

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Přehled a srovnání vlastností moderních tranzistorů pro klasické  
výkonové audio zesilovače**

**vedoucí práce: Ing. Michal Kubík**

**2012**

**autor: Luboš Kopačka**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Luboš KOPAČKA**  
Osobní číslo: **E10B0591P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Název tématu: **Přehled a srovnání vlastností moderních tranzistorů pro klasické výkonové audio zesilovače**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Seznamte se s topologií výkonových audio zesilovačů řady DPA.
2. Vytvořte přehled použitelných a dostupných tranzistorů pro jednotlivé stupně zesilovače DPA.
3. Podle pokynů vedoucího práce proveďte měření vybraných parametrů na vzorcích tranzistorů.
4. Diskutujte katalogové a naměřené parametry a vyberte vhodnou sestavu tranzistorů pro zesilovač typu DPA-440 a DPA-380.



*[Signature]*  
Doc. Ing. Jiří Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **dle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

**Dudek, P.: Moderní výkonové zesilovače řady DPA. Amatérské Radio č. A/1 až A/11 roč. 1992**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Kubík**  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Michal Kubík**  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. května 2012**

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

V Plzni dne 17. října 2011



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

## **Prohlášení**

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

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

V Plzni dne 11.6.2012

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval všem kteří mi jakýmkoliv způsobem pomohli při vzniku této bakalářské práce. Zvláště bych chtěl poděkoval vedoucímu Ing. Michalu Kubíkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Mé poděkování také patří rodičům za poskytnutí zázemí a finančních prostředků na studium. V neposlední řadě také děkuji svým přátelům a blízkým za podporu při studiu.

## **Anotace**

V této bakalářské práci jsou popsány jednotlivé stupně výkonových audio zesilovačů. Do jednotlivých stupňů jsou zde sepsány tranzistory a jejich případné dostupné náhrady. Další kapitoly jsou zaměřeny na měření některých parametrů tranzistorů. V poslední kapitole jsou sepsány vhodné tranzistory pro dané typy zesilovačů.

## **Klíčová slova**

zesilovač, bipolární tranzistor, unipolární tranzistor, šum, šumové napětí

## **Abstrakt**

### **Summary of modern transistors for analog audio power amplifiers**

In this bachelor thesis there are described the individual steps for power audio amplifier. Transistors and their relevant available substitutes are divided into separate steps. The next chapters are oriented on measurements of some parameter transistors. The last chapter shows useful transistors for existing types amplifiers.

## **Key words**

Amplifier, bipolar transistor, unipolar transistor, noise, noise voltage

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 TOPOLOGIE VÝKONOVÝCH AUDIO ZESILOVAČŮ ŘADY DPA</b> .....	<b>10</b>
1.1 DRUHY PROVOZU, TŘÍDY ZESILOVAČŮ .....	10
1.2 OBVODOVÉ ŘEŠENÍ.....	11
1.2.1 Vstupní zesilovač.....	12
1.2.2 Výstupní obvody.....	13
<b>2 PŘEHLED POUŽITELNÝCH A DOSTUPNÝCH TRANZISTORŮ PRO JEDNOTLIVÉ STUPNĚ ZESILOVAČE DPA</b> .....	<b>15</b>
2.1 DPA 220 .....	15
2.1.1 Náhrady tranzistorů .....	15
2.1.2 Parametry a dostupnost tranzistorů.....	16
2.2 DPA380.....	17
2.2.1 Náhrady tranzistorů.....	17
2.2.2 Parametry a dostupnost tranzistorů.....	17
2.3 DPA 440 .....	18
2.3.1 Náhrady tranzistorů.....	18
2.3.2 Parametry a dostupnost tranzistorů.....	19
2.4 DPA880.....	20
2.4.1 Náhrady tranzistorů .....	20
2.4.2 Parametry a dostupnost tranzistorů.....	21
<b>3 MĚŘENÍ VYBRANÝCH PARAMETRŮ</b> .....	<b>22</b>
3.1 MĚŘENÍ ZÁVĚRNÉHO NAPĚTÍ.....	22
3.1.1 Princip funkce .....	22
3.1.2 Popis zapojení.....	22
3.2 MĚŘENÍ ŠUMU .....	23
3.2.1 Ekvivalentní vstupní šum.....	23
3.2.2 Popis zapojení.....	25
3.2.3 Postup měření .....	25
<b>4 POROVNÁNÍ KATALOGOVÝCH A NAMĚŘENÝCH PARAMETRŮ</b> .....	<b>27</b>
4.1 MĚŘENÍ ZÁVĚRNÉHO NAPĚTÍ.....	27
4.1.1 Katalogové a naměřené hodnoty.....	27
4.1.2 Shrnutí měření závěrného napětí .....	27
4.2 MĚŘENÍ EKVIVALENTNÍHO VSTUPNÍHO ŠUMU .....	28
4.2.1 Naměřené hodnoty .....	28
4.2.2 Shrnutí měření vstupního šumu.....	28
<b>5 VHODNÉ SESTAVY TRANZISTORŮ PRO ZESILOVAČE TYPU DPA-440 A DPA-380</b> .....	<b>29</b>
5.1 SESTAVA PRO DPA 440.....	29
5.2 SESTAVA PRO DPA 380.....	30
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>31</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>32</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Úvod

Kvalitní výkonové zesilovače označovány „High End“ byly pro mnoho lidí u nás nedostupné. Nejznámější konstruktér zesilovačů řady DPA Pavel Dudek zkonstruoval výkonový zesilovač, který se mohl rovnat svými parametry a kvalitou se špičkovými světovými zesilovači.

Předkládaná práce je zaměřena na tranzistory používané u výkonových zesilovačů řady DPA. Zesilovače byly konstruovány už před mnoha lety, a proto některé součástky musíme nahradit dostupnými. Tranzistory, které jsou uvedeny u schémat zesilovačů DPA, byly nejčastěji od výrobce Tesla. Tyto součástky se již nevyrábějí, proto pokud možno použijeme náhrady nebo součástky s co nejvíce shodnými parametry.

Máme mnoho typů zesilovačů v řadě DPA, ať už v případě použití bipolárních, unipolárních technologií u tranzistorů, tak i ve velikostech výstupního výkonu.

První kapitola je zaměřena na topologii zesilovačů. Druhá kapitola se zabývá tranzistory a jejich dostupnými náhradami. Další kapitoly jsou zaměřeny na parametry tranzistorů.

Po přečtení této práce by se měl čtenář již lépe orientovat mezi DPA zesilovači a používanými tranzistory pro zesilovače. Dále by si měl vytvořit názor na současnou nabídku těchto součástek.

# 1 Topologie výkonových audio zesilovačů řady DPA

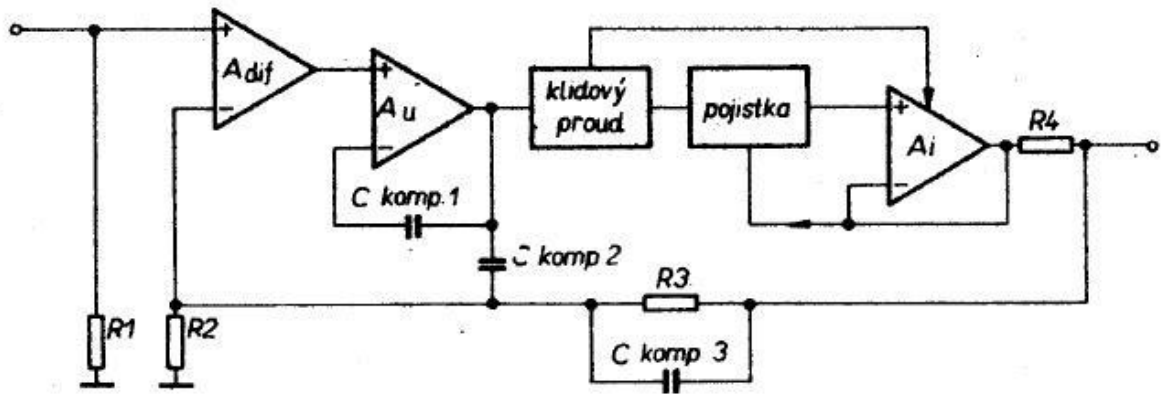
## 1.1 Druhy provozu, třídy zesilovačů

Zesilovače mohou pracovat v třídách provozu, dle nastavení pracovního bodu tranzistorů. Základní třída A má pracovní bod uprostřed převodní charakteristiky tranzistoru pro dosažení maximálního klidového proudu. Zde pracují výstupní součástky s velkou trvalou ztrátou, která je příčinou malé účinnosti. Jelikož pracují s velkými proudy, mají dobrou linearitu a odpadá vlastní zkreslení. Napájecí napětí v závislosti na vybuzení nekolísá, a proto se může pro budící stupeň použít stabilizované napětí. Zesilovače v této třídě jsou ovšem velmi nákladné z důsledku potřeby více dimenzovaných síťových transformátorů, větší filtrační kapacity ve zdroji a chladiče. Tato třída se používá u nejdražších přístrojů.

Požadavky zvětšení hudebního výkonu vedly ke vzniku třídy G. Princip je odvozen ze statického vyhodnocení přirozeného hudebního signálu. Špičky "ční" ze signálu poměrně osamoceně, a proto je zbytečné zesilovač dimenzovat na sinusový výkon jejich úrovně, když střední hodnota je mnohem nižší. Koncové tranzistory a napájecí zdroje jsou zapojeny do série. Při malých výstupních úrovních je energie čerpána ze zdroje s nižším napětím a výstupní proud prochází jen spodním tranzistorem. Při vyšším výstupním napětí se otevře i tranzistor horní a energetická špička je čerpána ze zdroje vyššího napětí. Tento zdroj musí mít proto velkou filtrační kapacitu (akumulátor energie), ale vinutí napájecího transformátoru může mít jen malý průřez, neboli velký vnitřní odpor. Prodleva mezi špičkami je dost velká, proto dovolí znovu nabít filtrační kondenzátor. Síťový transformátor může být proto malý a laciný. Při přechodu do sepnutí vyššího napájení vzniká bohužel jisté zkreslení, které je podobné přechodovému. Není sice tak slyšitelné, neboť je maskováno větší úrovní, ale právě z tohoto důvodu zesilovače řešené popsáním způsobem do vyšší kategorie nepronikly.

Jedna z dalších je třída D, která má impulzně spínaný zesilovač. Výhodou je vysoká energetická účinnost a malé rozměry přístrojů, čehož se využívá u mobilních ozvučovacích aparatur. Nevýhodou jsou problémy s dostatečným odstíněním vysokofrekvenčního vyzařování, které tyto přístroje produkují s relativně velkým zkreslením na vysokých kmitočtech.

## 1.2 Obvodové řešení



Obr. 1 - blokové schéma výkonového zesilovače

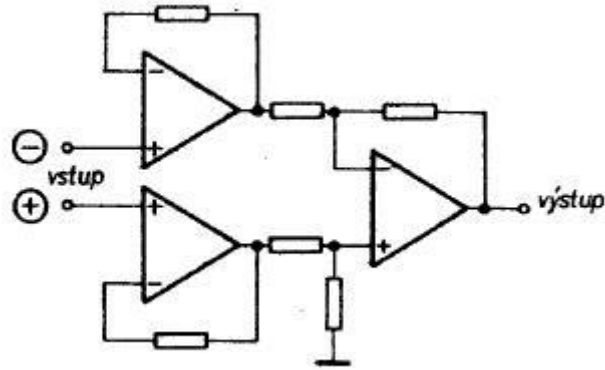
Zesilovač je rozdělen do jednotlivých stupňů. První stupeň diferenciální zesilovač, druhý je napěťový zesilovač, označován také jako rozkmitový a výkonový zesilovací stupeň spolu s ochrannými obvody. Toto všechno je svázáno napěťovou nebo proudovou zpětnou vazbou.

Moderní výkonové zesilovače bývají konstruovány v celosymetrickém zapojení, tj. zesilovací řetězec není komplementární jen ve výstupní a budící části, ale i v předchozích stupních. Díky tomuto řešení dostáváme výhodu. Vstupní rozkmitové stupně mohou pracovat s tranzistory komplementárními, které jsou z hlediska stejnosměrného napětí zapojeny v sérii. Jelikož pracují v třídě A, z hlediska střídavého signálu pracují paralelně. Použijeme-li proto na zrcadlových místech součástky se stejnými parametry, potlačíme velmi dobře vzniklé zkreslení.

Ve zvukařské praxi se používají tzv. symetrické vstupy a výstupy, které mají za následek určité složitější zapojení, ale také dvě výhody.

Zprvé je to odolnost vůči rušivým vlivům. Vstupy zesilovače pracují tak, že jeden otáčí fází, což má za následek vyrušení rušivých vlivů, které do vstupu pronikly. Signál, který chceme přenášet se zesílí, jelikož má na obou vstupech opačnou fázi.

Zadruhé je to galvanické oddělení zemního potenciálu spojovaných přístrojů. Mezi přístroji protéká vyrovnávací proud, který způsobí přenesení „brumu“, na vstup zesilovače. Zde se jako řešení nabízí použití vazebního transformátoru nebo použití symetrického zesilovače. Pokud pečlivě vybereme součástky při řešení symetrického vstupu, mohou být poté vlastnosti lepší, než při použití oddělovacího transformátoru.

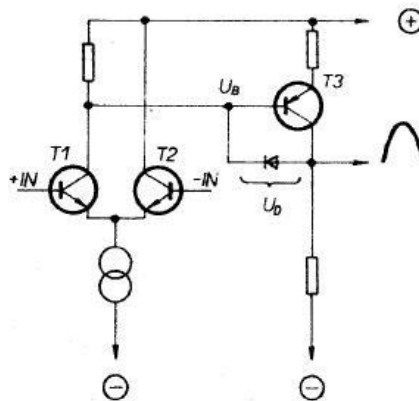


Obr. 2 – Přístrojový zesilovač

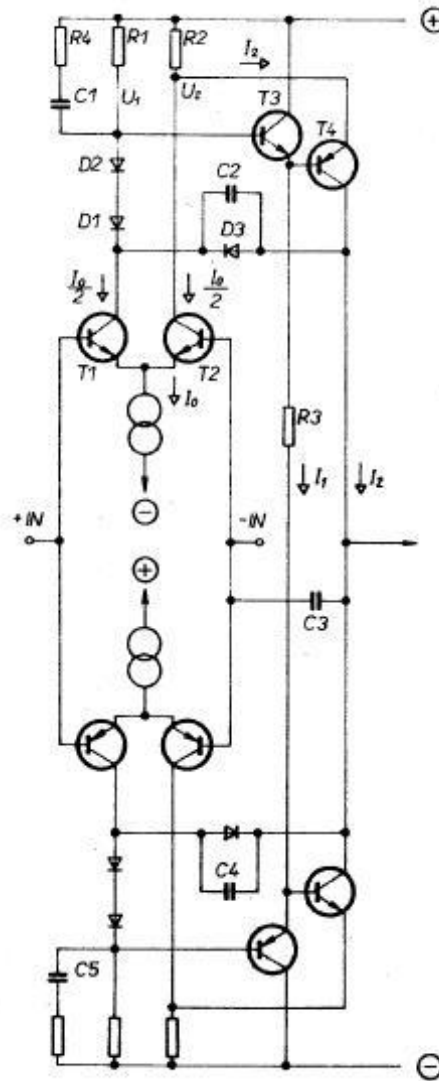
### 1.2.1 Vstupní zesilovač

Vstupní zesilovač zesiluje vstupní napětí na úroveň potřebnou k otevření výkonových tranzistorů. Požadavky jsou dobrá linearita, vysoká rychlost přeběhu, malá výstupní impedance, velký zisk naprázdno a velká šířka pásma. U následujícího stupně vlivem zatěžovací impedance a zpětné vazby klesá zisk u vyšších frekvencí a narůstá zkreslení.

Každý výkonový zesilovač pracuje občas v limitaci. Jednotlivé stupně či prvky mají různou mezní frekvenci. Výkonové tranzistory mají nižší tuto frekvenci a proto začnou limitovat dříve. Jako opatření se zavádí zpětná vazba přímo do vstupního zesilovače, ale má za následek zmenšení zisku naprázdno a vzrůstá zkreslení. Saturace ve vnitřní struktuře zesilovače se projevuje tzv. "odtržením" a zákmity při odběhu z limitace. Na toto harmonické zkreslení je lidské ucho velmi citlivé. Je tedy nutné zabránit saturaci výkonových tranzistorů. Řešením je napájet je vyšším napětím než stupně předchozí nebo zajistit, aby limitovaly déle než předchozí stupně. Tímto ovšem nepatrně klesá účinnost. Potlačení saturace rozkmitového stupně řeší zavedení nelineární zpětné vazby.



Obr. 3 – Nelineární vazba pro potlačení saturace



Obr. 4 - Zapojení vstupního a rozkmitového stupně

### 1.2.2 Výstupní obvody

Výstupní obvod musí zesílit napětí od rozkmitového stupně. Pracuje s velkými hodnotami proudu a napětím způsobující ohřev výstupních součástek. K zesílení jsou zde tranzistory bipolární nebo unipolární.

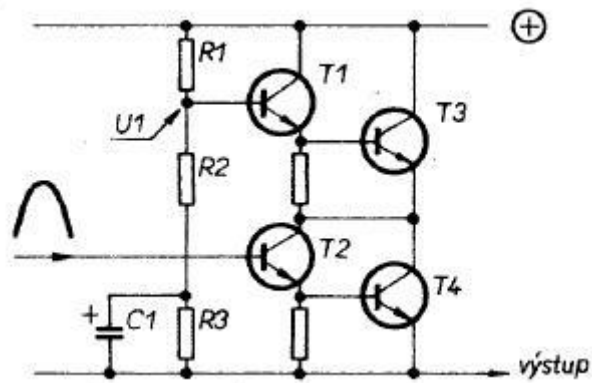
Bipolární výkonové tranzistory jsou velmi rozšířené. Nabídka typů je široká, proto nemáme téměř žádné omezení při výběru. Nejlepší typy mají výkonovou ztrátu až 250W, závěrné napětí až 200V, povolený kolektorový proud až 30A, mezní frekvenci až 50Mhz. Nevýhoda těchto součástek je kladný koeficient kolektorového proudu v závislosti na teplotě, se kterou je nutné počítat a korigovat teplotní vazbou.

Unipolární tranzistory svými parametry vyhovují, proto se používají. Výhodou těchto součástek je vysoká vstupní impedance řídicí elektrody, ovšem jen při nízkých kmitočtech. Na vyšších kmitočtech se musí brát v úvahu jejich vstupní kapacita. Jejich odpor a kapacita

rozhodují o rychlosti spínání součástek. Proto musí budící stupeň být schopen dodat poměrně velký proud.

Chceme-li dosahovat větších výkonů nebo zvýšit spolehlivost zesilovače, použijeme paralelní řazení součástek. Dle jejich vlastností a charakteristik vybíráme co nejpodobnější součástky. Snadněji lze metodu použít u unipolárních tranzistorů, které mají téměř shodné charakteristiky. U bipolárních tranzistorů se musíme řídit parametrem  $U_{BE}$  při proudu  $I_{CE}$  asi 50mA, což je pracovní proud, při které by měl pracovat.

Pokud nejsou k dispozici tranzistory s dostatečně velkým závěrným napětím, použijeme sériové zapojení. Zde ovšem vzniká nevýhoda součtu dvou saturačních napětí  $U_{CE}$ . Výhodou však máme zvětšení spolehlivosti.



Obr. 5 – Sériové řazení výkonových tranzistorů

## 2 Přehled použitelných a dostupných tranzistorů pro jednotlivé stupně zesilovače DPA

### 2.1 DPA 220

Základní zesilovač řady DPA o výkonu 2x 100W. Výstupní tranzistory zapojeny v Darlingtonově zapojení.

#### 2.1.1 Náhrady tranzistorů

Vstupní		Budič		Výstup	
Dříve	Náhrada	Dříve	Náhrada	Dříve	Náhrada
KC237V	BC546B	KSY71	BC546A	KD649T	BD649
KC307V	BC556B	KSY81	BC556A	KD650T	BD650
		KF470	BF470 BF472	KD366B	MJ4032 2SA1943 2N3773
		KF469	BF469 BF471	KD367B	MJ4035 2SC5200 2N6609
		KD135	BD139		
		KC635	BC639		
		KC636	BC640		

## 2.1.2 Parametry a dostupnost tranzistorů

Typ	$U_{CE0}$ [V]	$I_C$ [mA]	$P_C$ [W]	Cena[Kč]	Obchod
BC546B	65	0,1	0,5	1,50 3,22	GES Farnell
BC556B	65	0,1	0,5	1,50 3,22	GES Farnell
BC546A	65	0,1	0,5	1,50 2,56	GES Farnell
BC556A	65	0,1	0,5	1,10	GME
BF472	300	0,05	1,8	11,90	GES
BF471	300	0,05	1,8	8,90	GES
BD139	80	1,5	12,5	4,90 9,33	GES Farnell
BC639	80	1	1	4,09	Farnell
BC640	80	1	0,8	1,90 6,92	GES Farnell
BD649	100	8	62,5	21,90 28,28	GES Farnell
BD650	100	8	62,5	26,80 28,28	GME Farnell
MJ4032	100	16	150	98,30 114,00	GME GES
MJ4035	100	16	150	78,10	GME
2N3773	140	16	150	79,00 85,60 91,45	GES GME Farnell
2N6609	140	16	150	92,35	Farnell
2SA1943	230	15	150	52,90 85,60	GES GME
2SC5200	230	15	150	52,90 80,30	GES GME



## 2.2 DPA380

Zesilovač o výkonu 2x 200W. Výstupní 3 páry MOSFET tranzistorů zapojeny v paralelním zapojení.

### 2.2.1 Náhrady tranzistorů

Vstupní		Budič		Výstup	
Dřívě	Náhrada	Dřívě	Náhrada	Dřívě	Náhrada
BC546B	=dostupné	KSY71	BC546A	IRF640	IRF640N
BC556B	=dostupné	KSY81	BC556A	IRF9640	=dostupné
BC549C	=dostupné	BF472	=dostupné BF470		
BC559C	=dostupné	BF471	=dostupné BF469		

### 2.2.2 Parametry a dostupnost tranzistorů

Typ	$U_{CE0}$ [V]	$I_C$ [mA]	$P_C$ [W]	Cena[Kč]	Obchod
BC546B	65	0,1	0,5	1,50 3,22	GES Farnell
BC556B	65	0,1	0,5	1,50 3,22	GES Farnell
BC549C	30	0,1	0,5	1,00 4,84	GME Farnell
BC559C	30	0,1	0,5	1,10	GME
BF472	300	0,05	1,8	11,90	GES
BF471	300	0,05	1,8	8,90	GES
BC546A	65	0,1	0,5	1,50 2,56	GES Farnell
BC556A	65	0,1	0,5	1,10	GME
Typ	$V_{DS}$ [V]	$I_{DS}$ [A]	$P_D$ [W]	Cena[Kč]	Obchod
IRF640N	200	18	125	18,90 28,90 29,14	GES GME Farnell
IRF9640	200	11	125	24,90 26,00 67,31	GES GME Farnell

## 2.3 DPA 440

Zesilovač o výkonu 2x 200W. Výstupní tranzistory zapojeny v paralelním zapojení.

### 2.3.1 Náhrady tranzistorů

Vstupní		Budič		Výstup	
Dříve	Náhrada	Dříve	Náhrada	Dříve	Náhrada
KC237V	BC546B	KSY71	BC546A	MJ15003	=dostupné
KC307V	BC556B	KSY81	BC556A	MJ15004	= dostupné
KC239F	BC550	KF469	BF469 BF471	2N3773	= dostupné 2SA1943 MJL21193G
KC309F	BC560	KF470	BF470 BF472	2N6609	= dostupné 2SC5200 MJL21194G
		KD135	BD139		
		KC635	BC639		
		KC636	BC640		

### 2.3.2 Parametry a dostupnost tranzistorů

Typ	$U_{CE0}$ [V]	$I_C$ [mA]	$P_C$ [W]	Cena[Kč]	Obchod
BC546B	65	0,1	0,5	1,50 3,22	GES Farnell
BC556B	65	0,1	0,5	1,50 3,22	GES Farnell
BC550	45	0,1	0,5	6,92	Farnell
BC550C	45	0,1	0,625	1,10	GME
BC550CG	45	0,1	0,6	1,90	GES
BC560C	45	0,1	0,5	2,56 1,10	Farnell GME
BC560CG	45	0,1	0,6	1,90	GES
BC546A	65	0,1	0,5	1,50 2,56	GES Farnell
BC556A	65	0,1	0,5	1,10	GME
BF472	300	0,05	1,8	11,90	GES
BF471	300	0,05	1,8	8,90	GES
BD139	80	1,5	12,5	4,90 9,33	GES Farnell
BC639	80	1	1	4,09	Farnell
BC640	80	1	0,8	1,90 6,92	GES Farnell
MJ15003	140	20	250	88,00 90,00 93,56	GME GES Farnell
MJ15004	140	20	250	88,80 96,57	GME Farnell
2N3773	140	16	150	79,00 85,60 91,45	GES GME Farnell
2N6609	140	16	150	92,35	Farnell
2SA1943	230	15	150	52,90 85,60 91,78	GES GME Farnell
2SC5200	230	15	150	52,90 80,30 91,78	GES GME Farnell
MJL21193G	250	16	200	119,00	GES
MJL21194G	250	16	200	119,00	GES

## 2.4 DPA880

Výstupní výkon 2x400W. Tranzistory bipolární v sérioparalelním zapojení. Na výstupu 4 páry tranzistorů.

### 2.4.1 Náhrady tranzistorů

Vstupní		Budič		Výstup	
Dříve	Náhrada	Dříve	Náhrada	Dříve	Náhrada
KC237V	BC546B	KSY71	BC546A	KD337	BD241C
KC307V	BC556B	KSY81	BC556A	KD338	BD242C
KC239F	BC550	KF469	BF469 BF471	MJ15003	=dostupné
KC309F	BC560	KF470	BF470 BF472	MJ15004	= dostupné
		KD135	BD139	2N3773	= dostupné 2SA1943 MJL21193G
		KC635	BC639	2N6609	= dostupné 2SC5200 MJL21194G
		KC636	BC640		

## 2.4.2 Parametry a dostupnost tranzistorů

Typ	U <sub>CEO</sub> [V]	I <sub>C</sub> [mA]	P <sub>C</sub> [W]	Cena[Kč]	Obchod
BC546B	65	0,1	0,5	1,50 3,22	GES Farnell
BC556B	65	0,1	0,5	1,50 3,22	GES Farnell
BC550	45	0,1	0,5	6,92	Farnell
BC550C	45	0,1	0,625	1,10	GME
BC550CG	45	0,1	0,6	1,90	GES
BC560C	45	0,1	0,5	2,56 1,10	Farnell GME
BC560CG	45	0,1	0,6	1,90	GES
BC546A	65	0,1	0,5	1,50 2,56	GES Farnell
BC556A	65	0,1	0,5	1,10	GME
BF472	300	0,05	1,8	11,90	GES
BF471	300	0,05	1,8	8,90	GES
BD139	80	1,5	12,5	4,90 9,33	GES Farnell
BC639	80	1	1	4,09	Farnell
BC640	80	1	0,8	1,90 6,92	GES Farnell
BD241C	100	3	40	8,90 9,20 21,27	GES GME Farnell
BD242C	100	3	40	8,80 8,90 16,61	GME GES Farnell
MJ15003	140	20	250	88,00 90,00 93,56	GME GES Farnell
MJ15004	140	20	250	88,80 96,57	GME Farnell
2N3773	140	16	150	79,00 85,60 91,45	GES GME Farnell
2N6609	140	16	150	92,35	Farnell
2SA1943	230	15	150	52,90 85,60 91,78	GES GME Farnell
2SC5200	230	15	150	52,90 80,30 91,78	GES GME Farnell
MJL21193G	250	16	200	119,00	GES
MJL21194G	250	16	200	119,00	GES

### 3 Měření vybraných parametrů

#### 3.1 Měření závěrného napětí

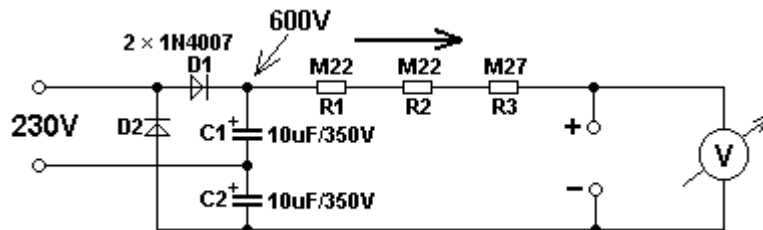
##### 3.1.1 Princip funkce

Princip vychází z metody *prvního průrazu*. Pokud na polovodičový PN přechod přivedeme vyšší napětí než snese, dojde k průrazu PN přechodu a většinou i k destrukci součástky. Omezíme-li proud součástkou na malou úroveň, nedojde ke zničení součástky. Průraz s omezeným proudem se nazývá *první průraz* a lze ho použít ke měření závěrného napětí. Proud musíme omezit na úroveň přibližně 1mA, která součástkám neublíží. Přípravek je primárně určen na měření výkonových tranzistorů, ale lze s ním měřit i závěrná napětí jiných polovodičových součástek.

##### 3.1.2 Popis zapojení

Vstupní napětí je střídavých 230V z oddělovacího transformátoru. Na vstupu máme násobič napětí, který nám transformuje napětí na cca stejnosměrných 600V. Dále jsou zde z důvodu napětového namáhání 3 rezistory omezující proud do PN přechodu.

Připojený voltmetr na výstupu nám ukazuje právě hodnotu závěrného napětí přechodu. Ovšem má-li součástka větší závěrné napětí než je na výstupu násobiče, voltmetr ukáže jen hodnotu napětí, kterým je přechod napájen. Pokud připojíme PN přechod v propustném směru, voltmetr ukáže napětí na přechodu cca 0,65V.



Obr. 6 – Schéma přípravku na měření závěrného napětí



Obr. 7 - Přípravek na měření závěrného napětí

## 3.2 Měření šumu

### 3.2.1 Ekvivalentní vstupní šum

Ekvivalentní vstupní šum je významnou vlastností u bipolárního tranzistoru. Vztahuje se pro velmi úzké kmitočtové pásmo na dané frekvenci  $f$ . Ekvivalentní šum  $v_{ni}^2$  je u tranzistoru zatíženého reálnou impedancí definován jako

$$v_{ni}^2 = \left[ 4kTt_x + \left( 2q + \frac{K_f}{f} \right) \frac{I_C}{\beta} r_x^2 + 2qI_c \left( \frac{r_x}{\beta} + \frac{V_T}{I_C} \right)^2 \right] \Delta f$$

Rovnice 1 – Ekvivalentní vstupní šumové napětí

$r_x$ .....	sériový odpor báze
$\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$ ...	proudové zesílení
$I_C$ .....	proud kolektoru
$I_B$ .....	proud báze
$k$ .....	Boltzmannova konstanta ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K )
$T$ .....	termodynamická teplota
$q$ .....	elementární náboj elektronu ( $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C )
$V_T$ .....	teplotní napětí ( $V_T = kT/q$ )
$K_f$ .....	koeficient blikavého (1/f) šumu
$f$ .....	kmitočet

Pokud měříme na dostatečně vysokém kmitočtu, kde se neuplatňuje vliv blikavého šumu, rovnice přejde na tvar

$$v_{ni}^2 = \left[ 4kTt_x + 2q \frac{I_C}{\beta} r_x^2 + 2qI_C \left( \frac{r_x}{\beta} + \frac{V_T}{I_C} \right)^2 \right] \Delta f$$

**Rovnice 2 - Ekvivalentní vstupní šumové napětí - upravená**

V tomto tvaru už není kmitočtově závislá. Proudové zesílení lze změřit z přenosových charakteristik nebo lze odhadnout na základě katalogových údajů. Jedinou neznámou v rovnici je sériový odpor báze  $r_x$ .

Pro určení tohoto odporu použijeme měřicí obvod dle schématu. Za předpokladu, že operační zesilovač se chová ideálně a při zanedbání tepelného šumu rezistoru  $R_5$  je střední kvadratická výstupní hodnota napětí operačního zesilovače dána vztahem

$$v_{no}^2 = R_F^2 G_m^2 \left[ 4kTt_x + \left( 2qI_B + \frac{K_f I_B}{f} \right) r_x^2 + \frac{2qI_C}{G_m^2} \right] \Delta f$$

**Rovnice 3 – Výstupní šumové napětí**

$$G_m^2 = \frac{1}{\frac{r_x}{\beta} + \frac{V_T}{I_C}}$$

**Rovnice 4 – Vztah pro  $G_m^2$**

Za předpokladu, že měříme na dostatečně vysokém kmitočtu, kde se neuplatňuje blikavý šum, se také tato rovnice zjednoduší do tvaru

$$\left[ \frac{A}{\beta^2} - \frac{2qI_C}{\beta} \Delta f \right] r_x^2 + \left[ \frac{2AV_T}{\beta I_C} - 4kT\Delta f \right] r_x + \frac{AV_T^2}{I_C^2} = 0$$

**Rovnice 5 – Rovnice pro určení  $r_x$**

$$A = \frac{v_{no}^2}{R_5^2} - 2qI_C \Delta f$$

**Rovnice 6 – Pomocná rovnice pro určení  $r_x$**

Řešení této kvadratické rovnice z naměřených hodnot  $v_{no}^2$  lze určit hodnotu  $r_x$ . Z fyzikálních důvodů použijeme jen kladnou hodnotu řešení této rovnice. Vazební kondenzátory  $C_2$ , doplněn o kondenzátory  $C_8, C_{13}$ , zabraňují průchodu stejnosměrné složky proudu z výstupu tranzistoru do zpětnovazebního odporu  $R_5$ , do kterého poté proudí celý signál odpovídající kolektorovému proudu tranzistoru. Invertující vstup



operačního zesilovače je virtuálně připojen k zemi, abychom získali nulovou hodnotu kolektorového napětí proti bázi tranzistoru a tím eliminovali tzv. Earlyho efektu (variace šířky bázevého přechodu v závislosti na napětí báze-kolektor). Kondenzátory  $C_1$  a  $C_9$  jsou blokovací, které zajišťují připojení emitorů tranzistorů na signálovou zem. Hodnoty těchto kondenzátorů musí být dosti vysoké, aby neovlivňovaly nízkofrekvenční spektrum produkovaného šumu.

Střední kvadratickou hodnotu ekvivalentního vstupního šumového napětí lze stanovit ze vztahu

$$v_{ni}^2 = \frac{v_{no}^2}{G_m^2 R_f^2}$$

Rovnice 7 – Vstupní šumové napětí

### 3.2.2 Popis zapojení

Měřený tranzistor se připojí do měřícího přípravku s operačním zesilovačem. Operační zesilovač je napájen napětím  $U_{cc} = \pm 15V$ . Vazební kondenzátor má hodnotě  $C_2 = 10\mu F$ , blokovací kondenzátory  $C_1$  a  $C_9 = 100\mu F$ . a kondenzátory blokování napájení o stejné hodnotě. Napájení je přivedeno přes rezistor o hodnotě  $R_4$  a  $R_6 = 100\Omega$ . Tato hodnota rezistoru je použita i na výstupu operačního zesilovače  $R_7$ . Mezi bázi a emitor tranzistoru je připojen kondenzátor  $C_5$  resp.  $C_{10}$  pro eliminaci možné elektromagnetické interference. Jako zpětnovazební rezistor o hodnotě  $R_5 = 100k\Omega$  byl kompromisem. Bylo nutno zvolit dostatečně vysokou hodnotu pro zajištění dostatečného zesílení šumového signálu na vstupu operačního zesilovače a zároveň zvolit přiměřeně malou hodnotu vzhledem k vlastnímu tepelnému šumu. K tomuto rezistoru jsem při návrhu měl paralelně připojený kondenzátor  $C_7$  pro korekci výstupního signálu, aby nedocházelo k překmitům. Pro nastavení kolektorového proudu se musí určit hodnoty rezistorů  $R_1, R_2$  a  $R_3, R_8$ . A vhodným poměrem se nastaví pracovní bod do poloviny kladného napájecího napětí. Kolektorový proud lze získat z následujícího vztahu, hodnotu  $U_{BE}$  lze předpokládat 0,65V.

$$I_C = \frac{-U_{cc} - U_{BE}}{R_E}$$

Rovnice 8 – Kolektorový proud

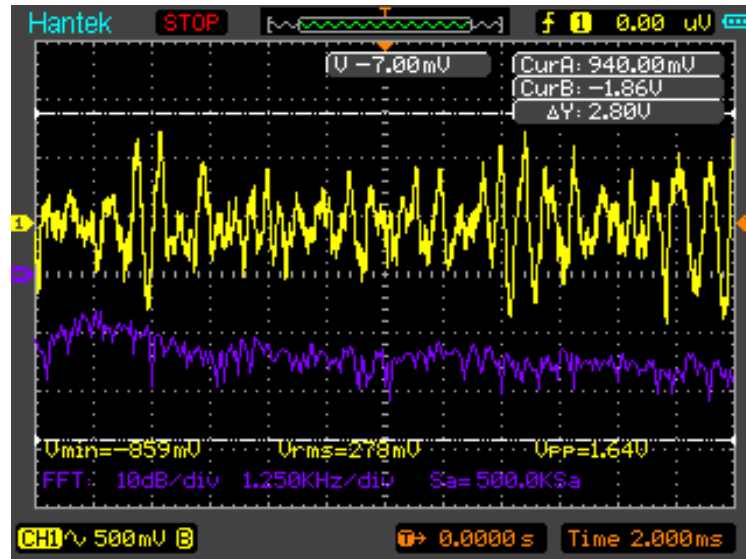
### 3.2.3 Postup měření

Přípravek dle schématu (viz příloha D) připojíme k napájení  $U_{cc}$ . Připojíme měřící sondu osciloskopu na výstup. Na vstup operačního zesilovače (pin 2 - svorkovnice SV5) přivedeme z generátoru obdélníkový signál. Na osciloskopu se nám nesmí objevovat překmity. Pokud by se objevily, museli bychom připojit kondenzátor  $C_7$ . V mém případě jsem tento kondenzátor nepotřeboval.

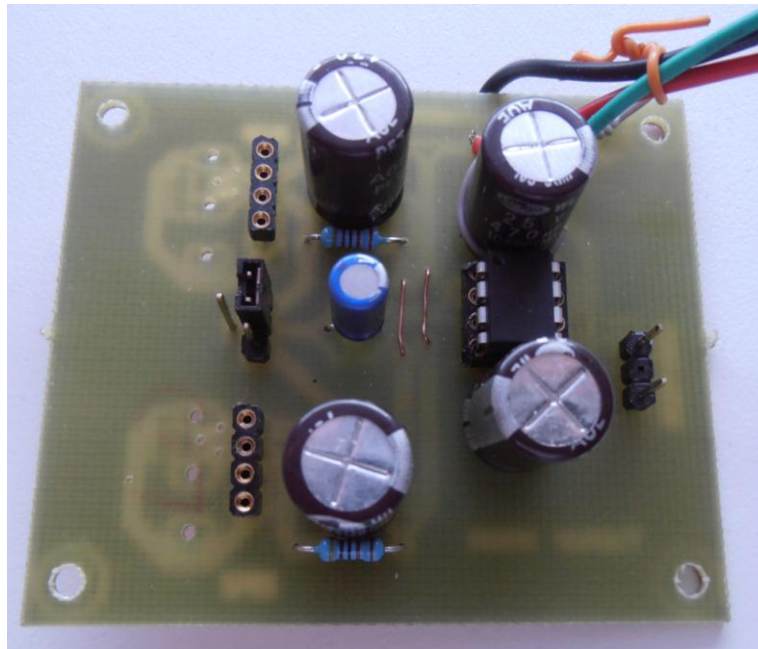
Další postup je už vlastní měření šumového napětí na výstupu operačního zesilovače. Osciloskop je připojen na výstup, kde měříme spektrum šumu. Testovaný tranzistor připojíme. Dle testovaného typu tranzistoru (PNP nebo NPN) musíme přepojit

svorkovnici SV5. Na osciloskopu vidíme spektrum šumu, kde se nám zobrazí i efektivní hodnota spektra.

Tento postup opakujeme pro zvolné hodnoty kolektorových proudů  $I_C$ . Měřil jsem pro dvě hodnoty  $I_C = 3,3\text{mA}$  a  $6,6\text{ mA}$ .



Obr. 8 - Spektrum šumu tranzistoru BC560C



Obr. 9 - Přípravek pro měření šumového napětí

## 4 Porovnání katalogových a naměřených parametrů

### 4.1 Měření závěrného napětí

#### 4.1.1 Katalogové a naměřené hodnoty

TYP	Katalogové hodnoty		1.vzorek		2.vzorek	
	$U_{cb}$	$U_{ce}$	$U_{cb}$	$U_{ce}$	$U_{cb}$	$U_{ce}$
BC860C	50	45	86	73	83	74
BC850C	50	45	150	75	152	78
2SA1371	300	300	392	395	388	395
2SC3468	300	300	200	377	214	402
2SA1419	180	160	266	190	267	191
2SC3649	180	160	428	205	410	207
BCX56-16	100	80	150	96	147	93
BCX53-16	100	80	134	91	131	91
BCE56-16	100	80	153	91	153	88
BCE53-16	100	80	150	112	151	114
2SD669A	180	160	402	178	393	171
2SB649A	180	160	253	208	255	210
2SC4793	230	230	510	301	494	285
2SA1837	230	230	345	307	335	295
BD140	100	80	179	125	177	125
BD139	100	80	290	123	294	128
2SC5200	230	230	550	304	555	310
2SA1943	230	230	336	306	326	303
BD912	100	100	203	147	208	148
BD911	100	100	271	118	272	116

Tab. 1 - Katalogové a naměřené hodnoty tranzistorů

#### 4.1.2 Shrnutí měření závěrného napětí

Při měření jsem zjistil, že závěrná napětí měřených tranzistorů, která u některých vzorků překračují až mnohonásobně katalogové hodnoty, jsou na vysoké hodnotě. Jednotlivé vzorky stejného typu se od sebe příliš nelišily. Avšak narazil jsem na jeden typ tranzistoru, který nedosáhl katalogové hodnoty  $U_{cb}$ . Je to typ 2SC3468, kde katalogová hodnota  $U_{cb}$  je 300V a při měření jsem u obou měřených vzorků naměřil pouhých 200V resp. 214V.

Výsledky mohou být zkresleny chybou měření, protože jsem neošetřil vždy jeden ze tří přívodů tranzistoru. Báze tranzistoru by měla být připojena u měření  $U_{ce}$  resp. emitor u měření  $U_{cb}$ .

## 4.2 Měření ekvivalentního vstupního šumu

### 4.2.1 Naměřené hodnoty

Tranzistor	BC560C	BC550C	2SA1371	2SC3468	2SD669A	2SB649A	2SC4793
$v_{ni1}$ [ $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]	18,52	18,48	8,47	10,35	10,31	7,97	10,79
$v_{ni2}$ [ $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]	17,85	19,96	8,48	10,40	9,37	8,20	10,58

Tab.2a - Vstupní ekvivalentní šum

Tranzistor	2SA1837	BD140	BD139	2SC5200	2SA1943	BD912	BD911
$v_{ni1}$ [ $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]	9,76	10,36	12,37	7,67	9,56	8,26	7,16
$v_{ni2}$ [ $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ]	9,75	10,31	10,62	7,29	8,64	8,26	7,10

Tab.2b - Vstupní ekvivalentní šum

### 4.2.2 Shrnutí měření vstupního šumu

Toto měření šumového napětí není příliš přesné. Hodnoty napětí na osciloskopu nebyly ustálené. Zapisoval jsem si hodnoty, které jsem zprůměroval. Hodnoty se velice lišily.

Téměř žádný datový list měřeného tranzistoru neuvádí šumové napětí, a proto je nemožné porovnání s katalogovými hodnotami. Můžeme porovnat jednotlivé vzorky tranzistorů nebo porovnávat tranzistory jako celek. Ale jelikož jsem měřil pouze dva vzorky od každého typu, nemůžu říci, který vzorek vybočuje. Z hlediska celku můžeme říci, že tranzistory používající se na vstupy zesilovačů, mají hodnoty šumového napětí na vyšších hodnotách a naopak tranzistory používající se ve výstupních obvodech, mají hodnoty šumového napětí na nižší úrovni.

Zde se velice projevuje chyba použité metody. Při měření jsem měl odečítat šum samotného přípravku, abych získal pouze šum daného tranzistoru. V zapojení je použito zapojení operačního zesilovače invertující zapojení. Jako lepší jsem měl použít neinvertující zapojení, které má lepší vlastnosti ohledně šumu. Jako další chyba se zde projevuje samotný šum operačního zesilovače, když jsem použil typ OP27. Jako lepší varianta by zde byl OP37, který má lepší šumové vlastnosti.

## 5 Vhodné sestavy tranzistorů pro zesilovače typu DPA-440 a DPA-380

### 5.1 Sestava pro DPA 440

Typ	$U_{CE0}$ [V]	$I_C$ [mA]	$P_C$ [W]	Cena[Kč]	Obchod
BC546B	65	0,1	0,5	1,50 3,22	GES Farnell
BC556B	65	0,1	0,5	1,50 3,22	GES Farnell
BC560CG	45	0,1	0,6	1,90	GES
BC546A	65	0,1	0,5	1,50 2,56	GES Farnell
BC556A	65	0,1	0,5	1,10	GME
BF472	300	0,05	1,8	11,90	GES
BF471	300	0,05	1,8	8,90	GES
BD139	80	1,5	12,5	4,90 9,33	GES Farnell
BC639	80	1	1	4,09	Farnell
BC640	80	1	0,8	1,90 6,92	GES Farnell
MJ15003	140	20	250	88,00 90,00 93,56	GME GES Farnell
MJ15004	140	20	250	88,80 96,57	GME Farnell

**5.2 Sestava pro DPA 380**

Typ	$U_{CEO}$ [V]	$I_C$ [mA]	$P_C$ [W]	Cena[Kč]	Obchod
BC546B	65	0,1	0,5	1,50 3,22	GES Farnell
BC556B	65	0,1	0,5	1,50 3,22	GES Farnell
BC549C	30	0,1	0,5	1,00 4,84	GME Farnell
BC559C	30	0,1	0,5	1,10	GME
BF472	300	0,05	1,8	11,90	GES
BF471	300	0,05	1,8	8,90	GES
BC546A	65	0,1	0,5	1,50 2,56	GES Farnell
BC556A	65	0,1	0,5	1,10	GME
Typ	$V_{DS}$ [V]	$I_{DS}$ [A]	$P_D$ [W]	Cena[Kč]	Obchod
IRF640N	200	18	125	18,90 28,90 29,14	GES GME Farnell
IRF9640	200	11	125	24,90 26,00 67,31	GES GME Farnell

## **Závěr**

Úkolem této bakalářské práce bylo srovnat a vybrat vhodné tranzistory pro moderní výkonové audio zesilovače.

Při psaní této bakalářské práce jsem se nejprve musel seznámit s topologií zesilovačů řady DPA a problematikou zesilovačů obecně. Zesilovače DPA byly vyráběny před několika lety, a proto se musela pro většinu tranzistorů hledat jejich náhrada.

Dalším úkolem této práce bylo změřit některé parametry tranzistorů. Měřil jsem dva parametry – závěrná napětí a šumové napětí. Obě metody jsem bohužel zvolil chybně a výsledky jsou velice zkreslené. Výsledné hodnoty průrazného napětí se proto ani z daleka nepřibližují katalogovým hodnotám. U měření šumu jsem udělal více chyb. Ať už použité zapojení, samotný operační zesilovač nebo to, že jsem neodečítal šum samotného přípravku. Katalogové listy které jsem našel na internetových stránkách mi bohužel neukázali jaký šum by měl mít daný tranzistor a proto jsem to nemohl porovnávat. Proto jsem mohl porovnávat tranzistory pouze mezi sebou. I přes tyto chyby jsem zjistil, že nejlepší šumové vlastnosti mají tranzistory, které se používají ve výstupních obvodech. U tohoto měření jsem neměřil SMD tranzistory. Z hlediska rozměrů by se musely tyto vzorky na desku připájet, což by znamenalo předělat přípravek na měření.

Posledním úkolem bylo vybrat vhodné sestavy pro zesilovače DPA 440 a DPA380. U DPA 440 jsem se nejvíce rozhodovali u výstupních tranzistorů, kde jsem vybíral mezi větším závěrným napětím nebo větší kolektorovou ztrátou. Rozhodl jsem se pro druhý z parametrů a vybral jsem tranzistory MJ15003 a MJ15004. U DPA 380 jsem se nemusel rozhodovat a vybírat vhodné součástky, protože všechny součástky, které jsem našel, byly dostupné a nebylo je třeba zaměňovat.

## Použitá literatura

- [1] Dostál, J. *Operační zesilovače*, BEN, 2005
- [2] Dudek, P. Moderní výkonové zesilovače třídy DPA, *Amatérské rádio*, 41, 1992
- [3] <http://www.zewel.tuliscz.com/dpa.php>
- [4] <http://www.federmann.cz/index.php/nf-technika/81-hqqf-a-teorie/283-zesilovae-a-fakta-o-jejich-konstruktech>
- [5] [http://www.amapro.cz/datove\\_zdroje/katalogy/katalog\\_tesla/katalog\\_tesla\\_204.php](http://www.amapro.cz/datove_zdroje/katalogy/katalog_tesla/katalog_tesla_204.php)
- [6] <http://forum.audioweb.cz/>
- [7] <http://www.elektroworld.info/modules.php?name=Forums&file=index>
- [8] <http://www.aldax.cz/index.php?tab=3&myordnum=&userid=&show=tranzistory>
- [9] <http://www.datasheetcatalog.com/>
- [10] <http://www.gme.cz/cz/>
- [11] <http://www.ges.cz/cz/>
- [12] <http://cz.farnell.com/>
- [13] <http://www.dpaudio.cz/>



## Přílohy

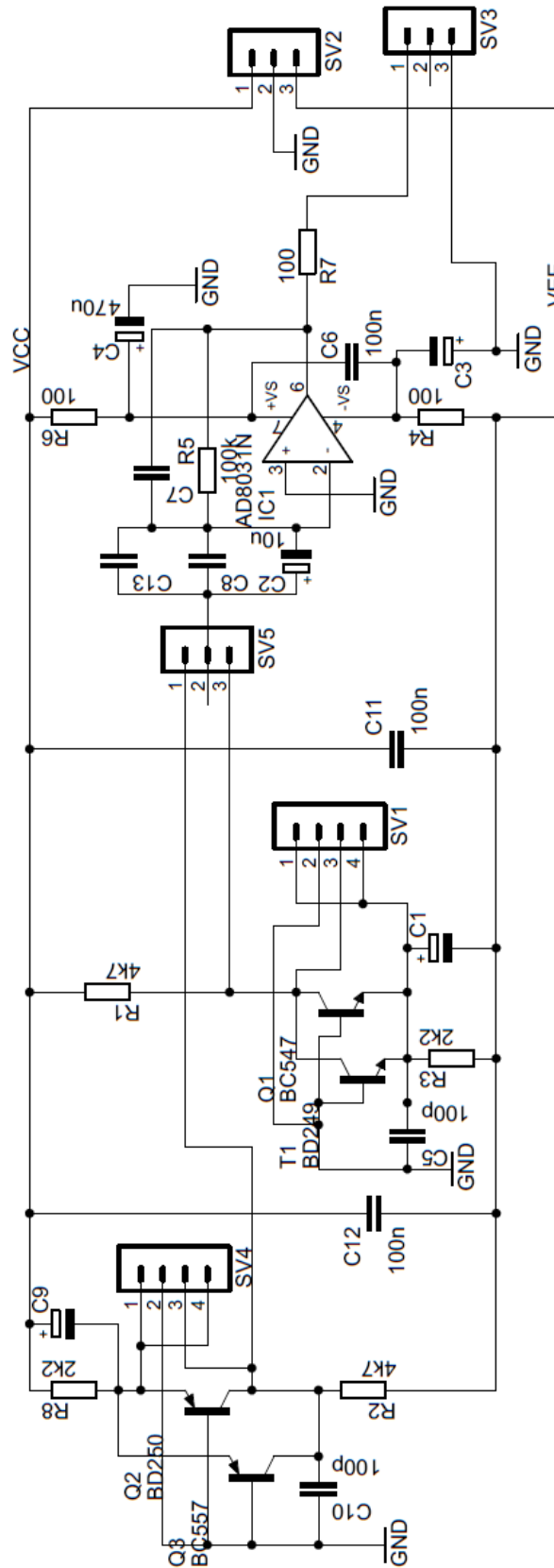
### Seznam obrázků

OBR. 1 - BLOKOVÉ SCHÉMA VÝKONOVÉHO ZESILOVAČE .....	11
OBR. 2 – PŘÍSTROJOVÝ ZESILOVAČ .....	12
OBR. 3 – NELINEÁRNÍ VAZBA PRO POTLAČENÍ SATURACE .....	12
OBR. 4 - ZAPOJENÍ VSTUPNÍHO A ROZKMITOVÉHO STUPNĚ .....	13
OBR. 5 – SÉRIOVÉ ŘAZENÍ VÝKONOVÝCH TRANZISTORŮ .....	14
OBR. 6 – SCHÉMA PŘÍPRAVKU NA MĚŘENÍ ZÁVĚRNÉHO NAPĚTÍ.....	22
OBR. 7 - PŘÍPRAVEK NA MĚŘENÍ ZÁVĚRNÉHO NAPĚTÍ.....	23
OBR. 8 - SPEKTRUM ŠUMU TRANZISTORU BC560C .....	26
OBR. 9 - PŘÍPRAVEK PRO MĚŘENÍ ŠUMOVÉHO NAPĚTÍ .....	26

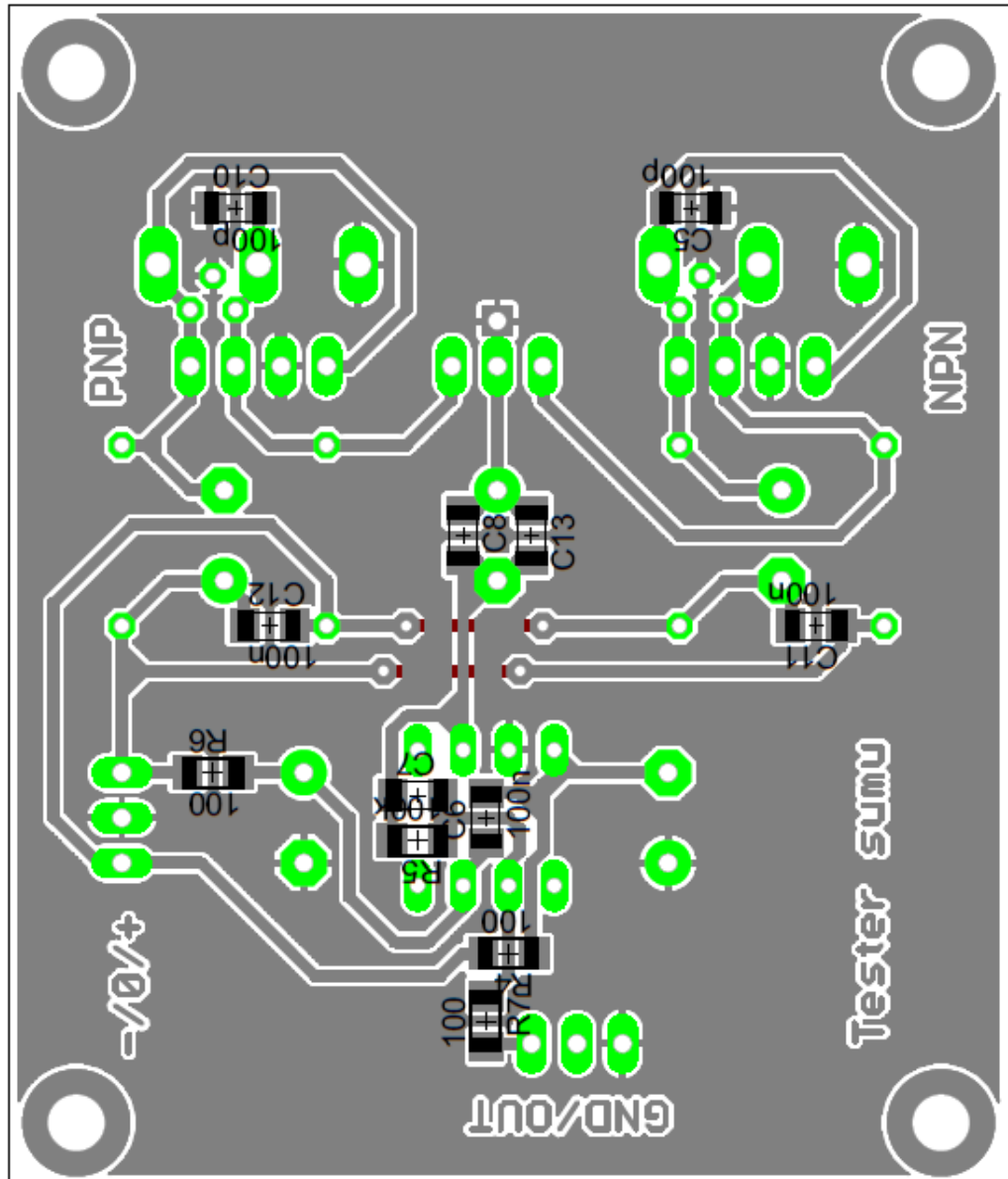
### Seznam rovnic

ROVNICE 1 – EKVIVALENTNÍ VSTUPNÍ ŠUMOVÉ NAPĚTÍ.....	23
ROVNICE 2 - EKVIVALENTNÍ VSTUPNÍ ŠUMOVÉ NAPĚTÍ - UPRAVENÁ .....	24
ROVNICE 3 – VÝSTUPNÍ ŠUMOVÉ NAPĚTÍ.....	24
ROVNICE 4 – VZTAH PRO $G_m^2$ .....	24
ROVNICE 5 – ROVNICE PRO URČENÍ $R_x$ .....	24
ROVNICE 6 – POMOCNÁ ROVNICE PRO URČENÍ $R_x$ .....	24
ROVNICE 7 – VSTUPNÍ ŠUMOVÉ NAPĚTÍ.....	25
ROVNICE 8 – KOLEKTOROVÝ PROUD .....	25

**Příloha A – Schéma zapojení přípravku pro měření šumu**



**Příloha B – Deska plošného spoje pro měření šumu – osazovací – vrstva Bottom**



Příloha C – Deska plošného spoje pro měření šumu – osazovací – vrstva TOP

