

# Nízkofrekvenční zesilovač

Luboš Fusek

---

Bakalářská práce  
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

**Fakulta aplikované informatiky**

**Ústav automatizace a řídicí techniky**

**akademický rok: 2005/2006**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

**(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)**

**Jméno a příjmení: Luboš FUSEK**  
**Studijní program: B 3902 Inženýrská informatika**  
**Studijní obor: Automatické řízení a informatika**  
**Téma práce: Nízkofrekvenční zesilovač**

**Zásady pro vypracování:**

- 1. Seznamte se s principy a různými variantami zapojení nf zesilovačů.**
- 2. Modifikujte vybrané schéma zesilovače pro dnes dostupnou součástkovou základnu.**
- 3. Ověřte princip zesilovače v dostupném simulačním programu (MicroCap).**
- 4. Zesilovač realizujte včetně ověření jeho správné funkce.**

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. LÁNÍČEK, R.: Elektronika, obvody, součástky a děje. Praha, BEN, 1998.
2. katalog EZK Rožnov pod Radhoštěm, 2005.
3. SIEGFRIED, W.: Abeceda nf techniky. Praha, BEN, 2002.
4. KOTISA, Z.: NF zesilovače I, II. Praha, BEN, 2002.
5. [www.auravos.cz](http://www.auravos.cz)

Vedoucí bakalářské práce:

**Mgr. Milan Adámek, Ph.D.**

Ústav elektrotechniky a měření

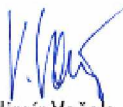
Datum zadání bakalářské práce:

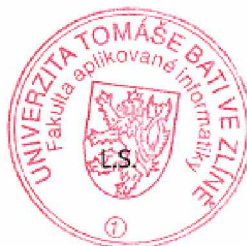
**14. února 2006**


Termín odevzdání bakalářské práce:

**16. června 2006**

Ve Zlíně dne 14. února 2006

  
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*pověřený děkan*



  
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Úkolem této bakalářské práce bylo seznámit se s různými principy a variantami NF zesilovačů. Jejím hlavním přínosem je modifikované schéma zapojení zesilovače Transiwatt z roku 1970 pro dnešní součástkovou základnu. Funkce tohoto zesilovače je nasimulována v programu Micro Cap verze 6.

Zesilovač je realizován jako dvoukanálový pro stereofonní poslech, pro běžné použití v domácnosti.

Klíčová slova: NF zesilovač, Transiwatt, Micro Cap

## **ABSTRACT**

The aim of this bachelor thesis was to familiarize with various principles and variants of LF amplifiers. Its main contribution is the modification of wiring diagram of the amplifier Transiwatt from 1970 for contemporary part base. The function of this amplifier is simulated by means of the program Micro Cap, version 6.

It is implemented as a two-ways amplifier for stereophonic listening for common home application.

Keywords: LF amplifiers, Transiwatt, Micro Cap

Chtěl bych tímto poděkovat mému vedoucímu Mgr. Milanu Adámkovi, Ph.D. za výborné konzultace tohoto projektu, rady a připomínky během vypracovávání bakalářské práce. Mé poděkování náleží také mým rodičům, jenž mi realizaci tohoto díla sponzorovali a mé přítelkyni Martině Machové za velikou podporu při tvorbě této bakalářské práce.

**Motto:**

„Neexistuje nic skutečně cenného,  
čeho může být dosaženo bez práce a bez námahy.“

JOSEPH ADDISON (1672 - 1719)

# OBSAH

ÚVOD .....	9
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY NÍZKOFREKVENČNÍCH ZESILOVAČŮ</b> .....	<b>11</b>
1.1 PRACOVNÍ BOD ELEKTRONKOVÉHO ZESILOVAČE .....	11
1.2 PRINCIP ZESILOVAČE .....	12
1.3 TŘÍDY NF ZESILOVAČŮ .....	13
<b>2 PRINCIPY JEDNOTLIVÝCH TŘÍD.....</b>	<b>14</b>
2.1 PRINCIP TŘÍDY A .....	14
2.2 PRINCIP TŘÍDY B .....	15
2.3 PRINCIP TŘÍDY AB .....	16
2.4 PRINCIP TŘÍDY AB+C.....	16
2.5 PRINCIP TŘÍDY D.....	17
<b>3 VOLBA VÝKONU ZESILOVAČE.....</b>	<b>19</b>
<b>4 VOLBA VÝKONU ZESILOVAČE.....</b>	<b>21</b>
4.1 STANDARDNÍ PŘÍKON .....	21
4.2 MAXIMÁLNÍ STANDARDNÍ PŘÍKON .....	21
4.3 SKUTEČNÝ PŘÍKON HUDEBNÍHO SIGNÁLU .....	22
<b>5 ZKRESLENÍ .....</b>	<b>23</b>
5.1 DEFINICE ZKRESLENÍ .....	25
5.2 ROZDĚLENÍ ZKRESLENÍ .....	26
5.2.1 Harmonické zkreslení.....	26
5.2.2 Intermodulační zkreslení .....	27
5.2.3 Zkreslení TIM.....	27
5.2.4 Zkreslení SID.....	29
5.3 DALŠÍ MOŽNÁ MĚŘENÍ.....	30
<b>6 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA .....</b>	<b>31</b>
6.1 MĚŘENÍ HORNÍHO MEZNÍHO KMITOČTU .....	31
6.2 MĚŘENÍ DOLNÍHO MEZNÍHO KMITOČTU .....	32
<b>7 CHOVÁNÍ ZESILOVAČŮ V LIMITACI .....</b>	<b>33</b>
<b>8 ŠUMOVÉ VLASTNOSTI ZESILOVAČŮ.....</b>	<b>34</b>
8.1 ODPSTUP SIGNÁL/ŠUM.....	34
8.1.1 Odstup cizích napětí.....	34
8.1.2 Odstup rušivých napětí.....	34

8.2	PRŮNIK BRUMU NAPÁJECÍM NAPĚTÍM .....	35
8.3	VLASTNÍ ŠUM KONCOVÉHO STUPNĚ .....	36
<b>9</b>	<b>CHLAZENÍ ZESILOVAČŮ .....</b>	<b>37</b>
9.1	PASIVNÍ CHLAZENÍ .....	37
9.2	AKTIVNÍ CHLAZENÍ.....	37
9.3	ODVOD TEPLA .....	38
<b>10</b>	<b>TEPLOTNÍ STABILITA TRANZISTORU .....</b>	<b>39</b>
10.1	ZTRÁTOVÝ PŘÍKON.....	39
10.2	TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ TRANZISTORU .....	39
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>41</b>
<b>11</b>	<b>DNEŠNÍ TRENDY A ODŮVODNĚNÍ VOLBY ZAPOJENÍ PRO MODIFIKACI.....</b>	<b>42</b>
<b>12</b>	<b>KONCOVÝ ZESILOVAČ A JEHO MODIFIKACE .....</b>	<b>44</b>
12.1	SIMULACE KONCOVÉHO ZESILOVAČE V PROSTŘEDÍ MICRO CAP 6 .....	45
12.1.1	Simulace původního zapojení o výkonu 20W s napájením +45V .....	45
12.1.2	Simulace bakalářskou prací modifikovaného zapojení na dnešní součástkovou základnu, o výkonu 45W, napájeného napětím +63V .....	47
12.1.3	Porovnání ztrátových výkonů v simulacích se skutečnými.....	50
12.1.4	Ovlivnění frekvenční charakteristiky změnou hodnot kondenzátorů C3 a C2.....	52
<b>13</b>	<b>REALIZACE MODIFIKOVANÉHO NF ZESILOVAČE .....</b>	<b>56</b>
13.1	POSTUP PŘI VÝROBĚ DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ .....	58
13.2	NAPÁJECÍ ZDROJ .....	58
13.2.1	Schéma zapojení a desky plošných spojů .....	59
13.2.2	Popis zapojení.....	60
13.2.3	Osazování desek plošných spojů zdrojů.....	60
13.2.4	Kontrola funkce .....	60
13.3	MODUL POJISTEK PRO OBA KANÁLY .....	60
13.3.1	Pohledy na plošný spoj modulu pojistek .....	61
13.4	KONCOVÝ STUPEŇ A JEHO SESTAVENÍ .....	61
13.4.1	Osazování desek plošných spojů výkonových zesilovačů .....	63
13.4.2	Oživení nf koncového zesilovacího stupně.....	64
13.4.3	Naměřený sinusový výkon zesilovače .....	65
<b>14</b>	<b>MECHANICKÁ KONSTRUKCE.....</b>	<b>66</b>
14.1	OBVOD PRO NAPÁJENÍ LED V SÍTOVÉM SPÍNAČI .....	68
<b>15</b>	<b>PROVOZNÍ DOPORUČENÍ TOHOTO ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>69</b>

15.1	ÚČEL ZAŘÍZENÍ .....	69
15.2	DOPORUČENÉ ZAPOJENÍ REPROSOUSTAV K TOMUTO ZESILOVAČI .....	69
15.3	NÁVOD K POUŽITÍ.....	71
15.4	DŮLEŽITÁ BEZPEČNOSTNÍ UPOZORNĚNÍ.....	71
15.5	VÝMĚNA POJISTEK .....	72
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>78</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>79</b>



## ÚVOD

Celkově mohou být zesilovače děleny na mnoho skupin. Bakalářská práce se bude zabývat jen principy a různými variantami zapojení tranzistorových (i elektronkových) zesilovačů nízkých frekvencí.

Hlavním úkolem nízkofrekvenčních zesilovačů je zesilovat slabé signály nízkých kmitočtů na požadovanou úroveň. Realizace tranzistorových zesilovačů se připisuje již k roku 1948, kdy byl v Bellových laboratořích v USA objeven tranzistor. Tento zesilovací prvek byl objeven při proměřování rozložení el.pole(napětí) kolem hrotového PN přechodu pomocí tzv. kompenzátoru (při měření neodebírá proud). Nechtěným prohozením napětí jeho zdroje vznikl tzv. hrotový tranzistor, který se vyráběl v zahraničí i průmyslově.

## I. TEORETICKÁ ČÁST

# 1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY NÍZKOFREKVENČNÍCH ZESILOVAČŮ

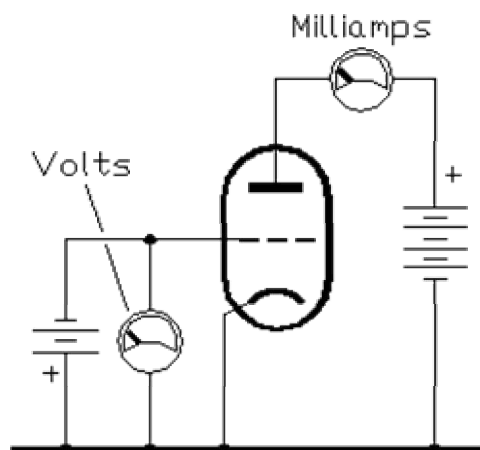
Tato kapitola se zabývá nejdůležitějšími poznatky pro pochopení základních pojmů a funkce NF zesilovačů.

## 1.1 Pracovní bod elektronkového zesilovače

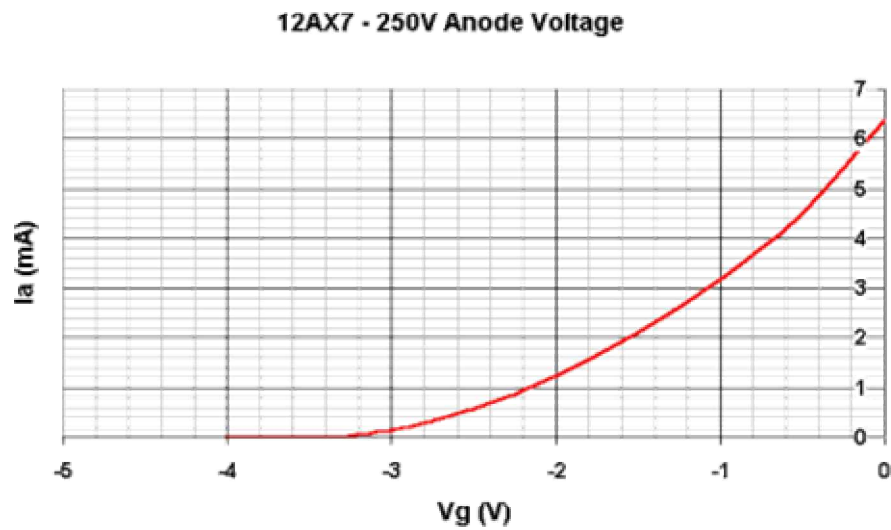
Obr. 1 znázorňuje nejjednodušší elektronku - triodu. Anoda bývá většinou napájena zdrojem o napětí od 100V do 1kV. V anodovém obvodu je zařazen miliampérmetr.

V levé části obrázku znázorňuje zdroj připojený mezi mřížku a katodu. Voltmetr měří jak velké napětí je přivedeno na mřížku. Napětí na mřížce musí mít vždy zápornou hodnotu, anodový proud tedy s vyšší hodnotou záporného napětí bude klesat.

Anodový proud měříme miliampérmetrem. Kdybychom přiváděli na mřížku nulové napětí, zjednodušeně lze považovat triodu za diodu. Anodový proud bude odpovídat emisní schopnosti katody. Jeho velikost lze měnit například žhavením. Čím bude katoda teplejší, tím vyšší anodový proud naměříme, protože bude emitovat větší množství elektronů. V praxi se někdy můžeme setkat se záměrným snižováním žhavicího napětí, abychom dosáhli zkreslení zvuku - kytarové zesilovače typu Marshall. U těchto zesilovačů bývá záporné předpětí výkonových elektronek kolem 40V nebo i více a pro vstupní elektrony kolem 2 až 10V. Každý typ elektrony má tedy jiné optimální nastavení [6].



Obr. 1. Zesilovač v třídě A (s elektronkou)

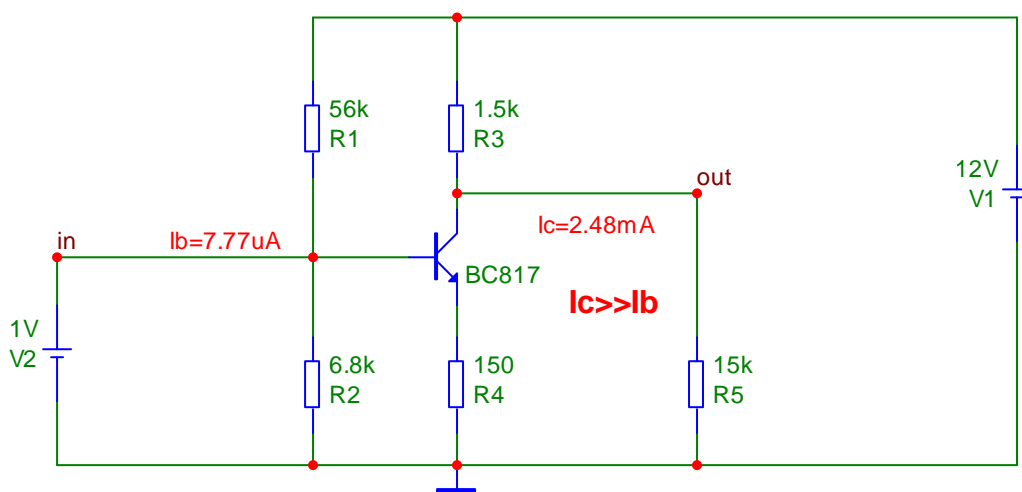


Obr. 2. Výstupní charakteristika elektronky

## 1.2 Princip zesilovače

Změnou mřížkového napětí můžeme měnit anodový proud. Necháme-li anodový proud procházet vhodně zvoleným anodovým odporem, vyvoláme malou změnou mřížkového napětí velkou změnu anodového napětí a tak dostaneme nejjednodušší zesilovač. Tímto způsobem bývají řešeny obvody předzesilovačů [4].

U zapojení s tranzistorem je princip zesílení totožný: malou změnou proudu báze vyvoláme velkou změnu proudu v obvodu kolektoru. (Obr. 3)



Obr. 3. Zapojení zesilovače ve třídě A (s tranzistorem)

### 1.3 Třídy NF zesilovačů

Často se můžete setkat na stránkách nejrůznějších odborných časopisů s polemikou, která třída je pro NF zesilovače nejlepší. A tak jsou vychvalovány zesilovače ve třídě A, jiní výrobci naopak tvrdí, že třída B je to nejlepší, v současnosti se objevují i zapojení ve třídách B+C, D a jiných. O co však skutečně jde, to leckdy kupující z řad hudebníků vůbec netuší. Většina NF zesilovačů pracuje ve třídách A, B, nebo AB. S vyššími třídami (B+C), D se bohužel můžeme setkat pouze velmi vzácně. Pro rozbor problematiky bakalářská práce používá zapojení s tranzistory, jenom pro názorné vysvětlení je objasněn pojem „pracovní bod“ zesilovače s elektronkou [6].

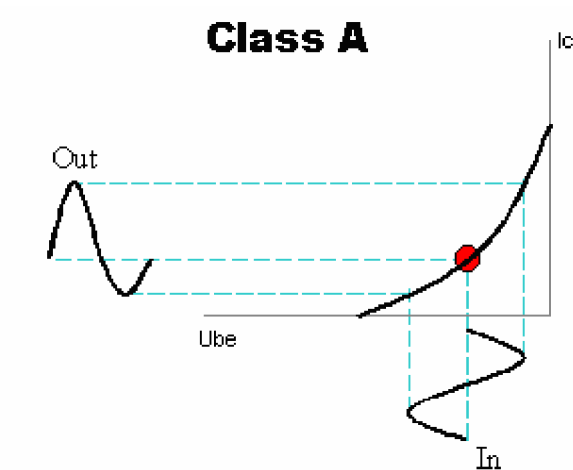
Předzesilovače se tedy konstruují ve třídě nejjednodušší - A. Jiné třídy se používají výjimečně, a to spíše ve vf technice, kde je nutno zesilovat zároveň slabé i silné signály.

Je jasné, že princip předzesilovacího i koncového tranzistoru je ten samý, pouze pracují s vyššími hodnotami kolektorových napětí a proudů. U koncového stupně ale je třeba uvažovat i o co možná nejefektivnějším provedení [8].

## 2 PRINCIPY JEDNOTLIVÝCH TŘÍD

Všechny principy tříd zesilovačů jsou odvozeny od nastavení pracovního bodu zesilovacího prvku - tranzistoru.

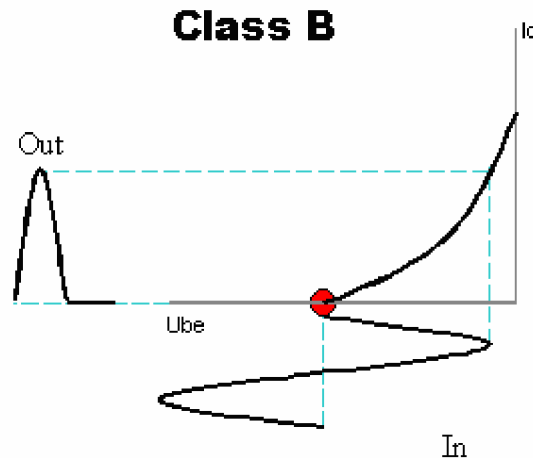
### 2.1 Princip třídy A



Obr. 4. Třída A

Černý bod je umístěný uprostřed převodní charakteristiky, tj. kolektorový (nebo anodový) proud stále protéká (Obr. 4). Signálem  $I_n$  měníme jeho velikost a na pracovním anodovém odporu vzniká signál  $I_{out}$ . Vidíme, že oproti vstupnímu signálu je zkreslený. Zkreslení bude tím menší, čím bude mít vstupní signál menší rozkmit. Proto třída A pracuje se zanedbatelným zkreslením pouze při velmi malých signálech. Pro velké signály bude již zkreslení značné a může dosahovat až hodnoty kolem 10%. Jediná možnost, jak zkreslení snížit, je zavedení silné záporné zpětné vazby. Výkon bude jen kolem 10 - 15W, jelikož výkonová ztráta tohoto zesilovače při jeho stále nastavené vysoké hodnotě kolektorového proudu je velice značná! Zesilovač ve třídě A odebírá stále značný proud, i když není vůbec vybuzen [6].

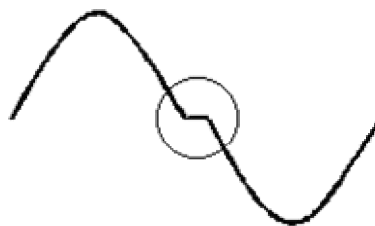
## 2.2 Princip třídy B



Obr. 5. Třída B

Zesilovač ve třídě B zesiluje každou půlvlnu zvlášť. Tj. pracovní bod je nastaven těsně před bod otevření tranzistoru. Na obrázku vidíme, jak je zesílena kladná půvlina. Pro zesílení obou půvlín je zapotřebí tzv. komplementární dvojice tranzistorů, kdy kladnou půvlínu zesiluje tranzistor NPN a zápornou půvlínu tranzistor PNP. Zesilovač ve třídě A odebírá stále značný proud, i když není vůbec vybuzen, ve třídě B bez buzení žádný proud neprotéká. A tak konstruovat zesilovače výkonů řádově stovky Watt nečiní problém [6].

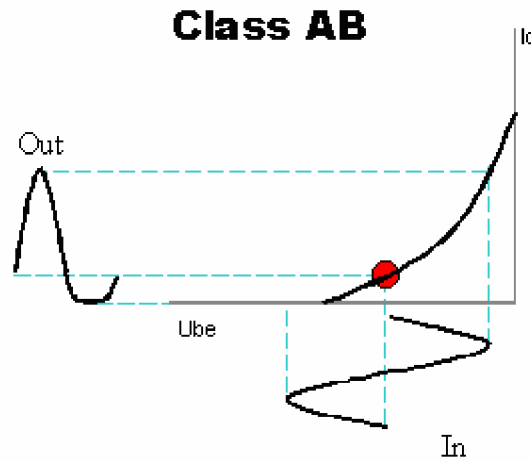
Nevýhoda:



Obr. 6. Přechodové zkreslení

Nastavení pracovního bodu na počátek převodní charakteristiky způsobuje přechodové zkreslení. Projevuje se jako zvláštní "chrastění" při malých hlasitostech. Jev je patrnější spíše u tranzistorových zesilovačů osazených bipolárními tranzistory. Lze jej například odstranit úpravou zapojení tak, aby při malých signálech pracoval budič ve třídě A s takovým výkonem, aby byl schopen převzít při malých signálech funkci koncového stupně. Příkladem může být známý Transiwatt TW40. Nevýhodou je vysoká kolektorová ztráta budiče, který se silně zahřívá [6].

### 2.3 Princip třídy AB



Obr. 7. Třída AB

Pracovní bod nenastavíme na počátek převodní charakteristiky, ale dovolíme, aby výkonovým stupněm tekla jistý klidový proud. V tomto případě ale musíme zajistit, aby jeho velikost byla stálá i při změně pracovních podmínek koncového stupně. U tranzistorů je počátek převodní charakteristiky závislý na teplotě čipu. Proto je nutná teplotní kompenzace klidového proudu. Pro dosažení vysokých výkonů je třeba třídy kombinovat a to nastavením napěťového budiče do třídy A, výkonového budiče do AB a koncových tranzistorů do B [6].

### 2.4 Princip třídy AB+C

V mnoha případech nám nevyhovuje ani třída B, a to tam, kde požadujeme maximální možnou účinnost - výkony nad  $1\text{kW}$ , autozesilovače s omezenou možností chlazení atd. Zesilovač má koncový stupeň konstruován tak, aby se při maximálním výkonu otvíraly další výkonové stupně, které zvýší napájecí napětí po dobu, kdy je požadován vysoký výkon. Zapojení dosahují energetické účinnosti kolem 80%. Firma SEAC již má takovýto koncový stupeň v testovacím provozu.

Jistě jste si všimli faktu, že zesilovače velkého výkonu "hřejí" i při zpracování malého výkonu podstatně více, než zesilovače nízkého výkonu. Jev je způsobený napájením koncového stupně velkým napětím, a tak se podstatná část výkonu zdroje spotřebovává na ohřátí výkonových tranzistorů. Při plném výkonu jsou už poměry lepší, zesilovač je dokonce "chladnější" než při tzv. kritickém buzení, ležícím zhruba v polovině jmenovitého sinusového výkonu (uvažujeme přirozený hudební signál). Proto je energeticky výhodné napájet koncový stupeň



ze zdroje nižšího napětí a vyšší napětí připínat pouze v případě potřeby vyššího výstupního výkonu. Tak je problém vyřešen např. u TDA7294V. Elegantnější je zapojení, ve kterém pracují koncové tranzistory téměř do limitace a poté jejich funkci převezmou tranzistory připojené na zvýšené napájecí napětí. Tak se výkonové ztráty rozloží na všechny tranzistory výkonového stupně. Protože do maximálního výkonu většinou nepracují zesilovače trvale, nároky na chlazení se prudce sníží [4,6].

## 2.5 Princip třídy D

Nejlepší by ale bylo, aby koncové tranzistory nehřály vůbec. Jak bylo již výše uvedeno, klasický zesilovač má účinnost asi 60%, zbývajících 40% ohříváme chladič koncových tranzistorů. Koncové tranzistory zde pracují vlastně jako odpory, mění svou velikost na základě odchylky okamžité hodnoty na výstupu zesilovače od hodnoty požadované, která přichází na vstup. Uvažujme například kladnou půlvlnu. Je-li z nějakého důvodu na výstupu napětí menší než požadované, výkonové tranzistory kladné větve sníží svůj odpor a propustí na výstup vyšší proud, který na impedanci reproduktoru vyvolá vyšší napětí. Tranzistor se zahřívá. Musíme tedy hledat stav, ve kterém se tranzistor zahřívát nebude. Příklad, kdy jím neteče žádný proud je nezajímavý. Druhý případ nastane, když jím sice proud protéká, ale jeho odpor je tak malý, že na něm vzniká pouze zanedbatelný úbytek napětí. To by ovšem znamenalo, že například tranzistor v kladné větvi bude propouštět plné napájecí napětí do reproduktoru. Tento stav jistě nechceme. Lepší myšlenka je ale tranzistor sepnout na velmi krátkou dobu a způsobit tak jisté vychýlení membrány reproduktoru požadovaným směrem. Vychýlení bude úměrné časovému trvání tohoto impulsu. V případě, výskytu impulsu s periodickým opakováním, bude membrána vychýlena stále. Někdo sice může namítnout, že bude kmitat. Ano, ale pouze tehdy, je-li frekvence impulsu taková, aby to membrána stihla. V případě řízení šířky impulsu vstupním signálem, dosáhneme stejného efektu jako u klasického zesilovače. Ovšem v praxi to tak jednoduché není. Frekvence impulsů by určitě způsobovala silné rušení. Proto je nutno spínací frekvenci odfiltrovat speciálním filtrem. Spínací frekvence musí být co možná nejvyšší, ale vzhledem k použitelnosti součástek je nutno volit kompromis. Pro použití běžných tranzistorů, samozřejmě typu MOS lepší použitelné frekvence někde v pásmu 100kHz až 1MHz. Nejnižší spínací kmitočet se dá stanovit z Shannon - Kotělnikova kritéria. Podle něj nejvyšší kmitočet přenesený šířkovou modulací bude rovněž polovině kmitočtu modulačního. Budeme-li tedy chtít přenášet pásmo do 20kHz, vyjde

modulační frekvence  $40\text{kHz}$ . Tuto frekvenci by bylo ale velmi složité odfiltrovat. Proto je nutno zvolit spínací kmitočet co nejvyšší, osvědčily se frekvence mezi  $100 - 200\text{kHz}$ . Tak jako u všeho, i zde jsou jisté nevýhody:

- Pro nízké zkreslení je nezbytná linearizace pomocí záporné zpětné vazby. Tato vazba však nemůže být frekvenčně nezávislá, její hodnota musí klesat se vzrůstajícím kmitočtem. V oblasti vysokých kmitočtů se sice nemusíme obávat zkreslení, to bude "odfiltrováno" výstupní propustí. Zvedne se však úroveň šumu. Ten se však bude projevovat pouze ve výškách.
- Je větší možnost průniku vf rušení na výstup zesilovače. Proto by měla být konstrukce dobře stíněna nebo umístěna v plechové skřínce [4,6].

### 3 VOLBA VÝKONU ZESILOVAČE

Velmi častým dotazem souvisejícím s maximálním příkonem reproduktoru bývá, zda reproduktor s určitým maximálním příkonem (např. 6W) může být připojen k zařízení, jehož výstupní výkon je menší než maximální příkon reproduktoru, např. 0,1W. Vyskytuje se i otázka, zda reproduktor s určitým maximálním příkonem (např. 6W) může být bez obavy z poškození připojen k zesilovači s větším výstupním výkonem, než je maximální příkon reproduktoru, např. zesilovač s výstupním výkonem 25W.

Není-li však na vstup zesilovače, tj. i koncového stupně rozhlasového přijímače přiveden signál, je výkon na výstupu zesilovače vlastně nulový (i u 0,1W a 25W zesilovače je na výstupu nulový výkon!). Přivede-li se na vstup zesilovače signál, objeví se tento signál zesílený na výstupu zesilovače. Výstupní napětí se zvětšuje, zvětšuje-li se vstupní napětí nebo zesílení (např. regulátorem hlasitosti) zesilovače. Přitom má výstup zesilovače buď definovaný zatěžovací odpor (např. 4 ohm výstup), nebo výstupní napětí pro plné vybudení (např. 100V výstup). Má-li výstup zesilovače definovaný zatěžovací odpor, potom udávaný výkon zesilovače je vypočítán z maximálního nezkresleného napětí na definovaném zatěžovacím odporu (např. výkon 0,1W při 4 ohm výstupu zesilovače je vypočítán z naměřeného napětí 0,63V, tedy platí vztah (1)).

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{0,63^2}{4} = 0,1W \quad (1)$$

popř. výkon 25W (2) při 4 ohm výstupu zesilovače je vypočítán z napětí 10V

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{10^2}{4} = 25W \quad (2)$$

Zvětšuje-li se proto vstupní napětí u zesilovače (0,1W) tak, že na 4 ohm zatěžovacím odporu je napětí 0,63V, je zesilovač tzv. plně vybuděn a s dalším zvyšováním napětí roste velmi rychle zkreslení výstupního signálu. U zesilovače 25W je toto napětí pro plné vybudění 10 V.

Je-li vstupní, tzn. i výstupní napětí poloviční, je výstupní výkon na konstantním zatěžovacím odporu roven čtvrtině maximálního výkonu (např. napětí 0,315V na 4 ohm výstupu 0,1W zesilovače...  $P = 0,025W$ ; napětí 5V na 4 ohm výstupu 25W zesilovače ...  $P = 6,25W$ ).

Regulací zesílení zesilovače nebo změnou vstupního signálu se mění výkon na konstantní zatěžovací impedanci od 0 až do maximálního výkonu, udávaného výrobcem zesilovače.

Z této úvahy je zřejmé, že reproduktor lze připojit na zesilovač s libovolným výkonem, pokud je výstup zesilovače určen pro zatěžovací odpor odpovídající impedanci kmitací cívky. U zesilovače s větším maximálním výkonem, než je maximální příkon reproduktoru, se však musí dát pozor na výstupní napětí. Příkon do reproduktoru závisí na velikosti vstupního napětí a nastavení regulace zesílení. U zesilovače, jehož maximální výstupní výkon je menší než maximální dovolený příkon reproduktoru, se nepoškodí ani zesilovač ani reproduktor, pouze akustický výkon vyzářený reproduktorem bude menší, protože reproduktor pracuje s konstantní účinností. U zesilovače, jehož maximální výstupní výkon je větší než maximální příkon reproduktoru, by se nemělo regulátorem zesílení, popř. velikostí vstupního signálu, překročit napětí odpovídající na výstupu maximálního příkonu reproduktoru. Např. reproduktor  $6W$  určitého typu s impedancí  $4$  ohmy má charakteristickou citlivost  $90dB$ , tj. hladina akustického tlaku při  $1VA$  ve vzdálenosti  $1m$ . Při  $6W$  je hladina akustického tlaku  $98dB$ . Při příkonu  $0,1W$  je hladina akustického tlaku  $80dB$ . Připojíme-li tento reproduktor k zesilovači  $25W$ , nemělo by výstupní napětí pro tento reproduktor překročit hodnotu  $4,9V$ , což odpovídá uvedenému příkonu  $6W$ . U většiny typů reproduktorů se však bez poškození může značně zvětšit příkon, výrobce to však nedoporučuje. Protože neustále kontrolovat výstupní napětí není snadné, lze buď připojit reproduktor přes transformátor, nebo kombinovat několik reproduktorů tak, aby byl výsledný zatěžovací odpor opět  $4$  ohmy, ale na každém reproduktoru bylo napětí odpovídající nejvýše maximálnímu příkonu.

Připojování reproduktoru na výstup zesilovačů s větším výkonem je usnadněno výstupem s konstantním napětím, např.  $30V$  u rozhlasu po drátě nebo  $100V$  u místního rozhlasu. Každý reproduktor se připojuje přes transformátor na výstup zesilovače (nebo na vedení z výstupu zesilovače). Transformátor má takový převod, že reproduktor odebírá z výstupu libovolně zvolený výkon až do maximálního příkonu reproduktoru. Transformátor mívá odbočky (tzn. různý převod) a příkon do reproduktoru lze volit podle potřebného akustického výkonu [7].

## 4 VOLBA VÝKONU ZESILOVAČE

Příkon reproduktoru je při konstantním napětí kmitočtově závislý. Největší je při nejmenší elektrické impedanci, tj. při jmenovité impedanci. Protože z hlediska provozu je důležitý maximální příkon a je lhostejné, při jakém kmitočtu nastává, udává se tento příkon se zřetelem na kmitočtové rozložení signálů a podle normy se nazývá standardní příkon.

### 4.1 Standardní příkon

- je příkon vypočítaný z napětí  $U$ , které je v daném okamžiku na svorkách reproduktoru a z absolutní hodnoty jmenovité impedance reproduktoru  $Z_j$ , platí vztah (3).

$$P = \frac{U^2}{|Z_j|} [VA; V; \Omega] \quad (3)$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že se velikost standardního příkonu reproduktoru mění úměrně se

měnou přiváděného napětí. Čím je napětí vyšší, tím je standardní příkon větší. Příkon reproduktoru však nelze zvětšovat bez omezení, proto výrobci udávají u reproduktorů tzv. maximální standardní příkon [7].

### 4.2 Maximální standardní příkon

- je takový standardní příkon, který se nemá při provozu překročit, protože by došlo k nadměrnému zkreslení akustického signálu nebo k mechanickému poškození kmitací soustavy reproduktoru.

Nejslabším článkem mechanické pevnosti kmitací soustavy bývají přívody ke kmitací cívce, lepení vinutí kmitací cívky, spojení kmitací cívky s membránou a únava ve vlhkých. Elektrická pevnost, tj. odolnost proti poškození izolace nebo přerušení vinutí kmitací cívky vlivem oteplení, bývá značně veliká, neboť kmitací cívka je dokonale chlazená. Mechanická pevnost systému, hlavně z hlediska doby života, bývá hlavním důvodem omezení příkonu. Tato mechanická pevnost však závisí na kmitočtovém spektru signálu. Kmitočty blízké rezonančnímu kmitočtu reproduktoru, při nichž má membrána největší výchylku, nejvíce mechanicky namáhají kmitací systém. Je proto možné omezením nízkých kmitočtů signálu přiváděného na reproduktor zvětšit bez obavy z mechanického poškození reproduktoru maxi-

mální příkon (neboť i maximální okamžité hodnoty příkonů budou menší v případě, postihlo-li omezení nízkých kmitočtů i oblast kmitočtů u jmenovité impedance) [4,7].

### **4.3 Skutečný příkon hudebního signálu**

- (nebo signálu řeči) značně kolísá a průměrný časový příkon těchto signálů je podstatně menší než při napájení reproduktoru sinusovým signálem s trvale maximálním příkonem [7].

## 5 ZKRESLENÍ

Jistá skupina lidí, říkajících si "hifisté" totiž odsuzují vše, co není v třídě "A" případně elektronkové, nebo osazeno komplementárními V-MOS. Mnohé firmy, vyrábějící zařízení pro výše uvedený druh lidí, pak uvádí velmi skvělé parametry. Praxe je ovšem měřit zkreslení v laboratorních podmínkách při 1kHz, 60-80% výkonu a čistě ohmické zátěži. Nic není ale jednoznačné ani v oblasti zkreslení, a tak bývají subjektivně lépe hodnoceny zesilovače elektronkové se zkreslením kolem 3 - 5% v klasickém zapojení. Údaje o zkreslení bohužel nezohledňují způsob, jakým zesilovač zkresluje[6].

Nejnepříjemnější zkreslení třetí harmonickou, zvané přechodové, se projevuje jako "chrasnění" při malých hlasitostech. Viz třídy zesilovačů. Přechodové zkreslení snižuje schopnost zesilovače přenést velmi malé dynamické signály (tranzienty), způsobuje subjektivní "zdrsnění" středů a výšek, zhoršuje prostorovost. Čím slabší signál a vyšší frekvence, tím více je zkreslení patrné. Na osciloskopu ho můžeme velmi dobře pozorovat při trojúhelníkovém signálu a napětí na výstupu kolem 1V. Měříme kmitočtem 10kHz, protože na něm je až o řád větší, než na 1kHz, kde bychom ho nemuseli zpozorovat [5].



Obr. 8. Průběh přechodového zkreslení

Ideální průběh přechodového zkreslení zobrazuje červená křivka, respektive její "vykousnutí". V praxi můžeme ještě pozorovat zákmitý způsobené charakterem zátěže. Dostáváme se do oblasti velmi nízkých výkonů, kde dochází k přechodu z třídy A do třídy B. Jedna z možností je používat zesilovače třídy "A", nebo nastavit velký klidový proud. To však vede k prodražení konstrukce, protože i nízký klidový proud ohřívá značně výkonové tranzistory. Např. máme-li u typu 300W osazeném 6 ks výkonových tranzistorů nastaven klidový proud 30mA/pár, klidový proud bude mít velikost 90mA. Při napájení zesilovače 120V bude celková výkonová ztráta  $120V \times 90mA$ , tj. 10,8W. Mnohým nepřipadá tato hodnota vysoká, je to pouze kolem 10% ztráty při sinusovém buzení do plného výkonu 300W. Přirozený signál ale zdaleka nedosahuje úrovně sinusového buzení, navíc v tomto signálu se objevují i tiché pasáže a pauzy, během nichž může zesilovač chladnout. Proto náš modul 300W je navržen tak, aby budič měl nastaven pracovní bod "hodně do třídy A". Při malých výkonových úrovních pak pracuje do zátěže pouze budič, výkonové tranzistory pracují v čisté třídě B. Pro větší výkony než 300W není vzhledem k jejich použití vznik přechodového zkreslení tak kritický, protože k němu dochází už v oblasti šumu. Plně postačí přesné, teplotně kompenzované nastavení předpětí bázi výkonových tranzistorů a poměrně silná zpětná vazba. Různá zkreslení můžeme pozorovat u výkonů, při kterých dochází k "přebuzení" zesilovače a limitaci signálu. Při zkouškách různých složitějších zapojení nemile překvapí jejich nepředvídané chování v limitaci, při sledování na osciloskopu byly patrné značné zákmity. Naproti tomu jednoduchý zesilovač podobné nečnosti nemá. Jev způsobuje budič koncového stupně "celosymetrického" zapojení. Při jeho práci v oblasti limitace totiž ve většině zapojení dochází k střídavému zavírání tranzistorů budiče, tyto pak pracují v režimu blízkém spínání. Proto v jistých konstrukcích je opodstatněno používání spínacích a vysokofrekvenčních tranzistorů. Jiné totiž nejsou schopny v dostatečně krátkém čase přecházet ze zavřeného do otevřeného stavu. Proto se v mnoha konstrukcích používá budič, který pracuje za všech okolností ve třídě A. Tato třída je nastavena velmi jednoduše, a to stálým otevřením tranzistorů řízených proudových zdrojů. Tato koncepce se příznivě projeví i v absenci rázů při připojení a odpojení zdroje. Není tedy nezbytně nutné používat obvody pro opožděné připojení reproduktorů. Tyto obvody jsou využity ve spojení s tepelnou ochranou spíš pro odepnutí reproduktorů v případě krátkodobého výpadku sítě, při kterém se zdroje signálu pro zesilovač mohou chovat nepředvídaně. Zvláště zařízení osazená operačními zesilovači při výpadku napájení mívají na výstupu proměnnou stejnosměrnou složku [6].



## 5.1 Definice zkreslení

Zkreslení udáváme pomocí tzv. činitele harmonického zkreslení THD. Tento by měl být co možná nejmenší a vyjadřuje procentní podíl vyšších harmonických k celému signálu (napětově). Zkreslení není jednoduché změřit, protože potřebujeme sinusový generátor o vysoké spektrální čistotě, na výstupu zesilovače ostrý filtr s spektrální analyzátor. Špičková zařízení, jmenujme alespoň výrobky Rohde & Schwarz nebo absolutní světovou jedničku v měřicí technice pro audioelektroniku, firmu Audio Precision a její System One, System Two jsou investice řádu statisíců korun. Leckdy je přínos měření sporný, protože co naplat, přístroje uši nemají !

Pro názornost k pojmu zkreslení můžeme uvést jednoduchý případ. Mějme zesilovač o výstupním sinusovém napětí 100V. Do 4 ohmové zátěže bude dávat výkon 2,5kW. Bude mít zkreslení 1%, to znamená bude dávat 1V harmonických kmitočtů, které do signálu nepatří. Tento 1V odpovídá výkonu 0,25W na 4 ohmech. Jste schopni uslyšet tento čtvrtwatt v rachotu zhruba 140dB, který odpovídá startu proudového letadla? Z hlediska akustiky je to asi totéž, kdyby Vám někdo tvrdil, že slyší spadnout špendlík v rachotu sbíječky, nebo růst trávu. Jistě, zkreslení se měřit musí, ale udávat je pro 1kHz ve tvaru 0.0000... je nesmysl. Zkreslení by se nemělo přeceňovat, protože nikdo neuvádí např. poměry sudých a lichých harmonických. Vztah k maximálnímu vybuzení je rovněž zavádějící, protože u výkonných zesilovačů kolem 1kW na kanál mohou být přechodová zkreslení při nízkých hlasitostech zřetelně slyšet, i když bude zkreslení vycházet pod 0,1%. Proto je vhodné měřit zkreslení právě v oblasti, kde se vyskytuje, "projet" celé pásmo frekvencí a nedostatky odstranit. Při měření přechodového zkreslení na výkonu kolem 1W je pěkně viditelné i na osciloskopu. S měřením zkreslení by se to nemělo přehánět, myslíme, že buďto se zesilovač poslechově líbí nebo ne, a když ten, co se líbí má zkreslení 0,1% není důvod ho tlačit za každou cenu do třídy 0,001%.

Na druhé straně ale měřit význam rozhodně má, víme -li, co zjistit. Zesilovače v třídě AB v případě špatně nastaveného pracovního bodu bude produkovat sice zkreslení 1% při plném výkonu, ale vztáhneme -li je k výkonu kolem 5W, může lehce překročit 10%. A to slyšet rozhodně bude. Kompenzace přechodového zkreslení je dost složitá záležitost, mění se totiž i s teplotou přechodů tranzistorů nebo s napájecím napětím lamp. Tedy nezáleží pouze na tom, čím budeme měřit, ale i jestli měříme na studeném nebo zahřátém zesilovači. V případě

špatně provedené teplotní kompenzace např. po zapnutí nezkresluje, ale po odehrání několika minut začne. Proto někteří špičkoví zvukaři aparaturu jistou dobu "rozehrávají". Výrobci se samozřejmě uvedenými skutečnostmi nechlubí, snaží se jen naměřit pomocí špičkových přístrojů co nejnižší údaj [6].

## 5.2 Rozdělení zkreslení

Harmonické

TIM - transient intermodulation distortion

SID - slew induced distortion

DIM - dynamic intermodulation distortion

### 5.2.1 Harmonické zkreslení

Jeho vznik je způsoben nelinearitou aktivních součástí tj. diody, tranzistorů, elektronek. Nelinearity způsobují vznik vyšších harmonických složek vstupního signálu. Harmonické složky obsahují celistvé násobky frekvence vstupního signálu. Sudé harmonické složky nepůsobí tak rušivě jako liché. Nejnepříjemněji zní zkreslení třetí harmonickou - již zmíněné přechodové zkreslení, navíc se projevuje při velmi malých hlasitostech, a tak není ani maskováno signálem. Vznik zkreslení je nežádoucí, i když u elektronkových zesilovačů to jednoznačně říci nelze, zde se pohybují zkreslení okolo 5%, složitější zapojení dosahují hodnot kolem 1%, ale poslechově mohou být paradoxně horší než jednodušší klasická zapojení. V jistých speciálních případech je zkreslení dokonce vyžadováno - např. kytarové (nástrojové) zesilovače, lze se setkat dokonce s možností zkreslení regulovat např. řízením žhavení vstupních lamp. Rozlišujeme tedy pojmy věrná reprodukce a reprodukce, která se nám subjektivně líbí. Tranzistorové zesilovače běžně dosahují hodnot menších než 0,05%, zatímco reproduktory se zkreslením pod 2% je velký problém vyrobit. Údaj o zkreslení reproduktorů ale najdete pouze u špičkových výrobků,

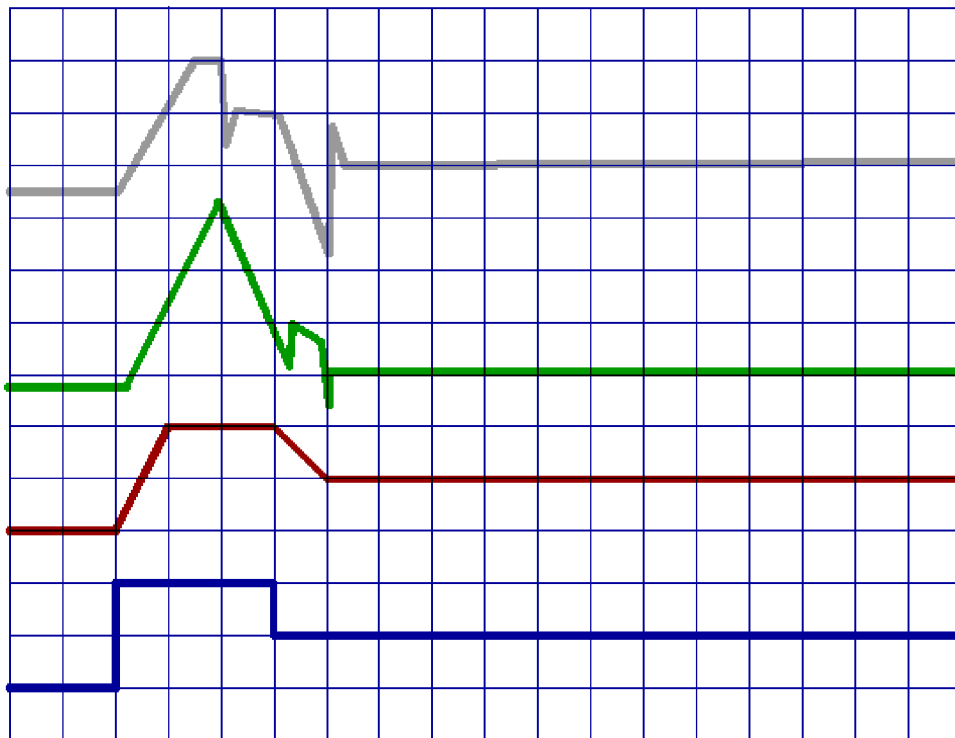
např. profesionální reproduktory BEYMA mají udané hodnoty kolem 3% a jsou špičkovými výrobky [4].

### 5.2.2 Intermodulační zkreslení

Je opět způsobeno nelinearitou převodních charakteristik. Přivedeme-li na vstup zesilovače dva sinusové signály o frekvencích  $f_1$  a  $f_2$  objeví se na výstupu zesilovače kromě těchto sinusových signálů ještě jejich kombinace  $f_1+f_2$ ,  $f_1-f_2$ ,  $2f_1+f_1$ ,  $2f_1+2f_2$ , atd. Bylo definováno několik standardních kombinací dvou signálů používaných pro měření. Jde o signály vzdálené (např.  $700\text{Hz} + 10000\text{Hz}$ ) i blízké (např.  $13000\text{Hz} + 14000\text{Hz}$ ). Zkreslení vytváří nepřirozený studeně umělý zvuk [6].

### 5.2.3 Zkreslení TIM

S nahrazováním elektronek tranzistory souvisí počátek hledání věrné reprodukce, hledání nejrůznějších zkreslení atd., tedy hnutí Hi-Fi. V době elektronek byla zapojení rozdělena na jednočinná a dvojitá, pracující ve třídě B. Pamětníci nám dají za pravdu, že měla skvělý zvuk, který nebylo nutno moc vylepšovat. Svou roli sehrál jistě jeden fakt - nebyly používány silné zpětné vazby pro eliminaci zkreslení. Převodní charakteristiky elektronek nevykazují silné nelinearity, tak ani nebyl důvod pro zavedení záporných vazeb. Tranzistorové zesilovače "hifisté" hodnotili v té době velmi špatně, jako nepřirozeně znějící, se zkreslením a "roztřepenými" výškami [4,6].



Obr. 9. Degradace signálu zkreslením TIM

Uvedené zkreslení má na svědomí silná zpětná vazba a nedostatečná rychlost přeběhu. Tranzistorové zesilovače se bez zpětných vazeb vůbec neobejdou, v počátcích této techniky leckdy dokonce platilo - čím víc součástek, tím horší zvuk. Přitom naměřené parametry byly proti elektronkám mnohem lepší, ve zkreslení až o dva řády, v odstupech rovněž. Vše souviselo s použitím germaniových tranzistorů, které byly dost "pomalé" K špičkově řešeným zesilovačům z doby počátku křemíkových tranzistorů patří bezesporu zesilovače TRANSIWATT, ty používaly budič se spínacím tranzistorem KU611, pracujícím ve třídě "A", který si poradil i s buzením komplementárního stupně složeného z křemíkového KD607 a germaniového 2NU74, a poslechově je i v dnešní době srovnatelný se zahraničními výrobky výrobky zvukových jmen. Hodnoty odstupu a přechodového zkreslení má ale na dnešní dobu horší a tak není moc důvodů pro to jej dále vyrábět. Pro zajímavost můžeme uvést fy. AU-RA (Rational Audio) Praha, mající je pořád ve výrobním programu za více než příznivé ceny. V době levných aktivních součástek a výkonových tranzistorů V-MOS, ale výroba zesilovačů nízkého výkonu takového provedení není opodstatněná. [1,5,6]

Jak jsme naznačili, zkreslení TIM způsobí přítomnost záporné zpětné vazby a je svázáno se zkreslením SID - nízká rychlost přeběhu. Projevuje se neschopností zesilovače sledovat vstupní signál. Nastává hlavně při buzení výškami do směrem k maximálním úrovním výstupního výkonu. Jev snadno zpozorujeme při přenosu řeči na sykavkách s,š,ž., které zesilovač doslova "rozbije" ("televizní výšky"). Projevuje se nejvíce při silném signálu o vysokém kmitočtu, a má za následek značně poslechově nepříjemné zkreslení. Při rychlé změně vyjádřené modrým průběhem - ta je pro jednoduchost naznačena obdélníkovým signálem superponovaným na stejnosměrné složce, by došlo na výstupu zesilovače s pouze omezenou rychlostí přeběhu ke zkreslení vyjádřeném červenou křivkou. Záporná zpětná vazba způsobí vznik překmitu, viz zelený průběh. Překmit vznikne díky snaze zpětné vazby "dotáhnout" výstup na obdélníkový tvar. Protože je ale frekvenčně kompenzovaná, dojde vinou kompenzace k neadekvátnímu přebuzení koncového stupně k výskytu špičky. Ta by na zvuk neměla ještě katastrofální následky, kdyby nedošlo k její limitaci a "protažení" díky špatně navrženému budiči. Protažení - viz horní šedivý průběh znamená katastrofální vliv na zvuk. Doba setrvání v limitaci může dosáhnout hodnot kolem  $100\mu s$  a "odtrh" zvuk silně degraduje.

Problém degradace zvuku je složitější o fakt, že zkreslení se vzájemně ovlivňují, ve výše uvedeném případě může dojít i k výskytu intermodulačního zkreslení vlivem průniku přes napájecí zdroj do signálové části [6].

#### 5.2.4 Zkreslení SID

Pokud na vstup zesilovače přivedeme skokovou změnu napětí, na výstupu dostaneme napětí se zpožděním, úměrným rychlosti přeběhu SR zesilovače (zkreslení SID).

Zpětná vazba snižuje zkreslení, ale jen do strmosti signálu SS menší než je SR zesilovače, pak se zkreslení prudce zvyšuje. Větší záporná ZV vyžaduje větší kompenzační kapacity z důvodu zajištění stability, aby nedošlo k nepříznivým fázovým poměrům a k rozkmitání zesilovače. Tím ještě více zmenšíme SR. Je možno sice konstrukčně problém obejít minimální nebo žádnou zpětnou vazbou, zhorší se ale silně zkreslení a šum. Lepší je ale dát si práci s návrhem koncového stupně tak, aby ke zmíněnému zkreslení nedošlo. Zkreslení lze eliminovat použitím vyššího napájecího napětí nebo ještě lépe uděláme, zajistíme-li pro koncový stupeň ve špičce krátkodobě zvýšenou úroveň napětí, pak nedojde k limitaci špičky, opět jsme u větších výkonů.

Dále lze využít následujícího faktu - 1% zkreslení signálu nastává zhruba tehdy, rovná-li se strmost přiváděného signálu SR zesilovače. Zkreslení je pozorovatelné při srovnávacím testu, projevuje se jako nepěkně "nakřáplé" výšky. Strmost sinusového signálu (max. strmost je při průchodu nulou) a platí vztah (4).

$$SS=2 \times 1,41 \times f \times U_s \times 10^{-6} \text{ [V/us]} \quad (4)$$

kde  $U_s=1,41 \times U_{ef}$

$U_{ef}$  - výstupní napětí

Pro 100W zesilovač se považuje dostatečná hodnota SR 25V/us, běžně uvažujeme SR asi 0,5V/us na každý špičkový volt výstupního napětí.

Omezit zkreslení SID a tím i TIM můžeme velmi jednoduše. Na vstup zesilovače zařadíme RC filtr pro omezení strmosti vstupního signálu. Ten by měl ale propustit celé akustické pásmo při poklesu maximálně kolem 1dB. Hodnoty SR vyjdou ve srovnání s jinými zesilovači velmi špatně, v poslechových testech se ale dobře umísťují, i když mají SR nižší než

praví vzorce. My konstruujeme zesilovače zásadně tímto způsobem. Naproti tomu mnoho rychlých zesilovačů má problémy a sklony k nestabilitě hlavně ve spojení se složitými reproduktorovými vyhybkami, představujícími komplexní (jalovou) zátěž.

Pro kontrolu SID se může použít i superponovaný signál obdélníku a sinusovky podle IEC [6].

### 5.3 Další možná měření

Měření může hodně napovědět o kvalitě zesilovače, a to hlavně o stabilitě. Fantazii se meze nekladou. Můžete měřit např. obdélníkovým signálem při komplexní zátěži, někteří výrobci doporučují trápit koncové tranzistory paralelní kombinací odporu a kondenzátoru 2 mikrofarady, a to signálem 15kHz. Při takovémto měření údajně nesmíme pozorovat zákmity. Obdélníkový signál do kapacitní zátěže však znamená nekonečný proud ve špičkách!. Pozor na to, že v zapojení musí být na výstupu tlumivka, jinak na osciloskopu neznororujeme nic, v zesilovači ale oheň a ucítíme "Ampérův zápach". Měření je nesmyslné, protože v praxi se takovéto zátěže nevyskytují. Výjimkou jsou pouze piezokeramické reproduktory, ale k těm by výrobci reprosoustav měli sériově řadit indukčnosti nebo rezistory pro kompenzaci jalové složky. Spíš se vyskytují kombinace indukčnosti a odporu (reproduktory mají zvukové cívky), proto měříme raději na zátěži, která toto simuluje [3].

## 6 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA

Frekvenční charakteristika audio zesilovačů Důležitým předpokladem jakostního poslechu je vyrovnaná frekvenční charakteristika. Nikde nevidíme důvod, proč odsuzovat zesilovače s poklesem kolem  $1dB$  na okrajích akustického pásma  $20Hz - 20kHz$ . Navíc  $20Hz$  solidně nepřenesou téměř žádná soustava, až na výjimky, což jsou převážně aktivní soustavy v cenách nad  $100000Kč$  (např. Turbosound). Zesilovače moderní konstrukce jsou v podstatě výkonové operační zesilovače, nemají na výstupu ani vstupech oddělovací kondenzátory a jsou schopny přenášet i stejnosměrný proud. Při propojení vývodů elektrolytického kondenzátoru jdou tedy použít i ve stejnosměrných aplikacích, jako je řízení servomotorů apod. Naproti tomu průchod vyšších kmitočtů nad  $20kHz$  je problematický, hlavně proto, že běžné výkonové tranzistory mají velmi nízký mezní kmitočet. Mezní kmitočty jsou výrobci zase uváděny v poměrně příznivých pracovních podmínkách, jako jsou nízké kolektorové proudy kolem  $1A$  a v oblasti nízkých napětí. Při jejich zvýšení mezní frekvence klesá. Situace je kritická hlavně u velkých výkonů, protože pro jejich dosažení je třeba poměrně vysokých napětí. V praxi dochází k tomu, že při kmitočtech kolem  $20kHz$  a plném výkonu není na výstupu sinusový průběh, ale pilový. Proto je nutno použít budič schopný dodat vysoký proud i na vyšších frekvencích a dostatečně rychlé výkonové tranzistory. Nejlepší by bylo použít na místě koncových tranzistorů hojně používané a dostupné typy Mosfet Hitachi 2SK133/2SJ48. Snesou ale jen  $120V/7A$ ,  $P_c=100W$ . Z plastových typů IRF lze doporučit IRF221/9231. Z praxe ale je známo, že bipolární tranzistory pracují s lepší účinností, navíc snesou mnohem vyšší kolektorové ztráty a kolektorové proudy ve srovnání s unipolárními tranzistory rozumné ceny. Nejvhodnější výkonnostně i cenově je v současné době použití tranzistorů Motorola řady MJ15003/MJ15004. Při nižších nárocích v našich zapojeních vyhoví běžné 2N3055/2N2955. Jejich parametry se však u různých výrobců liší [2,6].

### 6.1 Měření horního mezního kmitočtu

Na vstup zesilovače připojíme NF generátor, k výstupu zesilovače pak osciloskop a nf voltmetr. Postupně zvyšujeme frekvenci. Za horní mezní kmitočet je dle DIN považována frekvence, při které se sníží napětí na výstupu o  $3dB$  oproti buzení při  $1kHz$ . Přitom musí být kondenzátor vstupního filtru odpojen. Neměříme dlouhodobě do plného výkonu nebo dokonce obdélníkovým signálem!. Napětí generátoru musí zůstat konstantní. Menší šířka pásma ještě neznamená horší zvuk (elektronkové zesilovače) Požadovaný kmitočtový roz-

sah však musí zesilovač přenést i při maximálním výkonu. Není-li tomu tak, má malou rychlost přeběhu [4,6].

## 6.2 Měření dolního mezního kmitočtu

Budeme-li frekvenci generátoru měnit směrem "dolů" zjistíme dolní mezní kmitočet. Ten je definován rovněž pro pokles o  $3dB$  oproti  $1kHz$ . Pokles bychom měli zaznamenat až pod úroveň  $10Hz$ . Při tomto kmitočtu nastane fázový posuv o  $45$  stupňů. Při vyšším naměřeném kmitočtu dochází tedy k fázovému zkreslení akustického signálu [4].



## 7 CHOVÁNÍ ZESILOVAČŮ V LIMITACI

Další velmi důležitou vlastností zesilovače je jeho chování v limitaci. K limitaci dochází v případě, že zesilovač nemá dostatečný výkon, nebo signál není upraven pomocí kompresoru dynamiky.

Chování v limitaci se posuzuje nejčastěji sinusovým signálem. Ten však není pro zobrazování osciloskopem nejvhodnější, proto raději měříme trojúhelníkovým signálem. Trojúhelníkový signál navíc nezatěžuje tolik Boucherotův člen na výstupu, takže můžeme měřit vyššími kmitočty. Okamžitá hodnota sinusového signálu se v maximu mění pomalu, a tak nelze přesně odečítat na stínítku osciloskopu. Zesilovač přebudíme a většinou pozorujeme, jak dochází k zákmitům. Zákmity na špičkách trojúhelníkového signálu pozorujeme nejčastěji při poklesu z kladného nebo záporného maxima k nule. Nejčastěji jsou způsobeny saturací budiče nebo nízkými zotavovacími časy výkonových tranzistorů. Uvedené zkreslení je velmi nepříjemné, poslechově se zvuk jeví jako "rozmazaný", výšky znějí "televizně" zvukaři jev popisují jako ztráta dynamiky a čistoty zvuku, tzv "koule". Proto není vhodné šetřit na konstrukci budiče. Výkonové tranzistory volíme s rozumnými spínacími časy, u zesilovačů s tranzistory MOS se osvědčily např. spínací výkonové tranzistory [6].



Obr. 10. Průběh limitace signálu

## 8 ŠUMOVÉ VLASTNOSTI ZESILOVAČŮ

(co a proč šumí, jak zjistit odhadem odstup s/š )

### 8.1 Odstup signál/šum

Určuje dynamický rozsah reprodukováného signálu. Horní hranice výstupního signálu je dána maximálním výstupním výkonem, při kterém ještě nenastává přebuzení a limitace - viz kapitolu o výkonu. Nám spíše půjde o dolní hranici výstupního signálu. Platí nepsané pravidlo - čím vyšší výkon je schopen zesilovač dodat, tím by měl mít lepší poměr signál /šum. Důležitý je šumový výkon na vstupu reproduktoru. Čím je reproduktor citlivější, tím jsou požadavky na odstup vyšší. Návrh zesilovače by měl být proveden tak, aby šum z reproduktorů nepůsobil rušivě. Pro výkony kolem 400W bohatě vyhoví odstup kolem 120dB. Pro výpočet odstupu použijeme vztah  $SNR = 20 \log U_s / U_v$ . ( $U_s$  - šumové napětí na výstupu  $U_v$  - max. výstupní napětí.) Měření odstupu je rovněž problematická záležitost. Při měření možná naměříte horší hodnoty odstupů, než udává výrobce zesilovače.

Odstup rušivých a cizích napětí je důležitý hlavně z důvodu velkého maximálního akustického tlaku dosahovaného ve spojení s kvalitními vysoce účinnými reproduktory. Je běžně dosahováno akustických tlaků kolem 140dB v blízkosti reproduktorů, tj například odstup kolem 70dB (kazetový tape - deck s dolby C znamená úroveň šumu 70dB [6,7]).

#### 8.1.1 Odstup cizích napětí

Je to odstup všech střídavých výstupních napětí, která nejsou žádaným signálem. Vznikají v elektronických obvodech signálové cesty nebo pronikají z pomocných obvodů, případně ze vstupu a dostávají se na výstup koncového stupně [6].

#### 8.1.2 Odstup rušivých napětí

Udává se nejčastěji u spotřební elektroniky. Jeho hodnota bývá vyšší než u odstupu cizích napětí, protože se měří se speciálním filtrem, který by měl mít stejnou charakteristiku jako lidské ucho. Frekvenční charakteristika ucha je ale závislá i na velikosti akustického tlaku, a tak tato měření nejsou objektivní a slouží spíše jen k "papírovému" vylepšování hodnoty odstupů u nekvalitních zařízení. Výrobci měří s tzv. váhovým filtrem, který bere do úvahy fyziologické zákonitosti sluchu. Jde o filtry s charakteristikou typu A, která určitým způso-

bem zohledňuje fyziologickou charakteristiku lidského ucha. Hodnoty získané při měření s tímto filtrem pak vycházejí příznivěji. Konstrukce filtru není jednoduchá, a tak je na první pohled jasné, že se jedná o problematickou záležitost. Měření provádíme při odpojeném vstupním zdroji. Vstupní svorky se potom zkratují, nechávají rozpojené nebo se mezi ně zapojuje rezistor. Toto by mělo být u měření vždy uvedeno. K měření je potřeba generátor sinusového signálu, nízkofrekvenční milivoltmetr a někdy i výše zmíněný filtr. Postup je takový, že vybudíme zesilovač na maximální výkon (nejčastěji se volí vybudění  $1dB$  pod limitací) a na milivoltmetru zapojeném na výstupu, odečteme výstupní napětí. Poté generátor odpojíme, vstup zkratujeme nebo mezi vstupní svorky zapojíme požadovaný odpor a opět odečteme výstupní napětí na milivoltmetru. Podíl těchto napětí, zlogaritmovaný a vynásobený dvaceti nám udává hodnotu odstupů  $S/\bar{S}$ . Zesilovač dá v nouzi zkontrolovat i jednodušším způsobem. Vytočíme regulátory hlasitosti na maximum a neměli bychom z připojeného širokopásmového reproduktoru slyšet téměř žádný rušivý zvuk, jako šum a brum i v tiché místnosti. Ze vzdálenosti kolem tří metrů bychom neměli nic slyšet. Je-li tomu tak, má zesilovač s výkonem kolem  $500W$  odstup kolem  $120dB$ . Provedení zmíněného poslechového testu je důležité, pokud tedy chceme, aby zesilovač přenášel i nejjemnější detaily o malé úrovni.

Hodnota odstupů  $S/\bar{S}$  je dnes velmi důležitý parametr, neboť u záznamů na CD je běžně dosahováno odstupů  $S/\bar{S}$   $105dB$  a zesilovač by neměl tuto hodnotu snižovat. U DVD to bude ještě lepší, neboť předpokládaná dynamika bude vyšší než  $120dB$ . S odstupy CD to není tak jednoznačné, mnohé nahrávky šumy i obsahují, proto se doporučuje použít hlavně pro živou hudbu noise - gate, případně expandery dynamiky [4,6].

## 8.2 Průnik brumu napájecím napětím

Brum způsobuje průnik rušivého napětí elektrické sítě s kmitočtem  $50Hz$  do užitečného signálu. Nejpatrnější je průnik dvou složek. síťový kmitočet proniká špatným stíněním signálových vodičů nebo špatným konstrukčním uspořádáním zesilovače (zemní smyčky) a vlastnostmi komponentů (transformátor, vodiče). Silná rušení tedy nejčastěji způsobují napětí a magnetická pole o síťových frekvencích. Nejčastější příčina je ve špatném stínění signálových vodičů a indukci magnetických polí do zemních smyček

Výskyt brumu na výstupu může svědčit o špatně dimenzovaných nebo nekvalitních kondenzátorech zdroje, nebo o nesmyslně vysokém klidovém proudu zesilovače. Totéž platí o vyšších harmonických složkách, které působí hodně rušivě. Jev lze omezit použitím extrémních vyhlazovacích kapacit v napájecím zdroji. Je zřejmé, že nejnáchylnější k tomuto jevu jsou zesilovače s velkým klidovým proudem, nastavovaným u budičů třídy A až na 100mA. [6].

### 8.3 Vlastní šum koncového stupně

I u dobře navrženého a zhotoveného zesilovače se ve výstupním signálu objevuje šum. Šum je v podstatě náhodný rušivý signál a jako takový pokrývá celé akustické pásmo. Šum je velmi závislý na zvoleném zapojení a šumových vlastnostech použitých součástek. Šum je v zesilovačích způsoben mnoha zdroji. Tyto se částečně liší u polovodičových a elektronkových konstrukcí. Šumy se rozdělují například na- výstřelový šum, blikavý šum, tepelný šum, šum rezistorů. Obzvláště uhlíkové rezistory poměrně šumí a tak jediná možná volba jsou kvalitní metalizované rezistory, např. fy DRALORIC. Šumové vlastnosti aktivních součástek lze snadno ovlivnit nastavením vhodného pracovního bodu. Na vznik šumu je nejnáchylnější diferenční člen. V něm není vhodné dle našich zkušeností používat neblokované Zenerovy diody pro stanovení pracovního bodu proudových zdrojů. Zenerovy diody se dokonce užívaly jako generátor bílého šumu!. Z hlediska šumu není vhodné, abychom se snažili o co nejvyšší citlivost vstupu. Šum koncového stupně záleží hlavně na provedení vstupního diferenčního zesilovače a nastavené vstupní citlivosti. Čím bude citlivost vyšší, tím bude odstup signálu od šumu horší [6].

## 9 CHLAZENÍ ZESILOVAČŮ

Pro spolehlivý provoz koncových zesilovačů je nezbytně nutné dobré chlazení. Pro amatérskou výrobu a slabší zesilovače do 200W vyhoví běžně dodávané chladicí profily, které je vhodné montovat v přístrojových skříních s větracími otvory.

Pokud má zesilovač dosahovat trvale výkonu cca 400W sinus, je to již docela slušné "topné" těleso, toto teplo musíme někam odvést.

Jiná je situace u výkonů ještě vyšších, protože chladiče vycházejí velmi rozměrné. Problém lze vyřešit dvěma způsoby, a to lepším odvodem tepla nebo zvýšením účinnosti. Pro zvýšení účinnosti je možno využít zapojení pracující ve třídě B+C, kde je nutný větší počet napájecích napětí. V podstatě jde o "klasický" PA napájený při nižším výkonu ze zdroje nižšího napětí, vyšší napětí je připojeno až při překročení jisté výkonové úrovně

Účinnost dosahuje kolem 75%, zdá se, že tato konstrukce je neopodstatněná, musíme si ale uvědomit, že přirozený signál svou úrovní spadá spíše do nižších výkonových hladin s občasnými špičkami. Účinnost klasického provedení zesilovače je v tomto režimu velmi nízká, účinnosti 60% se dosahuje až při plném vybuzení. Proto zesilovač velkého výkonu musí být velmi dobře chlazen i při nižším výstupním výkonu. Někteří výrobci nabízejí koncové stupně s šířkovou impulsní modulací, ty mají účinnost kolem 90%. Protože však spínací zesilovače se vzhledem ke svým vysokým cenám a nižší kvalitě zvuku dosud masově nerozšířily, používá se méně elegantní, o to však více používané řešení - aktivní chlazení ventilátorem za použití speciálních chladicích profilů [6].

### 9.1 Pasivní chlazení

Má jednu přednost - zesilovač neprodukuje žádný rušivý zvuk. Nedostatek - velké rozměry, cena, hmotnost, špatná spolehlivost [4].

### 9.2 Aktivní chlazení

U aktivního chlazení otáčky ventilátorků jde řídit elektronicky v závislosti na teplotě chladiče, a tak je tato výhoda nehlukného provozu sporná. Navíc transformátory uvnitř zesilovače a usměrňovače jsou taktéž zdrojem tepla, které má zcela určitě zásadní vliv na spolehlivost

a dobu života součástek, o nastavení pracovního bodu nemluvě. Proto je snad každému jasné, že do zesilovače pro profesionální účely zkrátka a dobře ventilátory patří.

Dobrý návrh aktivního chlazení je vždy otázka kompromisu mezi velikostí chladiče, jeho umístěním a volbou ventilátoru. Spousty zesilovačů končí svůj život díky tomu, že nebyly vybaveny tepelnou ochranou a poté kopnuty v lepším případě někam do rohu, v horším je někteří "umělci" dokonce zavírají do nechlazeného racku, kde se uchladiť prostě nemůžou. Ventilátor zajistí alespoň minimální průtok vzduchu kolem chladičů. Optimální je konstrukční řešení mechanické části tak, aby byl vzduch zepředu nasáván a vzadu vyfukován, případně vzadu nasáván i vyfukován [2].

### 9.3 Odvod tepla

Pro zajištění dobrého odvodu tepla se používají AL profily tloušťky minimálně *5mm*.

Je vhodné upustit od ohýbání, protože při ohybu *4-5mm* tlustého plechu dochází k zborcení struktury hliníku a tím k nárůstu tepelného odporu v místě ohybu. Zároveň se téměř vždy plech prohne a musí se zpětně rovnat. Přestup tepla nebyl dostatečný. Používat plech tenčí než *4mm* se opět neosvědčilo. Vždy je velmi dobré alespoň rukou vyzkoušet prostup tepla mezi tranzistory a chladičem. Popálíme-li se o tranzistor až nám prst zasyčí, asi nebude s chlazením něco v pořádku [2,6].

## 10 TEPLOTNÍ STABILITA TRANZISTORU

Pokud tranzistor pracuje s vyšším napětím C-E (což většina), může být teplotně nestabilní. Po připojení napětí má tranzistor určitý ztrátový příkon, který zvyšuje teplotu přechodu tranzistoru nad teplotu okolí, tím zvýší zbytkový proud (stoupá exponenciálně s teplotou) který opět zvýší teplotu přechodu, vznikne lavinovitý efekt tepelné nestability, která vede ke zničení tranzistoru, pokud není omezen proud kolektoru na bezpečnou hodnotu sériovým odporem. V úvahu je také nutno vzít, že všechny přechody tranzistoru jsou teplotně závislé, tzn. jejich vlastnosti se mění s teplotou, některé lineárně, jiné exponenciálně. Naskytá se otázka, kdy vlastně měřit charakteristiky tranzistorů. Většinou se měření provádějí při teplotě okolí, bez ohledu na skutečné provozní podmínky tranzistoru. Po zahřátí zesilovače je ale vše jinak! [6].

### 10.1 Ztrátový příkon

$P_{cmax} = U_{ce} \cdot I_c$  (W) závisí na teplotě přechodu a je v podstatě omezen její maximální přípustnou hodnotou. Přechod B-E má předpětí v propustném směru a tudíž malý odpor, přechod mezi C-B s předpětím v závěrném směru má veliký odpor. Poněvadž emitorem i kolektorem prochází v podstatě stejný proud, zahřívá se kolektorový přechod. Výrobci doporučují jako maximální teplotu přechodu u křemíkových tranzistorů cca 150 - 200 stupňů. Teplota přechodu je rozdílná od teploty pouzdra. U tranzistorů, které pracují s malým ztrátovým výkonem většinou postačí odvod sáláním pouzdra do okolí, jiná situace je u výkonových typů, kde se musí teplo odvádět dobře dimenzovanými chladiči. Teplota chladiče by nikdy neměla překročit cca 80 stupňů [2,6].

### 10.2 Tepelné namáhání tranzistoru

Tepelné namáhání tranzistoru závisí na vnitřním tepelném odporu mezi přechodem a vlastním pouzdem tranzistoru - hodnoty udává výrobce, tepelném odporu mezi pouzdem a chladičem - ovlivňuje jej výběr typu izolační podložky a silikonové vazelíny a způsob uchycení tranzistoru, typ pouzdra např. TO220, TO3 a dále potom na tepelném odporu mezi chladičem a okolím, který závisí na velikosti chladičí plochy, tepelné konstanty a množstvím tepla odvedeného zářením, prouděním a vedením [2,6]. Pro výpočet platí rovnice (5).

Maximální ztrátový výkon je omezen na  $P_{\max} = (n_j \max - n_a \max) / R_n$  (5)

$R_n$  - Celkový tepelný odpor =  $R_1 + R_2 + R_3$

$R_1$  = Vnitřní tepelný odpor tranzistoru (udává výrobce tranzistoru)

$R_2$  = Tepelný odpor styku dosedací plochy tranzistoru s chladičem 0,35-0,8 slídová izolační podložka, 0,7 - 1,6 teflonová izolační podložka

$R_3$  = Tepelný odpor chladiče určíme podle přibližného vztahu  $A = (650C \cdot \dot{u}(l \cdot d)) / (R_3 - 3,3 \cdot 4uC)$

A - plocha čtvercové chladičí desky s tranzistorem uprostřed

C - korekční činitel 0,43 - 1,00 dle polohy a povrchu desky

d - tloušťka desky

$n_j \max$  - největší přípustná teplota přechodu tranzistoru udávaná výrobcem, většinou max. 155 st.C

$n_a \max$  - nejvyšší teplota okolí, kterou uvažujeme v provozu

l - tepelná vodivost materiálu chladiče udávaná výrobcem (většinou v rozmezí 1,1 -2,5 pro hliník, 3,8 pro měď, 1,1 mosaz, 0,46 ocel)

U chladičů složitějších tvarů je i obecný výpočet velmi komplikovaný, proto lze zhruba použít výše uvedený postup a vlastní rozměr zjistit experimentálně.

$P_{\max}$  nelze pro výpočet uvažovat jako sinusový, jednoduchým výpočtem zjistíme, že např. 500W modul by pro dokonalé chlazení musel mít výrazně vyšší počet tranzistorů, protože tepelný odpor chladiče vychází pro daný modul záporný, což je nesmysl (vždyť to funguje). Hudební produkce nikdy nemá charakter sinusového zatěžování zesilovače a ani ČSN nepožaduje trvalou schopnost sinusového provozu.

Shrnutím výše uvedených výpočtů a poznatků, je vcelku jasné, že vlastním experimentům se meze nekladou. Pokud používáme jakékoliv profily pro převod tepla na chladič, je nutné mít na mysli, že množství tepla převedeného na chladič je dáno nejužším místem řetězce, tzn., používáním tenkých plechů nebo nekvalitních profilů můžeme i kvalitní chladič degradovat [2,6].



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 11 DNEŠNÍ TRENDY A ODŮVODNĚNÍ VOLBY ZAPOJENÍ PRO MODIFIKACI

V dnešní době je soustředěno na výrobu zesilovačů, převážně používajících výkonové integrované obvody. Důvodem této volby je snaha o co nejjednodušší zapojení při příznivé ceně. Toto řešení bývá také nejjednodušší cestou, jak při amatérské, tak i profesionální výrobě, avšak přináší řadu nevýhod.

Pohlédne-li se do katalogových listů integrovaných zesilovačů, na první pohled se všimne velkých udávaných sinusových výkonů, které se měří při laboratorních podmínkách, s ideálním chlazením, při napájení stabilizovanými zdroji a v oblasti maximálního napájecího napětí. Solidnější výrobci jsou udávány tyto výkony při zkreslení 1%, většina však při zkreslení 10%, kdy už nejde o sinusový, ale spíše lichoběžníkový průběh, průběh, který je shora omezen limitací zesilovače. Signálem o takovémto průběhu je předán při stejné maximální hodnotě větší efektivní výkon oproti sinusovému.

Různá starší zapojení s diskrétních součástek jsou dodnes oblíbená a jejich zvuk je ve srovnání se zesilovači osazenými výkonovými obvody daleko příjemnější.

Proto se bakalářská práce dále zabývá přestavbou zesilovače, který vznikl již v 70. letech (Transiwatt TW40 z diskrétních součástek) a má dodnes dobré přenosové vlastnosti, na dnešní součástkovou základnu. Zapojení tohoto zesilovače je jednoduché i bez použití výkonových IO a vyniká tak svou velmi rychlou impulsní odezvou, nízkým harmonickým a především intermodulačním zkreslením, které v katalogových listech výkonových IO vůbec nenajdeme, protože se za něj zřejmě výrobci stydí. Právě toto zkreslení je pro poslech nejdůležitější, jelikož jeho velká hodnota způsobuje nepříjemně umělý zvuk, charakteristický pro většinu NF zesilovačů, pro běžné uživatele, dostupných na dnešním trhu. Příznivci hnutí Hi-Fi sáhnou po výrobcích jmen, jako je PRO-JECT, NAD, AU-RA. Tito výrobci vyrábí zesilovače špičkových parametrů, které obsazují nejvyšší místa hodnocení v časopisech Hi-Fi Revue atd.

Konkrétně firma AU-RA používá zapojení, jehož realizaci se bakalářská práce zabývá. Avšak žádný radioamatér nikde nenalezne desky plošných spojů na zesilovače této firmy. Výrobce si je tají a nejlevější zesilovač, který i nyní tato firma vyrábí stojí 27000Kč.

Bakalářská práce bude mít značný význam pro ty, kteří jsou zastánci koncových zesilovačů třídy High-End a chtějí si pořídit toto zařízení za víc než příznivou cenu - cca 3000Kč, avšak vlastní šikovností a zručností.

## 12 KONCOVÝ ZESILOVAČ A JEHO MODIFIKACE

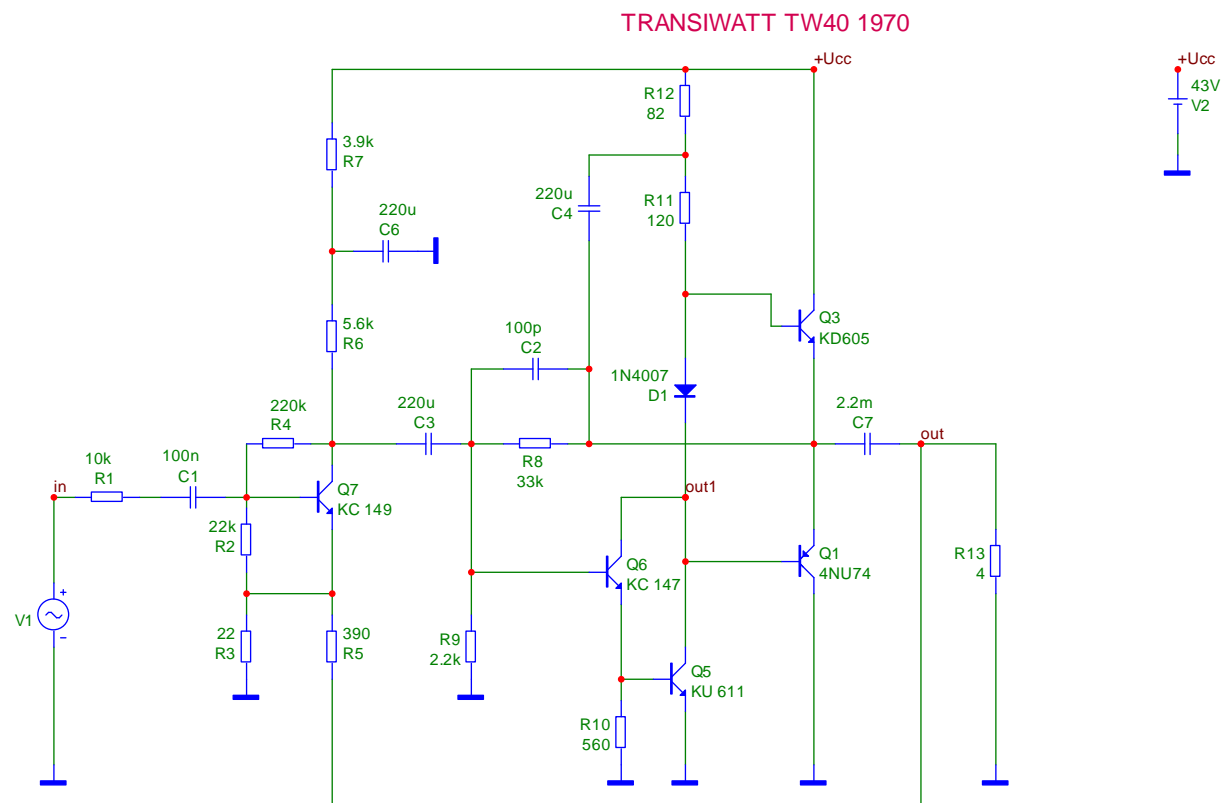
Koncový stupeň je napájen nesymetrickým napájecím napětím +62V a pracuje ve třídě A+B. Z výstupu na vstup je zavedena přes dělič R6/R5 mimořádně silná záporná zpětná vazba, která rozšiřuje a linearizuje přenosovou charakteristiku zesilovače, značně snižuje harmonické a intermodulační zkreslení, zvyšuje vstupní a snižuje výstupní impedanci, zlepšuje imunitu zesilovače proti rozptylu hodnot použitých součástí, proti jejich stárnutí a zhoršené filtraci napájecího zdroje. Pracovní bod stabilizuje další stejnosměrná záporná vazba z výstupu přes dělič R10/R7 do báze darlingtonového tranzistoru TIP 121, který pracuje jako budič v třídě A. Koncové tranzistory MJ15003 npn a MJ15004 pnp pracují jako komplementární emitorové sledovače, a to bez předpětí, s potlačeným klidovým proudem. Kromě dalších výhod se tak získá stoprocentní teplotní stabilita bez obvyklých stabilizačních a nastavovacích obvodů. Přechodové zkreslení malých signálů je tu kompenzováno oběmi zpětnými vazbami. Proti trvalému přetížení následkem poruchy jsou koncové stupně chráněny pojistkami P1 a P2 (3,15AT).

Protože použité zapojení s budičem v třídě A a předdimenzovanými koncovými tranzistory dobře snáší zvýšené zatížení na výstupu, můžeme pro reprodukci použít i nízko impedančních reprosoustav a to minimálně 2 ohmy, do kterých je zesilovač schopen dodat opět větší výstupní výkon, avšak musíme zajistit, nejlépe aktivní, chlazení zesilovače.

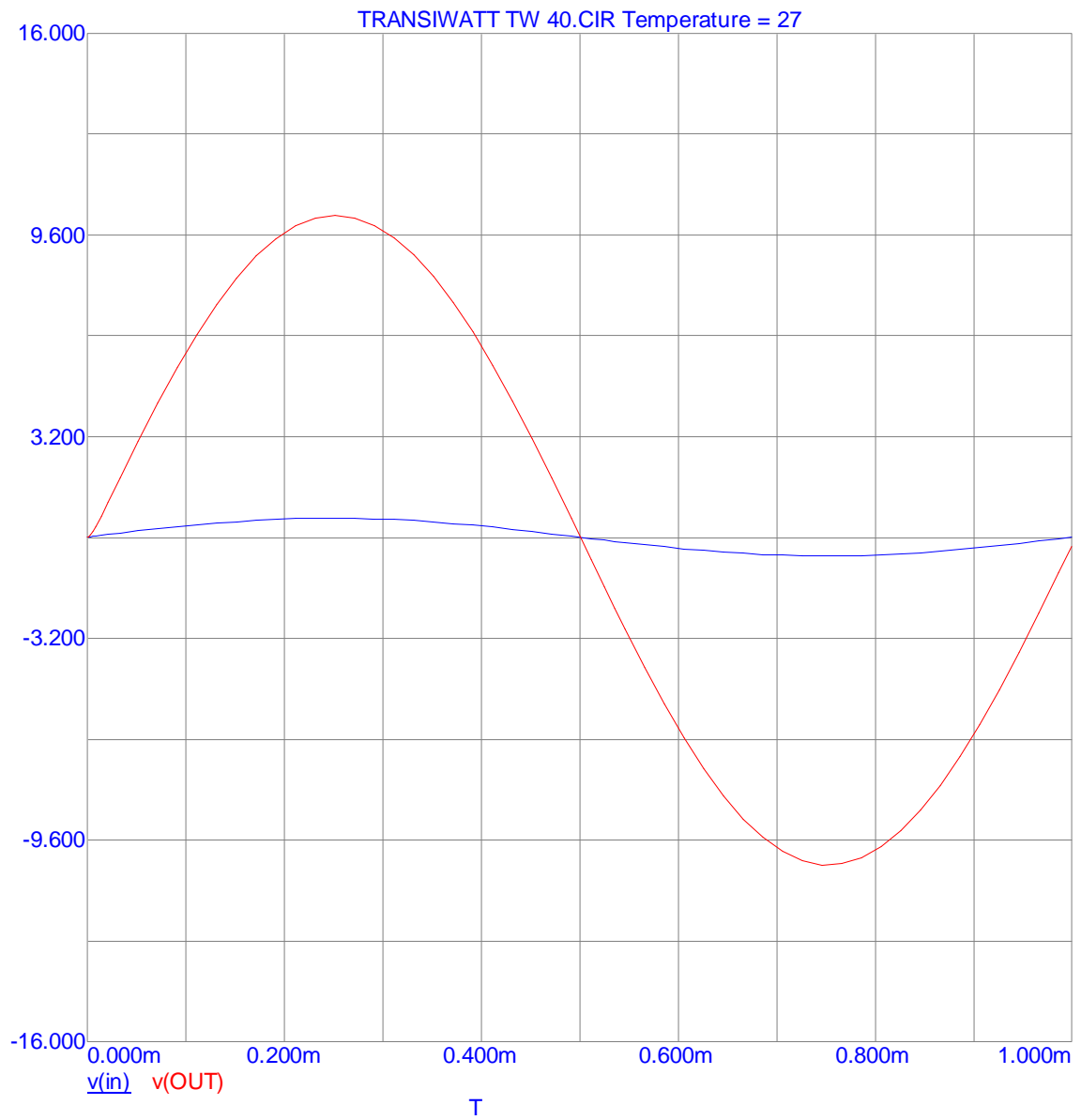
## 12.1 Simulace koncového zesilovače v prostředí Micro Cap 6

Všechny simulace jsou prováděny programem Microcap 6

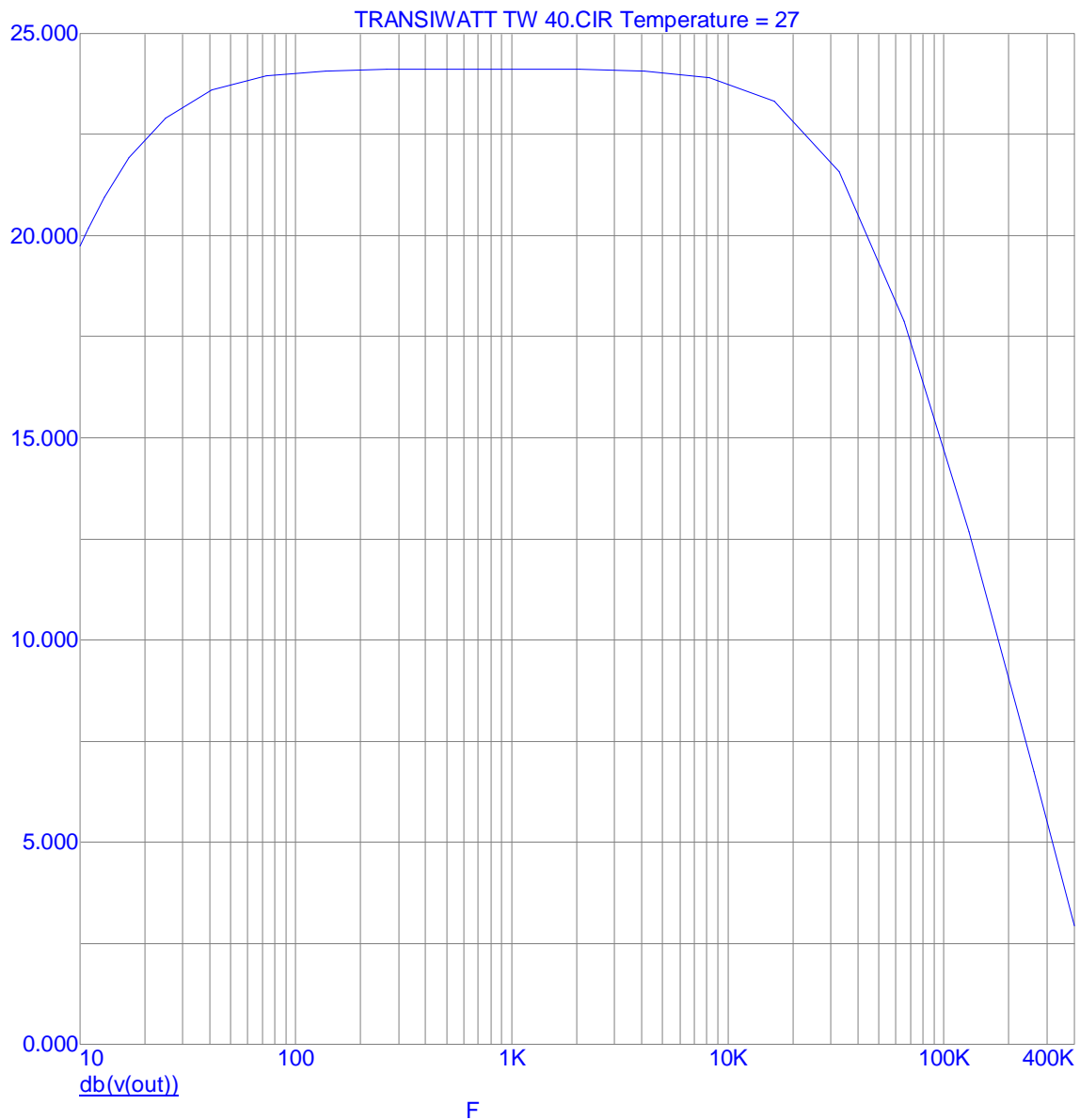
### 12.1.1 Simulace původního zapojení o výkonu 20W s napájením +45V



Obr. 11. Schéma zapojení Transiwatt TW40



Obr. 12. Simulace amplitudové charakteristiky



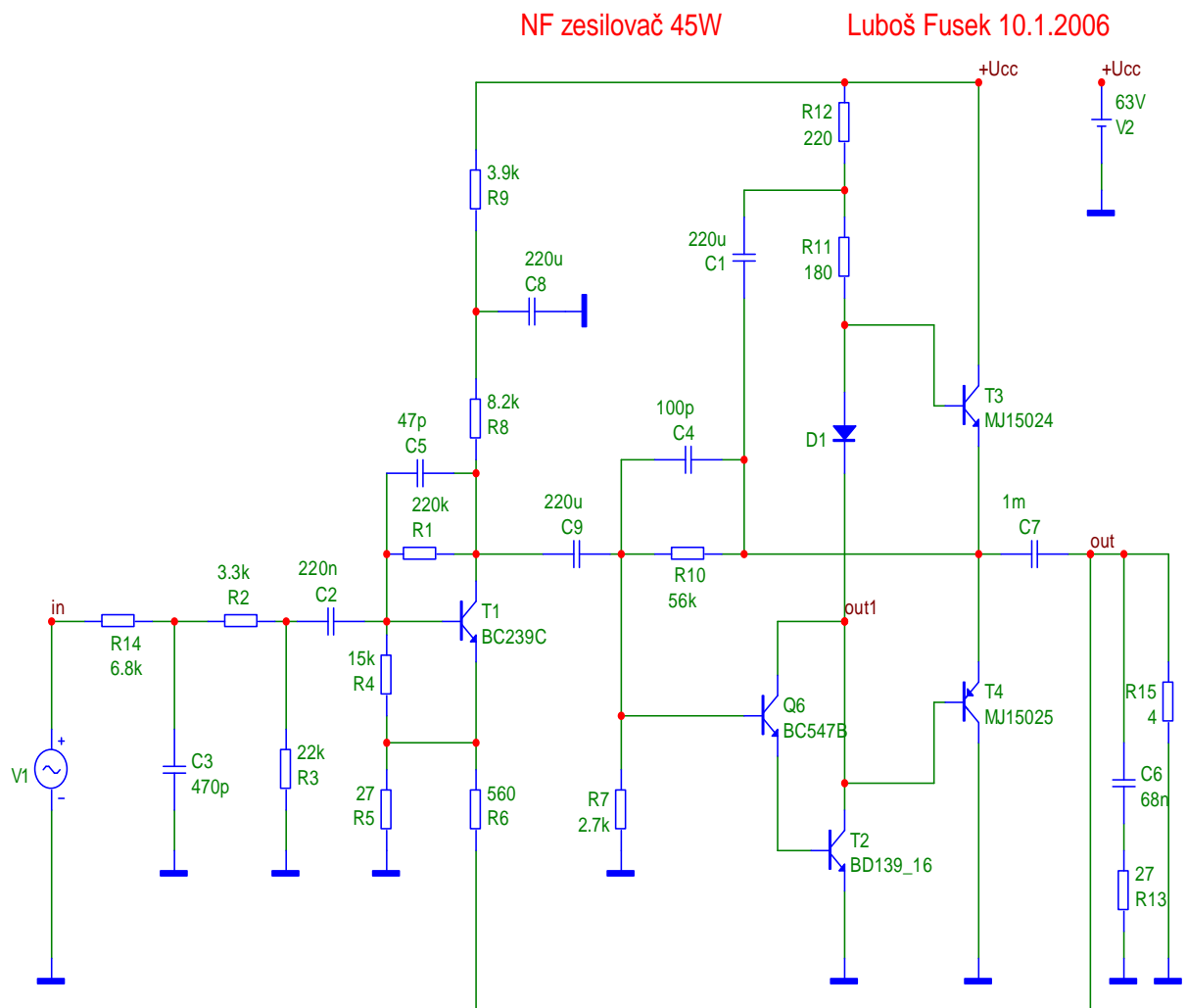
Obr. 13. Simulace frekvenční charakteristiky

### 12.1.2 Simulace bakalářskou prací modifikovaného zapojení na dnešní součástkovou základnu, o výkonu 45W, napájeného napětím +63V

Zvýšení napětí na 63V je umožněno vhodnou změnou rezistorů:

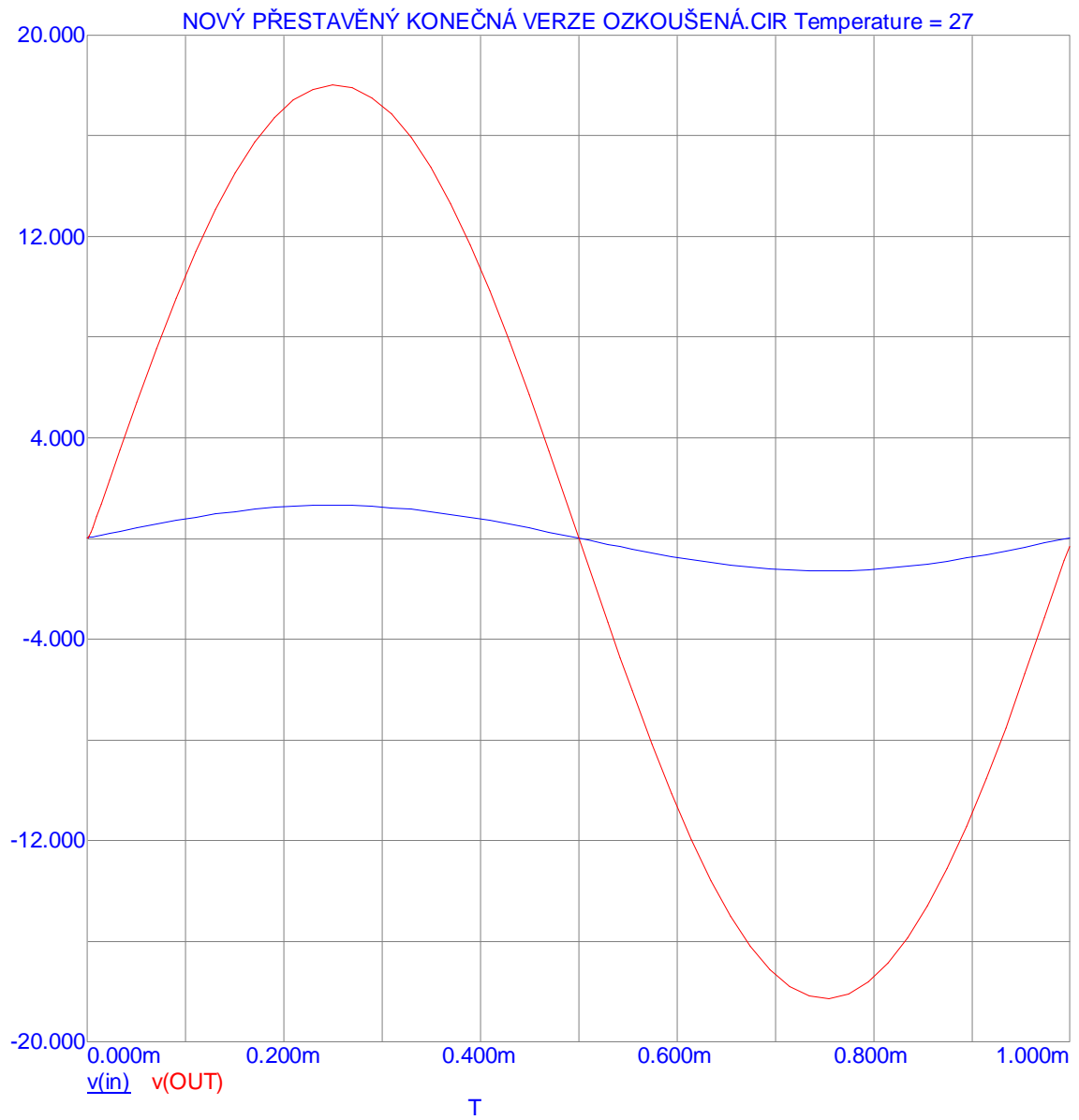
hlavně: R6,R8,R9,R11,R12 a R10

Rezistorem R10 je nastaveno napětí na kondenzátoru na  $63/2=31,5V$  pro symetrickou limitaci signálu.

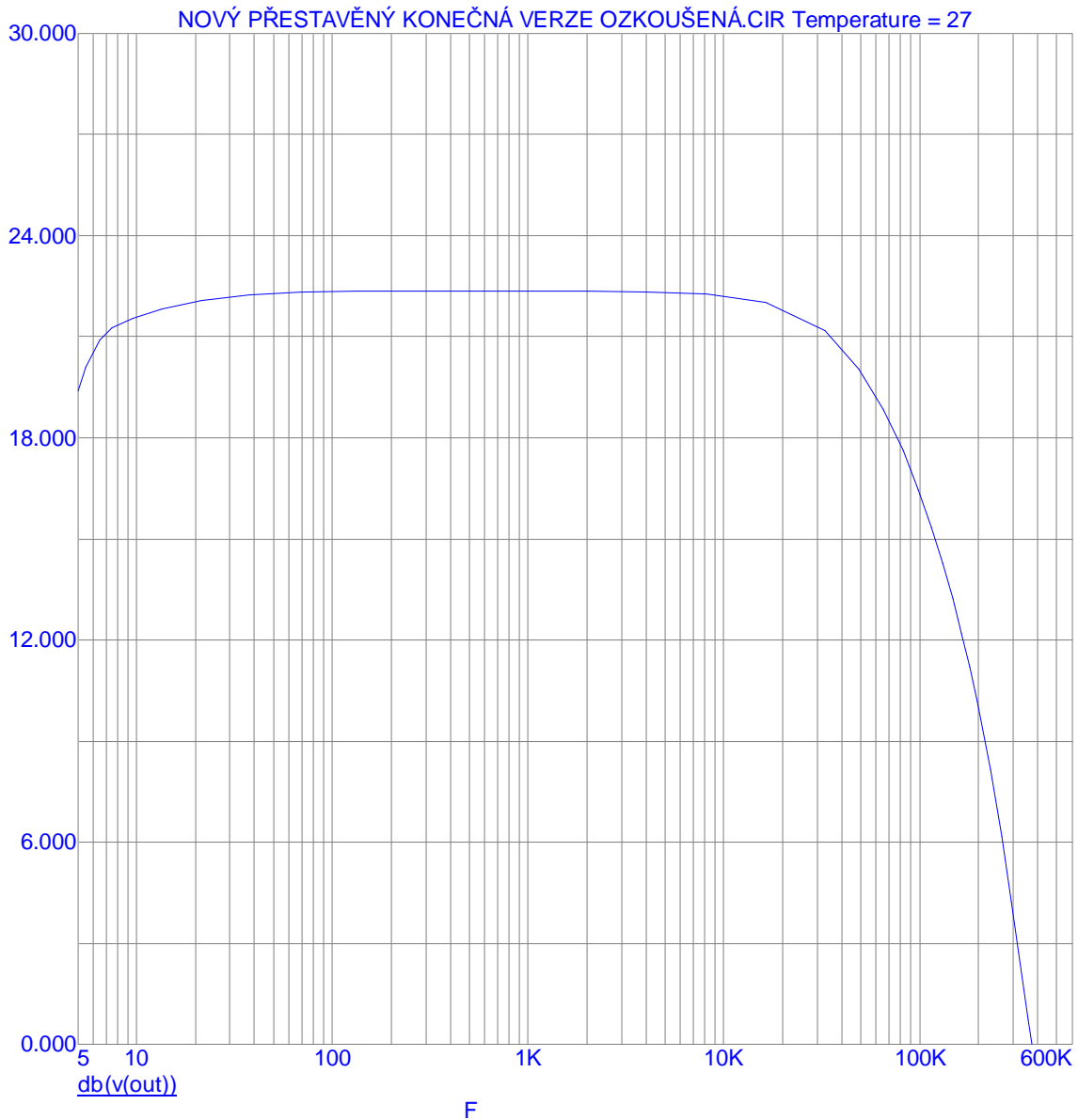


Obr. 14. Schéma pro simulaci modifikovaného zesilovače





Obr. 15. Simulace amplitudové charakteristiky modifikovaného zapojení



Obr. 16. Simulace frekvenční charakteristiky modifikovaného zapojení

### 12.1.3 Porovnání ztrátových výkonů v simulacích se skutečnými

V této simulaci jsou zobrazeny ztrátové výkony na součástkách a napěťové úrovně v jednotlivých bodech. Hodnoty napětí byly i na reálném zesilovači přeměřeny a přibližně odpovídají hodnotám nasimulovaným. Nepatrný rozdíl napětí v simulaci a napětí ve skutečném zapojení jsou způsobeny malým kolísáním napájecího napětí zdroje, jenž je nestabilizovaný a jeho výstupní napětí je tudíž závislé na hodnotě síťového napětí.

Jako příklad je uveden ztrátový výkon na výkonových rezistorech R12 a R11:

Simulací byly zjištěny tyto hodnoty:

Ztrátový výkon na R12 ..... $P=1,4W$

Ztrátový výkon na R12 ..... $P=1,15W$

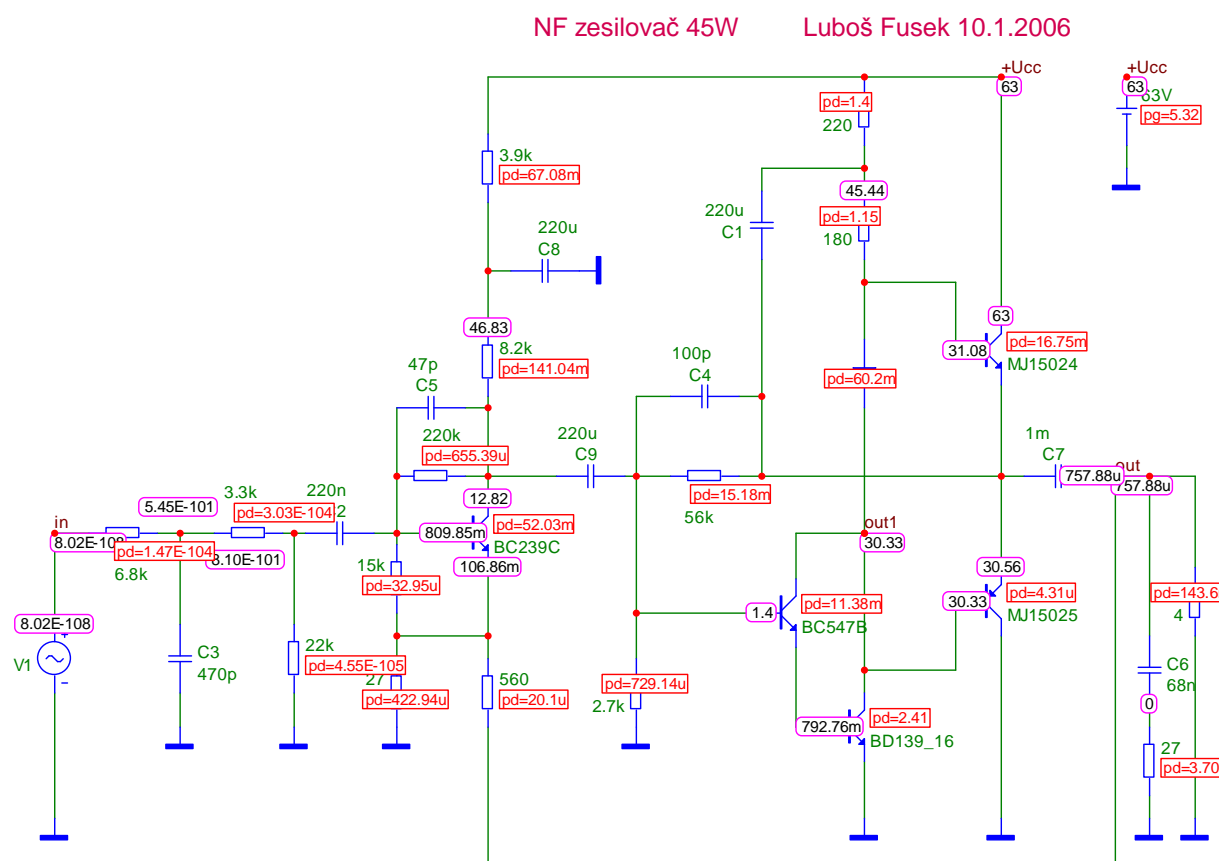
Měřením byly zjištěny tyto hodnoty:

Proud rezistory = klidový proud zesilovače =  $92mA$

Úbytek napětí na R12= $20,24V$  ztrátový výkon na R12  $P=U*I=20,24*0,092=1,86W$

Úbytek napětí na R11= $16,56V$

ztrátový výkon na R11  $P=U*I=16,56*0,092=1,52W$

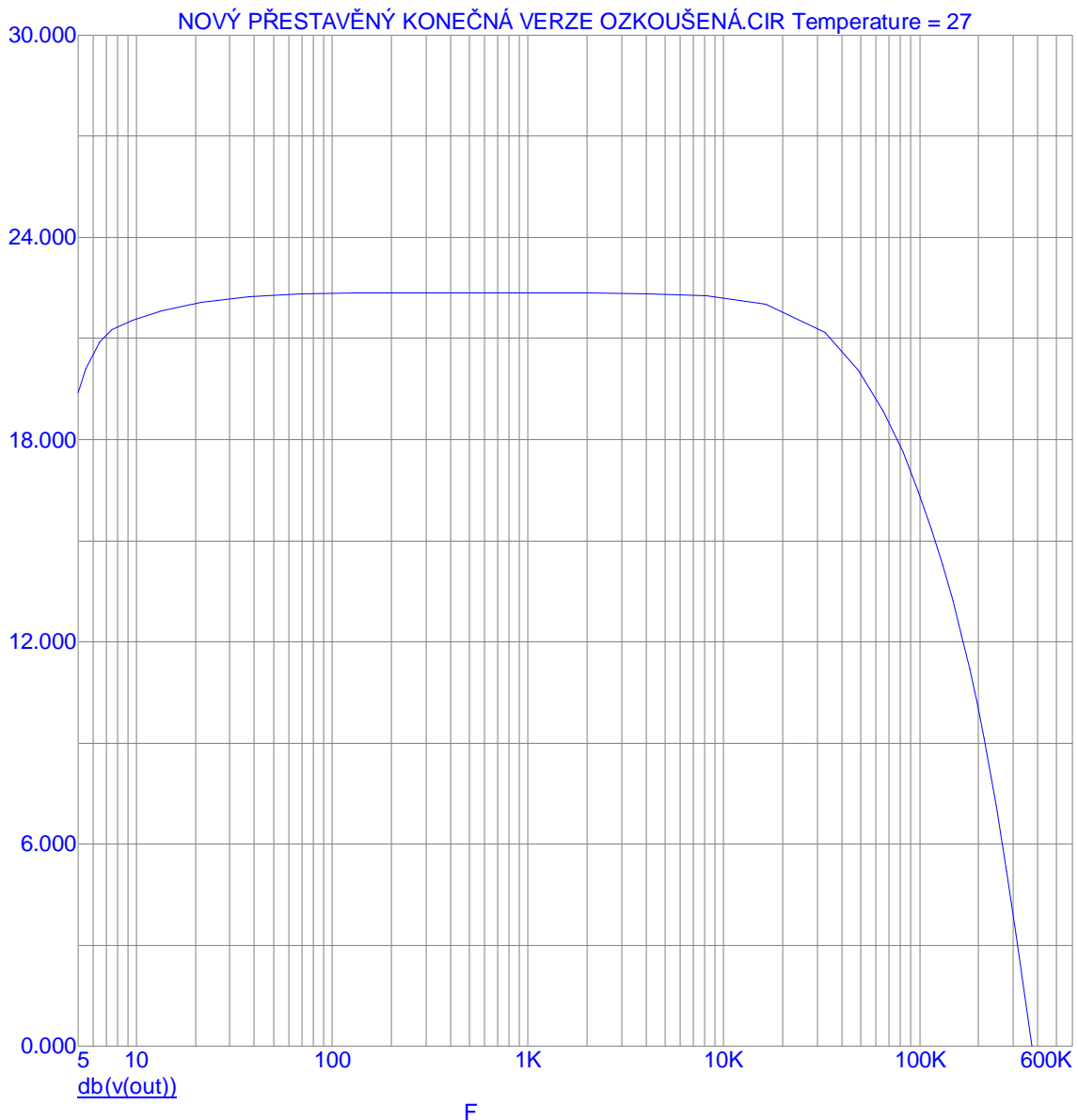


Obr. 17. Simulace napětí v jednotlivých bodech v schématu pro simulaci a ztrátové výkony na součástkách

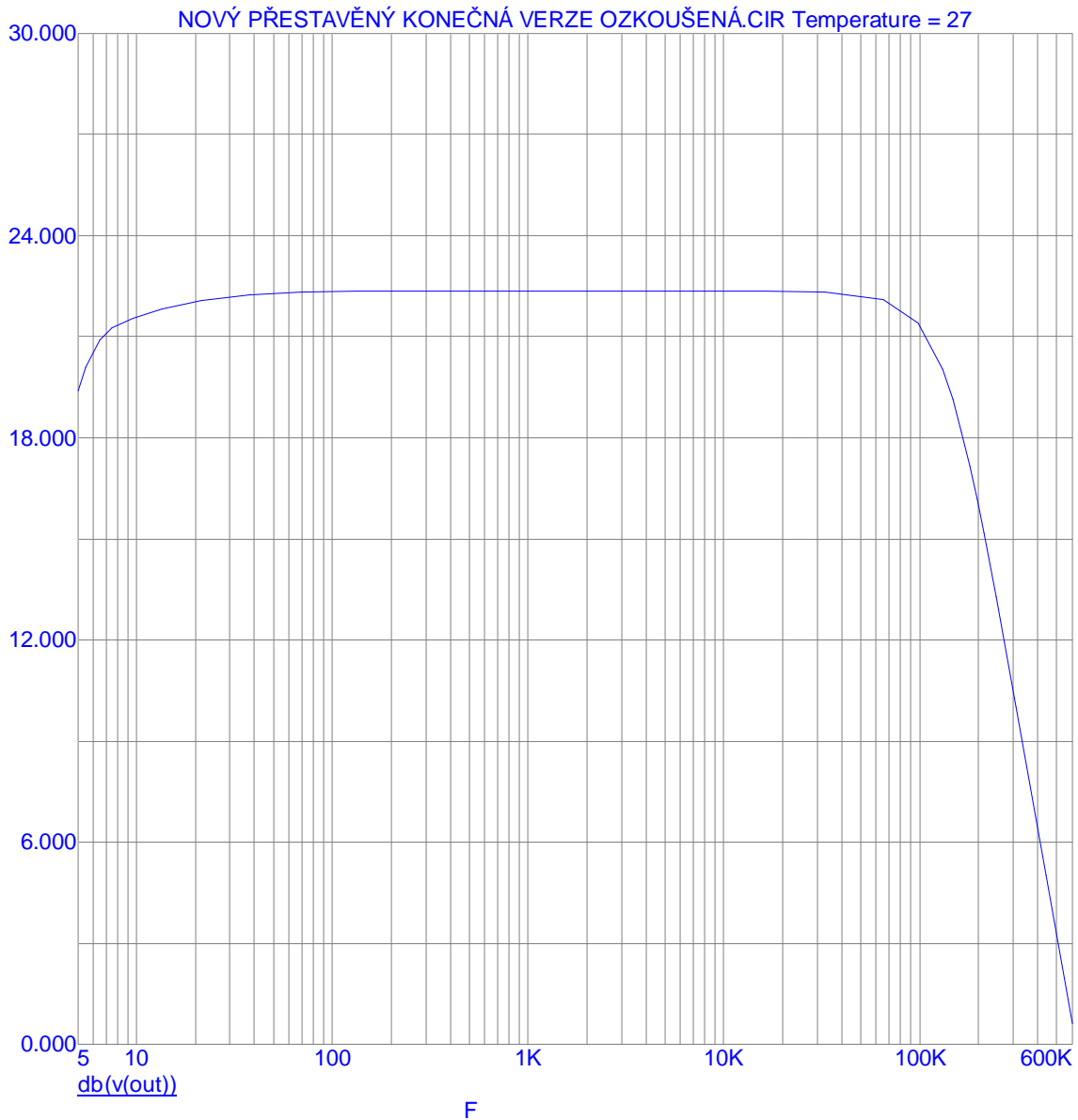
#### 12.1.4 Ovlivnění frekvenční charakteristiky změnou hodnot kondenzátorů C3 a C2

Přenos zesilovače na vysokých kmitočtech je omezen kondenzátorem C3 a je tak zabráněno vzniku nežádoucích vysokofrekvenčních kmitů, které ve většině případů mají za následek zničení koncových tranzistorů vlivem vysokých příčných proudů. Koncové tranzistory totiž mívají poměrně malý mezní kmitočet.

Čím menší je hodnota kapacity tohoto kondenzátoru, tím více se horní mezní kmitočet zesilovače posouvá do vyšších frekvencí.

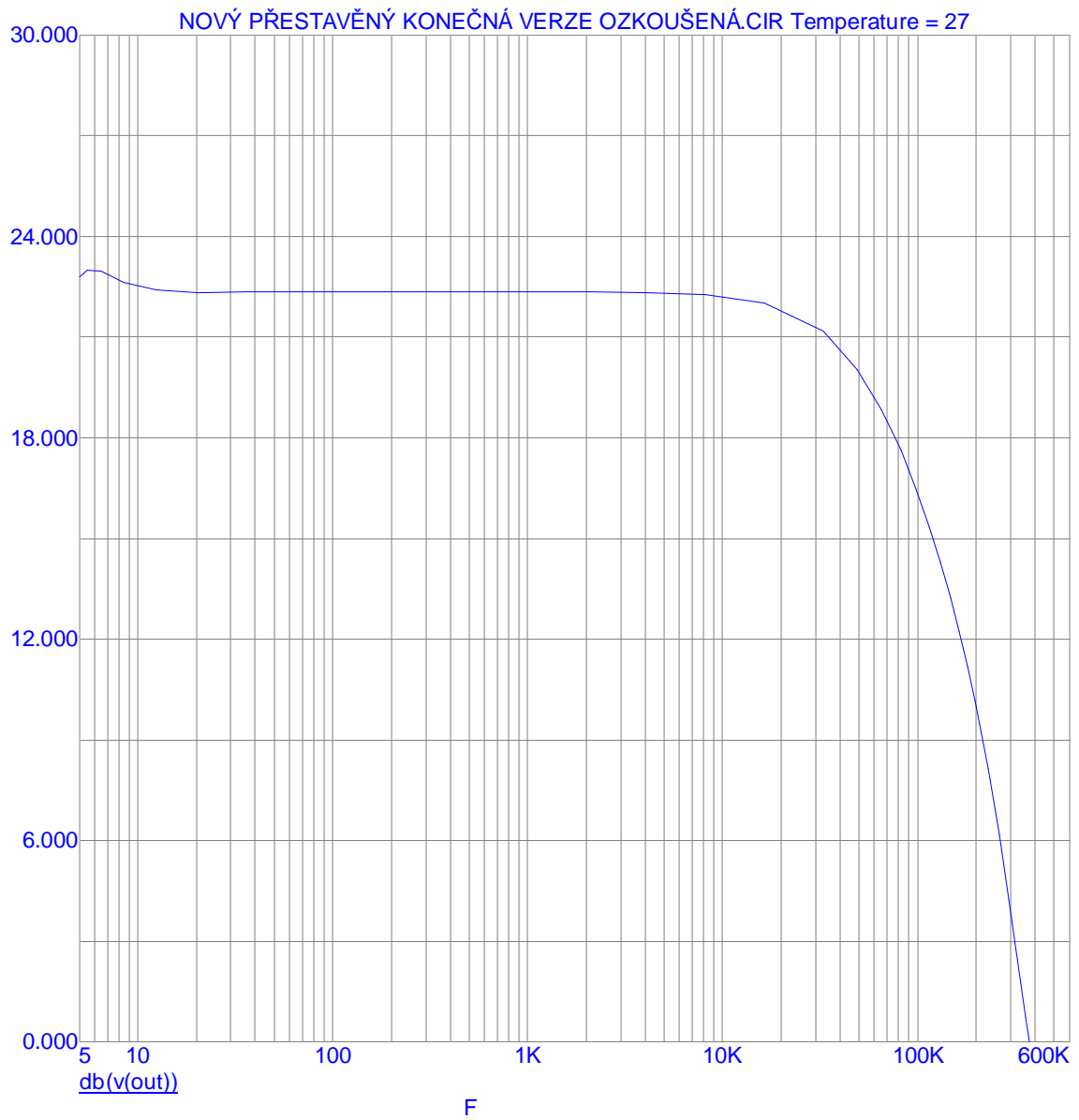


Obr. 18. Simulace frekvenční charakteristiky pro hodnotu kondenzátoru C3 470pF

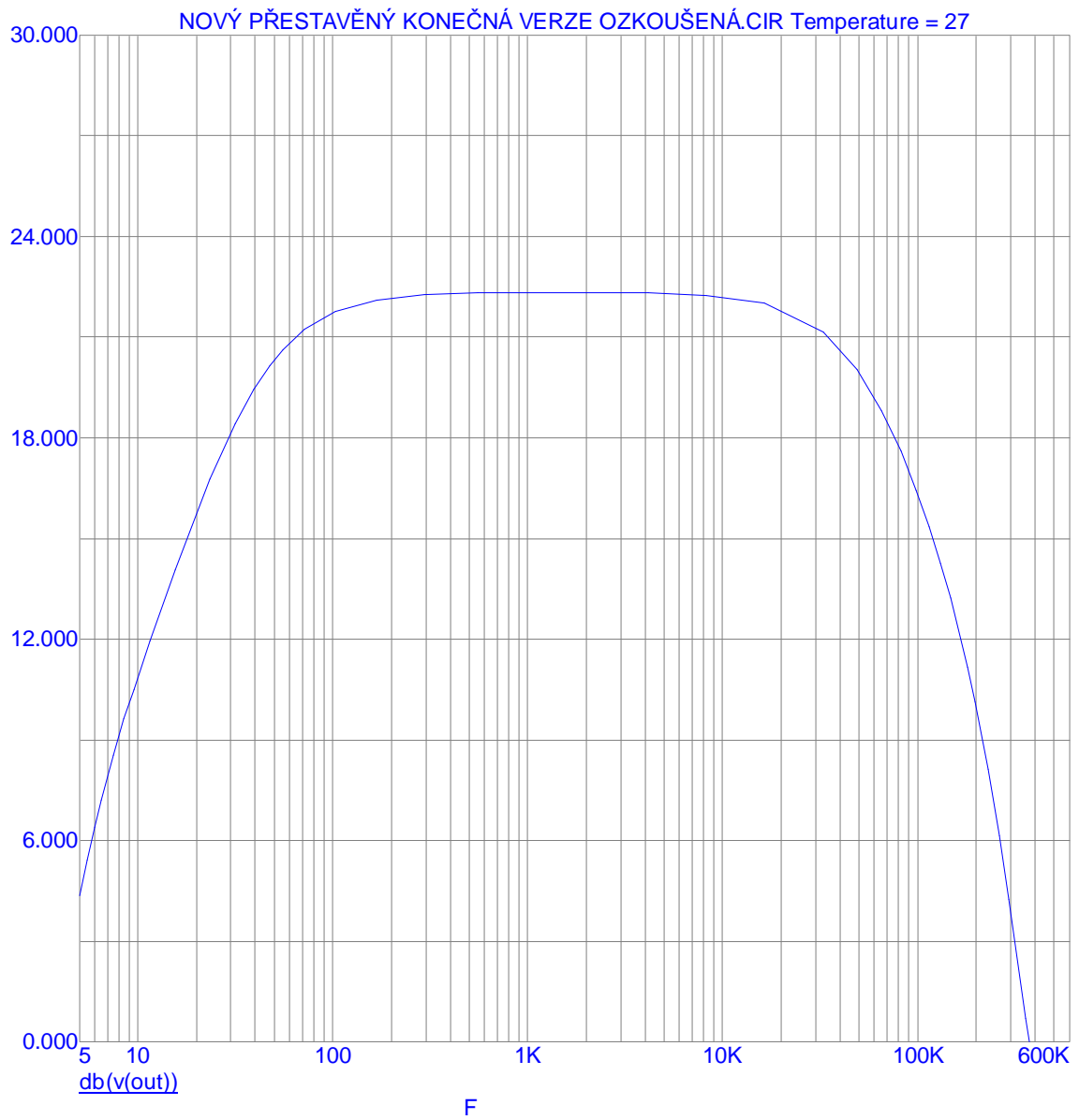


Obr. 19. Simulace frekvenční charakteristiky pro hodnotu kondenzátoru C3 100pF

Naopak změnou hodnoty kondenzátoru C2 je ovlivněn přenos zesilovače na nízkých kmitočtech. Čím větší hodnota tohoto kondenzátoru je použita, tím víc se přenos nízkých frekvencí zesilovačem blíží k jednotkám Herz. Tento jev je taky nežádoucí, protože lineární přenos takovýchto kmitočtů zesilovačem, může způsobit tzv. dýchání reproduktorů. Je třeba proto najít vhodný kompromis pro volbu kapacity kondenzátoru C2:



Obr. 20. Simulace frekvenčních charakteristiky při hodnotě C2 330nF



Obr. 21. Simulace frekvenčních charakteristiky při hodnotě C2 47nF

### 13 REALIZACE MODIFIKOVANÉHO NF ZESILOVAČE

Starý plošný spoj tvořil celek, na němž se nacházely všechny součásti zesilovače, včetně síťového transformátoru, který vnášel do zapojení brum, jelikož byl blízko signálových cest.

Kondenzátory se v té době používaly axiální a oproti dnešním kondenzátorům byly značných rozměrů a tolerancí. To samé platí o tehdy používaných rezistorech, takže konstrukce zesilovače s touto deskou a s dnešní součástkovou základnou by byla složitá a parametry zesilovače jen dostačující, kvůli dlouhým vývodům jednotlivých součástek, které by byly potřeba k jejich zapájení.

Cílem bakalářské práce bylo toto zapojení modifikovat pro dnešní součástkovou základnu a tak, aby každý kanál nf zesilovače měl svůj vlastní plošný spoj a zdroj byl taktéž oddělený a zdvojený - pro každý kanál usměrňovač a filtrační kapacita zvlášť za účelem minimalizace přeslechů mezi kanály.





### 13.1 Postup při výrobě desek plošných spojů

1. Deska plošného spoje se ořízne na potřebný rozměr zvětšený na každé straně minimálně s 3mm rezervou (z důvodu podleptání leptací emulzí).
2. Destička se dokonale očistí a odmastí.
3. Destička se vysuší a nanese se štětcem přímými tahy rovnoměrná vrstvička fotocitlivé emulze.
4. Pozor! Pracuje se při sníženém osvětlení!
5. Destička musí být vysušena při teplotě asi 60°C.
6. Přiloží se správně orientované klišé (vytištěný obrazec plošných spojů na průsvitné folii) a zajistí se společně s deskou v osvětlovacím rámu.
7. Je exponovaná UV zářením po dobu cca 8 minut.
8. Vyvolá se v 0,5% roztoku NaOH.
9. Opláchne se pod vlažnou vodou.
10. Leptá se v leptací bázi.
11. Důkladně se omyje a musí být opatřena antioxidačním lakem.
12. Vyleptaná DPS je ostřížena a opilována na čistý rozměr s vyvrtanými otvory.
13. Jsou osazeny všechny součástky od nejmenších rozměrů po největší

### 13.2 Napájecí zdroj

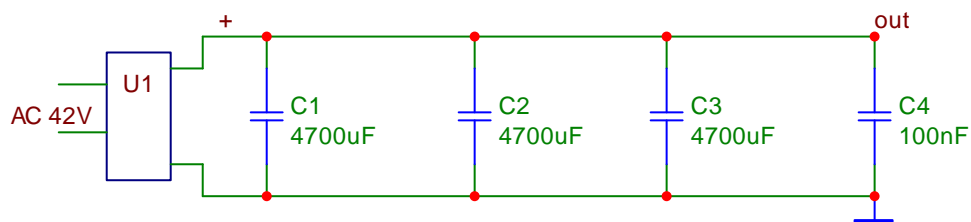
Jde o nestabilizovaný zdroj nesymetrického napětí s bohatě dimenzovanou filtrační kapacitou 14100 $\mu$ F

Nesymetrický nestabilizovaný zdroj s maximálním výstupním napětím (na vyhlazovacích kondenzátorech) +63V. Maximální zatěžovací proud je 8A - platí pouze pro zdroj! Skutečný maximální proud je omezen maximálním zatížením transformátoru.

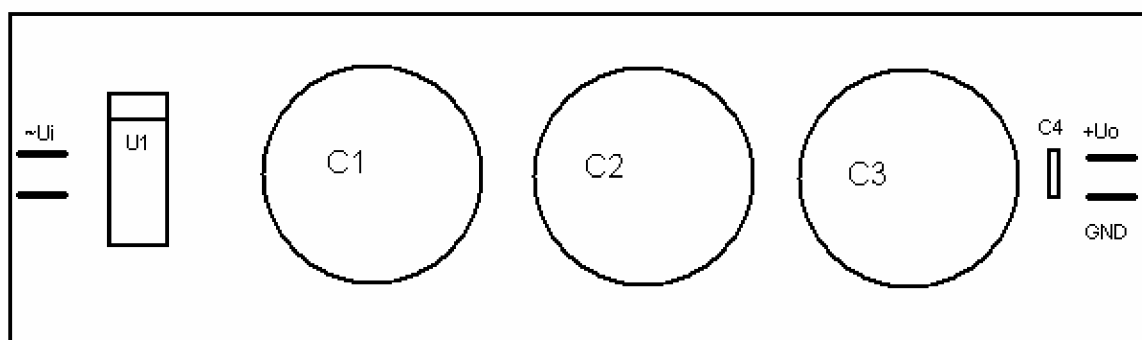
Tab. 1. Parametry napájecího zdroje

Rozsah napájecího napětí $U_{\max}$	+63V
Proud $I_{o \max}$ :	8A
Rozměry	70 x 187mm

## 13.2.1 Schéma zapojení a desky plošných spojů



Obr. 23. Schéma zapojení zdroje



Obr. 24. Pohled na osazený plošný spoj zdroje



Obr. 25. Plošný spoj zdroje-strana spojů

Tab. 2. Rozpiska součástek pro napájecí zdroj

Usměrňovací můstek:	
U1	KBU8J
Faston VSP 6,3x0,8	4ks
<b>Kondenzátory:</b>	
C1, C2, C3	ELRA 4M7/63V
C4	TK 100n
Plošný spoj	

Tab. 3. Popis vývodů modulu

1.	$\sim U_i$	Střídavý vstup
2.	GND	Zemnicí vstup
3.	+U <sub>o</sub>	Kladné napájecí napětí
4.	GND	Zem zdroje

### 13.2.2 Popis zapojení

Jednoduché zapojení nestabilizovaného symetrického zdroje s Graetzovým usměrňovačem a bohatě dimenzovanou filtrační kapacitou.

### 13.2.3 Osazování desek plošných spojů zdrojů

1. Desku je třeba mít dokonale čistou a opatřenou zasklou vrstvou rozpuštěné kalafuny v lihu, což je předpoklad pro dokonalé pájení!!!
2. Deska se osazuje od menších součástek po největší. Pro všechny součástky platí, že se osazují s co nejkratšími vývody, kromě výkonových rezistorů.
3. Je nutné provést důkladnou optickou kontrolu osazeného plošného spoje a případné chyby opravit. Obzvláště je kladen důraz na důkladnou optickou kontrolu polarity elektrolytických kondenzátorů, jejichž kapacita je zde značně velká a jejich přepolování by mělo za následek katastrofické následky!!!

### 13.2.4 Kontrola funkce

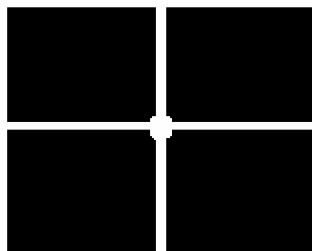
Při aplikaci nesmí dojít k překročení jmenovitých napětí použitých elektrolytických kondenzátorů (při zapojení bez zátěže) a k dlouhodobému překračování maximálního zatěžovacího proudu.

## 13.3 Modul pojistek pro oba kanály

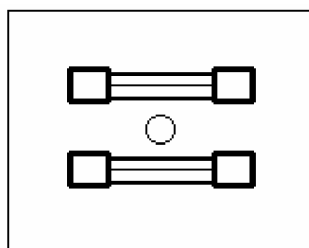
Rozměry tohoto modulu mohou být zvoleny libovolně, plní pouze funkci držení pojistek.

Rozpiskou součástek pro něj jsou pouze dvě trubičkové pojistky-3,15AT a dva kusy držáků pojistek DP08H P 250V/6.3A, společně s plošným spojem 30 x 40mm.

### 13.3.1 Pohledy na plošný spoj modulu pojistek



Obr. 26. Plošný spoj modulu pojistek ze strany spojů



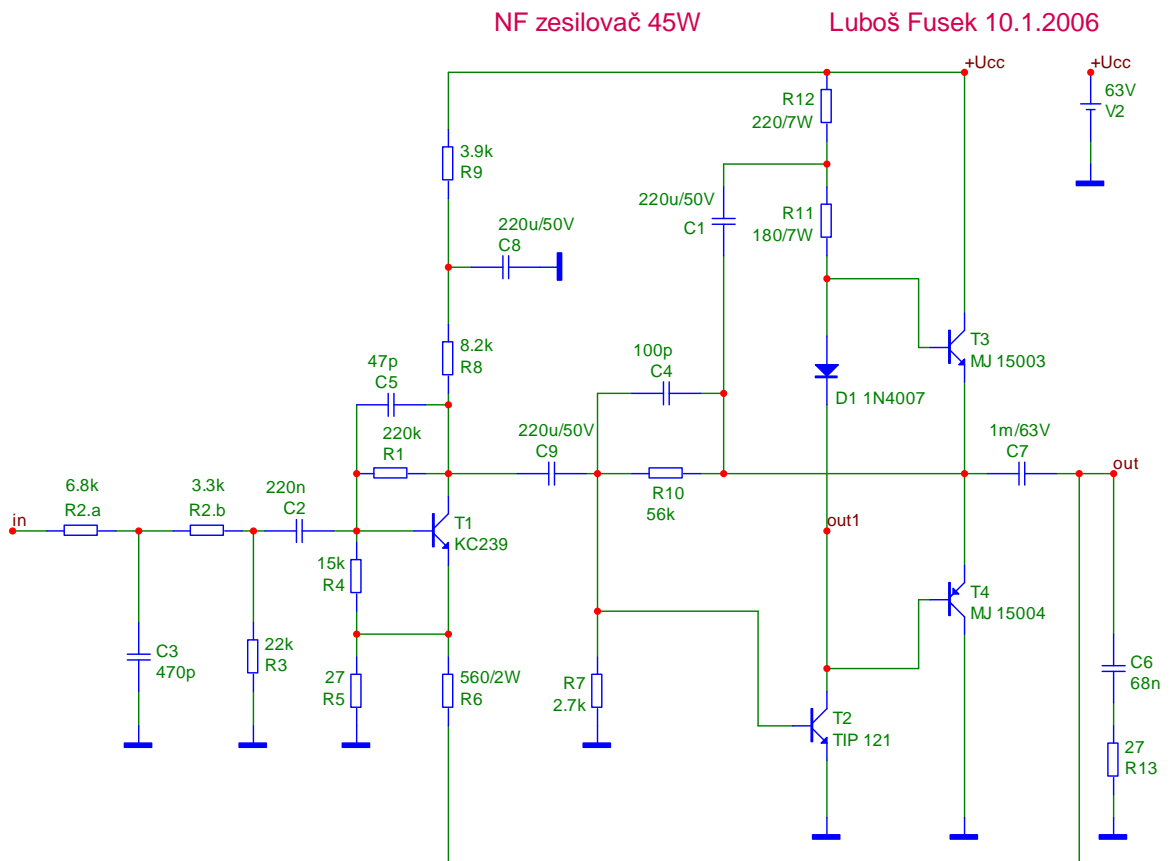
Obr. 27. Pohled na osazený modul

## 13.4 Koncový stupeň a jeho sestavení

Tab. 4. Rozpiska součástek pro koncový stupeň

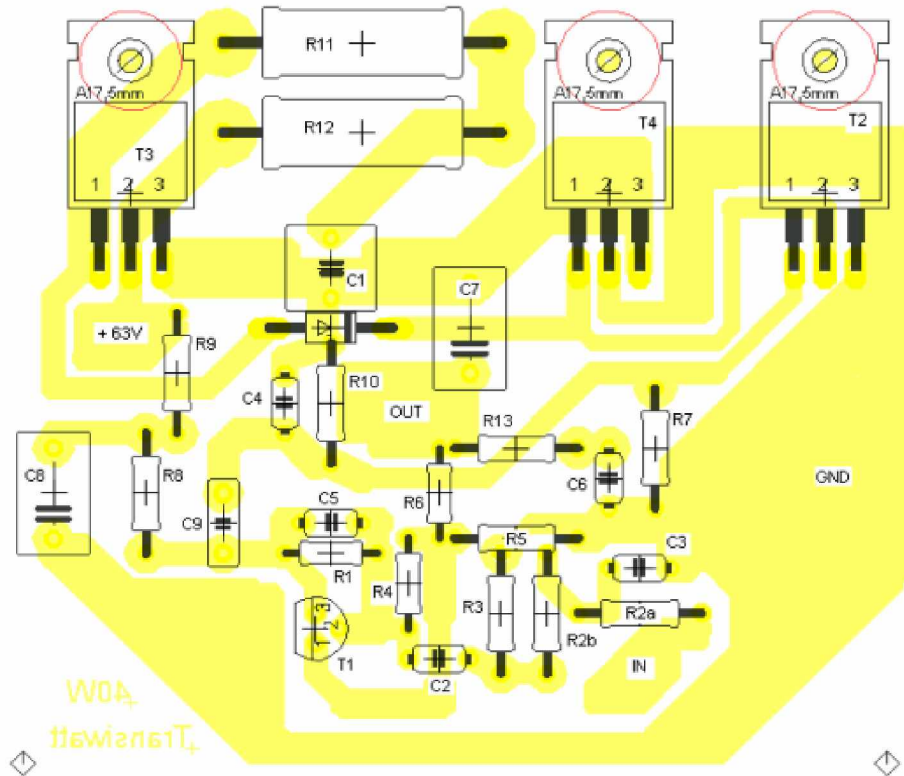
R1	220K
R2.a	6,8K
R2.b	3,3K
R3	22K
R4	15K
R5,R13	27
R6	560/2W
R7	2,7K
R8	8,2K
R9	3,9K
R10	56K
R11	180/7W
R12	220/10W
C1,C8,C9	220uF/50V
C2	220nF svitkový

C3	470pF
C4	100pF
C5	47pF
C6	68nF svitkový
C7	1mF/63V
T1	KC239
T2	NPN TIP 121
T3	NPN MJ15003
T4	PNP MJ15004
D1	1N4007

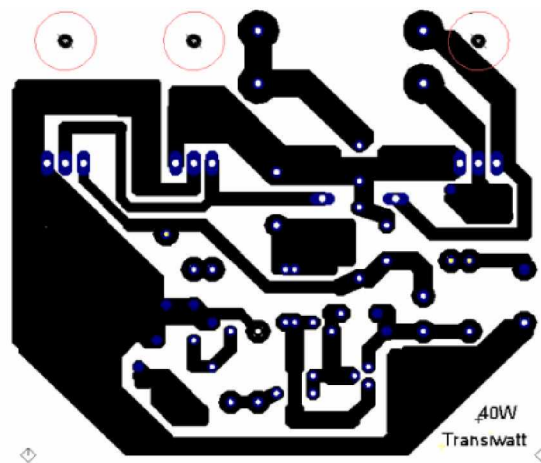


Obr. 28. Schéma zapojení realizovaného zesilovače

Tranzistory T3,T4 v pouzdrech T0220 jsou vyobrazeny jenom pro názornost. Ve skutečnosti jsou tyto tranzistory v pouzdru T03 umístěny mimo plošný spoj a propojeny vodiči.



Obr. 29. Osazený plošný spoj NF zesilovače



Obr. 30. Deska NF zesilovače-pohled ze strany spojů (1:1)

### 13.4.1 Osazování desek plošných spojů výkonových zesilovačů

1. Desku je třeba mít dokonale čistou a opatřenou zaschlou vrstvou rozpuštěné kalafuny v lihu, což je předpoklad pro dokonalé pájení!!!
2. Deska se osazuje od neměnějších součástek po největší, přičemž všechny aktivní součástky tj. tranzistory jsou osazovány vždy jako poslední. Pro všechny součástky platí, že se osazují s co nejkratšími vývody, kromě výkonových rezistorů.

3. Na koncové transistory v pouzdře TO3 se připraví vodiče o průřezu  $0,75 \text{ mm}^2$  a připájí se z dolní strany desky! (vodiče se ponechají dostatečně dlouhé)
4. V tomto kroku se musí nutně připevnit koncové tranzistory na hliníkové profily, aby k nim mohly být připájeny vodiče, které se, pokud možno, zkrátí na minimální možnou propojovací délku a poté se připájí k tranzistorům.
5. Na desku se napájí napájecí vodiče společně s výstupním vodičem. Všechny tyto vodiče musí mít průřez větší než  $1 \text{ mm}^2$  pro minimální odpor!!!
6. Musí se připájet stíněný vodič vstupního signálu.
7. Napájená deska se může umýt lihem a opatřit ochranným lakem.
8. Připevní se chladič k budiči třídy A, který produkuje značné množství tepla i pokud je zesilovač v klidu - je zde nastaven stálý kolektorový proud.
9. Je nutné provést důkladnou optickou kontrolu osazeného plošného spoje a případné chyby opravit. Obzvlášť je kladen důraz na důkladnou optickou kontrolu polarity elektrolytických kondenzátorů, hodnot rezistorů a správné pořadí koncových tranzistorů

#### 13.4.2 Oživení nf koncového zesilovacího stupně

Při správném osazení se nemusí zesilovač vůbec oživovat, přesto je nutné zkontrolovat jeho základní funkce. Dodržení níže uvedeného postupu je nezbytné, protože tento způsob zabezpečuje, že při případné chybě nedojde ke zničení součástek.

1. Kompletně osazená deska se připojí přes ochranný rezistor například v kladné větvi ( $56R/6W$ ) ke zdroji nesymetrického napětí cca  $\pm 63V$ . Před zapnutím zdroje se musí pečlivě zkontrolovat, je-li kladný a záporný póly zdroje připojen na správný vodič koncového zesilovače.
2. Zapne se zdroj, přičemž kladné napájecí větvi zůstává zapojen ochranný rezistor. Po zapnutí napájecího zdroje je nutné zkontrolovat proudové odběry (měřením napětím na rezistorech), které by měly být cca 90 až  $110mA$ . Úbytek napětí na rezistoru musí být cca 5 až 6V. V případě, že odběry z napájecího zdroje jsou větší, je nutné zkontrolovat, zda zesilovač nekmitá. Pokud kmitá, musí se zmenšovat hodnota ochranných rezistorů tak dlouho, až kmitání ustane. Úbytky napětí na poklesnou úměrně s poklesem jejich hodnot. Měřit stejnosměrnou složku napětí na výstupu to-



hoto zesilovače je zbytečné, všechny nesymetricky napájené zesilovače mají na výstupu oddělovací kondenzátor, který stejnosměrnou složku nepropustí na výstup.

3. Je-li vše v pořádku, vypne se napájecí zdroj a ten samý postup je aplikován i na druhý koncový stupeň zesilovače.
4. V případě, že zesilovač správně nefunguje a proudové odběry jsou při zapnutí zdroje s ochranným rezistorem velké, ještě jednou se zkontroluje, zda jsou všechny součástky připájeny na správná místa a se správnou polaritou. Pokud je vše správně, chyba se hledá v nedbale provedených spojích, které jsou nejčastější příčinou většiny problémů.

### Upozornění :

Musí být zamezeno zkratu výstupních svorek, přepólování napájecího napětí. Zcela nepřipustné je připojení zesilovače k napájecímu napětí při nepřipájených koncových tranzistorech!!!

### 13.4.3 Naměřený sinusový výkon zesilovače

Výkon byl měřen pomocí generátoru sinusového signálu a odporové zátěže - výpočty (6).

$$U_{\text{vstupní (amplituda)}} = 1100\text{mV} (f = 1\text{KHz})$$

$$U_{Z\langle\text{klid}\rangle} = 62,7\text{V}$$

$$R_Z = 4\Omega$$

$$U_{Z\langle\text{zat.}\rangle} = 59,9\text{V}$$

$$U_{\text{výst.ef.}} = 15,3\text{V} (k = 10\%)$$

$$P_0 = \frac{U_{\text{ef.}}^2}{R} = \frac{15,3^2}{4} = 58,52\text{W} \quad (6)$$

$$R_Z = 8\Omega$$

$$U_{Z\langle\text{zat.}\rangle} = 60,8\text{V}$$

$$U_{\text{výst.ef.}} = 16,2\text{V} (k = 10\%)$$

$$P_0 = \frac{U_{\text{ef.}}^2}{R} = \frac{16,2^2}{8} = 32,8\text{W}$$

## 14 MECHANICKÁ KONSTRUKCE

Kvůli velkému rozměru zdroje je nutné volit krabici typu KK09-455.

Krabice má rozměry 438x83x280 a umožňuje rozmístit jednotlivé součásti tak, aby se vzájemně neovlivňovaly. Skládá se ze dvou dílů: vrchního krytu a spodního nosného korpusu, do kterého je třeba vyvrtat, či vybrousit díry pro uchycení distančních sloupků, síťového spínače, vstupů CINCH a pro šroubovací výstupní svorky.

Zdroj zesilovače je umístěn klasicky do levé části krabičky. Všechny distanční sloupky kromě zemních jsou použity polyamidové, jelikož jejich připevněním ke krabici kovovými distančními sloupky by zdroj zkratoval. Koncový stupeň produkuje značné množství tepla i při použití masivního černěného chladiče. Proto je chladič spolu s koncovým zesilovačem umístěn tak, aby jeho žebra byla přesně mezi větracími otvory v krabici.

Rozmístění ostatních součástí je voleno podle světových výrobců velmi kvalitních zesilovačů tj. co nejefektivněji a nejelegantněji umístit moduly tak, aby mohlo být propojení realizováno co nekratšími vodiči a v zesilovači tak nevznikaly nepřehledné shluky vodičů.

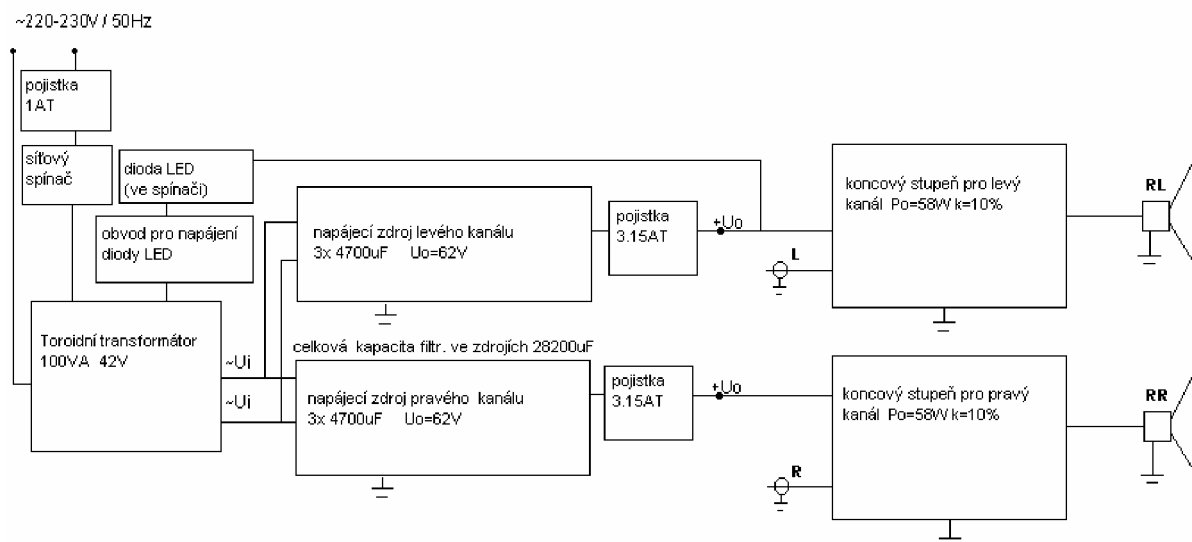
Zemnění celého zesilovače je provedeno do jednoho společného bodu a stínění signálových vodičů odizolováno izolovanými vstupními cinch konektory, které zajišťují zemnění stínění jen v jednom bodě a to u zdroje. Jedině tak lze totiž zamezit případnému výskytu zemních smyček, které vznikají při nesprávném či vícenásobném zemnění jednotlivých částí zesilovače. Zem celého zesilovače je totiž společná.

Chod zesilovače je indikován LED diodou umístěnou přímo v síťovém vypínači POWER, který je jednopólový.

Popisky vylepšující vzhled, jenž každý může konstruovat dle vlastního vkusu, jsou vytištěny nejmodernější technologií tisku PhotoREt na foto papír (lesklý). Nalepeny na přední panel jsou lepidlem Herkules.

Tab. 5. Rozpiska součástí pro mechanickou konstrukci

Přístrojová krabička KK09-455	1ks
Distanční sloupky kovové 0,8mm	18ks
Distanční sloupky z polyamidu 0,8mm	2ks
Pouzdro přístrojové pojistky DP 04J přístrojová	1ks
Pojistka trubičková 0,8AT	1ks
Flexo šňůra přívodní	1ks
Izolační průchodka flexo šňůry	1ks
Sít'ový spínač SSK 850 L RED led	1ks
Výstupní svorky červené šroubvací	4ks
Vstupní odizolované CINCH konektory	2ks
Chladič černěný CHL 205D/240 černěný	1ks
Chladič černěný CHL 205D/45 černěný	2ks
Al profily pro pouzdra T03	2ks
Izolační podložka pod T03	4ks
Izolační podložka pod T0220	2ks
Izolační průchodky	7ks
Vodič červený 1,5mm <sup>2</sup>	2m
Vodič červený 1,5mm <sup>2</sup>	2m
Vodič stíněný	0,6m
Šroubky M3 x 0,8	13ks
Matice M3	13ks
Podložky M3	13ks
Šroub M5 50mm	2ks
Matice M5	2ks



Obr. 31. Blokové schéma

### 14.1 Obvod pro napájení led v síťovém spínači

Z 30V nestabilizovaných upravuje toto napájení pro pracovní oblast diody LED. Je složen se sériového zapojení Zenerovy diody 15V, odporu 680R a diody LED. Tento obvod je zapojen mezi kladný pól zdroje a vyvinutý střed toroidního transformátoru, tj. na napájecí napětí 30V.

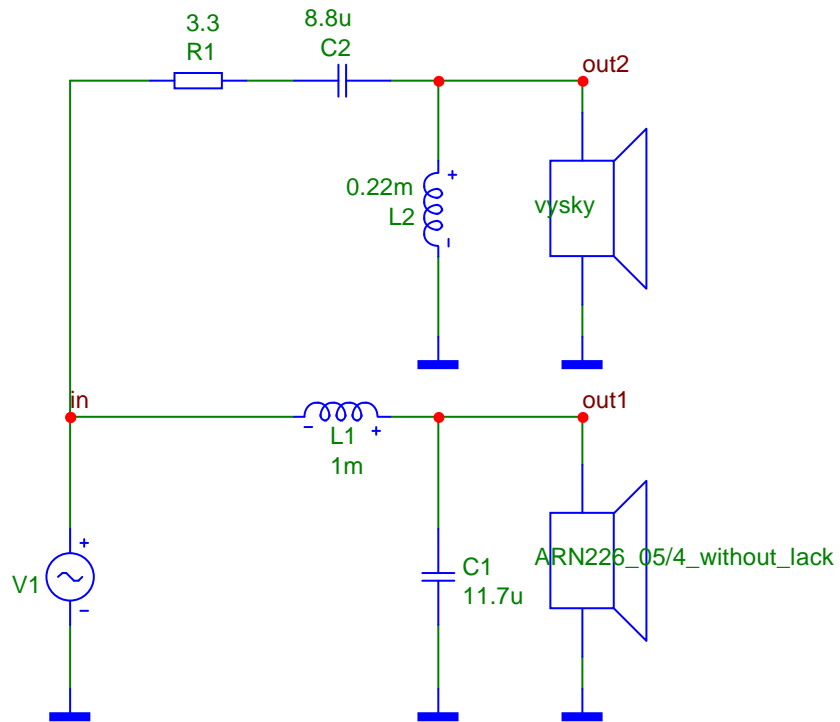
## 15 PROVOZNÍ DOPORUČENÍ TOHOTO ZAŘÍZENÍ

### 15.1 Účel zařízení

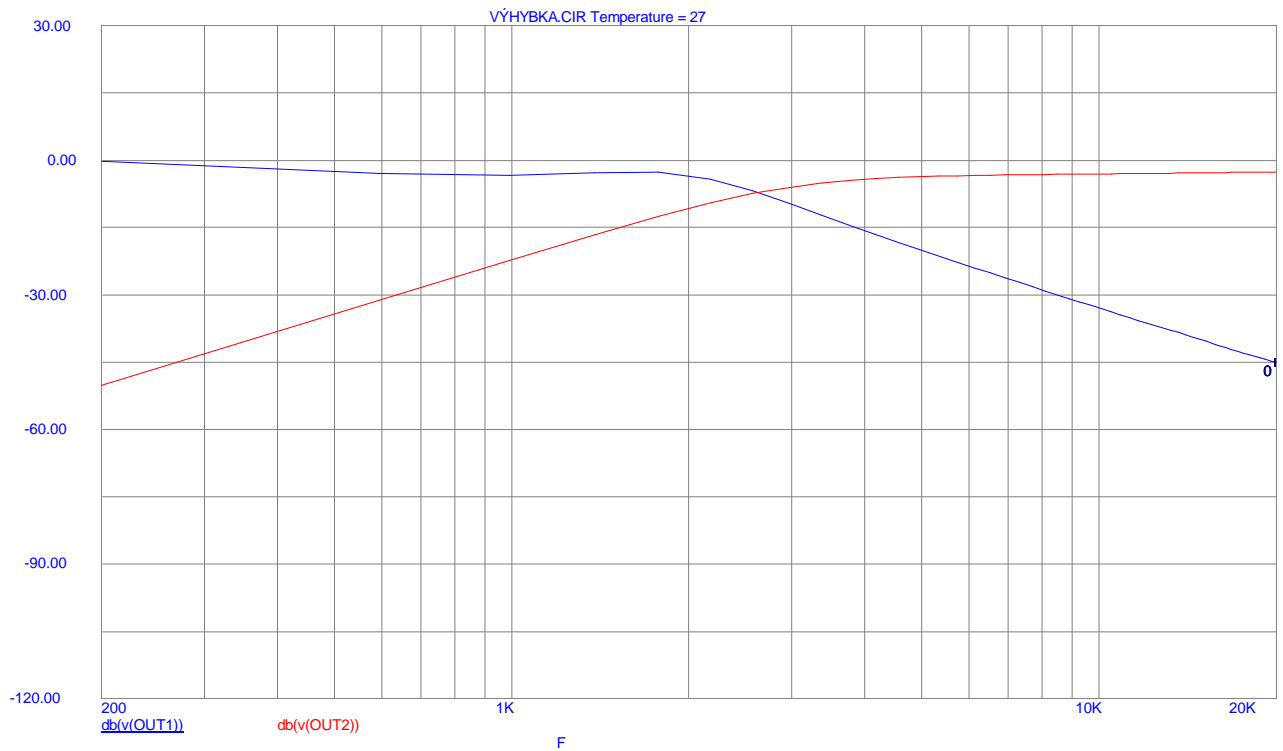
Tento zesilovač třídy High-End je určen pro ozvučení v bytových podmínkách a je určen pro posluchače, jenž kladou maximální nároky na věrnost reprodukce. Zesilovač se totiž k procházejícímu signálu chová tak neutrálně, že připomíná ideál: proslulý drát se ziskem, bez vlastního zvukového zbarvení (tj. bez obvyklých korekčních členů), což je pro všechny zesilovače třídy High-End zcela typické. Maximální sinusový výkon zesilovače je max. 60W (k=10%) na každý kanál při jmenovité impedanci připojených reproduktorových soustav 4 ohmy. Mezi pozoruhodné přednosti tohoto zesilovače patří profesionální toroidní síťový transformátor se zanedbatelným magnetickým rozptylem, takže neovlivňuje okolní přístroje. Bohatě dimenzovaný filtr síťového kmitočtu podporuje vynikající dynamické chování zesilovače, zejména nápadně čistou a intenzivní reprodukci basových pasáží. Zesilovač lze charakterizovat velmi nízkým zkreslením a dobrými kmitočtovými vlastnostmi a je doporučeno používat ho pro poslech hudby z CD přehrávačů, jelikož v tomto případě nemusíte použít předzesilovačů, které ve většině případů zvuk mírně degradují (šumem) a zesilovač potom zesílenou kopii tohoto zvuku přivádí do reprobeden. K zesilovači je však nutné použít vstupní externí regulátor hlasitosti, který lze zakoupit v každé prodejně profesionálních Hi-Fi zařízení.

### 15.2 Doporučené zapojení reprosoustav k tomuto zesilovači

Posledním článkem reprodukčního řetězce jsou reprosoustavy. Bakalářská práce doporučuje se zesilovačem používat reprosoustavy dvoupásmové s výhybkou druhého řádu. Běžné levné reprosoustavy na dnešním trhu používají tzv. piezo výškový reproduktor, který má v oblasti rezonančního kmitočtu minimální impedanci a může tak dojít k přetěžování zesilovače. Proto je doporučeno používat reprovýhybky se strmostí  $12\text{dB/okt}$  s následující charakteristikou:



Obr. 32. Schéma reprovýhybky



Obr. 33. Průběh útlumu dolní a horní propusti reprovýhybky

### 15.3 Návod k použití

1. Reprosoustavy se v poslechové místnosti rozmístí tak, aby byly co nejdále od sebe, pro kvalitní stereofonní poslech, a v jedné rovině, aby nedocházelo k fázovým posuvům mezi reprosoustavami. Reprosoustavy taktéž neumísťují do rohů místnosti, docházelo by k odrazům zvukových vln a zkreslení reprodukce.
2. Reprosoustavy se k zesilovači připojují dostatečně silnou dvojlinku alespoň o průřezu  $2,5 \text{ mm}^2$ . Je nutností dbát na správné fázování reprosoustav!!!
3. Připojí se zdroj signálu na vstup zesilovače s vhodnou citlivostí s vhodným regul.hlasitosti.
4. Připojí se zesilovač k síti.
5. Zapne se zesilovač síťovým spínačem POWER, rozsvítí se červená LED dioda v síťovém spínači.
6. Musí být přidána hlasitost (VOLUME na externím zařízení), není-li slyšet žádný zvuk, chybu hledejte nejprve ve zdroji vstupního signálu.

### 15.4 Důležitá bezpečnostní upozornění

1. Zesilovač používá napájení ze standardní zásuvky el. sítě 220V!!! Použití elektrické sítě s vyšším napětím, jako např. pro klimatizační zařízení, je velmi nebezpečné. Připojení k takovému zdroji by mohlo způsobit vznik požáru.
2. Při odpojování síťového přívodu se vytahuje přívod za síťovou vidlici. Vždy se dbá na to, abyste byla manipulace se síťovým přívodem prováděna suchými rukama. Při dotýkání se síťového přívodu mokřýma rukama hrozí úraz elektrickým proudem.
3. Síťový přívod musí být chráněn před mechanickým poškozením, nepokládají se na něj těžké předměty, násilně jej není dobré neohýbat apod.
4. Přístroj se umísťuje tak, aby byla zajištěna dostatečná ventilace, aby byl kolem něj prostor nejméně 20cm a nic na něm nebylo odloženo!!

Přístroj se neumísťuje:

- na místa vystavená přímému slunečnímu záření ani na jiná
- místa s vysokou teplotou
- na místa s nadměrnou vlhkostí nebo vibracemi

Nedodržení výše uvedených pokynů může mít za následek poškození skříňky přístroje a nebo jeho vnitřních součástí. Zkracuje se tak též délka životnosti přístroje.

5. Přístroj se nikdy nerozebírá! Není vhodné odstraňovat vnější kryt přístroje, nepokoušet se jej opravovat a dotýkat se jeho vnitřních součástí. Hrozí úraz elektrickým proudem! Případnou opravu musí být provedena pouze znalým odborníkem. V případě nutnosti sejmutí krytu musí být nejprve vytažena vidlice síťového přívodu ze zásuvky.
6. Na obzvláštní opatrnost se dbá, jsou -li přítomny děti. Je nepřijatelné, aby děti cokoliv zasunovaly do přístroje (např. skrz ventilační otvory), zvláště kovové předměty, jako jsou mince, jehly, šroubovák apod. Mohlo by dojít nejen k poruše přístroje, ale i k životu nebezpečnému úrazu elektrickým proudem.
7. Jestliže do přístroje vnikne voda, hrozí vážné nebezpečí požáru či úrazu elektrickým proudem. V takovém případě okamžitě musí být okamžitě vytažena vidlice síťového přívodu ze zásuvky el.sítě!!!
8. Pokud nebude přístroj delší dobu používán, je dobré, aby byl odpojen síťový přívod! Pokud by přístroj zůstal po dlouhou dobu zapnutý, zkracovala by se tím nejen jeho životnost, ale mohlo by docházet k různým poruchám.

## 15.5 Výměna pojistek

Při výpadku pojistky (pojistky jsou umístěny v pojistkovém pouzdře FUSE a uvnitř zesilovače na pojistkovém modulu) se odpojí přístroj od elektrické sítě a vytáhne se zásuvka s pojistkou. Propálená pojistka se vyjme a do zásuvky, či pojistkového držáku vloží nová, patřičné proudové hodnoty!!! Poté se zásuvka vloží zpět do přístroje a zesilovač může být opět připojen k síťovému rozvodu.



## ZÁVĚR

Zesilovače poskytují tím kvalitnější zvuk, čím širší kmitočtové pásmo dovedou přenést v neslyšitelné nadzvukové oblasti, a čím účinněji potlačují obtížné rezonance a překmity připojených reproduktorů. Dnes převažující zesilovače s velmi složitými obvody mají v signálové cestě příliš mnoho součástek natáčející fázi. Nestabilita tím způsobená se korekčními členy potlačí jen za cenu omezení důležitého nadzvukového pásma a zpomalení impulzní odezvy. To se však projeví i ve slyšitelném pásmu vinou nevhodně navržené zpětné vazby, která nestačí dostatečně rychle sledovat tranzienty (hudební signály impulzní povahy) a reaguje na ně se zpožděním. Při něm je zesilovač bez zpětné vazby, tedy neřízený, a jeho vnitřní obvody jsou přetíženy. Tím vzniká rušivé tranzientní intermodulační zkreslení (TIM nebo SID), které daleko přesněji vyjadřuje zvukové kvality zesilovače než běžně udávané celkové harmonické zkreslení (THD), a staticky měřené intermodulační zkreslení (DIM). TIM se ve zvuku projevuje hlavně nepřesnou reprodukcí impulzních nástrojů (např. kytary, bicích a piana), v souzvuku ztrátou čitelnosti jednotlivých hlasů a zvukové průzračnosti, a také únavou při déletrvajícím poslechu.

Výsledkem mé bakalářské práce je nasimulovaný, modifikovaný a realizovaný - plně funkční zesilovač, jenž je konstrukčně jednoduchý, bez obvyklých korekčních členů a do reprodukce tak nevnáší zabarvení zvuku a hlavně reprodukci minimálně zkresluje, tj. nemá výše zmíněné nectnosti. Součástky k jeho stavbě jsou dostupné ve všech prodejnách elektronických součástek a jejich celková cena nepřekročí 3000Kč. Tato bakalářská práce tak umožní, aby zesilovač dobrých zvukových vlastností měl doma každý zájemce o věrnou reprodukci hudby, jenž má alespoň základní elektrotechnické znalosti.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Láníček,R.: Elektronika,obvody,součástky a děje. Praha,BEN,1998.
- [2] katalog EZK Rožnov pod Radhoštěm,2005.
- [3] SIEGFRIED,W.: Abeceda nf techniky. Praha,BEN,2002.
- [4] Kotisa,Z.: NF zesilovače I,II.Praha,BEN,2002.
- [5] [www.auravos.cz](http://www.auravos.cz)
- [6] [www.zesilovace.cz](http://www.zesilovace.cz)
- [7] Reproduktory a reproduktorové soustavy L.Svoboda,M.Štefan SNTL Praha 1983
- [8] AMARO 1998

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

NF	nízkofrekvenční
AC	střídavý
DC	stejnoseměrný
MC6	Micro Cap 6
TIM	zkreslení způsobené silnou zápornou zpětnou vazbou
SID	zkreslení způsobené malou rychlostí přeběhu
DIM	zkreslení intermodulační
SR	rychlost přeběhu zesilovače

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Zesilovač v třídě A (s elektronkou) .....	11
Obr. 2. Výstupní charakteristika elektronky .....	12
Obr. 3. Zapojení zesilovače ve třídě A (s tranzistorem).....	12
Obr. 4. Třída A.....	14
Obr. 5. Třída B .....	15
Obr. 6. Přechodové zkreslení .....	15
Obr. 7. Třída AB .....	16
Obr. 8. Průběh přechodového zkreslení.....	23
Obr. 9. Degradace signálu zkreslením TIM .....	27
Obr. 10. Průběh limitace signálu.....	33
Obr. 11. Schéma zapojení Transiwatt TW40 .....	45
Obr. 12. Simulace amplitudové charakteristiky.....	46
Obr. 13. Simulace frekvenční charakteristiky.....	47
Obr. 14. Schéma pro simulaci modifikovaného zesilovače .....	48
Obr. 15. Simulace amplitudové charakteristiky modifikovaného zapojení .....	49
Obr. 16. Simulace frekvenční charakteristiky modifikovaného zapojení .....	50
Obr. 17. Simulace napětí v jednotlivých bodech v schématu pro simulaci a ztrátové výkony na součástkách .....	51
Obr. 18. Simulace frekvenční charakteristiky pro hodnotu kondenzátoru C3 470pF.....	52
Obr. 19. Simulace frekvenční charakteristiky pro hodnotu kondenzátoru C3 100pF.....	53
Obr. 20. Simulace frekvenčních charakteristiky při hodnotě C2 330nF .....	54
Obr. 21. Simulace frekvenčních charakteristiky při hodnotě C2 47nF .....	55
Obr. 22. Původní plošný spoj .....	57
Obr. 23. Schéma zapojení zdroje.....	59
Obr. 24. Pohled na osazený plošný spoj zdroje.....	59
Obr. 25. Plošný spoj zdroje-strana spojů .....	59
Obr. 26. Plošný spoj modulu pojistek ze strany spojů .....	61
Obr. 27. Pohled na osazený modul .....	61
Obr. 28. Schéma zapojení realizovaného zesilovače.....	62
Obr. 29. Osazený plošný spoj NF zesilovače .....	63

Obr. 30. Deska NF zesilovače-pohled ze strany spojů (1:1).....	63
Obr. 31. Blokové schéma.....	68
Obr. 32. Schéma reprovýhybky.....	70
Obr. 33. Průběh útlumu dolní a horní propusti reprovýhybky.....	70

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Parametry napájecího zdroje .....	58
Tab. 2. Rozpiska součástí pro napájecí zdroj .....	59
Tab. 3. Popis vývodů modulu.....	60
Tab. 4. Rozpiska součástí pro koncový stupeň .....	61
Tab. 5. Rozpiska součástí pro mechanickou konstrukci .....	67

**SEZNAM PŘÍLOH**

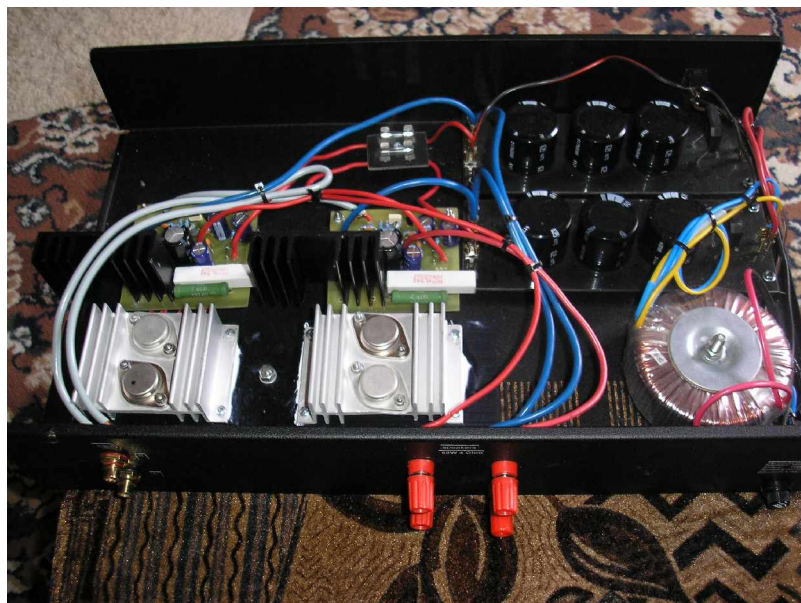
- P I        Pohled na zesilovač ze strany výstupních terminálů
- P II        Pohled do zesilovače (z horní části)
- P III       Pohled do zesilovače (z boku)
- P IV        Pohled na pravý koncový stupeň
- P V        Pohled na zdroj
- P VI        Popisek (přední)
- P VII       Popisek (zadní)

## PŘÍLOHA P I: POHLED NA ZESILOVAČ ZE STRANY VÝSTUPNÍCH TERMINÁLŮ

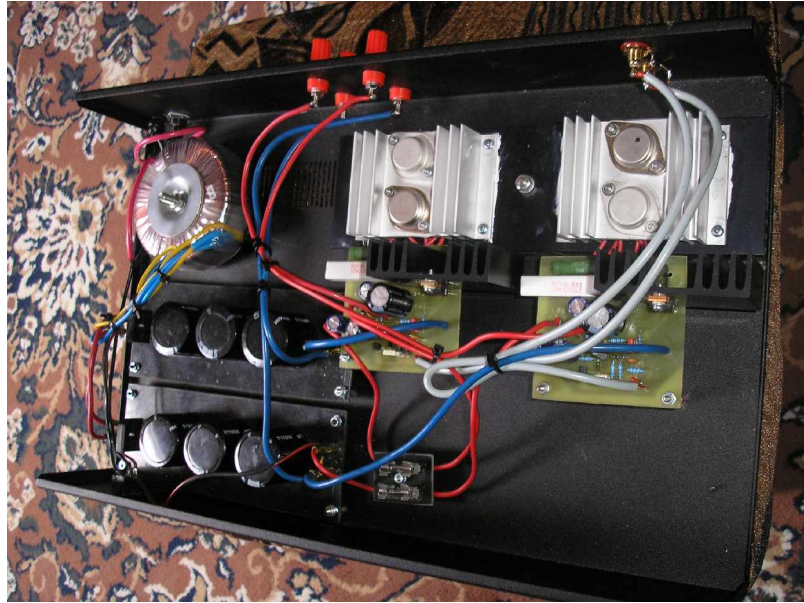




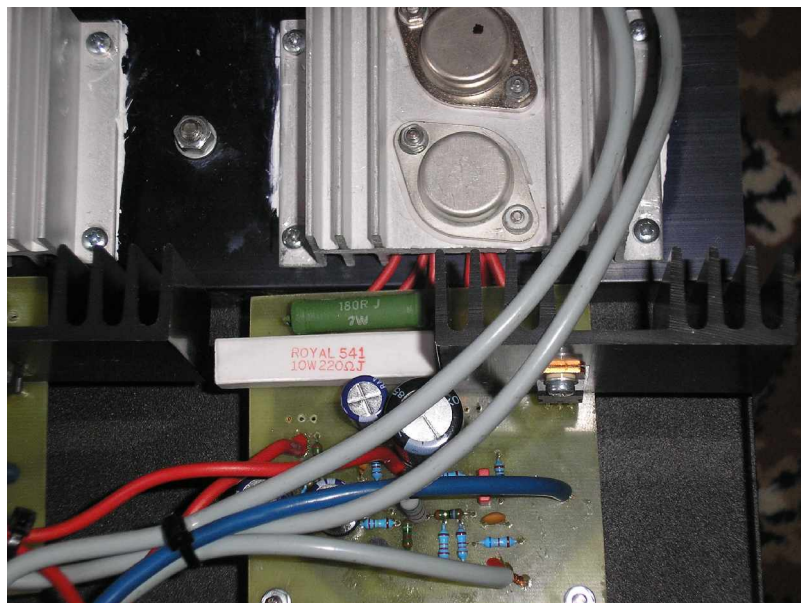
**PŘÍLOHA P II: POHLED DO ZESILOVAČE (Z HORNÍ ČÁSTI)**



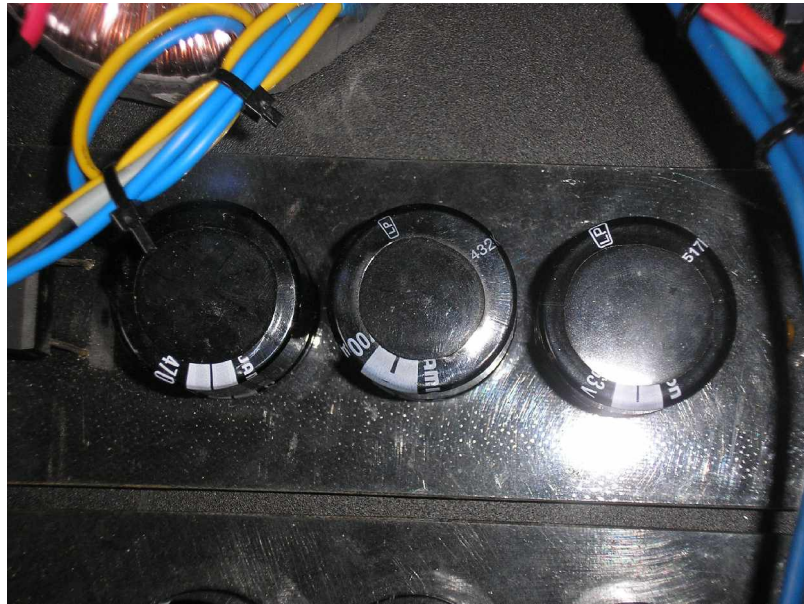
### PŘÍLOHA P III: POHLED DO ZESILOVAČE (Z BOKU)



## PŘÍLOHA P IV: POHLED NA PRAVÝ KONCOVÝ STUPEŇ



## PŘÍLOHA P V: POHLED NA ZDROJ



**PŘÍLOHA P VI: POPISEK (PŘEDNÍ)**

**High End AMPLIFIER 2x45W**

## **PŘÍLOHA P VII: POPISEK (ZADNÍ)**

**Technické údaje:**

Napájení: střídavé 230V 50Hz

Příkon: 100W

Rozměry:(šxvxh) 438x83x280 mm

Hmotnost: 4.1kg