



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Stanovení technických požadavků kladených na elektronkový zesilovač pro kytaru a měření jeho technických parametrů

Autor práce: Tomáš Kos

Vedoucí práce: Ing. Jiří Stifter, Ph.D.

Plzeň 2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš KOS**
Osobní číslo: **E15B0065K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Stanovení technických požadavků kladených na elektronkový zesilovač pro kytaru a měření jeho technických parametrů**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Definujte/stanovte požadavky a technické parametry kladené na elektronkové kytarové zesilovače se zabudovaným reproduktorem (tzv. komba). Provedte rešerši vhodných modelů továrně vyráběných zařízení dostupných na trhu a vzájemně je porovnejte.
2. Popište funkci zapojení zrealizovaného elektronkového zesilovače (kopie modelu Fender Deluxe 57). Stanovte požadavky kladené na použité obvodové součástky ve zrealizovaném zesilovači, navrhňte případné úpravy zapojení/konstrukce s cílem zvýšení provozní spolehlivosti, zlepšení technických parametrů zařízení.
3. Seznamte se s platnými normami pro měření technických parametrů nf výkonových zesilovačů a reproduktorových soustav, navrhňte měřicí postup dle platných norem aplikovatelný na zrealizovaný zesilovač a změřte jeho technické parametry včetně elektroakustického měniče v zabudované ozvučnici zařízení.
4. Na základě výsledků měření navrhňte vhodné úpravy zařízení/komba s cílem zlepšení jeho technických parametrů, případně snížení finančních nákladů na realizaci.
5. Provedte detailní cenovou kalkulaci nákladů na realizaci celého zařízení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 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. Jiří Stifter, Ph.D.**


Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na popis kytarového zesilovače, jeho částí a stanovení parametrů kladených na elektronkový zesilovač. Dále se práce zabývá popisem funkce zrealizovaného zesilovače "Fender Deluxe 57". Podle schématu zrealizovaného zesilovače byly provedeny simulace a následně ověřeny pomocí měření stanovených parametrů. Společně se zrealizovaným zesilovačem byl měřen tranzistorový zesilovač "Fender Frontman 15g". Zrealizovaný zesilovač byl porovnán s podobnými elektronkovými zesilovači.

Klíčová slova

Kytarový zesilovač, kytarové kombo, elektronkový zesilovač.

Abstract

Kos, Tomáš. *Determination of guitar tube amplifier technical parameters and his measurement* [Stanovení technických požadavků kladených na elektronkový zesilovač pro kytaru a měření jeho technických parametrů]. Pilsen, 2017. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Jiří Stifter

This thesis is focused on description of the guitar amplifier, its parts and the determination of the parameters placed on the tube amplifier. Further, the thesis deals with the description of the function of the realized "Fender Deluxe 57" amplifier. According to the scheme of the realized amplifier, simulations were performed and subsequently verified by measuring the specified parameters. The transistor amplifier of "Fender Frontman 15g" was simultaneously measured with the realised amplifier. The realised amplifier was compared with similar tube amplifiers.

Keywords

Guitar amplifier, guitar combo, tube amplifier.

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 7. června 2017

Tomáš Kos

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam symbolů a zkratek	ix
1 Úvod	1
2 Popis kytarového zesilovače	2
2.1 Kytarové snímače	2
2.2 Kytarové efekty	3
2.3 Členění zesilovačů dle použitých součástí	3
2.4 Členění zesilovačů dle konstrukčního provedení	4
3 Technické parametry kladené na elektronkové zesilovače	5
3.1 Akustické veličiny	5
3.1.1 Hladina akustického tlaku	5
3.1.2 Hladina akustického výkonu	5
3.1.3 Maximální hladina akustického tlaku	6
3.2 Jmenovitý výstupní výkon zesilovače	7
3.3 Frekvenční rozsah	7
3.4 Vstupní citlivost zesilovače	8
3.5 Nelineární zkreslení	8
3.5.1 Amplitudové zkreslení	8
3.5.2 Harmonické zkreslení	9
3.5.3 Intermodulační zkreslení	9
3.6 Vstupní impedance zesilovače	9
3.7 Charakteristická citlivost reproduktoru	10
3.8 Mikrofoničnost	10
3.9 Třídy zesilovačů	11
3.10 Provedení ozvučnice	11

4	Popis funkce zrealizovaného zesilovače	13
4.1	Předzesilovač s korekcemi	13
4.1.1	Korekce	15
4.1.2	Společná předzesilovací elektronka	15
4.2	Fázový invertor	15
4.3	Výkonový zesilovač	16
4.4	Napájecí zdroj	17
5	Simulace zrealizovaného zesilovače	18
6	Měření parametrů zesilovačů a reproduktoru	19
6.1	Měření časových průběhů	20
6.2	Měření frekvenčních charakteristik zesilovačů	22
6.2.1	Akustická měření reproduktoru v ozvučnici	25
7	Porovnání zrealizovaného zesilovače s továrně vyráběnými zařízeními	27
7.1	Porovnání zrealizovaného zesilovače s Fender Deluxe 57	27
7.2	Porovnání zrealizovaného zesilovače s podobnými zařízeními jiných značek	27
8	Vhodné úpravy zapojení na zrealizovaném zesilovači	29
9	Závěr	31
	Reference, použitá literatura	32
	Přílohy	34
A	Cenová kalkulace a kusovník zrealizovaného zesilovače	34
B	Schéma zapojení zrealizovaného zesilovače	37
C	Výkresy zrealizovaného zesilovače	39
D	Simulace dle schémat zesilovačů	43
E	Frekvenční charakteristiky reproduktorů	47
F	Fotografie zrealizovaného zesilovače	49

Seznam obrázků

2.1	Blokové schéma cesty signálu	2
2.2	Pasivní kytarové snímače	3
2.3	Zleva: Fender '57 CUSTOM DELUXE Převzato z [15] , Marshall JCM900 Převzato z [16] , Rackové provedení Převzato z [17] 	4
3.1	Blokové schéma měření jmenovitého výkonu	7
3.2	Křivky hladin stejné hlasitosti Převzato z [6] 	8
3.3	Druhy amplitudového zkreslení	9
3.4	Blokové schéma pro měření vstupní impedance vlevo pro vyvážený vstup a vpravo pro nevyvážený vstup Převzato z [10] 	10
3.5	Třídy zesilovačů	11
3.6	Provedení ozvučnice	12
4.1	Předzesilovač s korekcemi	13
4.2	Fázový invertor	15
4.3	Výkonový zesilovač	16
4.4	Napájecí zdroj	17
5.1	Simulace napěťového zesílení předzesilovače a společného předzesilovače . .	18
6.1	Fotografie Fender Frontman 15g vlevo a kopie Fender Deluxe 57 vpravo . . .	19
6.2	Měření napěťového průběhu invertoru (invertující vlevo a neinvertující vpravo)	20
6.3	Měření napěťového průběhu předzesilovačů (předzesilovač vlevo a společný předzesilovače vpravo)	20
6.4	Měření kmitání při maximálním zesílení	21
6.5	Detail kabeláže zrealizovaného zesilovače	21
6.6	Měření frekvenčních charakteristik s různým nastavením korekcí	22
6.7	Měření výkonu v závislosti na frekvenci	22
6.8	Harmonické zkreslení Fender Frontman 15g	23
6.9	Harmonické zkreslení kopie Fender Deluxe 57	24
6.10	Harmonické zkreslení síťovým brumem (střídavé žhavení červeně, stejno- směrné žhavení modře)	24
6.11	Měření reproduktoru	25

6.12	Frekvenční charakteristika reproduktoru Celestion G12M	26
6.13	Harmonické zkreslení reproduktoru Celestion G12M	26
7.1	Zleva: VOX AC15 Převzato z [19] , Marshall DSL15H Převzato z [21] , Orange OR15H Převzato z [20] 	28
8.1	Ochrana proti stejnosměrnému napětí	29
8.2	Předpětí elektronek koncového stupně a) individuální katodový rezistor, b) zapojení pro vyrovnání anodových proudů, c) zapojení pro vyrovnání anodových proudů s individuálními rezistory Převzato z [1] 	30
B.1	Schéma zapojení zrealizovaného zesilovače	38
C.1	Výkres sestavy zrealizovaného zesilovače	40
C.2	Výkres ozvučnice zrealizovaného zesilovače	41
C.3	Výkres šasi zrealizovaného zesilovače	42
D.1	Simulace frekvenčních charakteristik korekcí zesilovače Frontman 15g	43
D.2	Simulace frekvenčních charakteristik tónové clony zrealizovaného zesilovače kopie Fender Deluxe 57	44
D.3	Simulace frekvenční charakteristiky zrealizovaného zesilovače bez výstup- ního transformátoru	44
D.4	Ověření parametrů dvojité triody 12AX7	45
D.5	Ověření parametrů svazkové pentody 6V6	45
D.6	Stejnoseměrné napětí a proudy na jednotlivých součástkách	46
E.1	Frekvenční charakteristika reproduktoru Jensen P12R Převzato z [22] 	47
E.2	Frekvenční charakteristika reproduktoru Celestion G12M Převzato z [23] 	47
E.3	Frekvenční charakteristika reproduktoru Celestion G12 pod různými úhly od referenční osy reproduktoru Převzato z [24] 	48
E.4	Harmonické zkreslení reproduktoru Celestion G12 Převzato z [24] 	48
F.1	Pohled na kabeláž	49
F.2	Pohled zepředu	50
F.3	Pohled zezadu	50

Seznam tabulek

3.1	Vypočítané hodnoty akustického tlaku pro reproduktor Celestion G12M použitý ve zrealizovaném zesilovači	6
A.1	Cenová kalkulace kopie modelu Fender Deluxe 57	36

Seznam symbolů a zkratek

A_U	Napěťové zesílení
ČSN	Česká technická norma
DSP	Digital signal processor. Digitální signálový procesor.
FFT	Fast Fourier Transformation. Rychlá Fourierova transformace.
I_a	Proud anodou elektronky
L_p	Hladina akustického tlaku
L_P	Hladina akustického výkonu
NF	Nízkofrekvenční
p	Akustický tlak
p_0	Referenční akustický tlak
P_{ref}	Referenční akustický výkon
P_{MAX}	Maximální výkon
P	Výkon
R_a	Anodový zatěžovací rezistor
R_k	Katodový rezistor
R_p	Odporový trimr (proměnlivý rezistor)
R_z	Zatěžovací rezistor
RMS	Root Mean Square. Efektivní hodnota.
SPL	Sound Pressure level. Hladina akustického tlaku.
THD	Total harmonic distortion. Celkové harmonické zkreslení.
SPL_{MAX}	Maximal sound Pressure level. Maximální hladina akustického tlaku.
U_g	Napětí na mřížce elektronky
U_a	Napětí na anodě elektronky
VF	Vysokofrekvenční

1

Úvod

V roce 2013 jsem se rozhodl postavit si vlastní kopii elektronkového zesilovače. K realizaci jsem si vybral kytaristy uznávaný model kytarového komba Deluxe 57 od firmy Fender. Při realizaci jsem se řídil tovární dokumentací běžně dostupnou na webových stránkách firmy Fender a fotografiemi dostupnými na internetu.

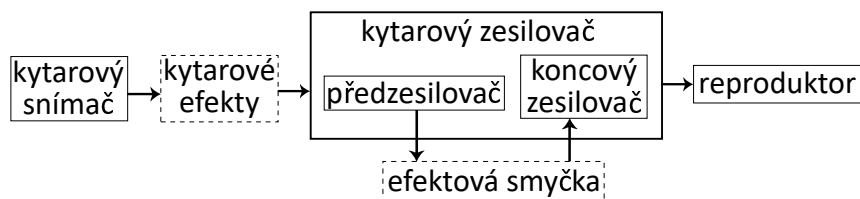
Cílem práce je stanovení technických parametrů a požadavků kladených na kytarový zesilovač. Porovnání továrně vyráběných modelů, detailní popis a následná simulace zrealizovaného zesilovače (kopie modelu Fender Deluxe 57) v programu PSpice. Dále se seznámit s platnými normami pro měření technických parametrů NF zesilovačů, reproduktorových soustav a navrhnout postup měření požadovaných parametrů.

Na základě provedeného měření navrhnout vhodné úpravy s cílem zvýšení provozní spolehlivosti, případně snížení finančních nákladů. Provést detailní cenovou kalkulaci nákladů na zrealizovaný zesilovač.

2

Popis kytarového zesilovače

Kytarový zesilovač je zařízení, které slouží k zesílení signálu kytary, popřípadě následnému žádanému zkreslení. Kytarový zesilovač se obvykle skládá z předzesilovače s korekcemi a koncového zesilovače. Na vstup zesilovače přivádíme signál z kytarových snímačů. Mezi kytarovým snímačem a vstupem zesilovače mohou být umístěny kytarové efekty, avšak mnoho moderních zesilovačů má efektovou smyčku, která je umístěna mezi předzesilovačem a koncovým zesilovačem. Z kytarového zesilovače přivádíme zesílený signál do reproduktorů. Celý proces je znázorněn na obrázku 2.1.



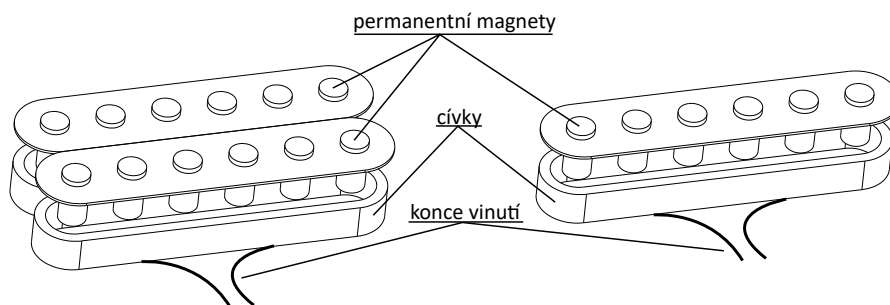
Obr. 2.1: Blokové schéma cesty signálu

2.1 Kytarové snímače

Kytarové snímače dělíme na aktivní a pasivní. Aktivní snímače pracují na stejném principu jako pasivní, s tím rozdílem, že signál je předzesilovačem zesílen už v kytaře a pro svojí funkci potřebují externí napájecí zdroj, většinou 9 V baterii.

Pasivní snímače dále dělíme na jedno-cívkové (single-coil) a dvou-cívkové (Humbucker). Skládají se z cívky navinuté okolo permanentních magnetů podle obrázku 2.2. Dvou-cívkový snímač se skládá ze dvou jedno-cívkových.

U kytarových snímačů se většinou udává parametr reálné složky impedance, který bývá od 2 až 15 k Ω , tento parametr závisí na materiálu permanentního magnetu a počtu závitů cívky. Čím je vyšší reálná složka impedance, tím docílíme vyššího napěťového zisku snímače. Výstupní napětí snímačů bývá většinou od 100 do 500 mV.



Obr. 2.2: Pasivní kytarové snímače

2.2 Kytarové efekty

Kytarový efekt je zařízení, ovlivňující signál z elektrické kytary, což se projevuje na výsledném reprodukováném zvuku. Nejčastěji používaný kytarový efekt, který je většinou implementovaný do kytarového zesilovače je dozvuk (reverb). Dozvuk může být analogový nebo digitální jako většina ostatních efektů.

Mezi kytarové efekty dále patří delay, overdrive, fuzz, boost, vibrato a mnoho dalších.

2.3 Členění zesilovačů dle použitých součástek

- Elektronkové zesilovače
- Hybridní zesilovače
- Tranzistorové zesilovače
- Zesilovače s DSP procesorem

První kytarové zesilovače byly elektronkové, což znamená, že elektronky byly v předzesilovači a koncovém zesilovači, popřípadě se používaly místo usměrňovacích diod.

Hybridní zapojení kombinuje použití elektronek a tranzistorů. Používá se z důvodu ušetření spotřeby a cenové náročnosti na výměnu elektronek. Další výhodou je odstranění nutnosti impedančního přizpůsobení v podobě výstupního transformátoru, protože elektronka je použita jen v předzesilovači.

Tranzistorové zesilovače mají v předzesilovači zkreslující obvody, aby docílily podobného zvuku jako elektronkové zesilovače. U dražších zesilovačů s vyššími výkony v řádech stovek wattů je koncový stupeň tvořen výkonovými tranzistory a pro nižší výkony je většinou použito levnější provedení v podobě integrovaných NF zesilovačů.

Zesilovače s DSP procesorem nejprve analogový signál z kytary digitalizují a následně upraví, čímž dochází k simulaci známých kytarových zesilovačů a efektů.

2.4 Členění zesilovačů dle konstrukčního provedení

- Kytarové kombo
- Kytarová hlava s reproboxem
- Rackové provedení s reproboxem

Kytarové kombo je konstrukční řešení, které zahrnuje zesilovač i ozvučnici do jednoho zařízení. Toto řešení je nejvýhodnější z hlediska snadné mobility. Případnou nevýhodou tohoto řešení je, že reprodukováný zvuk může být ovlivňován vlastním zesilovačem, což znamená, že skrze elektronky vlivem mikrofoničnosti může docházet k zavedení kladné zpětné vazby a následkem toho dojít k nepříjemnému pískání. Elektronková kytarová komba jsou realizována s otevřenou ozvučnicí z důvodu chlazení elektronek.

Řešením pro omezení kladné zpětné vazby vlivem mikrofoničnosti elektronek je kytarová hlava s reproboxem, kde je zesilovač umístěn odděleně od ozvučnice. Ozvučnice bývá uzavřená a obsahuje většinou více reproduktorů s přepínačem, který je určen k změně impedance, což je realizováno sérioparalelní kombinací reproduktorů. Nevýhodou je složitější mobilita a s tím často spjatá vyšší cena.

Obvykle nejdražším řešením je provedení do rackové skříně, které má velkou výhodu v možnosti snadné změny jednotlivých prvků zesilovače, z čehož vyplývá výhoda modularity a následně možnost najít si originální zvuk. V rackovém provedení se vyrábějí kytarové efekty, ladičky a bezdrátové systémy pro přenos signálu kytary. Velkou výhodou je robustní provedení.



Obr. 2.3: Zleva: Fender '57 CUSTOM DELUXE |Převzato z [15]|, Marshall JCM900 |Převzato z [16]|, Rackové provedení |Převzato z [17]|

3

Technické parametry kladené na elektronkové zesilovače

3.1 Akustické veličiny

3.1.1 Hladina akustického tlaku

Akustický tlak je střídavá veličina u které rozeznáváme efektivní, okamžitou a maximální hodnotu. Akustický tlak může mít různou hodnotu od nuly do nekonečna. Pro účely v akustice stačí uvažovat rozsah, který lidské ucho vnímá. Při velmi malém tlaku ucho nic nevnímá, zvukový vjem začíná až při určitém minimálním tlaku, tzv. práhu slyšení a při příliš vysokém překračuje práh bolesti, který není vnímán jako zvuk, nýbrž hlavně jako bolestivý pocit[1].

Hladina akustického tlaku se udává jako dvacetinásobek dekadického logaritmu poměru uvažovaného akustického tlaku p k referenčnímu akustickému tlaku p_0 . Referenční akustický tlak byl stanoven z práhu slyšení průměrného posluchače při frekvenci 1 kHz a jeho hodnota $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$. Hladinu akustického tlaku L_p vypočteme z výrazu:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [dB] \quad (3.1)$$

3.1.2 Hladina akustického výkonu

Hladina akustického výkonu je definována jako desetinasobek dekadického logaritmu poměru uvažovaného akustického výkonu P k referenčnímu akustickému výkonu P_{ref} . Hodnota referenčního akustického výkonu $P_{ref} = 10^{-12}W$. Hladinu akustického výkonu L_P vypočteme z výrazu:

$$L_P = 10 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad [dB] \quad (3.2)$$

3.1.3 Maximální hladina akustického tlaku

Parametr SPL_{MAX} udává úroveň maximální hladiny akustického tlaku, kterou je reproduktor schopný vyzářit při maximálním výkonu. Lze jí spočítat z charakteristické citlivosti a maximálního příkonu reproduktoru. Pro zjednodušení výpočtu lze uvažovat, že při zvýšení výkonu dodávaného do reproduktoru o jeden řád stoupne hladina akustického tlaku při stejné vzdálenosti o 10 dB a při zdvojnásobení výkonu stoupne hladina o 3 dB [6].

Pro zrealizovaný zesilovač jsem použil reproduktor s charakteristickou citlivostí 98 dB a maximálním výkonem P_{MAX} 25 W. Takže maximální hladina akustického tlaku pro vzdálenost jeden metr od reproduktoru se vypočte z výrazu (3.3), kde P je výkon při měření charakteristické citlivosti.

$$SPL_{MAX} = \text{char. citlivost} + 10 \log \frac{P_{max}}{P} \approx 112 \quad [dB] \quad (3.3)$$

Při hraní na kytaru je běžná vzdálenost od reproduktoru 1 až 4,5 metru. Hodnota SPL_{MAX} je definována na vzdálenost r_1 jednoho metru, proto je třeba hodnotu akustického tlaku přepočítat pro danou vzdálenost. Pokud budeme reproduktor uvažovat jako bodový zdroj, tak hladina akustického tlaku SPL na vzdálenost r_2 dvou metrů bude:

$$SPL = SPL_{max} + 20 \log \frac{r_1}{r_2} \approx 106 \quad [dB] \quad (3.4)$$

(a) Hladina akustického tlaku pro různou vzdálenost při výkonu 25 W

Vzdálenost [m]	Hladina akustického tlaku [dB]
1	112
1,5	108,5
2	106
2,5	104
3	102,4
3,5	101
4	100
4,5	98,9

(b) Hladina akustického tlaku pro různé výkony na vzdálenost 1 metr

Výkon [W]	Hladina akustického tlaku [dB]
3	102,7
6	105,8
9	107
12	108,8
15	109,8
18	110
21	111,2
24	111,8

Tab. 3.1: Vypočítané hodnoty akustického tlaku pro reproduktor Celestion G12M použitý ve zrealizovaném zesilovači

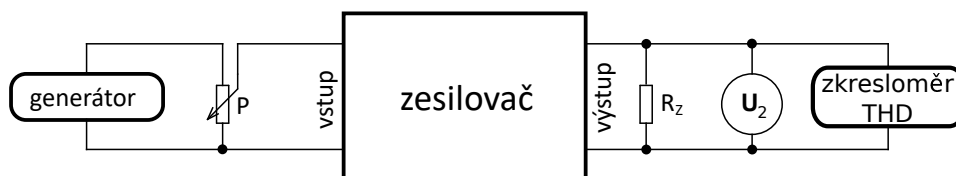
Z tabulky (3.1) je patrné, že když zdvojnásobíme vzdálenost od bodového zářiče (reproduktoru), dojde k poklesu hladiny akustického tlaku o 6 dB. Pro sólové hraní je postačující maximální hladina akustického tlaku 106 dB. K docílení akustického tlaku 106 dB při použití reproduktoru Celestion G12M na vzdálenost 1 metr je potřebný výkon zesilovače 6 wattů. Hladina akustického tlaku se měří pomocí zvukoměru.

3.2 Jmenovitý výstupní výkon zesilovače

Jmenovitý výkon zesilovače je nejčastěji uváděný parametr u kytarových zesilovačů, přesto však nutně neznamená, že vyšší výkon má za následek vyšší hlasitost. Výkon zesilovače volíme podle toho, jestli chceme zesilovač užívat k domácímu použití (sólovému hraní) nebo v hudební skupině. K domácímu použití postačuje zesilovač s výkonem do 15 W, při použití v hudební skupině je zapotřebí vyššího výkonu od 50 W do 100 W.

Při měření výstupního výkonu je důležité udržet konstantní napájecí napětí zesilovače. Jmenovitý výkon se obvykle měří při frekvenci generátoru 1 kHz. Zátěž R_Z volíme podle dimenzování konkrétního zesilovače většinou 4,8 nebo 16 Ω . Jmenovitý výkon výrobci většiny kytarových zesilovačů uvádějí při zkreslení THD=5 %.

Postup měření podle obrázku 3.1 spočívá v nastavení potenciometru P na hladinu zkresloměru THD=5 % a následném odečtení hodnoty z voltmetru U_2 . Následný výstupní výkon se vypočítá podle vzorce (3.5)[10].



Obr. 3.1: Blokové schéma měření jmenovitého výkonu

$$P_{vyst} = \frac{U_2^2}{R_Z} \quad [W] \quad (3.5)$$

3.3 Frekvenční rozsah

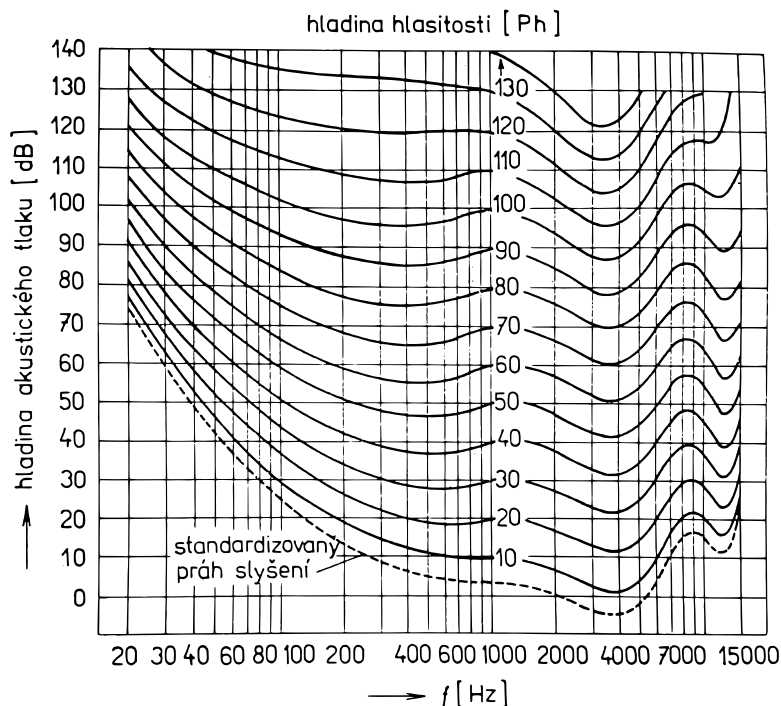
Práh slyšení a bolesti nejsou stejné při všech kmitočtech, ale probíhají podle křivek stejné hlasitosti znázorněných na obrázku 3.2. Tyto křivky se nazývají izofóny.

Obvykle se udává, že frekvenční oblast slyšitelnosti je od 16 Hz do 20 kHz. Pro elektronkové zesilovače je charakteristické, že mají výstupní transformátor, který omezuje nízké kmitočty, a proto nejsou vhodné pro basové kytary. Na omezení frekvenčního pásma má největší vliv reproduktor, který se pro kytarová a basová komba používá nejčastěji širokopásmový.

Nejnižší tón basové kytary je E_1 s frekvencí 41 Hz a nejnižší tón sólové kytary je E_2 s frekvencí 82 Hz, z tohoto důvodu je třeba pro basové kytary vybírat reproduktory s dolním mezním kmitočtem od 40 Hz a pro sólové kytary od 80 Hz. Pro elektrické sólové kytary je frekvenční rozsah reproduktorů obvykle od 70 Hz do 5-8 kHz a pro basové kytary od 40 Hz do 3,5 kHz.

Z obrázku 3.2 vyplývá, že k docílení stejné hlasitosti pro nejnižší tón basové kytary bude třeba v průměru o 10 dB vyššího akustického tlaku než pro sólovou kytaru. Repro-

duktory pro basové zesilovače mají nižší citlivost. Z těchto důvodů jsou basové zesilovače dimenzovány na vyšší výkony.



Obr. 3.2: Křivky hladin stejné hlasitosti |Převzato z [6]|

3.4 Vstupní citlivost zesilovače

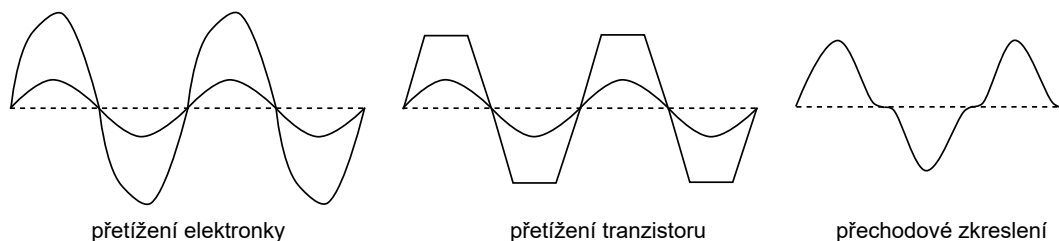
Vstupní citlivost zesilovače je parametr udávající hodnotu nejmenšího napětí, které je schopné vybudit zesilovač na maximální výkon. Velikost napětí signálu záleží na kvalitě snímače kytary, průřezu strun a dynamice úhozu.

3.5 Nelineární zkreslení

3.5.1 Amplitudové zkreslení

Pro zjištění amplitudového zkreslení stačí měřit u zesilovače zesílení pro různé velikosti vstupního signálu. Bude-li přenosová charakteristika nelineární je zesílení v určité míře závislé na vybuzení zesilovače a odchylka skutečného zesílení od teoretického je měřítkem amplitudového zkreslení.

Na obrázku 3.3 je znázorněn rozdíl mezi přetížením "clippingem" elektronky a tranzistoru. U elektronky dochází k jemnějšímu omezení, což se považuje za muzikálnější než u tranzistoru, kde dochází k ostrému omezení[7]. Při zapojení ve třídě AB je důležité volit pracovní bod v lineární oblasti elektronky, jinak dochází k přechodovému zkreslení "crossover distortion".



Obr. 3.3: Druhy amplitudového zkreslení

3.5.2 Harmonické zkreslení

U harmonického zkreslení je zjišťována změna kmitočtového spektra signálu. Přivedeme-li na vstup zesilovače jediný signál se sinusovým kmitočtem, tak průchodem nelineárními prvky zesilovače vznikne zkreslený signál, který obsahuje celou řadu kmitočtových složek, které v původním signálu nebyly obsaženy.

Poměr efektivní hodnoty vyšších harmonických složek k první harmonické složce je definován jako činitel harmonického zkreslení THD. Pro výkony jako poměr sumy všech výkonů k výkonu základní harmonické, dle vzorce (3.6)[9][6].

$$THD = \frac{P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_n}{P_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.6)$$

Pro napětí vypočteme celkové harmonické zkreslení dle vzorce (3.7). Kde U_1 je efektivní hodnota celkového výstupního napětí[9].

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.7)$$

Měřit harmonické zkreslení je možné zkresloměrem nebo spektrálním analyzátozem. Často se udává, že elektronky přednostně generují sudé harmonické složky a tranzistory liché.

3.5.3 Intermodulační zkreslení

Intermodulační zkreslení vzniká tehdy, jsou-li na vstup zesilovače přiváděny alespoň dva kmitočty. Potom dochází ke směšování obou kmitočtů a mimo harmonické složky vznikají složky součtové a rozdílové základních kmitočtů, všech vyšších harmonických a množství dalších kombinačních složek [5][6].

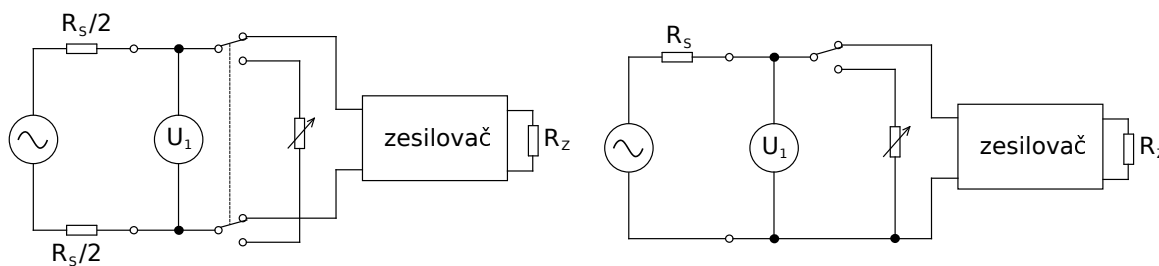
3.6 Vstupní impedance zesilovače

Snímače kytary generují napětí v řádech stovek milivolt, ale z důvodu velkého vnitřního odporu 2 až 15 k Ω jsou schopné dodávat jen malý proud, proto je třeba, aby vstupní impedance zesilovače byla vysoká nejlépe v řádech stovek k Ω . Nejmenšího napěťového útlumu kytarového snímače docílíme teoreticky při vstupní impedanci blížíící se nekonečnu,

což je prakticky nemožné, a proto se snažíme, aby vstupní impedance byla co největší. Vstupní impedance je kmitočtově závislá, z čehož vyplývá, že útlum signálu snímače bude odlišný pro různé frekvence[4]. Pro kytarové zesilovače je obvyklá hodnota vstupní impedance až $1\text{ M}\Omega$.

Podle obrázku 3.4 vlevo je vstupní napětí U_1 měřeno pomocí voltmetru s vyváženým vstupem, což znamená že zdroj signálu je neuzemněný. Impedance voltmetru je vysoká oproti vstupní impedanci zesilovače, aby se zamezilo zkreslení výsledků vlivem protékajícího proudu voltmetrem. Zesilovač je nahrazen kalibrovaným proměnným rezistorem, který je nastaven, aby ukazoval stejnou hodnotu U_1 jako při připojení na vstupu zesilovače. Hodnota proměnného rezistoru je potom rovna modulu vstupní impedance zesilovače při standardní referenční frekvenci, obvykle 1 kHz . Měření by mělo být opakováno na dalších frekvencích, přednostně v třetinooktávovém pásmu. Pozice potenciometru hlasitosti zesilovače může ovlivnit vstupní impedanci, proto je třeba změřit vstupní impedanci pro různé úrovně hlasitosti.

Pro nevyvážený vstup podle obrázku 3.4 vpravo postupujeme tak, že společnou vstupní svorku zdroje signálu uzemníme. Dále postupujeme stejně jako při měření vstupní impedance s vyváženým vstupem [8][10].



Obr. 3.4: Blokové schéma pro měření vstupní impedance vlevo pro vyvážený vstup a vpravo pro nevyvážený vstup |Převzato z [10]|

3.7 Charakteristická citlivost reproduktoru

Charakteristická citlivost reproduktoru je parametr udávající průměrnou velikost efektivního akustického tlaku v daném kmitočtovém pásmu, v akustické ose reproduktoru na vzdálenosti jednoho metru od referenčního bodu a při standardním příkonu 1 VA . Vyjadřuje se v hladině charakteristické citlivosti nad referenční hladinou $2 \cdot 10^{-5}\text{ Pa}$ [6].

3.8 Mikrofoničnost

Mikrofoničnost je vlastnost elektronky, která udává citlivost na zvukové a mechanické signály. Vlivem mikrofoničnosti může dojít k zavedení kladné zpětné vazby na vstup a dojít k samovolnému rozkmitání zesilovače.

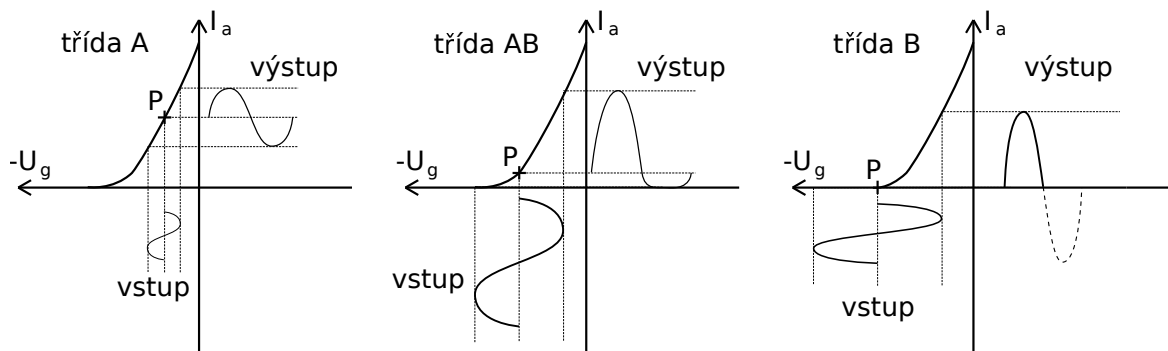
3.9 Třídy zesilovačů

U elektronkových zesilovačů ovlivňujeme velikostí klidového předpětí $-U_g$ na mřížce pracovní bod P . Umístění pracovního bodu je důležité z hlediska rozdělení do jednotlivých tříd zesilovačů. Pro elektronkové zesilovače to mohou být A, AB popřípadě B. Pracovní třídy lze snadno rozeznat z převodních charakteristik na obrázku 3.5, kde I_a je anodový proud.

Je-li pracovní bod umístěn do středu lineární části převodní charakteristiky, tak se jedná o třídu A. Pro zesílení signálu nám postačuje jedna elektronka. Tato třída má značnou nevýhodu v podobě velkého klidového proudu, který snižuje účinnost na 35 % až 45 % a negativně působí na životnost elektronky. Výstupní výkon zesilovače je maximálně v desítkách wattů. Výhodou je malé zkreslení.

Když pracovní bod umístíme na začátek převodní charakteristiky, tak klidový anodový proud je nulový, jde o třídu B. Jelikož je klidový anodový proud nulový je vysoká účinnost, prakticky 45 % až 60 %. Pro toto zapojení zesiluje každá elektronka jednu půlvlnu, takže potřebujeme dvě elektronky. Při zesílení malých úrovní signálů pracuje elektronka v nelineární oblasti a dochází k velkému přechodovému zkreslení.

Nevýhodu přechodového zkreslení při malých signálech lze odstranit posuneme-li pracovní bod těsně nad nelineární oblast charakteristiky, získáme tak třídu AB. Takový zesilovací stupeň pracuje při malé úrovni signálu ve třídě A a při velkém signálu pracuje ve třídě B. Třída AB je vhodná alternativa k získání velké účinnosti a malého zkreslení[6][1].



Obr. 3.5: Třídy zesilovačů

3.10 Provedení ozvučnice

- Desková ozvučnice
- Otevřená skříňová ozvučnice
- Uzavřená skříňová ozvučnice

Protože membrána reproduktoru vyzařuje na obě strany, tak je zapotřebí přední stranu od zadní oddělit, aby nedocházelo k akustickému spojení a tím redukcí vyzařování reproduktoru. Nejjednodušším způsobem oddělení je pomocí deskové ozvučnice. U tohoto provedení potřebujeme velmi rozměrnou desku abychom potlačili akustické spojení.

Rozměr ozvučnice můžeme redukovat použitím mělké skříňě, která je vzadu otevřená, nebo uzavřená jen zčásti. Hloubka by neměla být větší než polovina čelní hrany ozvučnice, protože by se mohla uplatnit vlastní rezonance vnitřního prostoru. Toto řešení nazýváme otevřená skříňová ozvučnice. Otevřené provedení je vhodné pro elektronkové zesilovače z důvodu potřebného chlazení elektronek. Při tomto provedení může nastat zavedení kladné zpětné vazby vlivem mikrofoničnosti elektronek.

Pro uzavřenou skříňovou ozvučnici sice odstraníme akustické spojení, ale vznikne problém v tom, že uzavřený prostor se chová jako vzduchový polštář a klade odpor pohybu membrány. K zamezení vzniku rušivých stojatých vln jsou většinou stěny ozvučnice obloženy porézním materiálem, absorbujícím akustickou energii. Uzavřená ozvučnice se používá jen u tranzistorových kytarových zesilovačů nebo elektronkových při provedení s repro-boxem. Objem ozvučnice se volí podle parametru ekvivalentního objemu, který je většinou uveden v katalogovém listu reproduktoru[5][6].



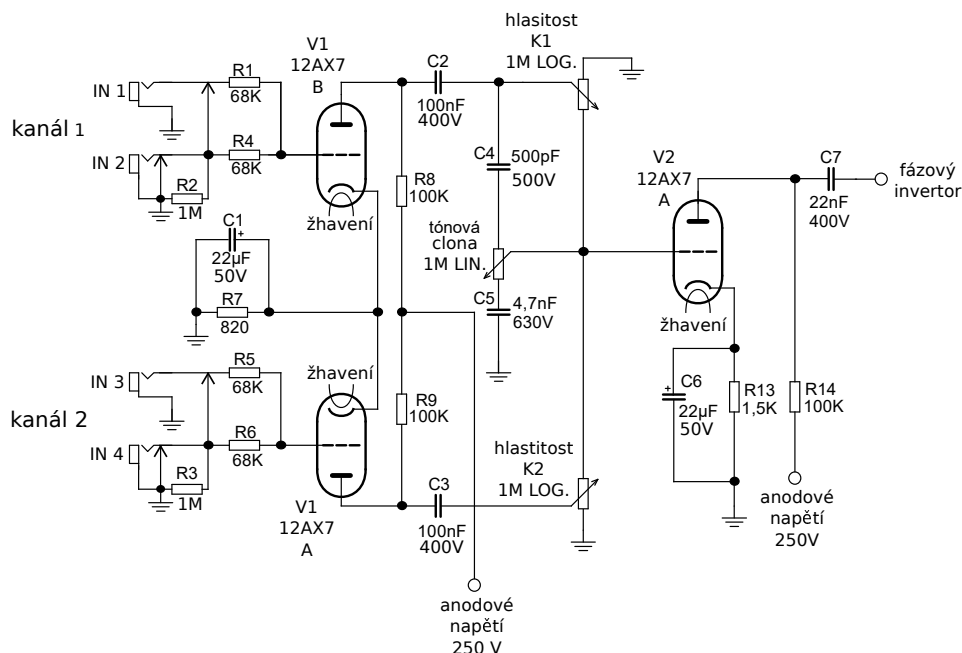
Obr. 3.6: Provedení ozvučnice

4

Popis funkce zrealizovaného zesilovače

4.1 Předzesilovač s korekcemi

Zesilovač má celkem čtyři vstupy pro konektory "jack 6,3 mm" a dva kanály, což znamená dva vstupy na kanál. Oba kanály jsou na konci sloučené do jednoho a vedou na společnou předzesilovací elektroniku. Toto řešení je převzaté z originálního zapojení zesilovače Fender Deluxe 57, který je z roku 1957. V této době se kytarová komba používala nejen ke kytáře, ale také jako zesilovač k ostatním zařízením, protože zesilovače byly drahé.



Obr. 4.1: Předzesilovač s korekcemi

Šipky na obrázku 4.1 znázorňují odepínací kontakty, které slouží k úpravě vstupní impedance. Po zasunutí konektoru do vstupu IN 1 je vstupní impedance upravena rezistory R1 a R4, kde R4 je paralelně k vstupu. Rezistor R2 je v tomto případě vyzkratován spína-

čem ve vstupním konektoru IN 2 a vstupní impedance je tedy nízká odpovídající hodnotě rezistoru R4. Při zasunutí do konektoru IN 2 je vstupní impedance upravena paralelní kombinací R1 a R4 s rezistorem R2, který je paralelně k vstupu a vstupní impedance bude přibližně odpovídat hodnotě rezistoru R2. Pro druhý kanál je vstupní impedance analogicky upravena rezistory R3, R5 a R6.

První předzesilovací stupeň je realizován odděleně pro každý kanál pomocí dvojitě nepřímou žhavené triody s označením V1 12AX7B a V1 12AX7A. Jedná se o zapojení s anodovým napětím $U_a = 250V$. Anodový proud je podle katalogového listu $I_a = 1,2mA$. Hodnota zatěžovacího rezistoru R_a je zvolena tak, aby na ní vznikl úbytek rovný polovině napájecího napětí. Vypočteme dle vzorce (4.1) pro zatěžovací odpor R_a v našem případě R8 a R9[5][6][1].

$$R_{8,9} = \frac{1}{2} \frac{U_a}{I_a} = \frac{1}{2} \frac{250}{1,2} \approx 100 \quad [k\Omega] \quad (4.1)$$

Vyzářené teplo na zatěžovacích rezistorech vypočítáme ze vztahu(4.2).

$$P_{vyz.} = R_a I_a^2 = 100 \cdot 1,2^2 = 0,144 \quad [mW] \quad (4.2)$$

Klidové předpětí mřížky je nastaveno úbytkem napětí na katodovém rezistoru R_k v našem případě s označením R7, který je přemostěn blokovacím kondenzátorem C1. Blokovací kondenzátor slouží k zamezení vzniku střídavého napětí na rezistoru R7 a tím odstraňuje proudovou zpětnou vazbu. Hodnota blokovacího kondenzátoru C1 se vypočítá z výrazu (4.3). Kde f je frekvence omezující slyšitelné pásmo, čili 20 Hz[1].

$$C_1 = \frac{1}{2\pi R_k f} = 9,7 \approx 10 \quad [\mu F] \quad (4.3)$$

Z výpočtu je patrné, že hodnota 10 μF by byla dostačující, ale v našem případě bylo použito vyšší hodnoty, konkrétně 22 μF .

Předpětí mřížek elektronky V1 $U_g = 2V$ je dáno hodnotou rezistoru R7, který je společný pro oba kanály, a proto musíme uvažovat součet anodových proudů obou elektronek. Hodnota rezistoru R7 se vypočte podle vzorce (4.4). Jelikož hodnota 833 Ω není v řadě, vybereme hodnotu nejbližší, tedy 820 Ω . Vyzářené teplo podle vzorce (4.2) bude 4,7 mW.

$$R_k = \frac{U_g}{2 \cdot I_a} = \frac{2}{2 \cdot 1,2} = 833,33 \quad [\Omega] \quad (4.4)$$

Napěťové zesílení předzesilovače A_U je dáno vztahem (4.5), kde μ je zesilovací činitel, R_i je vnitřní odpor elektronky a R_a je anodový odpor.

$$A_U = \frac{\mu R_a}{R_a + R_i} = \frac{100 \cdot 10^5}{162 \cdot 000} = 61,5 \quad [-] \quad (4.5)$$

Kondenzátory C2 a C3 zastávají roli střídavé vazby mezi výstupem předzesilovače a vstupem na korekce a zároveň slouží k oddělení stejnosměrné napájecí složky předzesilovače.

4.1.1 Korekce

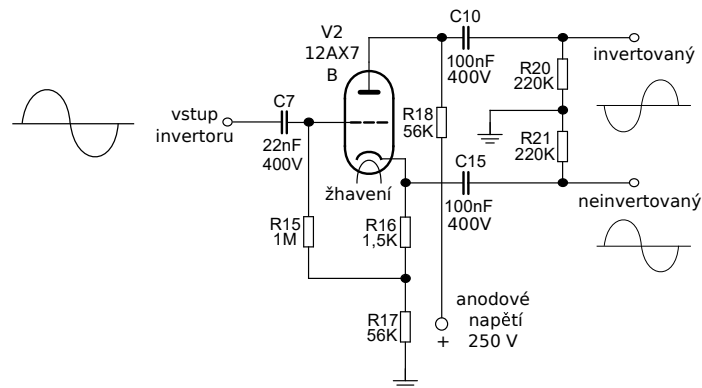
Každý kanál obsahuje regulaci hlasitosti v podobě logaritmického potenciometru K1 a K2 o hodnotě $1\text{ M}\Omega$. Dále je první kanál opatřen tónovou clonou, kterou zprostředkovává lineární potenciometr o hodnotě $1\text{ M}\Omega$ a kondenzátory C4 a C5, kde C5 zkratuje vysoké kmitočty, tudíž se jedná o potlačení výšek[1].

4.1.2 Společná předzesilovací elektronka

Společná předzesilovací elektronka je na obrázku 4.1 pod označením V2(12AX7A), parametry je shodná s předchozími předzesilovači, čili C6 je blokovací kondenzátor, R14 je zatěžovací rezistor v anodě, kondenzátor C7 je střídavá vazba mezi výstupem společného předzesilovače a vstupem invertoru, zároveň slouží k oddělení napájecí stejnosměrné složky. Liší se pouze vyšší hodnotou katodového rezistoru R13, protože je samostatný pro jednu elektronku. Hodnota mřížkového napětí $U_g = -1,8\text{ V}$ se nepatrně liší od hodnoty předzesilovače[1].

4.2 Fázový invertor

Protože společný předzesilovač je v jednočinném zapojení, čili jedna elektronka zesiluje obě půlvlny, tak k buzení koncového dvojčinného stupně, potřebujeme dvou signálních napětí stejné velikosti, ale opačné polarity. Z tohoto důvodu je použit fázový invertor v podobě triody V2(12AX7B).



Obr. 4.2: Fázový invertor

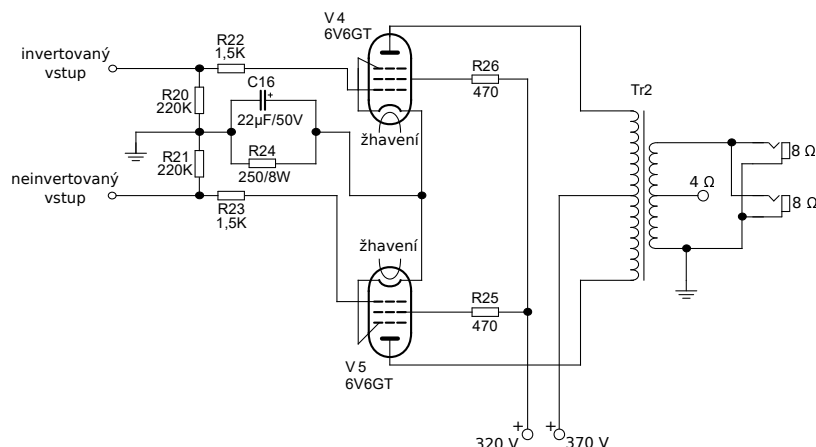
V tomto zapojení je použit invertor s rozdělenou zátěží, což znamená, že zatěžovací rezistor $R_a = 100\text{ k}\Omega$ je rozdělen na dva rezistory pod označením R18 a R19, které mají poloviční hodnotu tj. $56\text{ k}\Omega$ ($50\text{ k}\Omega$ není v řadě) a jsou umístěny do anodového a katodového přívodu. Stejná hodnota R18 a R19 je důležitá pro docílení souměrnosti invertoru. Rezistor R16 je katodový a vzniká na něm potřebné předpětí, které je přivedeno přes zpětnovazební rezistor R15 na mřížku invertoru. Kondenzátory C10 a C15 jsou vazební

mezi výstupem invertoru a vstupem koncového zesilovače a zároveň slouží k odstranění stejnosměrné napájecí složky invertoru.

U invertoru s rozdělenou zátěží nemají vlastnosti nebo stáří elektronky na souměrnost vliv. Fázový invertor je také známý jako obraceč fáze.

4.3 Výkonový zesilovač

Výkonový zesilovač pracuje ve třídě AB. Společný katodový rezistor R24 slouží k nastavení předpětí mřížek a je blokován kondenzátorem C16 z důvodu zamezení záporné proudové vazby. Ke stínícím mřížkám jsou připojeny rezistory R25 a R26, které mají za úkol snížit napájecí napětí. Rezistory R20 a R21 slouží k impedančnímu přizpůsobení a symetrizaci vstupu mřížek dvojčinného koncového stupně. Rezistory R22 a R23 přivedené na řídicí mřížky koncových elektronek plní funkci ochrany proti mřížkovým proudům při velkém buzení. Při tomto zapojení musí být použito párovaných koncových elektronek, z důvodu absence seřízení klidových anodových proudů.



Obr. 4.3: Výkonový zesilovač

Úkolem výstupního transformátoru dvojčinného zesilovače je spojit anodové obvody obou koncových svazkových tetrod, oddělit jejich stejnosměrné proudy od zátěže a přizpůsobit odpor zátěže odporu předepsanému pro koncové elektrony[1]. Výstupní transformátor by podle katalogového listu měl přenést výkon 15 W a parametry je určen pro typ zapojení s výstupními elektrónkami 6V6 nebo EL84.

Na primární straně transformátoru je vyvedený střed, který je připojen na kladnou elektrodu a konce vinutí jsou připojeny na anody koncových svazkových tetrod. Sekundární vinutí je vinuto s odbočkou pro reproduktory s impedancí 4 Ω a konec vinutí s impedancí 8 Ω .

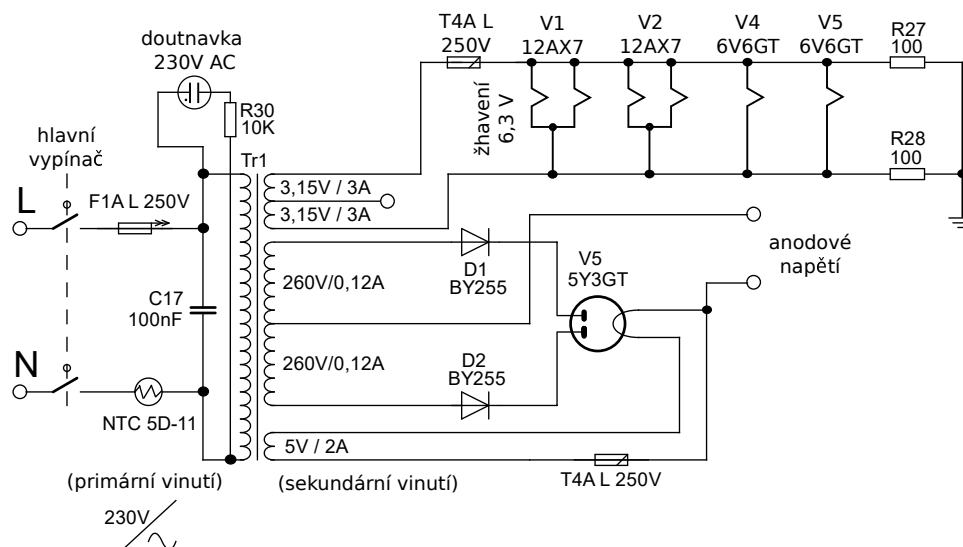
4.4 Napájecí zdroj

Síťový transformátor, který napájí celý zesilovač je svými parametry určen pro elektronkové zesilovače. Jedná se o transformátor, který podporuje zapojení s vyvedeným středem, a tudíž možnost usměrnění elektronkou. Na straně primárního vinutí je umístěn termistor NTC 5D-11 z důvodu omezení proudového rázu a rychlá pojistka F1A jako ochrana proti zkratu na zařízení. Dále je na primárním vinutí paralelně umístěn keramický kondenzátor C17, který slouží k filtraci VF signálu z 230 V sítě. K primárnímu vinutí je dále připojena doutnavka s předřadným rezistorem R30, doutnavka slouží jako indikace sepnutí hlavního spínače.

První ze třech sekundárních vinutí je určeno k napájení žhavení elektronek o hodnotě napětí 6,3 V a jako ochrana proti zkratu je použita pomalá pojistka T4A. Proud potřebný pro žhavení triod a koncových elektronek je vypočítán dle (4.6).

$$I_{celk.} = 2 \cdot I_{12AX7} + 2 \cdot I_{6V6GT} = 2 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,45 = 1,5 \quad [A] \quad (4.6)$$

Druhé vinutí je s vyvedeným středem o hodnotě 260 V vůči středu. Střed slouží jako záporná elektroda a konce vinutí jsou připojena k přímo žhavené dvojité diodě 5Y3GT, přičemž jsou pojištěny křemíkovými diodami D1 a D2. Usměrněné napětí je spínáno spínačem anodového napětí a to až po řádném ohřátí žhavení, což je zhruba za 5 minut. Třetí vinutí s hodnotou 5 V slouží k přímému žhavení dvojité diody 5Y3GT.

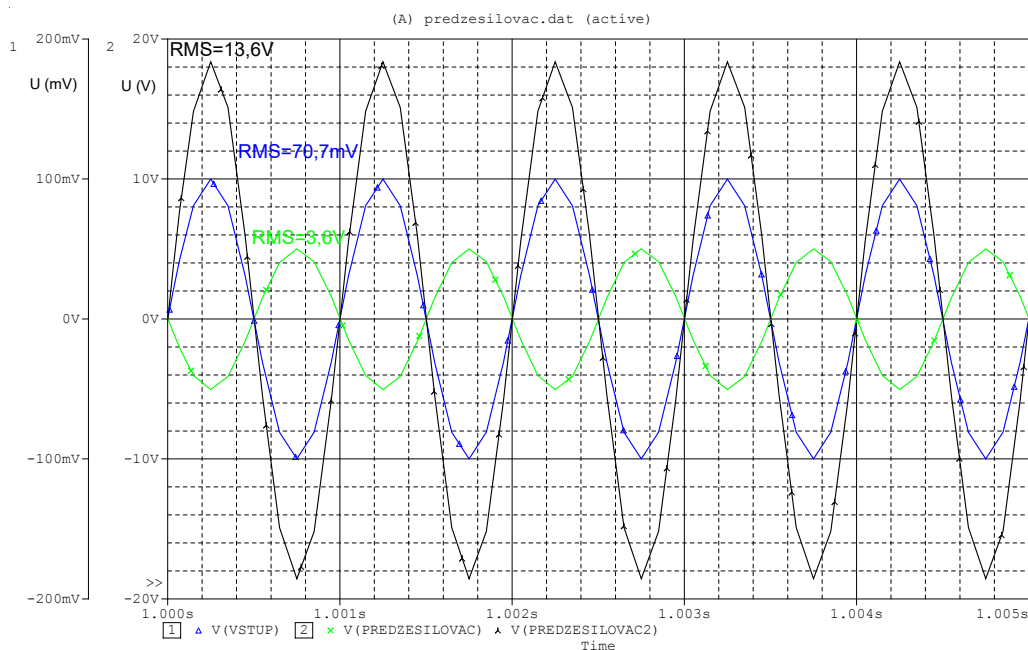


Obr. 4.4: Napájecí zdroj

5

Simulace zrealizovaného zesilovače

K simulaci zrealizovaného zesilovače jsem si vybral simulační program PSpice od firmy OrCAD. PSpice nedisponuje knihovnami s modely elektronek, a proto jsem musel vhodné knihovny dohledat na internetu [18]. V první řadě jsem simulací anodových charakteristik ověřil parametry elektronek 12AX7 na obrázku D.4 a 6V6 na obrázku D.5. Dále jsem simuloval transientní charakteristiku pro jednotlivé předzesilovací stupně, která je na obrázku 5.1, koncový stupeň se mi nepovedlo odsimulovat z důvodu neznámých parametrů výstupního transformátoru.



Obř. 5.1: Simulace napěťového zesílení předzesilovače a společného předzesilovače

Stejnou analýzou podle přiloženého obrázku D.6 jsem ověřil napětí a proudy jednotlivých součástek. Dále jsem simuloval frekvenční charakteristiku tónové clony s 1/10 krokem potenciometru, frekvenční charakteristiku předzesilovače a společného předzesilovače. U tranzistorového zesilovače Fender Frontman jsem simuloval frekvenční charakteristiku pro různá nastavení korekcí.

6

Měření parametrů zesilovačů a reproduktoru

K porovnání parametrů mezi elektronkovým a tranzistorovým zesilovačem jsme k měření použili zrealizovaný elektronkový zesilovač kopii Fender Deluxe 57 a továrně vyráběný tranzistorový zesilovač Fender Frontman 15g s podobným výkonem. Nejprve jsme změřili hodnotu reálné složky vstupní impedance, která nám vyšla pro Fender Frontman $466\text{ k}\Omega$ a pro zrealizovaný zesilovač $95,6\text{ k}\Omega$, z čehož plyne, že zrealizovaný zesilovač více snižuje napěťovou úroveň snímačů. Jako další parametr jsme změřili příkon při nebuzeném a buzeném stavu na jmenovitý výkon. Fender Frontman s výkonem 15 W odebíral ze sítě při nebuzeném stavu 6 W a při jmenovitém buzení odebíral 30 W . Příkon zrealizovaného zesilovače v režimu "standby" při kterém je sepnuté pouze žhavení odebíral $26,5\text{ W}$, při nebuzeném stavu odebíral $52,3\text{ W}$ a při buzení jmenovitým výkonem odebíral 55 W .



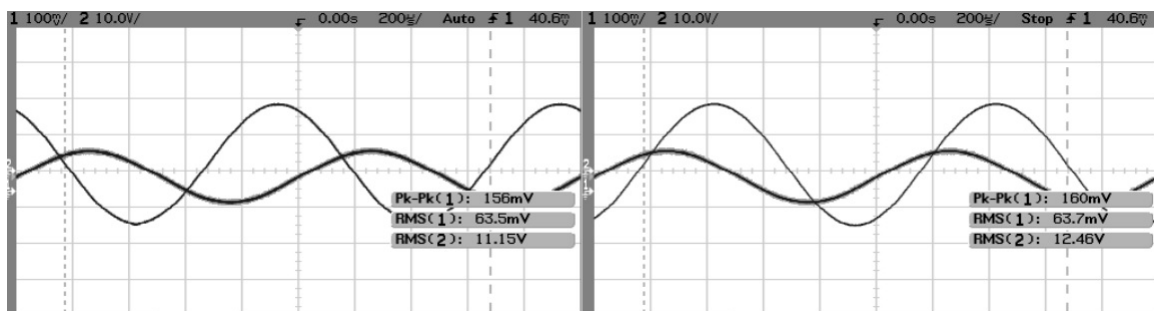
Obr. 6.1: Fotografie Fender Frontman 15g vlevo a kopie Fender Deluxe 57 vpravo

Dále jsme měřili jmenovitý výkon zesilovače při 5% THD, který nám vyšel pro tranzistorový zesilovač $14,8\text{ W}$ a pro zrealizovaný zesilovač $9,5\text{ W}$. Hodnota výkonu podle tovární dokumentace je pro tranzistorový zesilovač 15 W a pro zrealizovaný zesilovač $12,5\text{ W}$. Nižší hodnota výkonu zrealizovaného zesilovače je dána nižším anodovým napětím než u originálu. V tovární dokumentaci je uvedena hodnota při nebuzeném stavu, po

usměrnění a filtraci 370 V, námi naměřená hodnota byla 314 V. Tuto skutečnost přisuzují odlišnému síťovému transformátoru, který má vinutí pro anody na 260 V a originál má na výstupu napětí 350 V. Pro zvýšení úrovně anodového napětí jsme vyřadili usměrňovací dvojitou diodu, na které vzniká úbytek napětí. K usměrnění jsme použili pouze polovodičových diod, čímž jsme docílili vyššího anodového napětí konkrétně 333 V a následně jsme změřili výkon zesilovače, který nám vyšel 11,5 W při 5% THD.

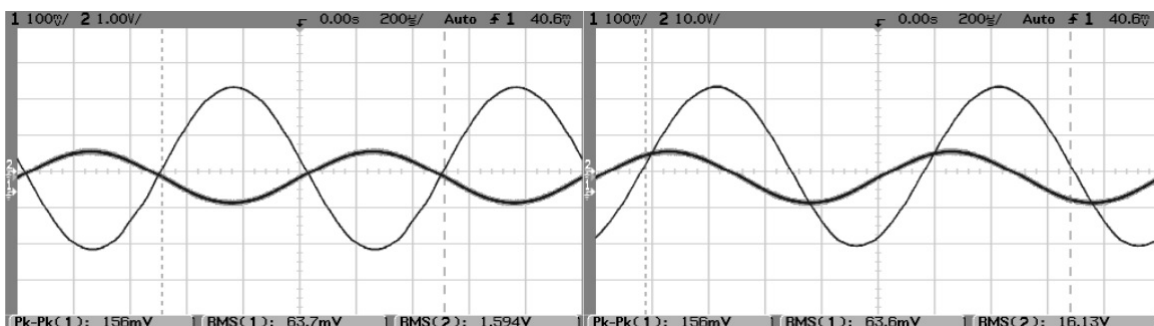
6.1 Měření časových průběhů

Měření časových průběhů jsme provedli pouze na zrealizovaném zesilovači. Nejprve jsme nastavili úroveň hlasitosti a tónové clony na poloviční hodnotu a následně jsme osciloskopem ověřili správnou funkci invertoru. Z obrázku 6.2 je patrné, že výstup invertoru je zpožděn oproti vstupnímu signálu. Fázový posuv je způsoben pasivními součástkami. Dále byla změřena rozdílná úroveň efektivní hodnoty výstupního napětí, pro neinvertující 12,46 V a invertující 11,15 V. Odchylku úrovně napětí přisuzují toleranci hodnotě rezistorů R18 a R17.



Obr. 6.2: Měření napěťového průběhu invertoru (invertující vlevo a neinvertující vpravo)

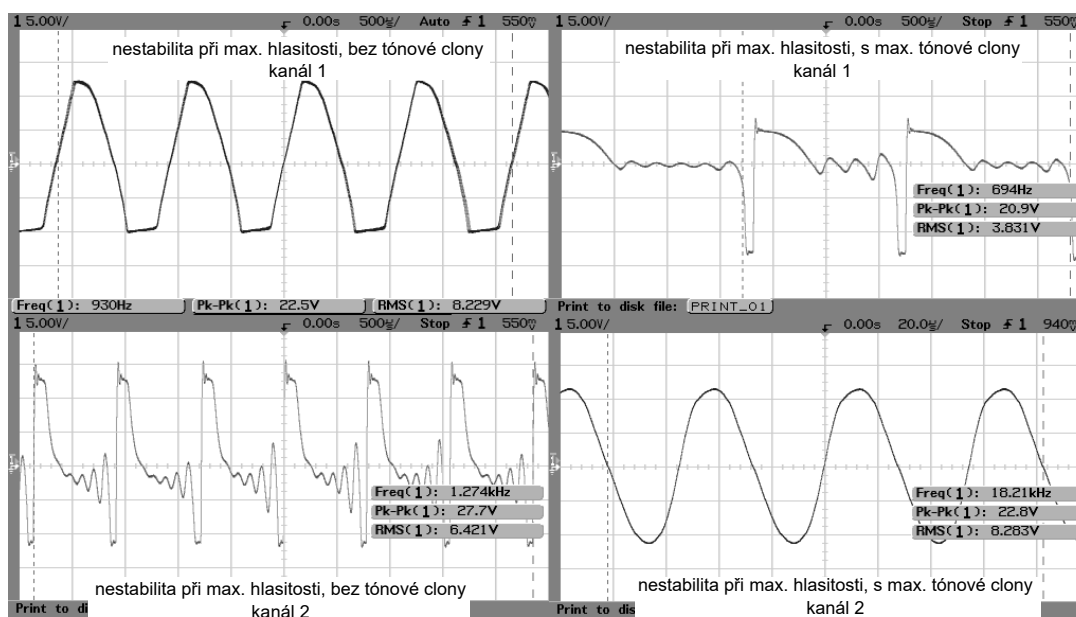
Dále jsme při stejném nastavení hlasitosti a tónové clony měřili úroveň zesílení předzesilovače. Vyšlo nám, že předzesilovač má napěťové zesílení 25 a je v protifázi oproti vstupnímu signálu. Pro společný předzesilovač je napěťové zesílení 10 a fázový posuv oproti vstupnímu napětí je 110° . Celkové napěťové zesílení předzesilovačů je 250.



Obr. 6.3: Měření napěťového průběhu předzesilovačů (předzesilovač vlevo a společný předzesilovač vpravo)

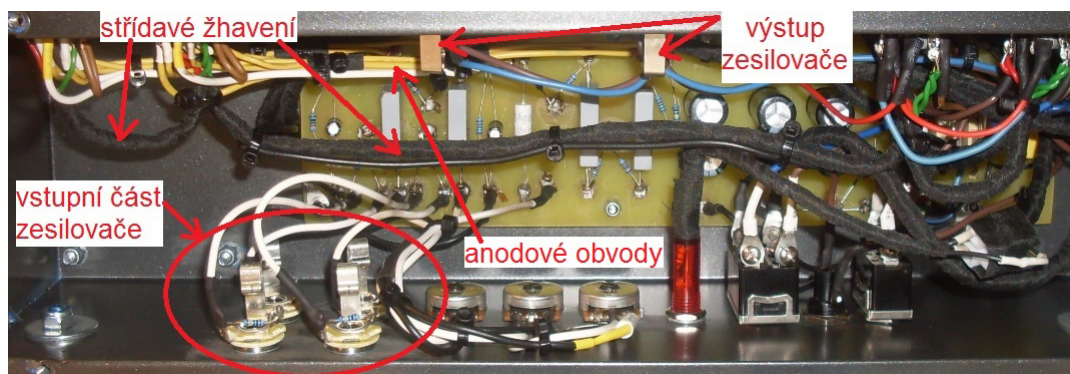
Simulací jsme zjistili, že napěťové zesílení předzesilovače je 50 a společného předzesilovače je 3,7. Simulací vyšlo společné napěťové zesílení 185. Výsledek simulace je nepoužitelný k porovnání s měřením, protože nebyly dodrženy stejné podmínky.

Při nastavení hlasitosti kanálu 1 a 2 podle schématu B.1 do krajní polohy maxima dochází k samovolnému rozkmitání zesilovače, což je znázorněno na obrázku 6.4. K rozkmitání dochází i při nahrazení reproduktoru výkonovým rezistorem, čímž jsme vyloučili možnou příčinu zavedení kladné zpětné vazby na elektronky vlivem mikrofoničnosti.



Obr. 6.4: Měření kmitání při maximálním zesílení

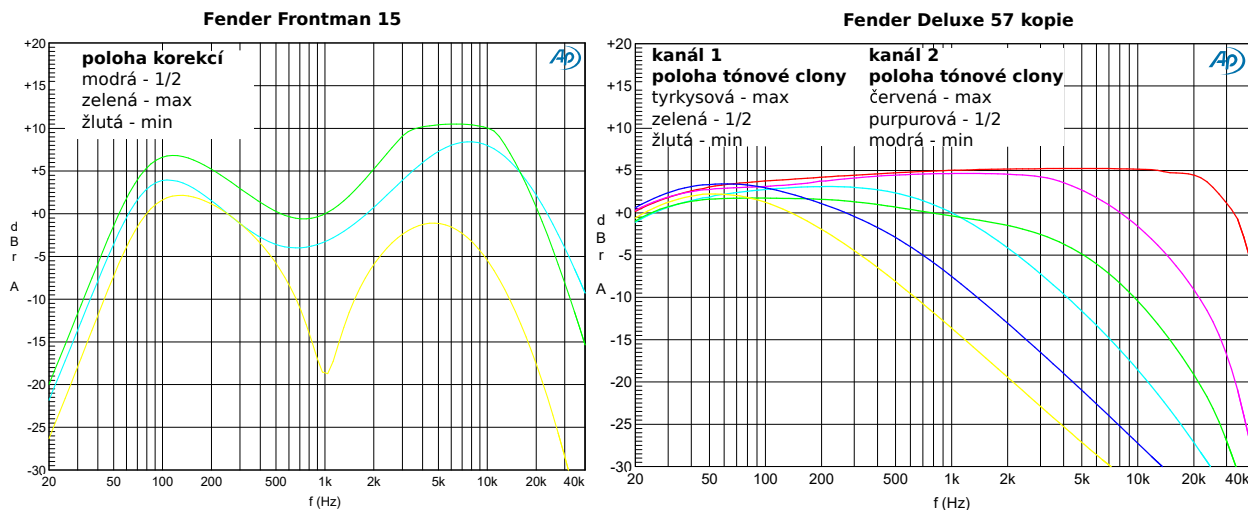
Domnívám se, že nestabilita je způsobena podle obrázku 6.5 parazitními vazbami mezi vstupní částí a výstupem zesilovače, následně dochází k zavedení kladné zpětné vazby. Možným řešením tohoto problému je upravení všech vodičů k vstupní části zesilovače na minimální délku a použití stíněných vodičů. K odstínění by bylo vhodné použít plechovou přepážku a umístit jí mezi vstupní část zesilovače a výstup. Dále by bylo vhodné opatřit předzesilovací triody stínícími kryty.



Obr. 6.5: Detail kabeláže zrealizovaného zesilovače

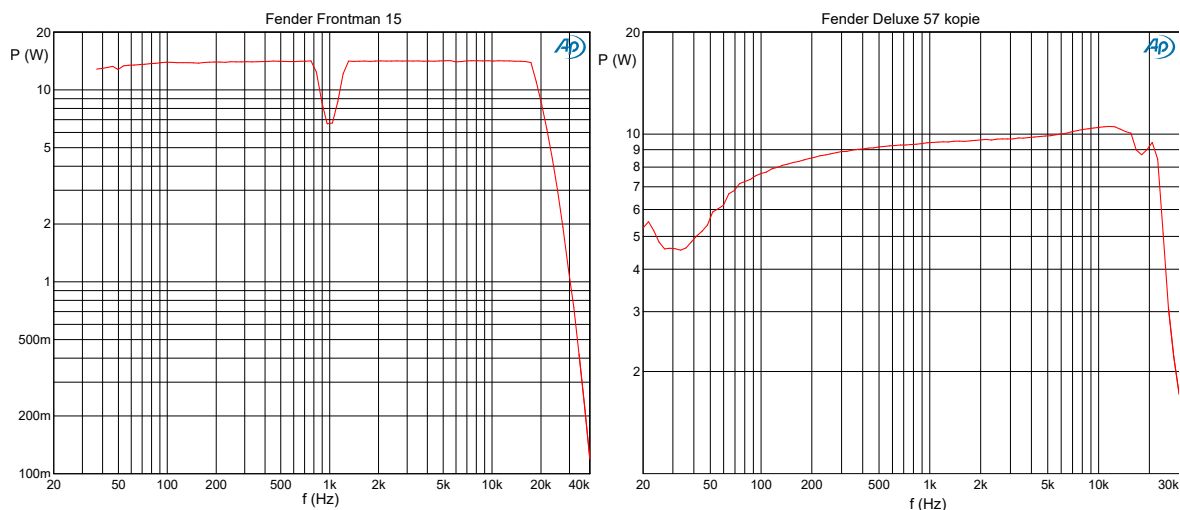
6.2 Měření frekvenčních charakteristik zesilovačů

K měření frekvenčních charakteristik zesilovačů jsme použili audio analyzátor Audio Precision a reproduktory jsme nahradili výkonovým rezistorem s hodnotou 8Ω . Frekvenční charakteristika tranzistorového zesilovače na grafu 6.6 vlevo odpovídá pro nastavení basů, středů a výšek do minimální, poloviční a maximální hodnoty. Provedené měření odpovídá simulaci přiložené na grafu D.1, pouze při nastavení korekcí na maximální hodnotu došlo u simulace k potlačení výšek, což se při měření neprojevalo.



Obr. 6.6: Měření frekvenčních charakteristik s různým nastavením korekcí

U zrealizovaného zesilovače jsme zjistili, že se tónová clona znázorněná na B.1 projevuje odlišně pro oba kanály. Pro kanál 2 dochází k očekávanému tlumení výšek, ale pro kanál 1 se do poloviny jezdcy potenciometru charakteristika příliš nemění a od poloviny dochází k ztlačení výšek. Při maximální úrovni tónové clony dochází k útlumu 5 dB na oktávu, což odpovídá provedené simulaci D.2.



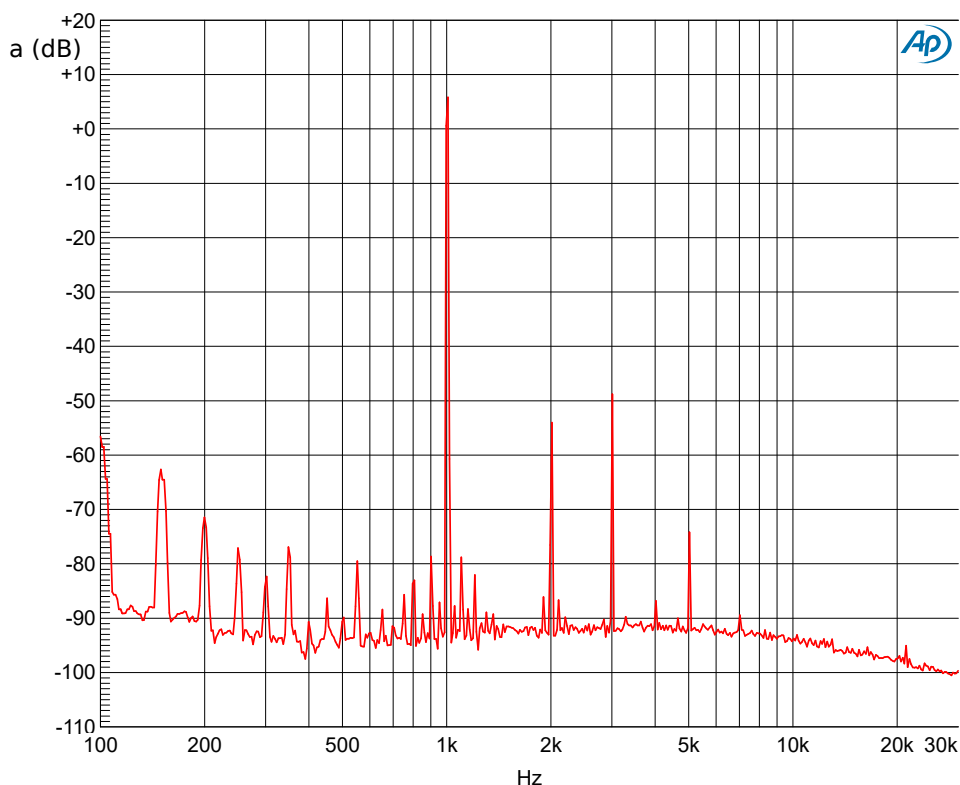
Obr. 6.7: Měření výkonu v závislosti na frekvenci

V závislosti na frekvenci jsme pro oba zesilovače změřili úroveň výstupního výkonu znázorněné na grafu 6.7. Výstupní výkon je definován pro maximální zkreslení 5 % THD. U tranzistorového zesilovače došlo k neočekávanému poklesu výkonu na polovinu v okolí frekvence 1 kHz, pravděpodobně z důvodu použité středové korekce. U elektronkového zesilovače došlo na okrajích charakteristiky k plynulému poklesu výkonu, patrně z důvodu použití výstupního transformátoru, který je navržen, aby přenášel výkon pouze v určitém pásmu.

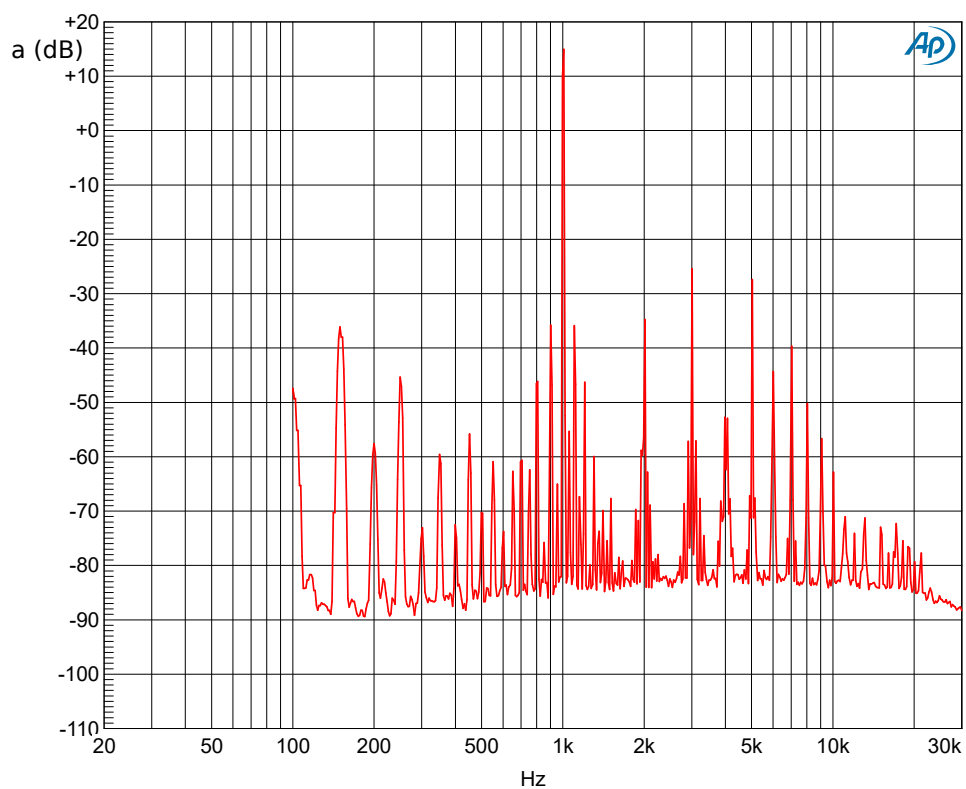
Na generátoru jsme nastavili frekvenci 1 kHz a pomocí frekvenční analýzy FFT jsme zjistili úroveň jednotlivých násobků hlavní frekvence 1 kHz, pro tranzistorový zesilovače převládaly liché celistvé násobky, což je patrné z grafu 6.8.

U elektronkového zesilovače podle grafu 6.9 také převládaly liché harmonické násobky, protože jsme zesilovač měřili jako celek, včetně výstupního transformátoru, který má zásadní vliv na liché harmonické[7]. Navíc z grafu 6.10 je patrné, že do signálu proniká síťový kmitočet. Vliv síťového kmitočtu jsme se pokusili redukovat stejnosměrným žhavením v grafu 6.10 modře, ale úroveň síťového brumu zůstala téměř shodná.

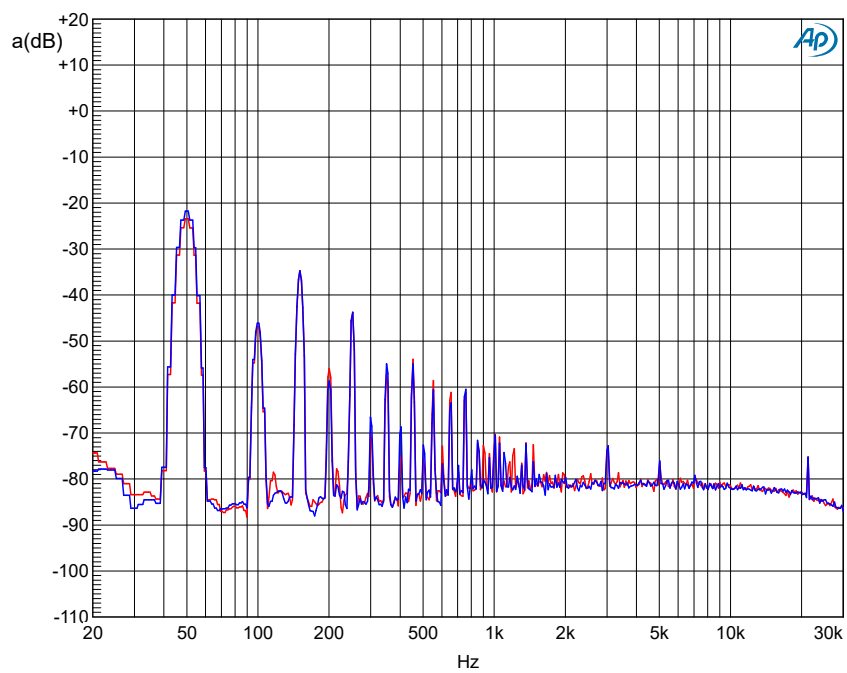
Ve srovnání s tranzistorovým zesilovačem je u elektronkového vyšší koncentrace intermodulačních produktů, které vznikají intermodulací síťového brumu a hlavní frekvence 1 kHz.



Obr. 6.8: Harmonické zkreslení Fender Frontman 15g



Obr. 6.9: Harmonické zkreslení kopie Fender Deluxe 57



Obr. 6.10: Harmonické zkreslení síťovým brumem (střídavé žhavení červeně, stejnosměrné žhavení modře)

6.2.1 Akustická měření reproduktoru v ozvučnici

Na reproduktoru Celestion G12M v otevřené skříňové ozvučnici v provedení kombo jsme provedli akustická měření. Měření jsme realizovali na střeše budovy, čili v otevřeném prostoru. K měření jsme použili audio analyzátor Audio Precision, nízkofrekvenční zesilovač Yamaha AX-496 a k snímání jsme použili všesměrový měřicí mikrofón Earthworks M50 s citlivostí 35 mV/Pa. Podmínky k měření nebyly ideální z důvodu silného větru, což se projevilo velikostí výstupního klidového napětí mikrofónu až 60 mV. Na střeše bylo mnoho objektů, které působily odrazy a negativně ovlivnily výsledky měření.



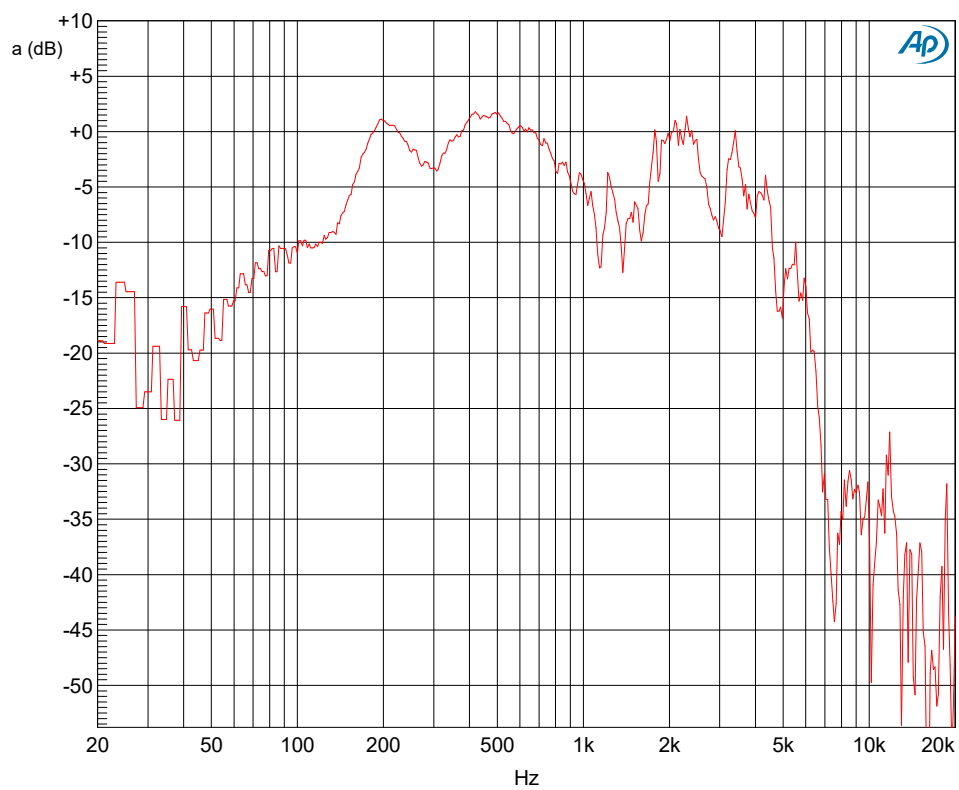
Obr. 6.11: Měření reproduktoru

Mikrofón jsme umístili do referenční osy reproduktoru ve vzdálenosti jeden metr. Reproduktor jsme budili pseudonáhodným širokopásmovým šumovým signálem o efektivní hodnotě napětí $U = 2,8 \text{ V}$, což odpovídá výkonu 1 W při zátěži 8Ω . Spektrálním analyzátozem jsme následně vyhodnotili zastoupení jednotlivých frekvenčních složek.

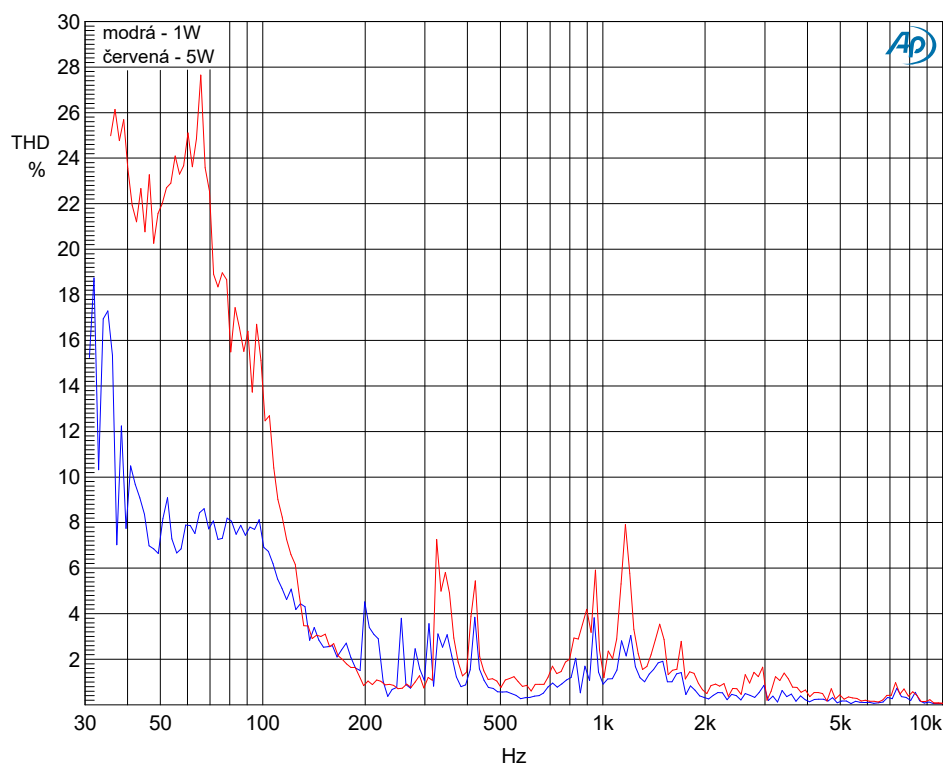
Při vychýlení mikrofónu z referenční osy reproduktoru dochází k značnému útlumu frekvencí od 1 kHz až do horního mezního kmitočtu, což je patrné z grafu E.3. Při ozvučování kytarového komba je důležité umístění mikrofónu vůči referenční ose reproduktoru, protože se tím ovlivňuje frekvenční spektrum přenášené mikrofónem.

Dále jsme měřili úroveň harmonického zkreslení, která vyšla pro 1 kHz 0,9 % THD. Z grafu 6.13 je patrné, že při zvyšujícím výkonu vzrůstá harmonické zkreslení. Harmonické zkreslení reproduktoru vzniká z důvodu nelinearity poddajného uložení systému a vlivu deformace membrány při kmitání [6]. V běžně používaném frekvenčním pásmu reproduktoru by mělo být harmonické zkreslení co nejmenší. V případě měření v otevřené ozvučnici typu kombo došlo ke zvýšení zkreslení v rozmezí 200-400 Hz a 1-2 kHz.

Srovnáním výsledků měření z grafu harmonického zkreslení (E.4), které bylo provedeno v uzavřené ozvučnici s tlumící pěnou o rozměrech 35x35 cm došlo k nárůstu harmonického zkreslení až mezi 3-4 kHz [24].



Obr. 6.12: Frekvenční charakteristika reproduktoru Celestion G12M



Obr. 6.13: Harmonické zkreslení reproduktoru Celestion G12M

7

Porovnání zrealizovaného zesilovače s továrně vyráběnými zařízeními

7.1 Porovnání zrealizovaného zesilovače s Fender Deluxe 57

Rozměr ozvučnice a šasi je shodný s originálem Fender Deluxe 57. Materiál ozvučnice originálu je borovice pokrytá folií imitující vlněný povrch, já jsem použil lípu a povrch jsem pouze natřel bezbarvým lakem. Výkon zrealizovaného zesilovače je 9,5 W a originál disponuje výkonem 12,5 W. Reproduktor originálu je širokopásmový 12“ Jensen P12R s citlivostí 95 dB a od roku 2015 je dodáván s reproduktorem Eminence Special Design bez bližší specifikace. Pro realizaci kopie jsem volil levnější variantu reproduktoru Celestion G12M Greenback, který má vyšší citlivost 98 dB a stejnou impedanci 8 Ω . Maximální hladina akustického tlaku na vzdálenost jednoho metru vychází podle vzorce (3.3) pro originální zesilovač 106 dB a zrealizovaný zesilovač 107 dB, takže i při nižším výkonu docílíme vyššího akustického tlaku díky vyšší citlivosti použitého reproduktoru. Originál předzesilovací elektronky opatřeny stínícími kryty. Koncové elektronky včetně usměrňovací diody jsou opatřeny mřížkováným plechem, který slouží jako mechanická ochrana a zároveň jako stínící plech. Cena originálního zesilovače je 57 490 Kč, stavba svépomocí vyšla na 8 150 Kč. Hmotnost originálu činí 11,5 kg a hmotnost zrealizovaného zesilovače je 13 kg.

7.2 Porovnání zrealizovaného zesilovače s podobnými zařízeními jiných značek

Firem zabývajících se výrobou kytarových zesilovačů je nespočet, a proto jsem vytipoval několik modelů od nejznámějších firem s podobnými parametry. K porovnání jsem zvolil kytarové hlavy Orange OR15H, Marshall DSL15H a kytarová kombo VOX AC15, Fender

Frontman 15g.

Kytarové kombo VOX AC15 je z roku 1958 a disponuje výkonem 15 W, jeho cena je 18 500 Kč. Koncový stupeň je zapojen ve třídě AB s koncovými elektronkami EL84. Zesilovač VOX AC15 má implementovaný pružinový dozvuk a efekt tremolo. Tremolo je efekt, při kterém se v určitém časovém intervalu opakovaně mění hlasitost. Dále zesilovač podporuje možnost připojení nožního přepínače, který slouží k přepínání čistého a zkresleného kanálu[19].

Kytarová hlava Orange OR15H s koncovými elektronkami EL84 ve třídě AB byla navržena počátkem sedmdesátých let, obsahuje přepínač výkonu, který je realizován pomocí odbočky síťového transformátoru. Pro výkon 15 W je anodové napětí 250 V a pro výkon 7 W je anodové napětí sníženo na hodnotu 180 V. Hlavním přínosem snížení výkonu je stejné zkreslení, ale při nižší úrovni akustického tlaku a prodloužení životnosti elektronek. Kytarová hlava dále obsahuje efektovou smyčku a tónové korekce pro basy, středy a výšky. Cena tohoto zařízení je 13 500 Kč [20].

Kytarová hlava Marshall DSL15H s výstupními svazkovými pentodami 6V6 disponuje možností přepínání výkonu 15 W v režimu pentody, kdy je stínící mřížka připojena na anodové napětí a režim výkonu 7,5 W v režimu triody, kdy se stínící mřížka přepínačem propojí s anodou. Možnost přepínání přináší stejné výhody jako u kytarové hlavy Orange OR15H. Zesilovač disponuje s korekcemi pro basy, středy a výšky. Marshall DSL15H je na trhu od roku 2012 a jeho cena je 15 290 Kč [21].



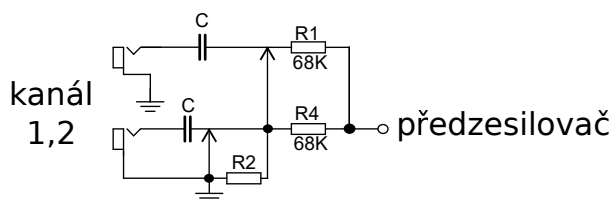
Obr. 7.1: Zleva: VOX AC15 [Převzato z [19]], Marshall DSL15H [Převzato z [21]], Orange OR15H [Převzato z [20]]

Tranzistorový zesilovač Fender Frontman 15g s integrovaným koncovým stupněm je nejlevnější varianta porovnávaných zesilovačů, cena činí pouze 2 500 Kč. Zesilovač obsahuje přepínač pro čistý a zkreslený kanál. Jeho hlavní výhodou je, že k docílení zkresleného zvuku nepotřebujeme vysokou úroveň hlasitosti, protože zkreslení obstarává pouze předzesilovač. Další výhodou je nízká spotřeba a to především při nebuzeném stavu. Nevýhodou elektronkových zesilovačů je vysoký odběr elektrické energie, který se jen nepatrně mění v závislosti na buzení zesilovače.

8

Vhodné úpravy zapojení na zrealizovaném zesilovači

Mezi vstup a mřížku triody podle obrázku 8.1 by bylo vhodné umístit kondenzátor C, který by sloužil jako ochrana před průchodem vysokého stejnosměrného napětí na kytaru při mechanickém poškození elektronky.



Obr. 8.1: Ochrana proti stejnosměrnému napětí

Měřením jsme zjistili, že výstupní výkon zesilovače je o 3 W nižší než u originálu, nižší výkon je způsoben nižším anodovým napětím. K docílení stejného výkonu by bylo třeba zvýšit anodové napětí pomocí převinutí síťového transformátoru. Možným řešením a zároveň snížením nákladů na provedení by bylo odstranění elektronkové dvojité diody na které vzniká úbytek napětí.

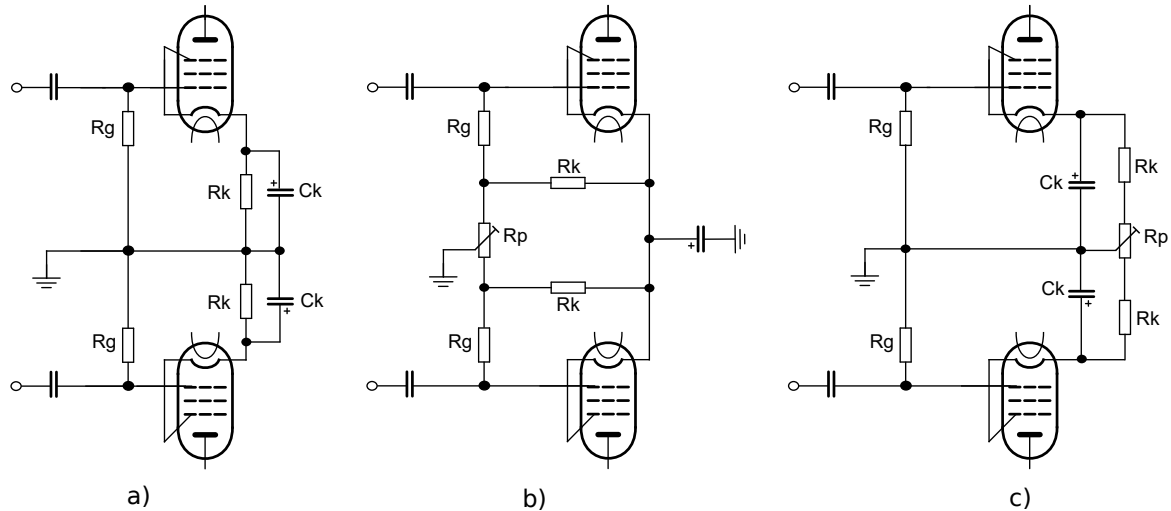
Z obrázku F.3 je patrné, že umístění elektronek není vhodné z důvodu odvodu odpadního tepla, řešením by bylo umístit je opačným směrem, aby se elektronka zasouvala do patice shora. K snížení nákladů je možné použít koncové elektronky 6L6 nebo elektronky EL84, které mají podobné parametry. Cena koncových elektronek EL84 je poloviční, nicméně jsou určeny do patice noval, což by znamenalo změnit patice.

Možnou změnou zapojení je provedení katodového rezistoru R_k zvlášť pro každou elektronku podle obrázku 8.2a. Výhodou oddělených rezistorů je, že na nich vzniká automatické předpětí zvlášť pro konkrétní elektronku, takže se u elektronek s rozdílnými parametry omezí rozdíly jejich anodových proudů.

Při provedení se společným katodovým rezistorem by bylo dobré opatřit zapojení možností vyrovnat anodové proudy obou elektronek na stejnou velikost, což je důležité z hlediska stejnosměrné magnetizace výstupního transformátoru a z hlediska malého zkres-

lení. Toto provedení je znázorněno na obrázku 8.2b. Odporový trimr R_p nastavíme do vhodné polohy, aby na rezistorech R_k vznikl stejný úbytek napětí, čímž jsou zajištěna stejná předpětí obou elektronek.

Na obrázku 8.2c je znázorněna možnost seřízení anodových proudů s individuálními rezistory R_k pomocí trimru R_p [5][6].



Obr. 8.2: Předpětí elektronek koncového stupně a) individuální katodový rezistor, b) zapojení pro vyrovnání anodových proudů, c) zapojení pro vyrovnání anodových proudů s individuálními rezistory |Převzato z [1]|

Na elektronkové kytarové zesilovače je často kladen důraz na vyšší zkreslení při malé úrovni hlasitosti, proto mají některá zapojení možnost snížení anodového napětí, čímž dojde k snížení výkonu a zesilovač zkresluje už při malých úrovních zesílení. Další možností jak zvýšit úroveň zkreslení je, že koncové elektrony zapojíme v provedení triody, což znamená, že stínící mřížky koncových elektronek připojíme přes rezistor na anody.

9

Závěr

V bakalářské práci je provedené stanovení technických parametrů kladených na elektronkový kytarový zesilovač. U jednotlivých parametrů je navrhnut postup měření. V práci je provedeno srovnání zrealizovaného zesilovače s originálem Fender Deluxe 57 a s několika dalšími typy zesilovačů odlišného provedení.

Pro zrealizovaný zesilovač kopie Fender Deluxe 57 je proveden popis funkce zapojení s případnými výpočty jednotlivých součástek. Pomocí stejnosměrné simulace v programu PSpice byly stanoveny výkonové požadavky na obvodové součástky. Dále jsem simuloval frekvenční charakteristiku tónové clony, zesilovače bez výstupního transformátoru a transientní charakteristiku pro jednotlivé předzesilovače.

Následně bylo provedeno měření stanovených parametrů na zrealizovaném zesilovači. Pro srovnání byl současně měřen tranzistorový zesilovač Fender Frontman 15g. Osciloskopem bylo zjištěno napěťové zesílení předzesilovačů a porovnáno se simulacemi. Výstupní výkon zrealizovaného zesilovače při zkreslení 5% THD vyšel 9,5 Wattů a při vyřazení usměrňovací elektronky 11,5 Wattů. Měřením příkonu tranzistorového a elektronkového zesilovače při různé úrovni buzení byly zjištěny odlišnosti a výsledky porovnány. Akustickým měřením na střeše budovy byla změřena frekvenční charakteristika reproduktoru v zabudované ozvučnici a změřeno harmonické zkreslení reproduktoru. Výsledky akustického měření byly porovnány s výsledky měření dostupnými na internetu.

Na základě výsledků měření byly navrženy vhodné úpravy zrealizovaného zesilovače za účelem zlepšení jeho technických parametrů a snížení finančních nákladů na realizaci.

Pro zrealizovaný zesilovač byla provedena detailní cenová kalkulace nákladů. Jednotlivé díly zrealizovaného zesilovače jsou znázorněny v přiložených výkresech. Cena originálního zesilovače činí 57 490 Kč a cena zrealizovaného zesilovače po sečtení všech nákladů činí 8 150 Kč.

Výkresy zrealizovaného zesilovače byly vytvořeny v rámci školení pomocí programu CATIA. Elektrické schéma zrealizovaného zesilovače bylo kresleno v programu ProfiCAD.

Literatura

- [1] Lukeš, Jaroslav. *Věrný zvuk: Určeno pro prac. v nízkofrekvenční elektrotechn. a radioamatéry*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství SNTL, 1962. 321 s.
- [2] Vlach, Jaroslav. *Lampárna, aneb, Co to zkusit s elektronkami?*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. 151 s. ISBN 80-7300-091-1.
- [3] Trůneček, Jiří. *Radiotechnika od A do Z: encyklopedie radiové techniky současné doby pro každého*. 2. vyd. V Praze: Jos. Hokr, 1940. 203 s. Hokrovy technické a dílenské příručky; sv. 9.
- [4] Strnad, Julius. *Elektroakustika: Záznam a reprodukce zvuku. Část 1*. 1. vyd. Praha: Technicko-vědecké vydavatelství, 1951, 720 s. Elektrotechnická knihovna; Sv. 9.
- [5] Jurkovič, Kamil a Zodl, Ján. *Příručka nízkofrekvenčnej obvodovej techniky*. 2., preprac. vyd. Bratislava: Alfa, 1985. 683 s. Edícia elektrotechnickej literatúry.
- [6] Smetana, Ctirad a kol. *Praktická elektroakustika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981. 692 s.
- [7] Eric Barbour. The Cool Sound of Tubes. *IEEE spectrum*. New York: IEEE Press Piscataway, 1998, 24-35. ISSN:0018-9235
- [8] ČSN IEC 268-1. *Elektroakustická zařízení. Část 1: Všeobecně.*, 1994.
- [9] ČSN IEC 268-2. *Elektroakustická zařízení. Část 2: Vysvětlení všeobecných termínů a výpočetních metod*, 1994.
- [10] ČSN EN 60268-3 ed. 2. *Elektroakustická zařízení - Část 3: Zesilovače*, 2014.
- [11] ČSN EN 60268-5. *Elektroakustická zařízení - Část 5: Reprodukory*, 2004.
- [12] ČSN EN 61305-1. *Domácí hi-fi zařízení a systémy - Metody měření a stanovení vlastností - Část 1: Všeobecně*, 1998.
- [13] ČSN EN 61305-3. *Domácí hi-fi zařízení a systémy - Metody měření a stanovení vlastností - Část 3: Zesilovače*, 1998.
- [14] ČSN EN 61305-5. *Domácí hi-fi zařízení a systémy - Metody měření a stanovení vlastností - Část 5: Reprodukory*, 2004.

- [15] AUTOR NEUVEDEN. *Fender*[online]. [cit. 3.3.2017]. Dostupné z: <http://shop.fender.com/en-CZ/guitar-amplifiers/vintage-pro-tube/57-custom-deluxe/product-81505001.html>
- [16] AUTOR NEUVEDEN. *Marshallamps*[online]. [cit. 3.3.2017]. Dostupné z: <https://marshallamps.com/products/amplifiers/vintage-re-issues/jcm900-4100/>
- [17] AUTOR NEUVEDEN. *mtsforum*[online]. [cit. 3.3.2017]. Dostupné z: <http://mtsforum.grailtone.com/>
- [18] AUTOR NEUVEDEN. *Duncan's Amp Pages*[online]. [cit. 20.3.2017]. Dostupné z: <http://duncanamps.com/>
- [19] AUTOR NEUVEDEN. *VOX Amplification LTD.*[online]. [cit. 22.3.2017]. Dostupné z: <http://www.voxamps.com/ac15c1>
- [20] AUTOR NEUVEDEN. *ORANGE Guitar amplifiers*[online]. [cit. 22.3.2017]. Dostupné z: <https://orangeamps.com/products/guitar-amp-heads/or-series/or15h-amp-head/>
- [21] AUTOR NEUVEDEN. *Marshall Guitar amplifiers*[online]. [cit. 22.3.2017]. Dostupné z: <https://marshallamps.com/products/amplifiers/dsl-series/dsl15h/>
- [22] AUTOR NEUVEDEN. *Jensen loudspeakers*[online]. [cit. 25.3.2017]. Dostupné z: <https://www.jensentone.com/frequency`response`comparison/>
- [23] AUTOR NEUVEDEN. *Celestion loudspeakers*[online]. [cit. 25.3.2017]. Dostupné z: <http://celestion.com/product/16/g12m`greenback/>
- [24] DICKANSON, Vance. Test Bench: Celestion G12H “GreenBack” 12” Guitar Speaker Reissue *Audio xpress*[online]. [cit. 25.3.2017]. Dostupné z: <http://www.audioxpress.com/article/Test-Bench-Celestion-G12H-GreenBack-12-Guitar-Speaker-Reissue>

Příloha A

Cenová kalkulace a kusovník zrealizovaného zesilovače

Tab. A.1

Pozice	Počet kusů	Název	Cena Kč/ks
1	2	Koncové pentody 6V6GT Electro-Harmonix	643
2	1	Usměrňovací dvojitá dioda 5Y3GT Sovtek	485
3	2	NF dvojitá trioda 12AX7 (ECC83)	289
4	1	Výstupní transformátor OTRG-15W-1	769
5	1	Síťový transformátor TSL 100/001	850
6	1	Reproduktor CELESTION G12M Greenback	2400
7	2	Patice noval SK9-CA	39
8	3	Patice oktál SK8-PA	60
9	6	Elektrolytický kondenzátor 33 μ F 250V	2
10	4	Uhlíkový rezistor 68 k Ω 0,5W	2
11	3	Uhlíkový rezistor 1 M Ω 0,5W	2
12	3	Uhlíkový rezistor 100 k Ω 0,5W	2
13	1	Uhlíkový rezistor 820 Ω 0,5W	2
14	4	Uhlíkový rezistor 68 k Ω 0,5W	2

Tabulka pokračuje na další straně...

Tab. A.1 – pokračování

Pozice	Počet kusů	Název	Cena Kč/ks
15	4	Uhlíkový rezistor 1,5 k Ω 0,5W	2
16	2	Uhlíkový rezistor 56 k Ω 0,5W	2
17	4	Uhlíkový rezistor 68 k Ω 0,5W	2
18	2	Uhlíkový rezistor 220 k Ω 0,5W	2
19	1	Uhlíkový rezistor 22 k Ω 2W	4
20	1	Uhlíkový rezistor 4,7 k Ω 2W	4
21	2	Uhlíkový rezistor 470 Ω 2W	4
22	2	Uhlíkový rezistor 100 Ω 0,5W	2
23	1	Keramický rezistor 220 Ω 10W	10
24	1	Keramický rezistor 33 Ω 10W	10
25	3	Elektrolytický kondenzátor 22 μ F 25V	4
26	4	Kondenzátor v MKT hmotě 100 nF 400V	5
27	1	Kondenzátor svitkový 22 nF 630V	4
28	1	Kondenzátor svitkový 4,7 nF 630V	4
29	1	Kondenzátor v MKT hmotě 500 pF 500V	5
30	1	Kondenzátor v MKT hmotě 100 nF 275 VAC	5
31	2	Potenciometr Hlasitost 1 M Ω (logaritmický)	70
32	1	Potenciometr Tónová clona 1 M Ω (lineární)	70
33	3	Knob zlatý na potenciometr	65
34	6	Samice Jack 6,3mm (Neutrik)	10
35	2	Trubičková pojistka T (pomalá) 250V/4A	4
36	1	Trubičková pojistka F (rychlá) 250V/2A	4
37	1	Doutnavka 230VAC	29
38	1	Vypínač dvoupólový (TSP 201AAA1)	57
39	1	Vypínač jednopólový (TSP 101AAA1)	45
40	2	Držák na pojistku na PCB (PTF 15)	4
41	1	Držák na pojistku do panelu (PTF 5030)	11
42	1	Samec Jack 6,3mm (Proel)	65
43	1	Euro napájecí kabel 3PIN 230 V	91
44	1	Samice na EU kabel	20

Tabulka pokračuje na další straně...

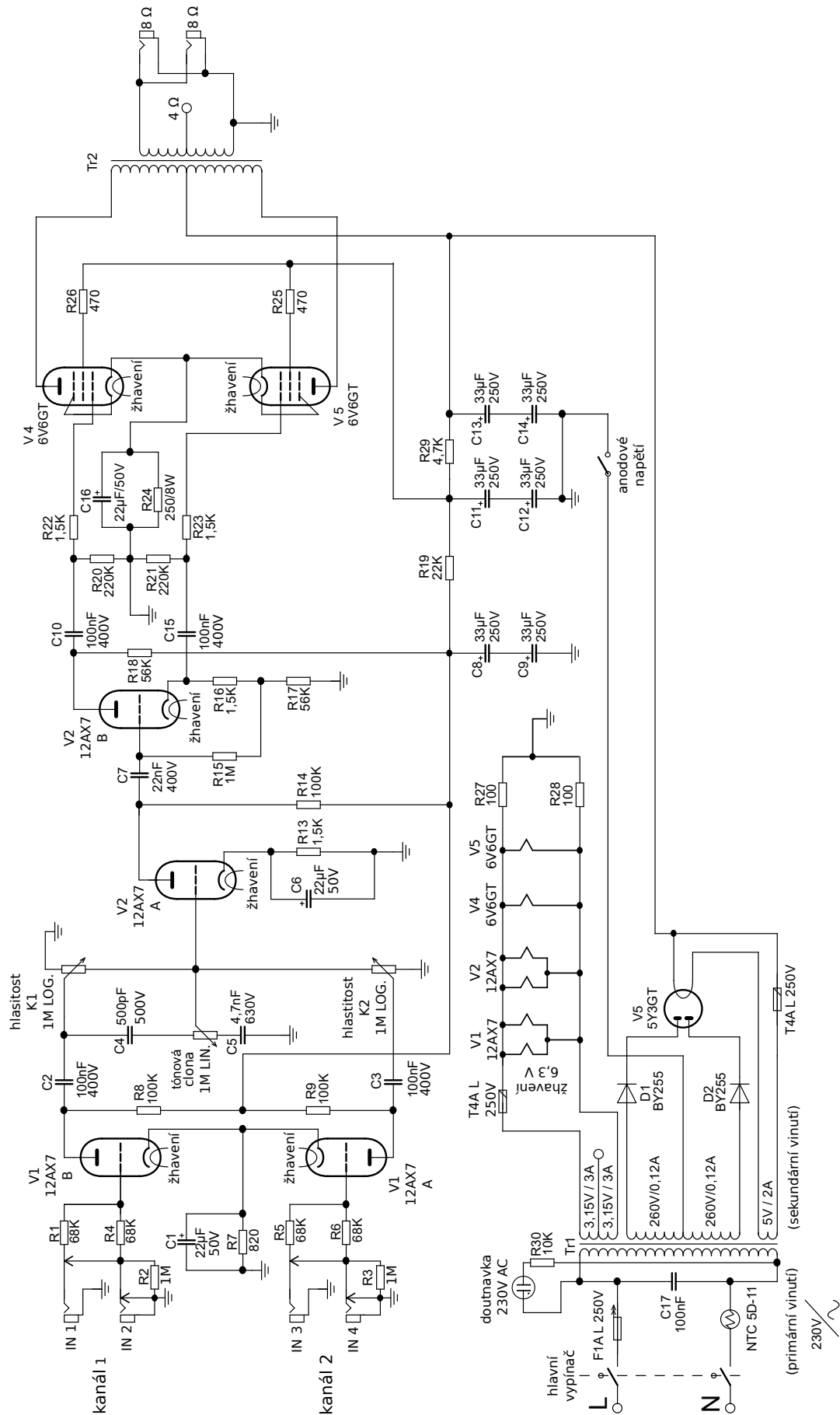
Tab. A.1 – pokračování

Pozice	Počet kusů	Název	Cena Kč/ks
45	1	NTC termistor 5D-11	7
46	61	Pájecí očko (319 IIM)	0,83
47	1	Madlo	50
48	6	Distanční sloupek DR 710VO	1
49	1	Deska Cuprextitová CUH 1,5 200x300	120
50	1	Kovové šasi	200
a	22	Šroubový spoj MATICE M4 (ISO 7040), ŠROUB M4X10 (ISO 7045)	3
b	2	Šroubový spoj MATICE M4 (ISO 7040), ŠROUB M4X12 (ISO 7046)	3
c	10	Šroubový spoj MATICE M4 (ISO 7040), ŠROUB M4X20 (ISO 7045)	3
d	2	Šroubový spoj MATICE M8 (ISO 7040), ŠROUB M8X40 (DIN 603)	10
e	2	Šroubový spoj MATICE M4 (ISO 7040), ŠROUB M4X40 (ISO 7045)	4

Tab. A.1: Cenová kalkulace kopie modelu Fender Deluxe 57

Příloha B

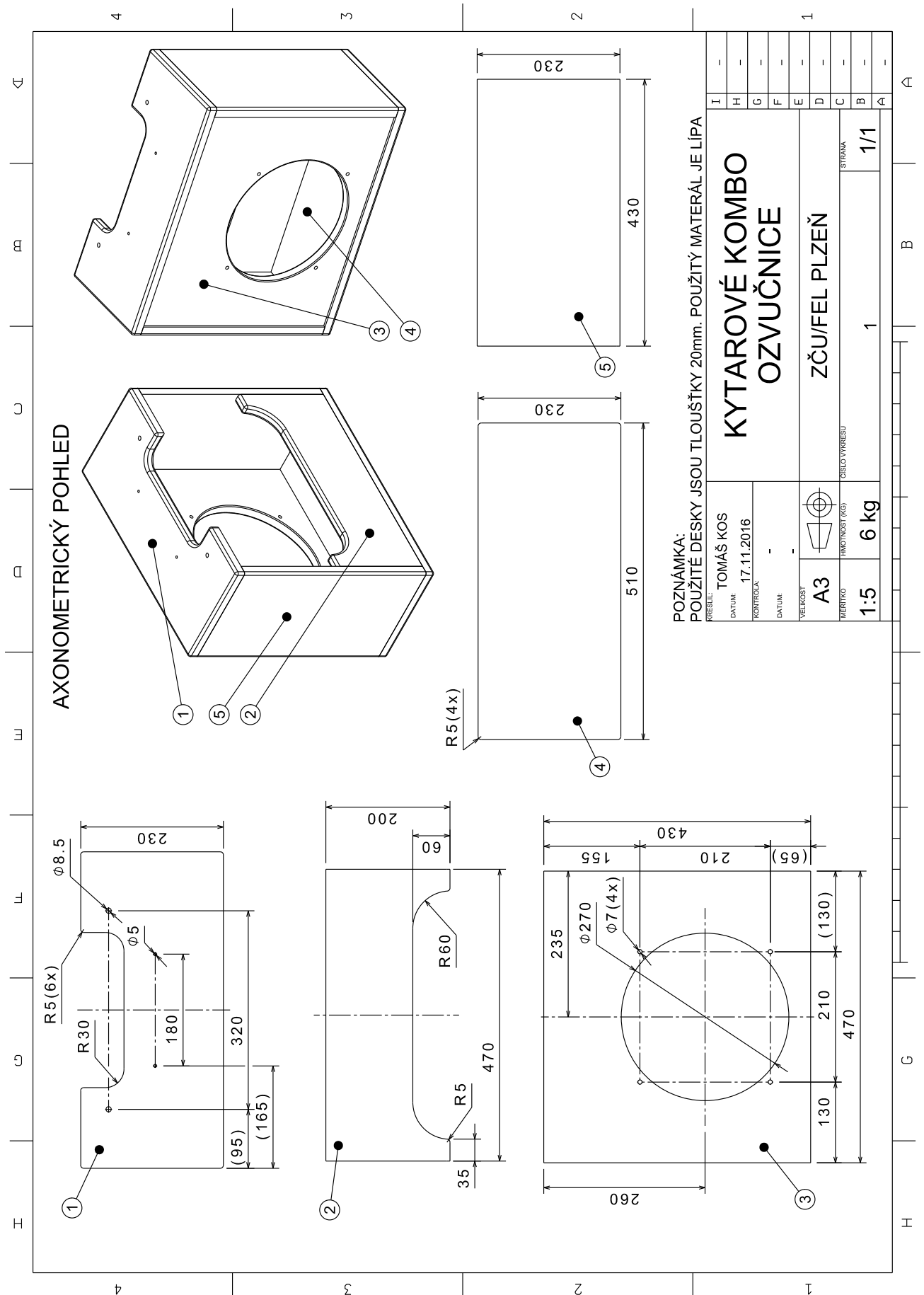
Schéma zapojení zrealizovaného zesilovače



Obr. B.1: Schéma zapojení zrealizovaného zesilovače

Příloha C

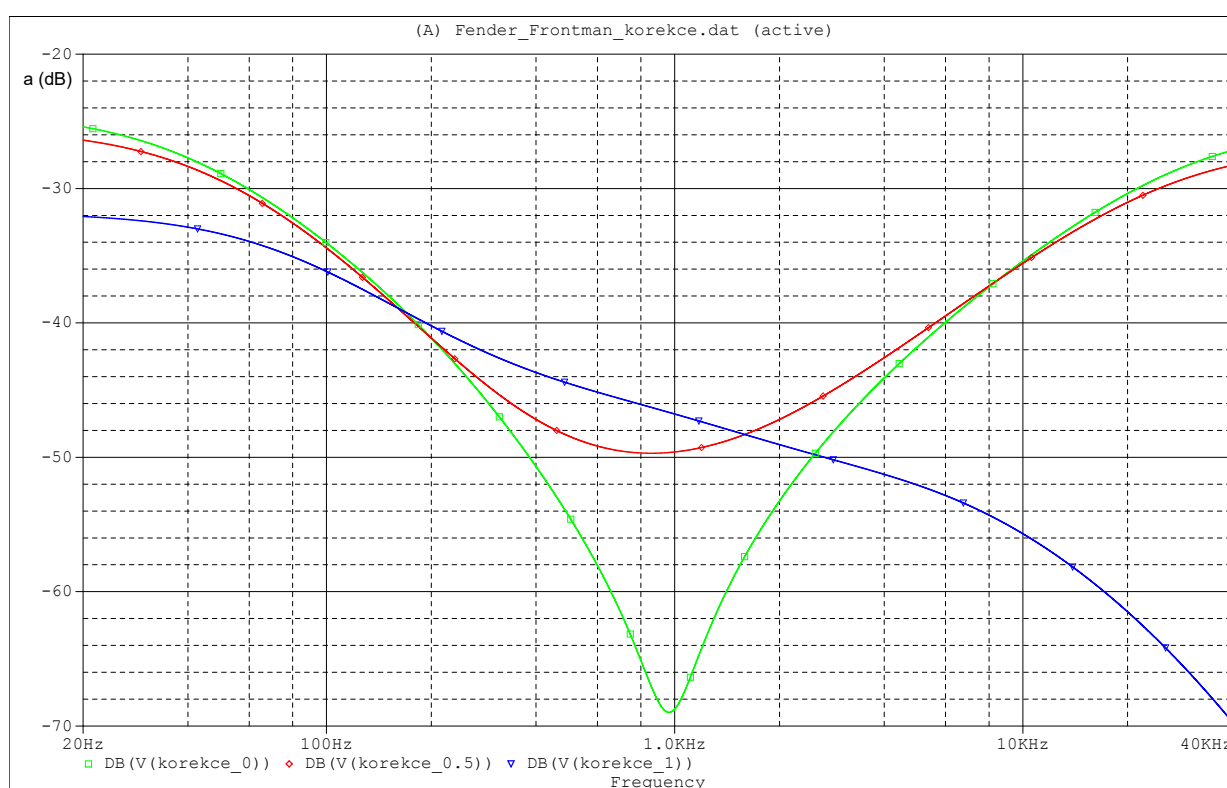
Výkresy zrealizovaného zesilovače



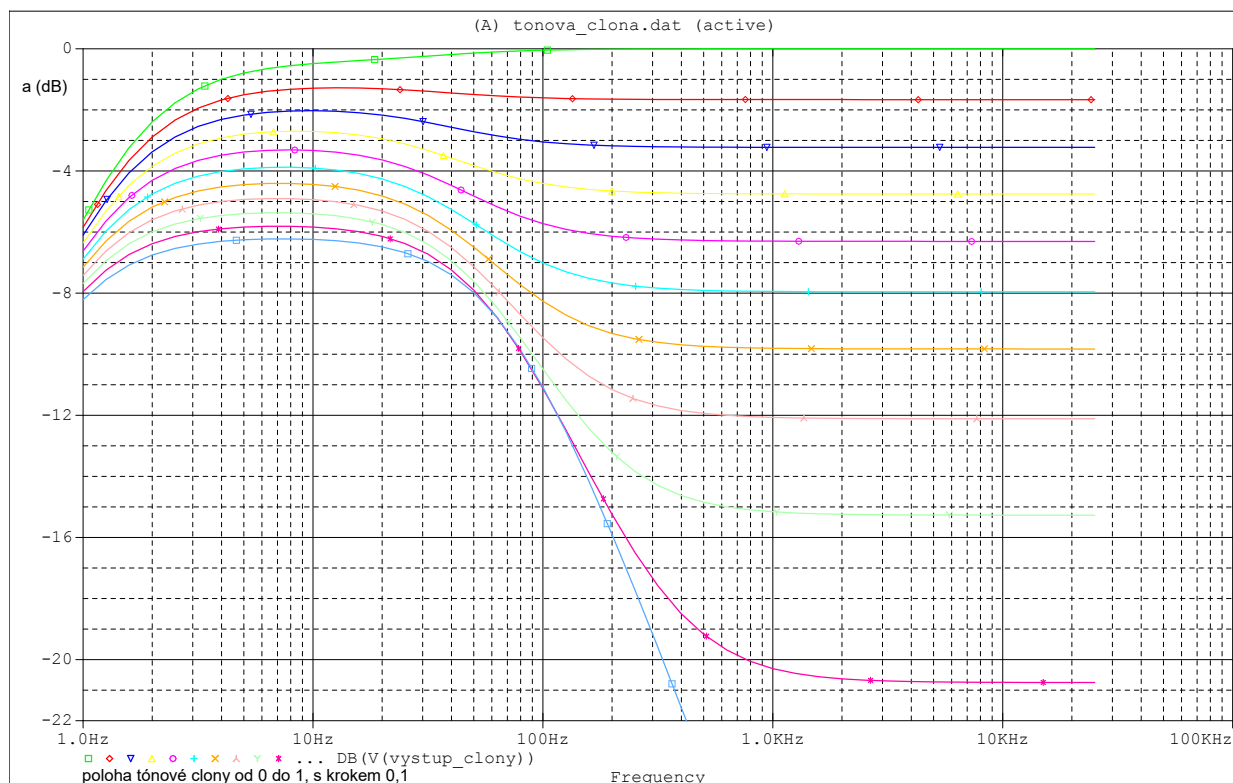
Obr. C.2: Výkres ozvučnice zrealizovaného zesilovače

Příloha D

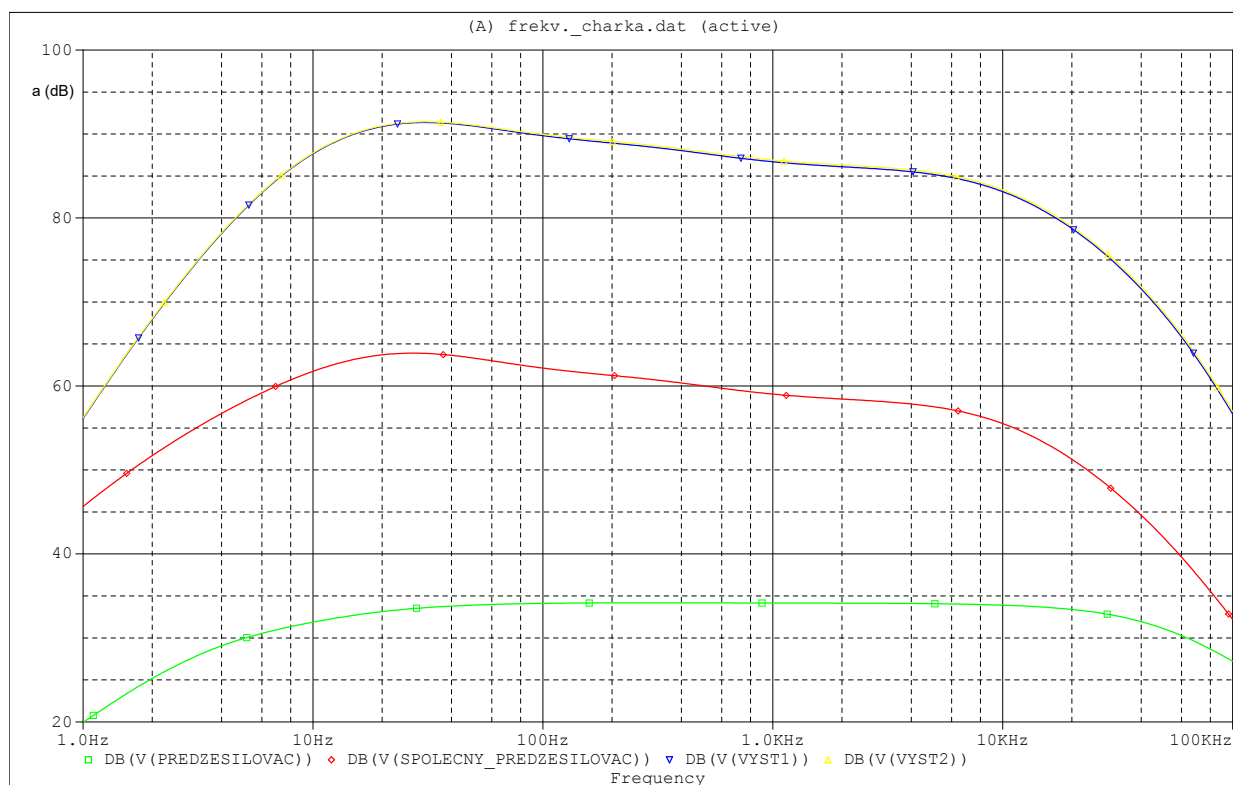
Simulace dle schémat zesilovačů



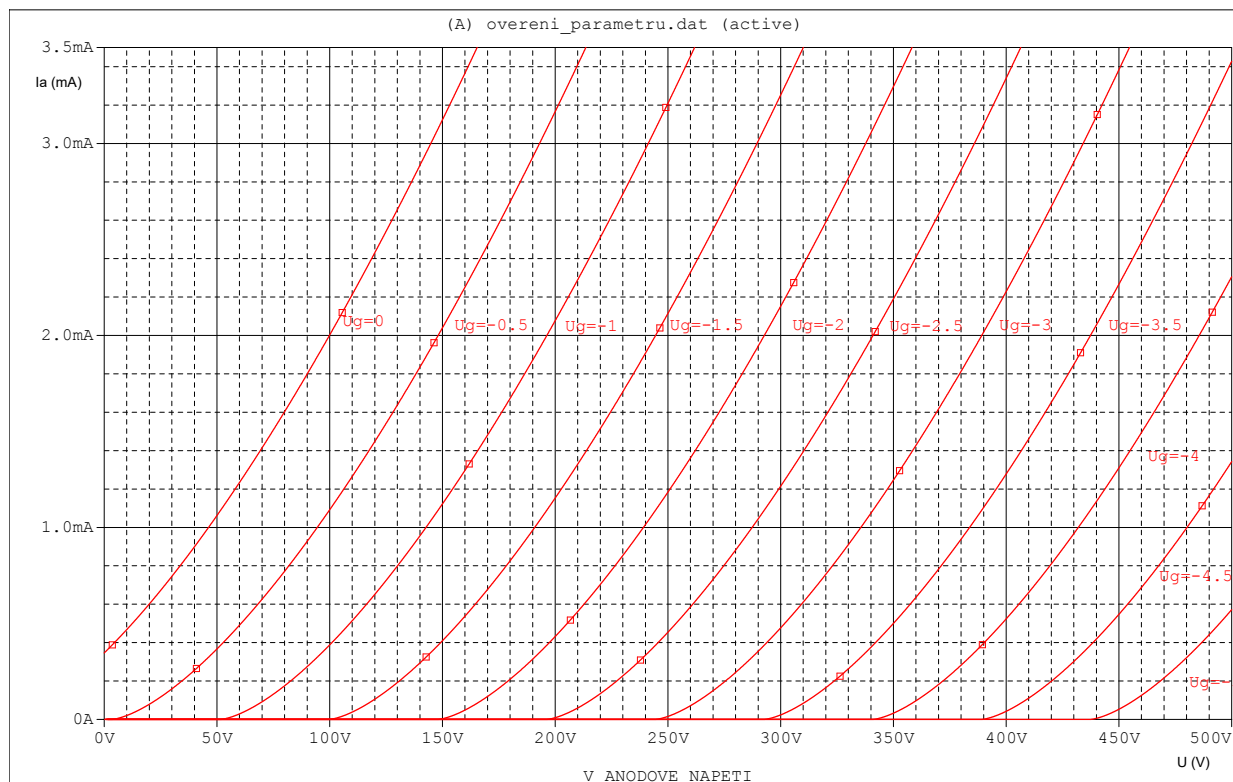
Obr. D.1: Simulace frekvenčních charakteristik korekcí zesilovače Frontman 15g



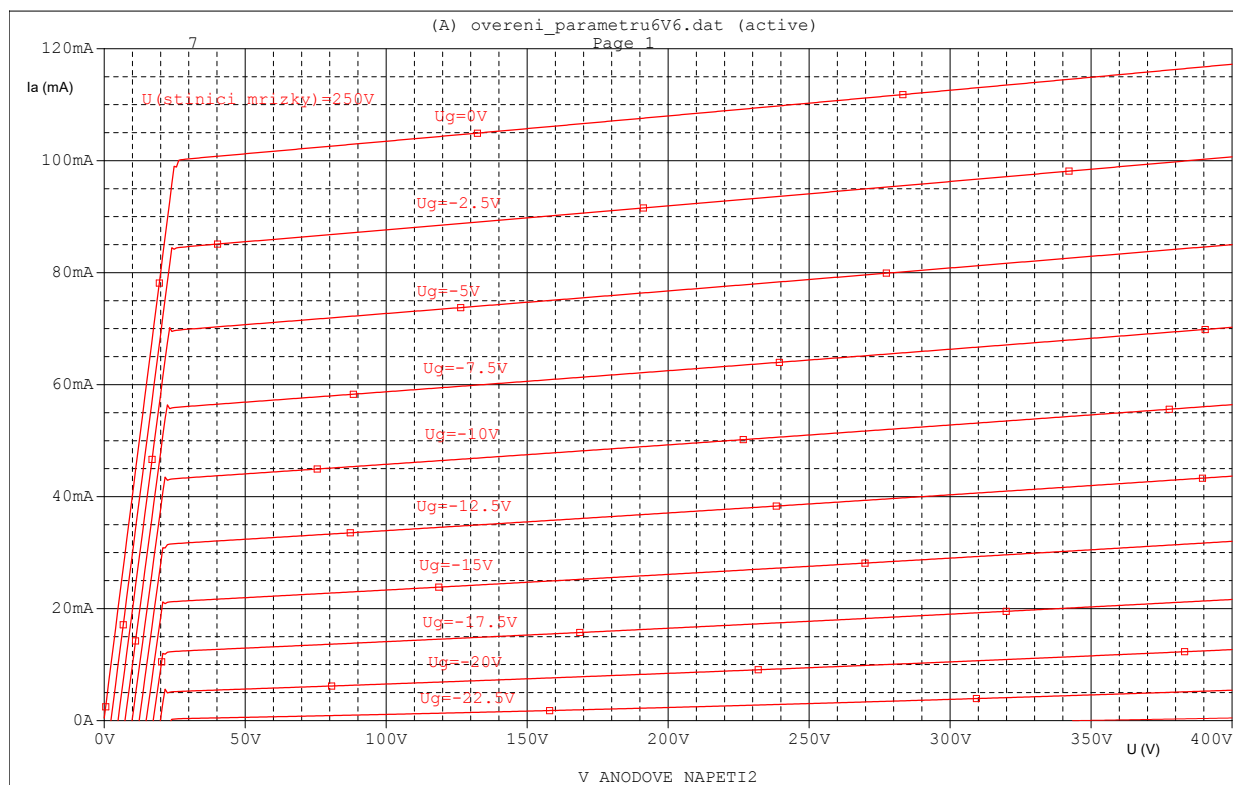
Obr. D.2: Simulace frekvenčních charakteristik tónové clony zrealizovaného zesilovače kopie Fender Deluxe 57



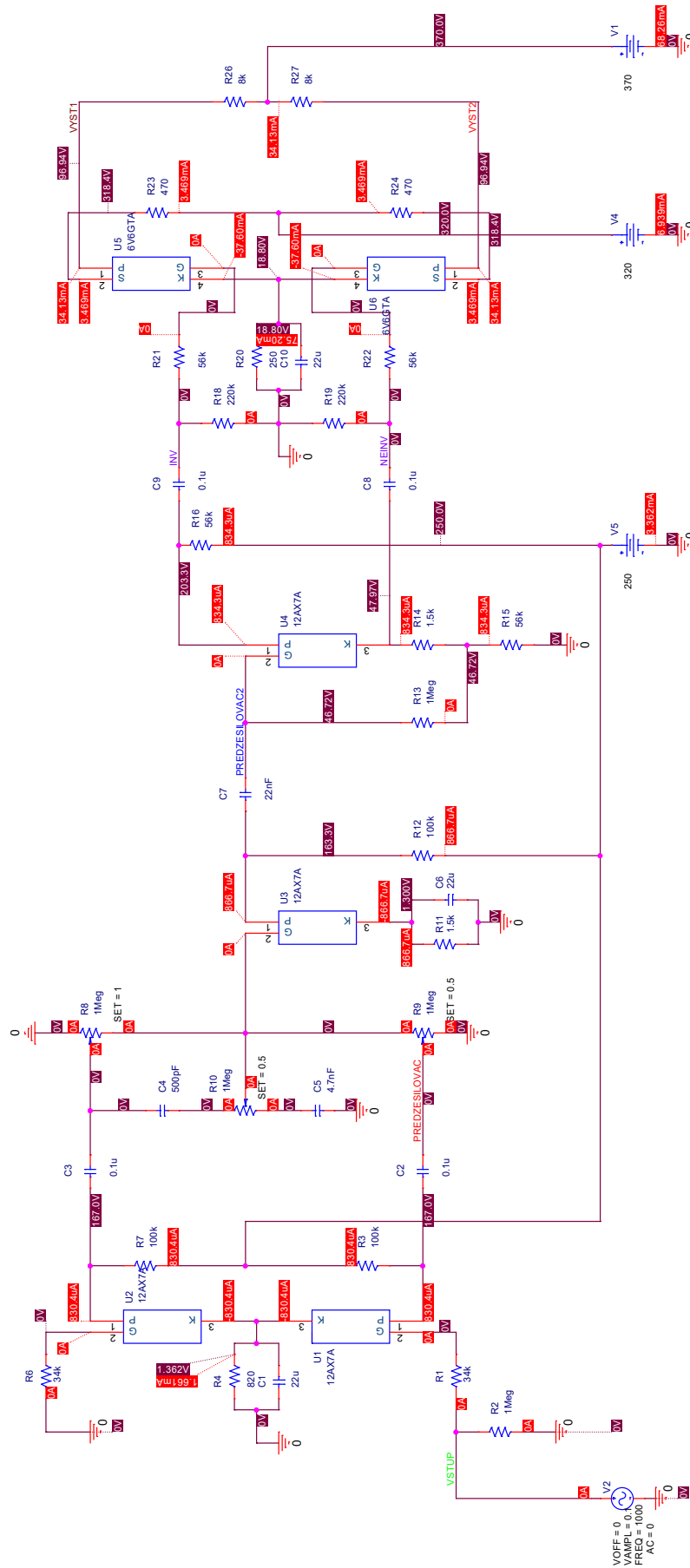
Obr. D.3: Simulace frekvenční charakteristiky zrealizovaného zesilovače bez výstupního transformátoru



Obr. D.4: Ověření parametrů dvojité triody 12AX7



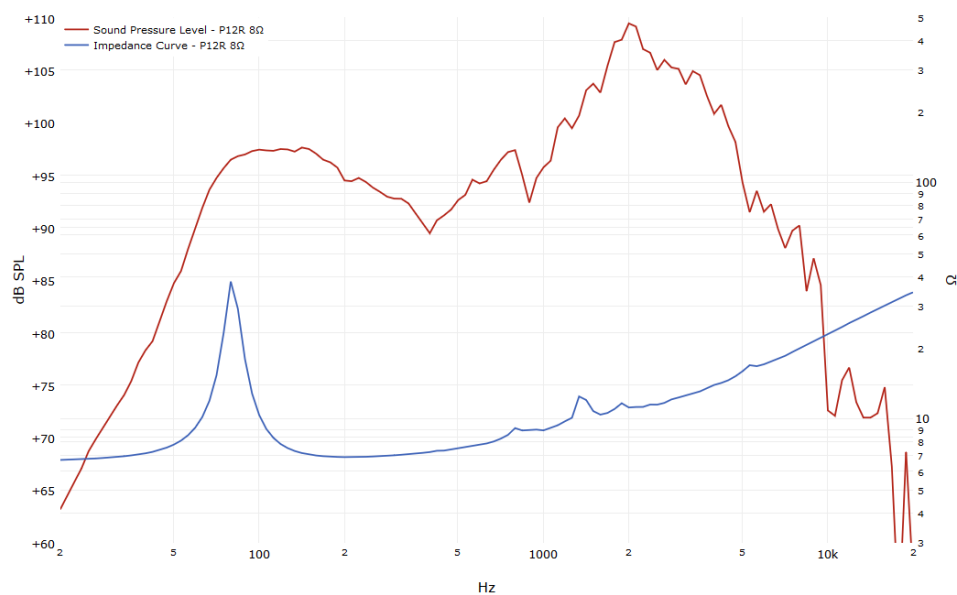
Obr. D.5: Ověření parametrů svazkové pentody 6V6



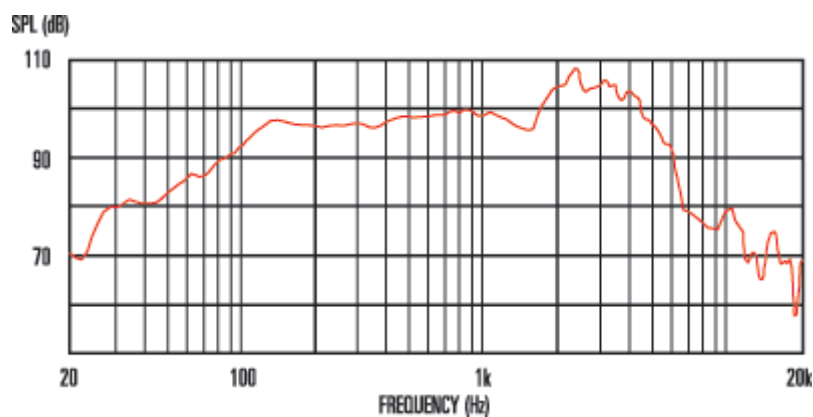
Obr. D.6: Stejnosečné napětí a proudy na jednotlivých součástkách

Příloha E

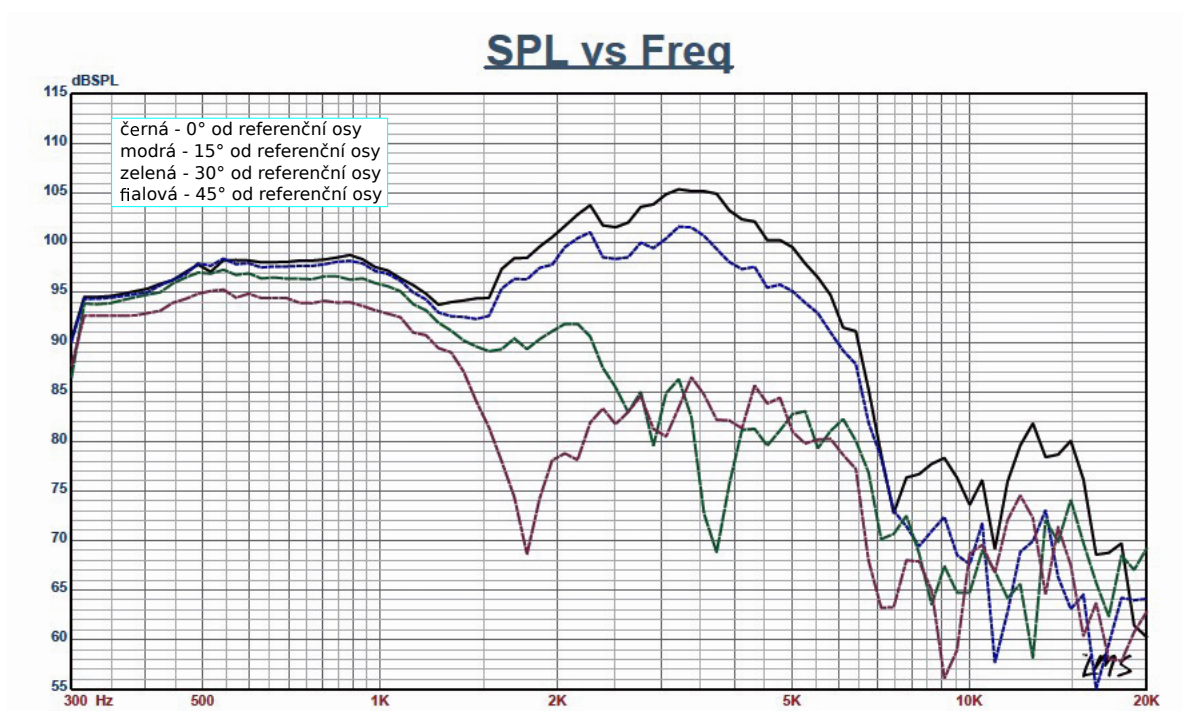
Frekvenční charakteristiky reproduktorů



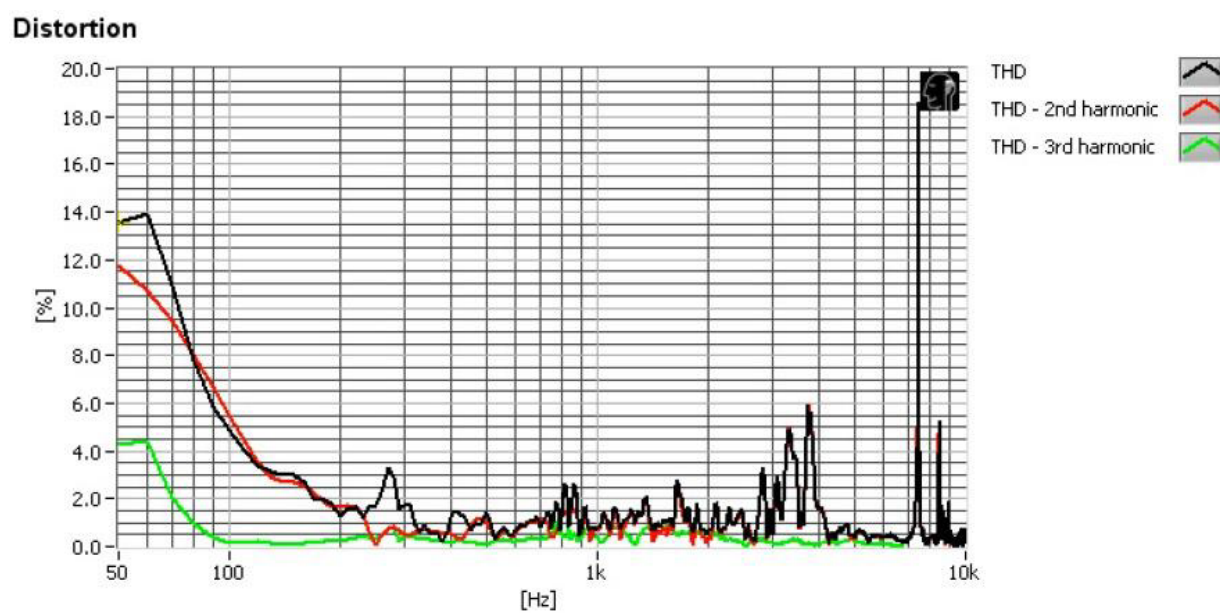
Obr. E.1: Frekvenční charakteristika reproduktoru Jensen P12R [Převzato z [22]]



Obr. E.2: Frekvenční charakteristika reproduktoru Celestion G12M [Převzato z [23]]



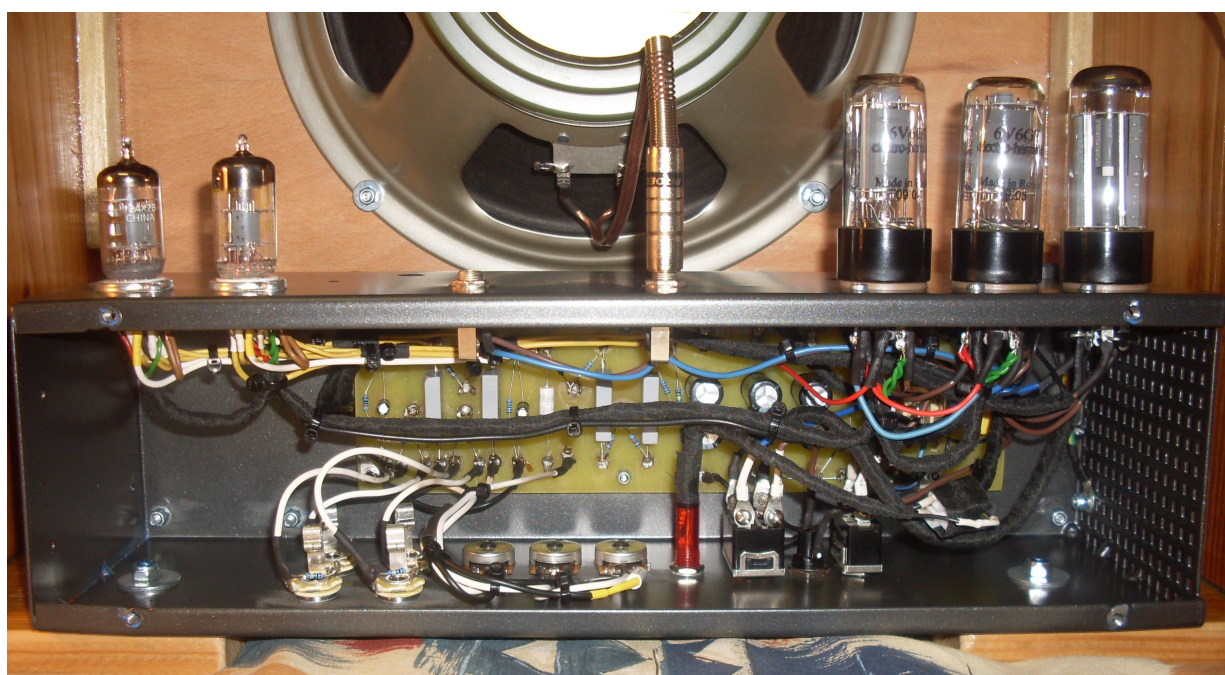
Obr. E.3: Frekvenční charakteristika reproduktoru Celestion G12 pod různými úhly od referenční osy reproduktoru [Převzato z [24]]



Obr. E.4: Harmonické zkreslení reproduktoru Celestion G12 [Převzato z [24]]

Příloha F

Fotografie zrealizovaného zesilovače



Obr. F.1: Pohled na kabeláž



Obr. F.2: Pohled zepředu



Obr. F.3: Pohled zezadu