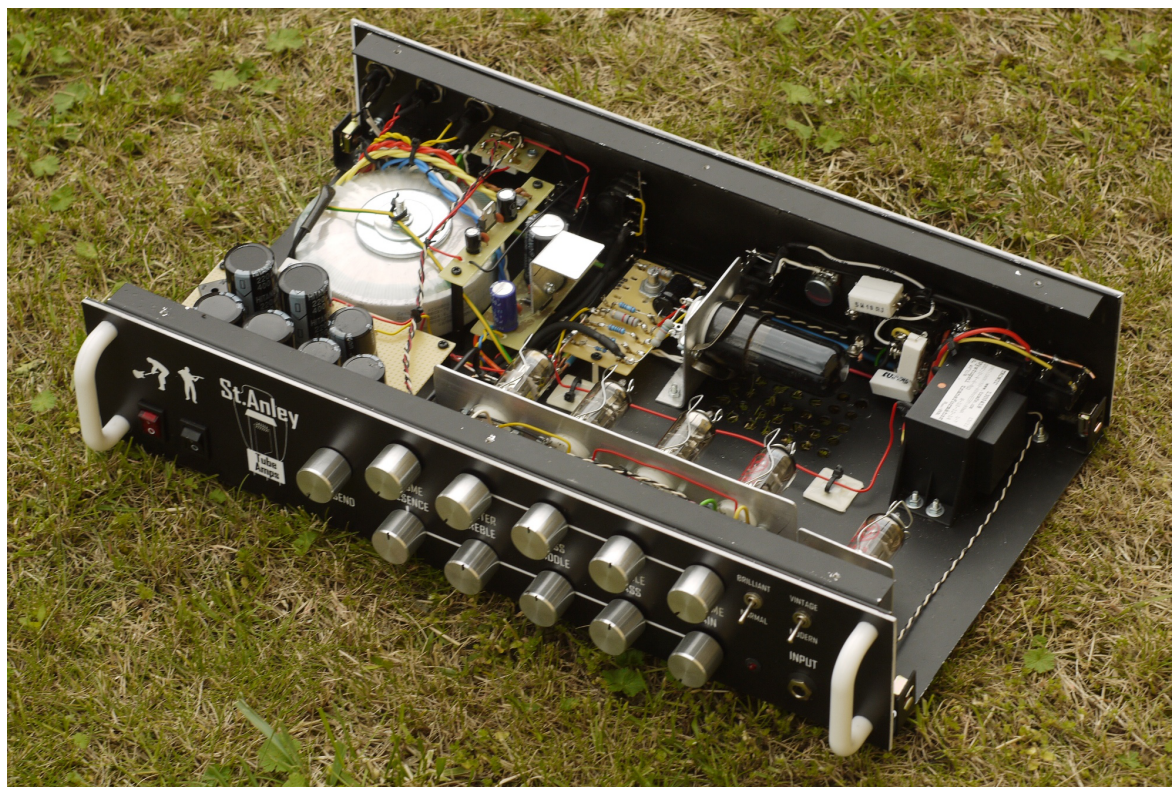
Fotografie dokončeného zařízení



Obr. D.1: Pohled na sestavené zařízení - přední



Obr. D.2: Pohled na sestavené zařízení - zadní



Obr. D.3: Pohled do otevřeného zařízení 1



Obr. D.4: Pohled do otevřeného zařízení 2