

# **Zesilovač ve třídě D**

Bc. Jiří Kasáček



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Kasáček**  
Osobní číslo: **A14856**  
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Zesilovač ve třídě D**  
Téma anglicky: **A D-Class Audio Amplifier**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s teorií týkající se vzorkování signálu.
2. Nastudujte princip funkce nízkofrekvenčních zesilovačů pracujících ve třídě D.
3. Popište nejčastěji používané aplikace, ve kterých se zesilovače pracující ve třídě D používají.
4. Z ustálených konstrukčních řešení vyberte takové, které je vhodné k realizaci ověřovacího vzorku.
5. Zkonstruujte funkční vzorek vybraného zesilovače a pomocí měření na vhodné impedanční zátěži ověřte jeho základní vlastnosti.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. ŠTÁL, Petr. Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D: [základní principy a konstrukce zesilovače]. 1. české vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2008, 198 s. ISBN 978-80-7300-230-5.
2. SÝKORA, Jan. Teorie digitální komunikace: [základní principy a konstrukce zesilovače]. Dotisk 1. vyd. Praha: ČVUT, 2005, xiii, 329 s. ISBN 80-010-2478-4.
3. KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. EMC z hlediska teorie a aplikace: [základní principy a konstrukce zesilovače]. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 216 s. ISBN 80-730-0202-7.
4. VACULÍKOVÁ, Polina, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů: Praktický průvodce technikou omezení elektromagnetického vlivu rušení. 1. vyd. Praha: Grada, 1998, 487 s. ISBN 80-716-9568-8.
5. METZLER, B. Audio measurement handbook. 2. vyd. Audio Precision, 2005. 171 s. 0058.0003 r1 AUDIO PRECISION, Beaverton, Oregon, 2005.
6. PUNČOCHÁŘ, Josef. Operační zesilovače v elektronice. 5. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002, 495 s. ISBN 80-730-0059-8.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Pospíšilík, Ph.D.

Ústav počítačových a komunikačních systémů

Datum zadání diplomové práce:

12. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

15. května 2015

Ve Zlíně dne 6. února 2015

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.  
děkan



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.  
ředitel ústavu

### **Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

## **ABSTRAKT**

V teoretické části je znázorněn rozdíl mezi klasickými (lineárními) zesilovači a zesilovači třídy D. V dalších částech teorie je rozebrán princip zesilovače ve třídě D a v jednotlivých kapitolách pak zmíněny jednotlivé části zesilovače, ze kterých se skládá. Praktická část se zabývá vlastním řešením zesilovače, návrhem desky plošného spoje, kde je kladen důraz na kvalitu rozmístění součástek, následně osazení desky plošných spojů, prvotní oživení obvodu a finální proměření základních charakteristik zesilovače. Obvod je postaven na integrovaném obvodu TPA3122D2 od firmy Texas Instruments.

Klíčová slova: Zesilovač, třída D, pulzně šířková modulace, PWM

## **ABSTRACT**

The theoretical part shows the difference between conventional (linear) amplifier and a Class D amplifier. In other parts of the theory is discussed principles amplifier in class D and in individual chapters then discussed each of the amplifier, of which it is composed. The practical part deals with their own solutions to the amplifier design of the PCB with an emphasis on quality component placement. Subsequent placement of printed circuit boards, primary recovery circuit and final measurement of the basic characteristics of the amplifier. The circuit is built on an integrated circuit TPA3122D2 from Texas Instruments.

Keywords: Amplifier, class D, pulse width modulation, PWM

V první řadě bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce Ing. Martinu Pospíšilkovi, Ph.D. za jeho pomoc a cenné poznatky při vypracovávání diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Lukáši Vrátníkovi za jeho cenné rady při konstrukci zesilovače, mé rodině a přítelkyni, u kterých jsem měl velkou oporu.

## OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>11</b>
<b>1 ZESILOVAČE OBECNĚ.....</b>	<b>12</b>
1.1 ROZDĚLENÍ ZESILOVAČŮ .....	12
1.1.1 Zesilovač třídy A.....	12
1.1.2 Zesilovač třídy B.....	13
1.1.3 Zesilovač třídy AB .....	14
1.1.4 Zesilovač třídy C .....	15
1.1.5 Zesilovač třídy D.....	15
1.2 SHRUTÍ ÚČINNOSTI TŘÍD ZESILOVAČŮ .....	16
<b>2 ZESILOVAČ VE TŘÍDĚ D .....</b>	<b>17</b>
2.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ ZESILOVAČŮ TŘÍDY D.....	17
2.2 ANALOGOVÝ SIGNÁL.....	17
2.3 DIGITÁLNÍ SIGNÁL.....	18
2.3.1 Vzorkování a kvantizace .....	19
2.4 PRINCIP ZESILOVAČE TŘÍDY D.....	20
2.5 PRŮBĚH SIGNÁLU V ZESILOVAČI TŘÍDY D.....	20
<b>3 MODULÁTOR ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ D.....</b>	<b>22</b>
3.1 IMPULZNĚ ŠÍRKOVÁ MODULACE .....	22
3.1.1 Princip impulzně šířkové modulace .....	22
3.2 STRÍDA SIGNÁLU .....	23
<b>4 VÝKONOVÝ STUPEŇ ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ D .....</b>	<b>24</b>
4.1 POLOVIČNÍ MOST (HALF BRIDGE) .....	24
4.2 PLNÝ MOST (FULL BRIDGE) - BTL .....	24
<b>5 VÝSTUPNÍ FILTR ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ D.....</b>	<b>26</b>
5.1 VÝSTUP ZESILOVAČE FILTREM NEDISPONUJE .....	26
5.2 FERISTOR A KONDENZÁTOR.....	26
5.3 FILTR TYPU „DOLNÍ PROPUST“.....	26
<b>6 VYUŽITÍ ZESILOVAČE TŘÍDY D.....</b>	<b>28</b>
6.1 NEJMENŠÍ ZESILOVAČ TŘÍDY D - TPA2011D1 .....	28
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>30</b>
<b>7 INTEGROVANÝ OBVOD TPA3122D2 .....</b>	<b>31</b>
7.1 POPIS FUNKCÍ ČIPU .....	31
7.2 VLASTNOSTI ZESILOVAČE TPA3122D2 .....	31
7.3 INFORMACE O INTEGROVANÉM OBVODU .....	32
<b>8 PARAMETRY ZESILOVAČE.....</b>	<b>34</b>

8.1	NASTAVENÍ VSTUPNÍ CITLIVOST ZESILOVAČE.....	34
8.2	HODNOTY VÝSTUPNÍHO FILTRU .....	34
8.3	FILTRAČNÍ KONDENZÁTOR STEJNOSMĚRNÉ SLOŽKY .....	34
8.4	PRACOVNÍ PODMÍNKY ZESILOVAČE .....	35
<b>9</b>	<b>ESD – ZÁSADY PRO PRÁCI S INTEGROVANÝMI OBVODY .....</b>	<b>36</b>
<b>10</b>	<b>ELEKTRONICKÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ .....</b>	<b>37</b>
10.1	SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK - BOM .....	38
<b>11</b>	<b>LAYOUT – NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ.....</b>	<b>39</b>
11.1	POPIS LAYOUTU – VRCHNÍ STRANA .....	39
11.2	POPIS LAYOUTU – SPODNÍ STRANA .....	40
11.3	ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK.....	41
11.3.1	Horní strana PCB .....	41
11.3.2	Spodní strana PCB .....	41
<b>12</b>	<b>ZPŮSOB OSAZENÍ DPS .....</b>	<b>42</b>
12.1	PÁJENÍ MIKROPÁJKOU A CÍNEM .....	42
12.2	PÁJENÍ HORKOVZDUŠNOU PISTOLÍ A PÁJECÍ PASTOU .....	43
<b>13</b>	<b>FINÁLNÍ PODOBA ZESILOVAČE.....</b>	<b>44</b>
<b>14</b>	<b>NAMĚŘENÉ HODNOTY .....</b>	<b>45</b>
14.1	FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA PRO ZÁTĚŽ 9,4 $\Omega$ .....	45
14.2	FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA PRO ZÁTĚŽ 4,7 $\Omega$ .....	46
14.3	ZÁVISLOST VÝSTUPNÍHO VÝKONU NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO ZÁTĚŽ 9,4 $\Omega$ .....	47
14.4	ZÁVISLOST VÝSTUPNÍHO VÝKONU NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ PRO ZÁTĚŽ 4,7 $\Omega$ .....	49
14.5	PŘESLECH MEZI KANÁLY .....	50
14.6	PROVOZNÍ NAPĚTÍ ZESILOVAČE .....	50
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>51</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>55</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>59</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>60</b>



## ÚVOD

Diplomová práce se zabývá problematikou zesilovačů ve třídě D. První zesilovače tohoto typu byly vyvinuty již v roce 1958, ale k jejich masivnímu využití dochází teprve v posledních letech. Produkce elektronických zařízení je stále na vzestupu a s příchodem mobilních zařízení, jakými jsou např. notebooky, chytré telefony a hudební přehrávače, se staly zesilovače ve třídě D velmi zajímavým produktem.

Cílem zesilovačů je zejména zesílení a reprodukce vstupního signálu s co nejmenším zkreslením v rozsahu slyšitelného kmitočtového spektra 20 Hz - 20 kHz. Zesilovač by měl mít v tomto rozsahu co nejvyrovnanější frekvenční charakteristiku, aby docházelo k věrné reprodukci původního signálu. Výkonové využití zesilovačů spadá do několika kategorií v závislosti na reprodukčním zařízení. Mohou to být sluchátka, kde vystačí výkon v řádech desítek miliwattů nebo mobilní telefony, kde se výkon pohybuje v řádech wattů. Mini domácí stereo zařízení a televizory již spadají do kategorie vyššího výkonu a to v řádech desítek wattů. V poslední řadě to mohou být systémy pro hlasitější domácí ozvučení nebo pro komerční zvukové systémy, kde se hranice výkonu může pohybovat na hranici stovek wattů.

Klasické lineární zesilovače mají sice kvalitní reprodukční vlastnosti, ale jejich použití do mobilních zařízení je zcela neslučitelné. Je to hlavně z důvodu potřeby kvalitního, mnohdy velmi rozměrného zdroje napájení, ale také z důvodu malé účinnosti zesilovače, který musí obsahovat externí chlazení, aby nedošlo k poškození výkonového stupně. V prvních kapitolách diplomové práce je této problematice věnováno několik kapitol, aby byl pochopen rozdíl mezi principy zpracování a zesílení signálu různých tříd zesilovačů.

Řekněme si něco o výhodách zesilovače ve třídě D. Tyto zesilovače fungují na úplně odlišném principu zpracování signálu než zesilovače lineární. Svou podobností mohou připomínat spínané zdroje. Výkonový stupeň se skládá z MOSFET tranzistorů, které pracují buď v plném sepnutí, nebo ve stavu zcela nepropustném. Tím se dostáváme k té nejdůležitější vlastnosti zesilovačů třídy D, kterou je vysoká účinnost, jež může dosahovat hodnot 85 – 95 %. Díky tomu se zesilovače třídy D staly v poslední době tak populárními. Svými parametry se přibližují kvalitě reprodukce konvenčních zesilovačů a jejich miniaturní rozměry určily směr využití pro přenosná zařízení, která jsou napájena interní baterií.

Nejmenší zástupce zesilovače třídy D je vyroben firmou Texas Instruments. Jeho rozměry jsou 1,2 x 1,2 mm a dosahuje výkonu 3,2 W při zátěži 4  $\Omega$ .

Zesilovače třídy D celkově neprodukují téměř žádné teplo a šetří místo na desce plošných spojů. Nízké pořizovací a provozní náklady či prodlužování životnosti baterie přenosných systémů dělají z tohoto typu zesilovače velkého hráče na trhu.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ZESILOVAČE OBECNĚ

Zesilovač je zařízení, jehož primárním úkolem je zesílit vstupní signál na požadovanou úroveň v dané frekvenční oblasti. Zesilovače jsou dnes stavěny tak, že zesílení není jedinou funkcí, kterou disponují, ale mohou také vstupní signál upravit např. zvýrazněním či ořezáním některých kmitočtů nebo zesílením či zeslabením amplitudy. Zvolený typ zesilovače pro tuto práci operuje v pásmu slyšitelného spektra, tedy od 20 Hz – 20 kHz. [8] [9]

Ne všechny zesilovače fungují na stejném principu, proto je nutné rozlišovat rozdíl ve zpracování signálu a následně v jeho reprodukci. Hlavními vlastnostmi každého zesilovače jsou tyto parametry: [8] [9]

- Linearita [ - ]
- Zesílení signálu (gain) [ dB ]
- Výkon [ W ]
- Účinnost [ % ]

Technologicky není možné zajistit vysokou úroveň všech parametrů současně. Z tohoto důvodu je nutné zvolit takový typ zesilovače, který bude vyhovovat našim konkrétním požadavkům. [8] [9]

### 1.1 Rozdělení zesilovačů

Jednou z nejpoužívanějších metod, podle kterých se jednotlivé zesilovače rozdělují, je podle „třídy“. Ta označuje způsob, jak jsou zesilovače klasifikovány dle jejich uspořádání výkonových tranzistorů a způsobu ovládání elektrického obvodu. [1] [2]

V následujících podkapitolách je popsán hlavní rozdíl mezi těmito druhy zesilovačů.

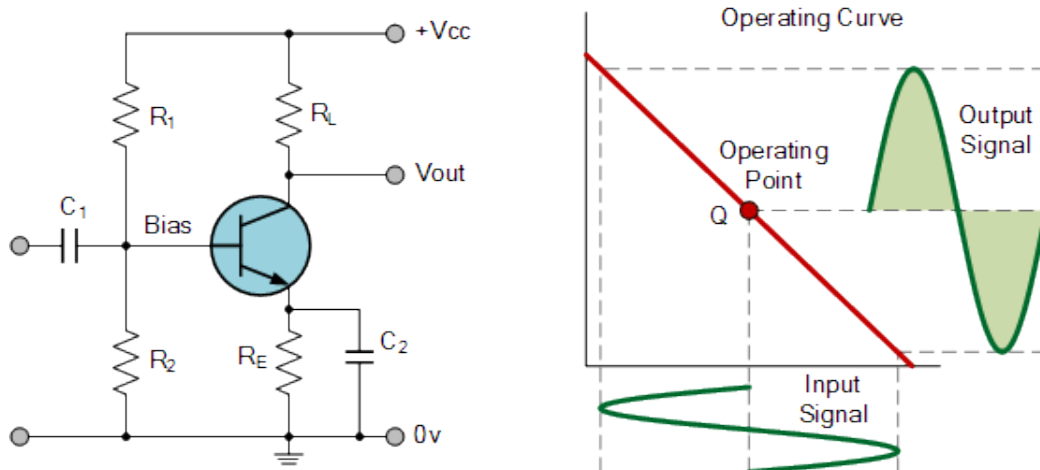
#### 1.1.1 Zesilovač třídy A

Tento typ je běžnějším zesilovačem a to zejména pro jeho jednoduchou konstrukci. Třída A doslovně znamená „nejlepší třída“, protože tento typ zesilovače dosahuje nejmenšího zkreslení a má nejvěrnější reprodukci signálu ze všech zde uvedených typů zesilovačů. Je to hlavně z toho důvodu, že pracuje v nejlineárnější oblasti převodové charakteristiky tranzistoru. [1] [2]

Zesilovač tohoto typu je zapojen jednočinně. To znamená, že jediný tranzistor (pro daný kanál) zpracovává celý signál (kladnou i zápornou půlvlnu). Jeho součástky tedy mu-

sí mít nastavený takový klidový proud, aby byly neustále ve vodivém stavu. Díky tomuto proudu má zesilovač třídy A nejmenší zkreslení ze všech zde zmíněných. Vysoký proud s sebou nese úskalí konstrukce. Je potřeba kvalitní zdroj napájení s velkým příkonem a následně pak zesilovač potřebuje velký chladič, protože většina výkonu se vytratí v podobě tepelných ztrát. Tyto zesilovače mají velmi malou účinnost, a to pouze kolem 20 - 30 %.

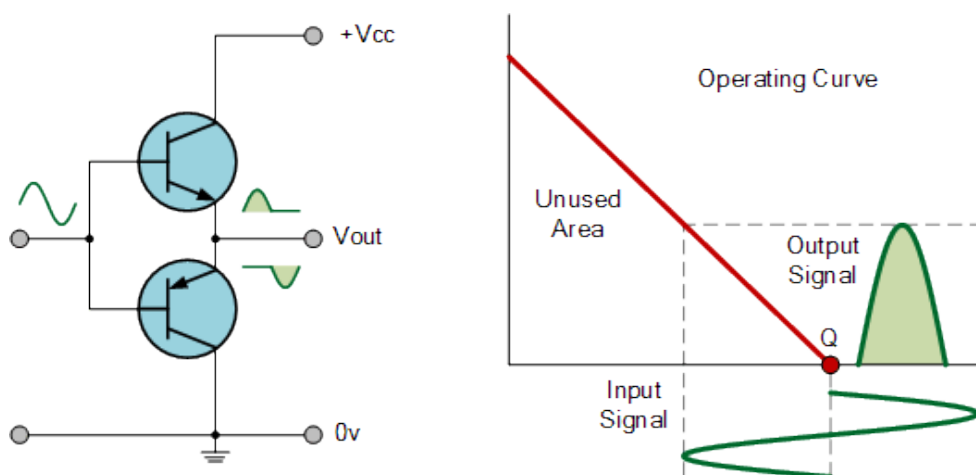
[1] [2]



Obrázek 1 – Zapojení zesilovače v třídě A [1]

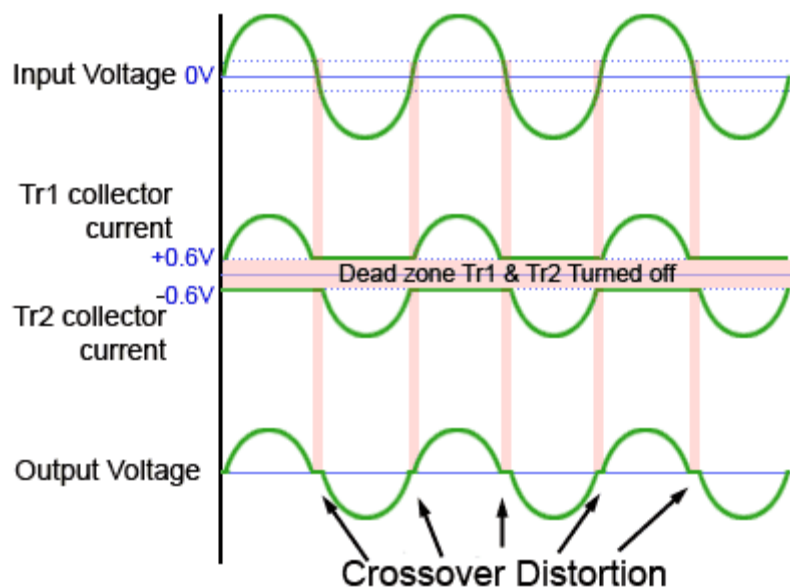
### 1.1.2 Zesilovač třídy B

Zesilovače třídy B byly vynalezeny zejména z toho důvodu, aby se vyřešil problém malé účinnosti u zesilovače třídy A. Tento typ využívá 2 tranzistory, které jsou zapojeny dvojčinně. To znamená, že výkonové tranzistory jsou zapojeny tak, že každý z nich zpracovává pouze jednu polaritu signálu, tedy první tranzistor kladnou půlvlnu a druhý tranzistor zápornou. [1] [2]



Obrázek 2 – Zapojení zesilovače ve třídě B [1]

U tohoto typu zesilovače je pracovní bod nastaven na začátek převodové charakteristiky (viz. obrázek 2), což s sebou nese úskalí v době přechodu signálu z kladné půlvlny do půlvlny záporné. Toto přechodové zkreslení je zobrazeno níže na obrázku 3. [1] [2]



Obrázek 3 – Přechodové zkreslení zesilovače třídy B [13]

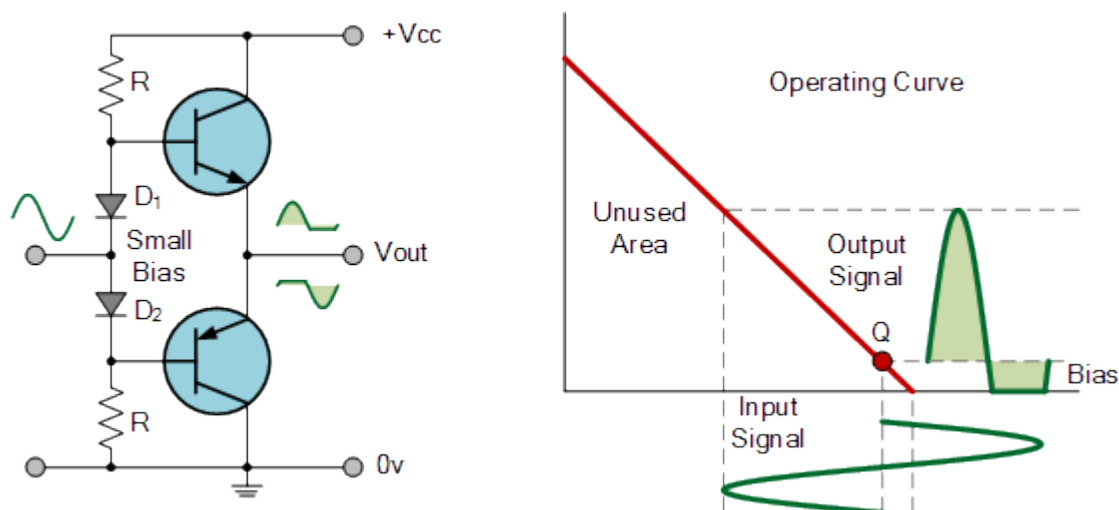
Zesilovače třídy B byly vytvořeny za účelem získání většího zisku přivedené energie, kde účinnost dosahuje někde na hranici 50 %. Zkreslení signálu, které nastává při přechodu z kladné do záporné půlvlny, je slyšitelné i lidským uchem. Z tohoto důvodu se tento typ zesilovačů v audio-technice neuchytil. [1] [2]

### 1.1.3 Zesilovač třídy AB

Jak již samotný název napovídá, tak zesilovač AB je kombinací tříd "A" a "B", které jsou zmíněny výše. Tento zesilovač patří v současné době jednoznačně k nejrozšířenějším zesilovačům na trhu, protože využívá výhod obou zmíněných. Zesilovač třídy AB funguje na stejném principu jako zesilovač třídy B s tím rozdílem, že má pracovní bod nastaven tak, aby nedocházelo ke zkreslení v přechodu z kladné do záporné půlvlny signálu (viz. obrázek 4). [1] [2]

Oba tranzistory mají nastavený velmi malý klidový proud, který je mnohem menší než u třídy A. Tento malý proud efektivně eliminuje přechodové zkreslení, se kterým se potýkal zesilovač třídy B, což umožňuje dobrou kvalitu reprodukce signálu. [1] [2]

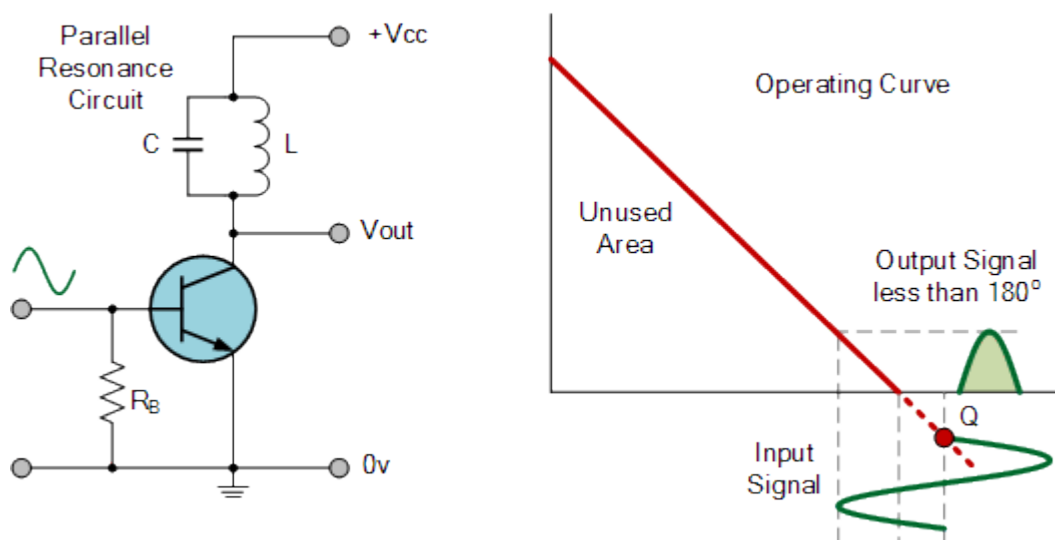
Bohužel i dobře navržené zesilovače třídy AB mají podstatný ztrátový výkon, který se pohybuje s účinností někde kolem 50 - 60 %. [1] [2]



Obrázek 4 – Zapojení zesilovače ve třídě AB [1]

#### 1.1.4 Zesilovač třídy C

Zesilovače třídy C disponují poměrně vysokou účinností, ale vykazují největší zkreslení. Návrh obvodu těchto zesilovačů není určen pro zesilování nízkofrekvenčního signálů, ale pro práci s vysokofrekvenční složkou. Z tohoto důvodu zde jeho problematika nebude příliš rozebírána. Nastavení pracovního bodu můžeme vidět na obrázku 5. [1] [2]



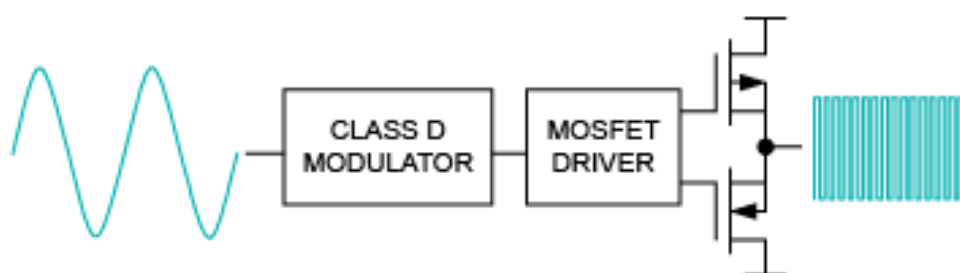
Obrázek 5 – Zapojení zesilovače ve třídě C [1]

#### 1.1.5 Zesilovač třídy D

Tento typ zesilovače pracuje naprosto odlišně od výše zmíněných a nelze jej ani řadit mezi zesilovač lineární. Zesilovač ve třídě D je v podstatě spínací zesilovač. Můžeme se také setkat s označením PWM zesilovač, který má mnoho podob. Dokážou pracovat jak

s digitálním, tak s analogovým vstupem a mohou být řízeny softwarově nebo hardwarově. Tato práce se bude zabývat zesilovačem, který pracuje s klasickým analogovým vstupem, jelikož pro její praktickou část byl vybrán obvod s označením TPA3122D2. Podrobnější informace v kapitole 2. [1]

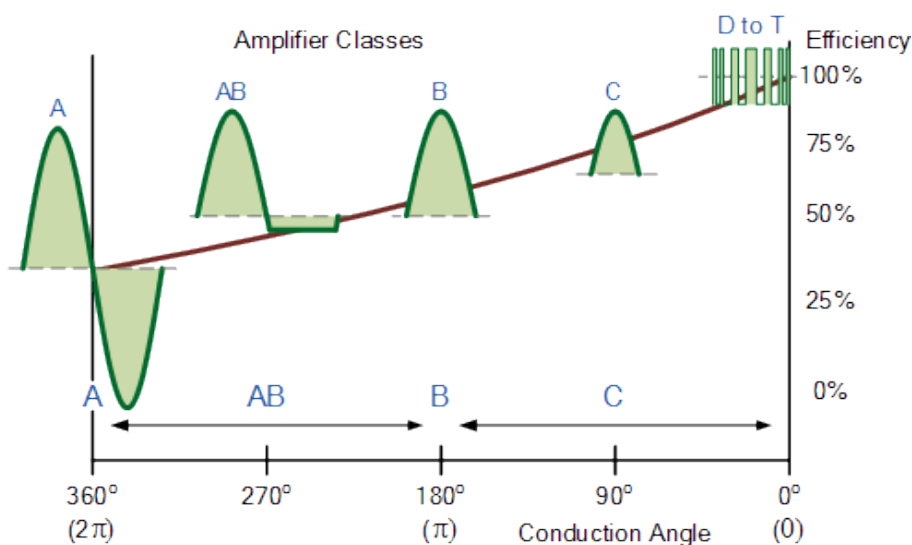
Tato topologie zapojení a princip zpracování signálu dosahuje velmi vysoké účinnosti, která se může v krajních mezích pohybovat až na hranici 90 - 95 %. To je hlavní důvod, proč byl tento typ zesilovače vyvíjen. Ve většině případů odpadá problém s přídavným chlazením a může tak dosahovat velmi malých rozměrů. [1]



Obrázek 6 – Blokové schéma zesilovače ve třídě D [1]

## 1.2 Shrnutí účinnosti tříd zesilovačů

Na obrázku 7 můžeme vidět porovnání účinností a úhel vedení signálu přivedeného na vstup tranzistorů. V účinnosti jednoznačně vede zesilovač ve třídě D a jeho upravené alternativy (D to T). [1]



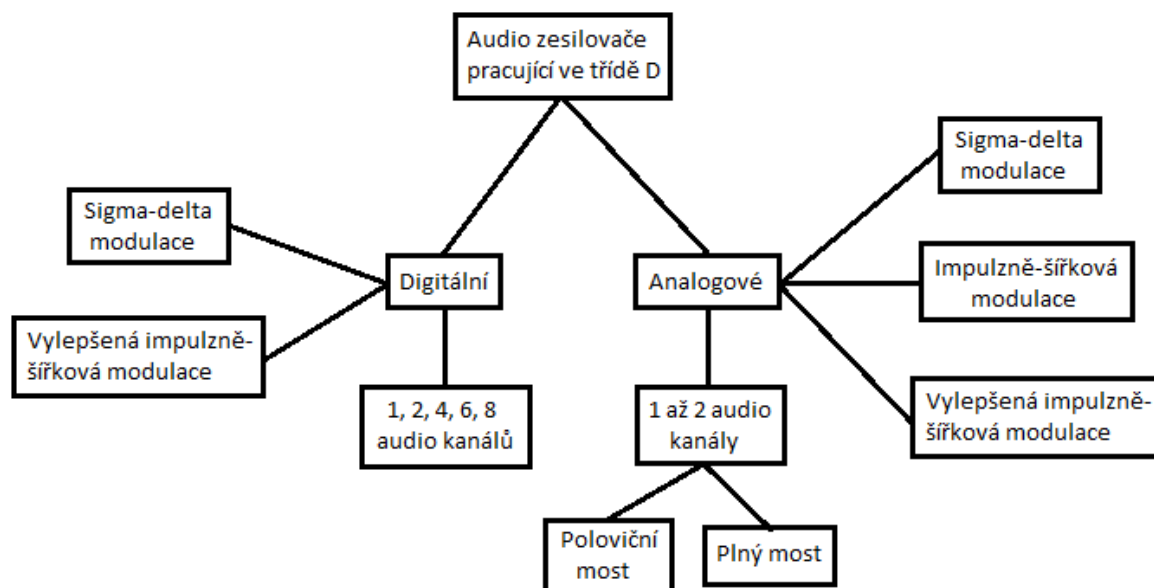
Obrázek 7 - Účinnosti jednotlivých tříd zesilovačů [1]



## 2 ZESILOVAČ VE TŘÍDĚ D

### 2.1 Základní rozdělení zesilovačů třídy D

Podle toho, jak jsou zapojeny koncové tranzistory, podle počtu audio kanálů a druhu použitého modulátoru, můžeme zesilovače ve třídě D dělit následujícím způsobem, který je schematicky zobrazen na obrázku 8. [3]



Obrázek 8 - Rozdělení zesilovače třídy D [3]

Z obrázku 8 můžeme vyvodit, že základní dělení zesilovače třídy D je na základě přivedeného vstupního signálu, který může být:

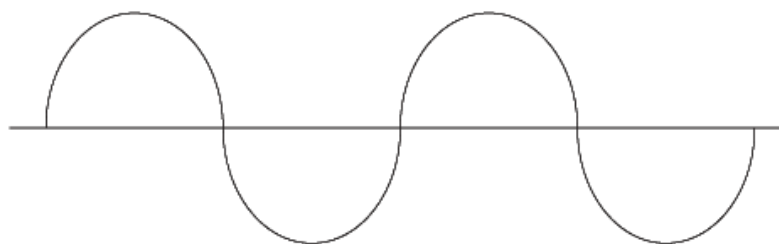
- Analogový
- Digitální

Další dělení je dle počtu kanálů, který daný zesilovač dokáže zpracovat. U analogového provedení se dělí na zapojení v polovičním nebo plném mostu a podle typu modulace. [3]

### 2.2 Analogový signál

Jedná se o takový signál, který je v celé své délce v čase spojitý a může obsahovat nekonečné množství hodnot. [3] Analogový signál může mít například podobu, která je znázorněna na obrázku 9.

# Analog



Obrázek 9 - Analogový signál [14]

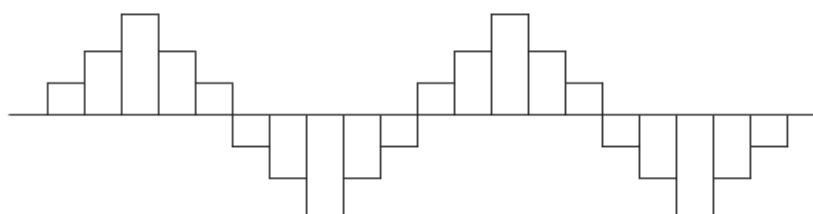
Analogový signál můžeme také zpracovávat dalšími způsoby, a to pomocí: [7]

- Zesílení
- Útlumu
- Modulace a demodulace
- Filtrace

## 2.3 Digitální signál

Digitální signál, je buď generován přímo, nebo je velmi často převáděn ze signálu analogového. [7]

# Digital

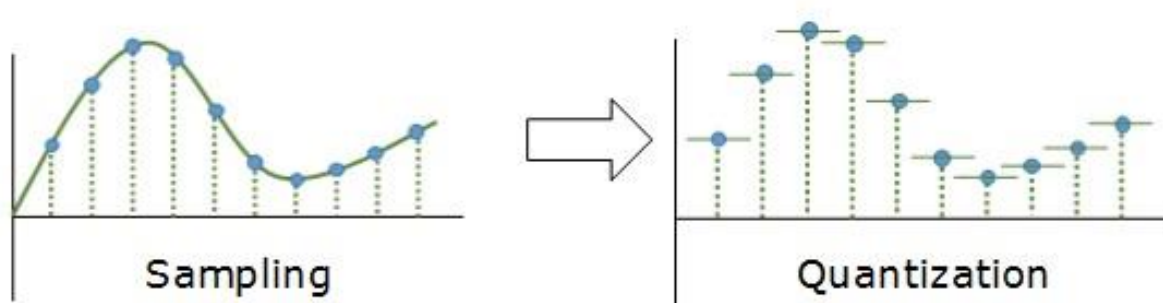


Obrázek 10 - Digitální signál [14]

Převod signálu do digitální podoby se provádí ve dvou krocích. Nejprve se provede vzorkování (sampling) a následně se navzorkovanému signálu přiřadí konkrétní hodnota pomocí kvantizace (quantization). [7]

### 2.3.1 Vzorkování a kvantizace

Na obrázku 10 můžeme vidět, jak se tyto postupy projeví na vstupním (analogovém) signálu.



Obrázek 11 - Vzorkování a kvantizace [15]

Kvalita reprodukce digitalizovaného signálu závisí na několika faktorech. Prvním z nich je hodnota vzorkovací frekvence (osa X), tedy kolikrát za vteřinu se má signál navzorkovat. Typické hodnoty vzorkování pro audio signál jsou: [7]

- 44,1 kHz
- 96 kHz
- 192 kHz

Druhou, velmi důležitou hodnotou, je kvalita převodníku, který přiřazuje navzorkovanému signálu amplitudovou hodnotu (osa Y). Kvalita převodu závisí na množství hodnot, které daný převodník dokáže přiřadit. Ta se odvíjí podle toho, kolik napěťových úrovní dokáže převodník zpracovat v závislosti na počtu bitů. Typické hodnoty pro audio signál jsou: [7]

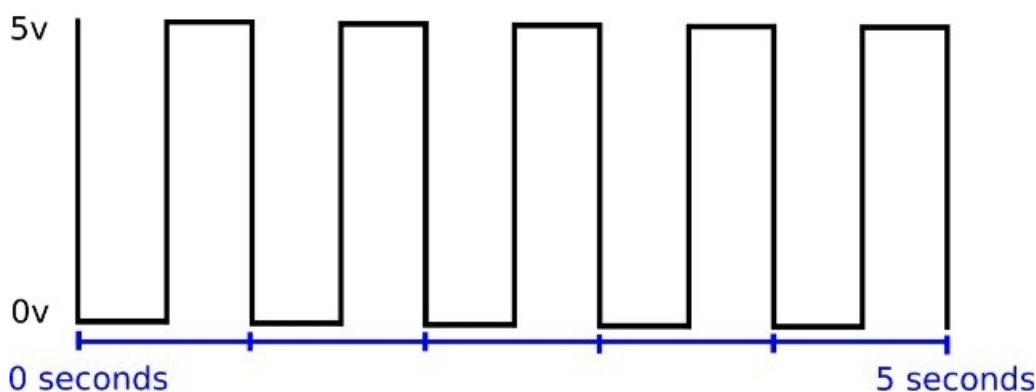
- 8 bitů
- 16 bitů
- 24 bitů

S počtem bitů stoupá kvalita reprodukováného signálu, nároky na výpočet, počet informací, ale také rychlost zpracování a výsledná velikost dat [7].

## 2.4 Princip zesilovače třídy D

Zesilovač třídy D funguje na velmi podobném principu jako spínané zdroje. Na vstup je přiveden analogový audio signál, který se pohybuje v rozmezí od cca 20 Hz do 20 kHz. Tento signál projde komparátorem, kde se porovná s vysokofrekvenční složkou trojúhelníkového nebo pilového signálu, který je generován uvnitř čipu (v tomto případě v čipu TPA3122D2), aby se vytvořil signál ve tvaru PWM (viz. obrázek 12). [3]

# Pulse Width Modulation



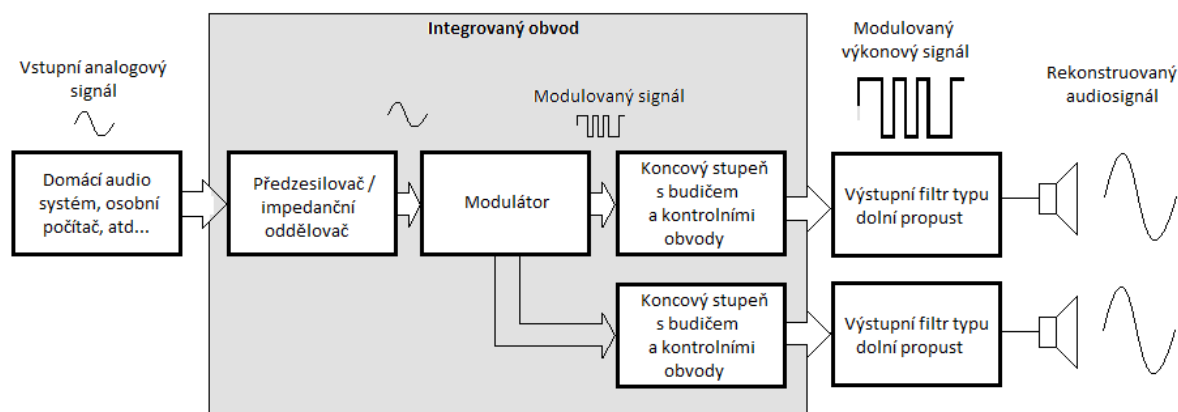
Obrázek 12 - Tvar PWM signálu [16]

Takto zpracovaný signál se dále využívá k řízení výkonového stupně, kde se tento signál zesílí na požadovanou úroveň. Poté je nutné jej nechat projít skrze filtr typu dolní propust, za pomoci kterého získáme výsledný tvar audiosignálu. Ten je následně poslán na reprodukční zařízení. [3]

V následující podkapitole 2.5 je názorně vysvětleno, jak se audio signál šíří v jednotlivých částech obvodu.

## 2.5 Průběh signálu v zesilovači třídy D

Na obrázku 13 je zobrazeno jednak blokové zapojení pro takzvaný poloviční most (Half Bridge) zesilovače třídy D a dále jsou zde zobrazeny jednotlivé průběhy signálu. Ty mají v jednotlivých částech zesilovače různý tvar. [3] [5] [6]



Obrázek 13 - Blokové schéma zesilovače s průběhem signálu [3]

V této práci je rozebrán zesilovač třídy D, který je postaven na čipu TPA3122D2. Ten dokáže zpracovávat pouze vstupní signál analogového tvaru, proto budeme dále uvažovat pouze s analogovým signálem.

Vstupem je analogový signál, který postupuje do bloku předzesilovače, kde je "zesílen" na požadovanou úroveň. V bloku modulátoru je signál upraven tak, aby byl vhodný pro řízení výkonových (MOSFET) tranzistorů. Úprava signálu se provádí pomocí modulace a to nejčastěji pulzně-šířkovou (PWM) nebo sigma-delta modulací. [3] [5] [6] Více o modulacích v kapitole 3.

Takto upravený (modulovaný) signál je dále zesílen v bloku výkonových tranzistorů, kde se většinou nacházejí pomocné obvody, které chrání integrovaný obvod před přehřátím a následným zničením obvodu elektrického. Zesílený signál následně putuje přes propojení do výstupního filtru, kde se odfiltruje vysokofrekvenční složka, aby se zamezilo VF rušení do okolí. Jedná se nejčastěji o LC filtr typu dolní propust. [3] [5] [6]

Někteří výrobci dokázali u obvodů zesilovače typu D vyvinout vylepšené algoritmy, kde se z části eliminovala potřeba využití výstupního filtru (tzv. "filterless"), aby tak dosáhli ještě menších rozměrů zesilovače. To není případ zvoleného čipu TPA3122D2, takže filtr typu dolní propust bude sestaven z externích součástek. [3]

### 3 MODULÁTOR ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ D

V této kapitole bude rozebrána problematika modulátoru, jeho základní vlastnosti a princip činnosti uvnitř elektronického obvodu zesilovače ve třídě D.

Existuje několik typů modulátorů, avšak kromě níže zmíněných existují i takové, které jsou firmami patentově chráněné. Mezi nepoužívanější modulace pro zesilovače ve třídě D patří tyto: [3] [5] [6]

- Impulzně šířková modulace
- Delta modulace
- Sigma-delta modulace

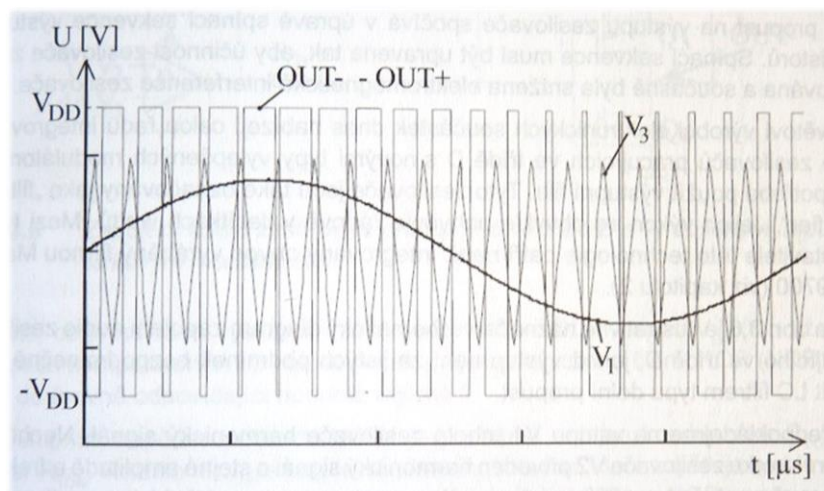
#### 3.1 Impulzně šířková modulace

Tato modulace patří svým zařazením mezi modulace diskrétní. Velmi často se používá také zkratka PWM, které vychází z anglického spojení: „Pulse Width Modulation“. [3]

##### 3.1.1 Princip impulzně šířkové modulace

Impulzně šířková modulace je technika, která zastupuje amplitudu vstupního signálu s využitím tzv. střidy výstupního signálu, který nabývá nejčastěji dvou hodnot. Je mnoho způsobů jak takového tvaru dosáhnout, ale nejjednodušším je porovnání vstupního, analogového signálu se signálem pilovitého nebo trojúhelníkového průběhu, který splňuje podmínky SHANNONOVA teorému, tedy minimálně 2x vyšší frekvence než je frekvence původního signálu. V praxi se však využívají frekvence mnohonásobně vyšší a to v rozmezí 200 - 300 kHz. [3]

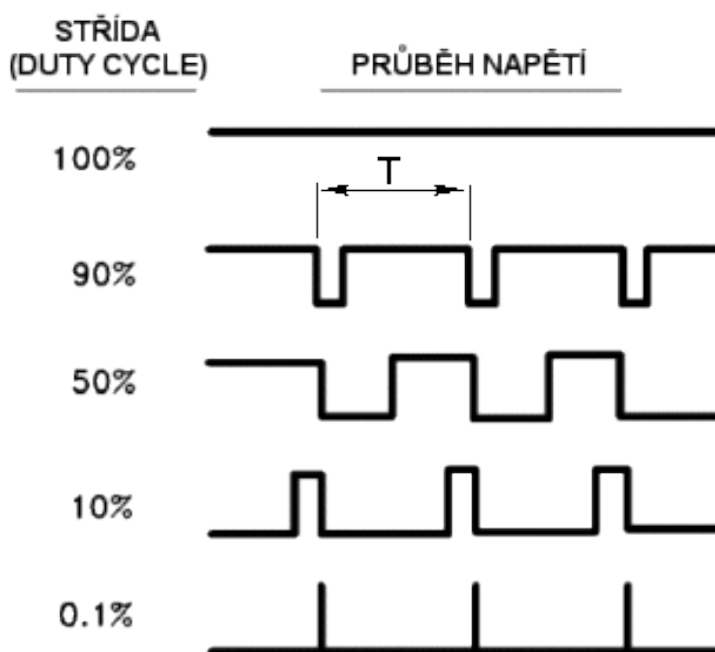
Abychom získali původní informaci a tvar signálu, stačí takto modulovaný signál nechat projít skrze filtr typu dolní propust. Tento typ modulace se díky svým vlastnostem využívá hlavně ve výkonové elektronice, což je i případ využití zesilovače třídy D. [3]



Obrázek 14 - Idealizovaný průběh napětí  
na výstupních svorkách [3]

### 3.2 Střída signálu

Tento termín se vyskytuje u signálů, které mají konstantní periodu  $T$ . Při přechodu z jedné úrovně signálu do jiné se mění poměr časů obdélníkového signálu a právě tento poměr časů se nazývá střída. V anglické terminologii se můžeme setkat s pojmenováním „Duty cycle“. Střída může nabývat různých hodnot a to v různých formátech, např.: poměrem (1:1; 1:0) nebo v procentech (0,1 %; 1 %, 50 %, 100 %). Velmi přehledně je to znázorněno na následujícím obrázku 15. [17]



Obrázek 15 - Střída signálu [17]

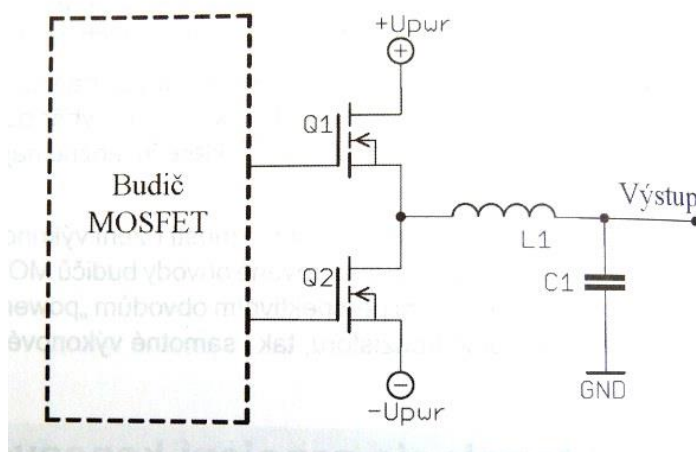
## 4 VÝKONOVÝ STUPEŇ ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ D

U zesilovačů ve třídě D se používají výhradně dvě topologie zapojení výkonového stupně a to poloviční a plný most. [3]

### 4.1 Poloviční most (Half Bridge)

Na obrázku 16 je znázorněno zapojení do polovičního mostu. Budič MOSFET tranzistorů spíná v jeden okamžik pouze jeden z nich. Sepnutí obou tranzistorů v jeden okamžik nesmí nikdy nastat. To je řešeno funkcí v budiči tranzistorů tzv. „dead time“. Jedná se o čas mezi sepnutím a rozepnutím tranzistoru než přejde hodnota řídicího signálu z kladné do záporné hodnoty. Tato pauza se může definovat jako offset a bývá v řádech desítek nanosekund. [3][5][6]

U této topologie je nutné zařadit filtrační kondenzátor před reproduktor, aby do něj nevcházela stejnosměrná složka, která by mohla reproduktor poškodit. [3]



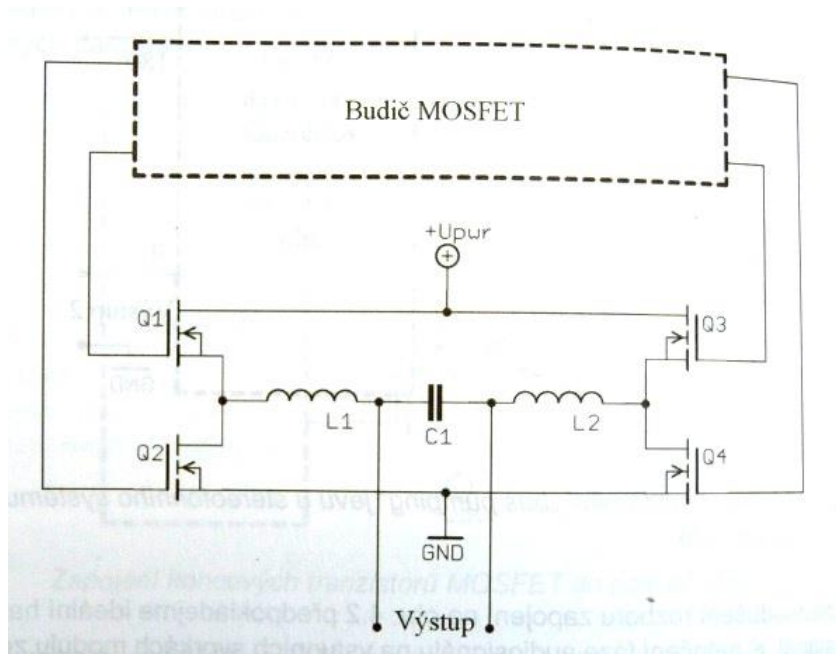
Obrázek 16 - Zapojení do polovičního mostu [3]

### 4.2 Plný most (Full Bridge) - BTL

U tohoto typu topologie je potřebný dvojnásobný počet výkonových tranzistorů než v předchozím případě. Budič spínacích tranzistorů pak funguje tak, že v daný okamžik spíná tranzistory do kříže (viz. obrázek 17), aby vždy proud protékal přes výstupní svorky zesilovače. V jeden okamžik jsou tedy sepnuty tranzistory s označením Q1 a Q4 a v druhém okamžiku Q2 a Q3. Toto zapojení znemožňuje využití stereo vstupu a vytváří z něj pouze zesilovač o jednom vstupním kanále (MONO). Použití je vhodné zejména



u subwooferů. Pokud chceme udělat stereo zesilovač, budeme muset použít 2 krát stejný elektrický obvod, což se ve výsledku projeví na dvojnásobné ceně. [3][5][6]



Obrázek 17 - Zapojení do plného mostu [3]

## 5 VÝSTUPNÍ FILTR ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ D

Účinnost zesilovače je z velké části ovlivněna vhodně zvoleným a sestrojeným výstupním filtrem zesíleného signálu, ale také kvalitou komponent, které tento filtr tvoří. Zde jsou uvedeny tři používané technologie výstupního filtru pro zesilovače ve třídě D: [3]

- Výstup zesilovače filtrem nedisponuje
- Feristor a kondenzátor
- Filtr typu „dolní propust“, který je tvořen LC prvky (cívkou a kondenzátorem)

### 5.1 Výstup zesilovače filtrem nedisponuje

Tuto technologii lze použít pouze v případě, když se pro návrh zesilovače využije čip, tzv. „filterless“, což prakticky znamená, že je integrovaný obvod navržen a sestrojen tak, že ho pro svou funkci nepotřebuje. Tato problematika byla zmíněna v kapitole 2.5 a je řešena převážně využitím komplexnější modulací signálu. [3]

Technologie nedosahuje tak kvalitních parametrů (hlavně co se týče EMI) jako u zesilovačů, které filtr mají. Na druhou stranu významně klesá cena za výrobek a model se značně miniaturizuje. [3]

### 5.2 Feristor a kondenzátor

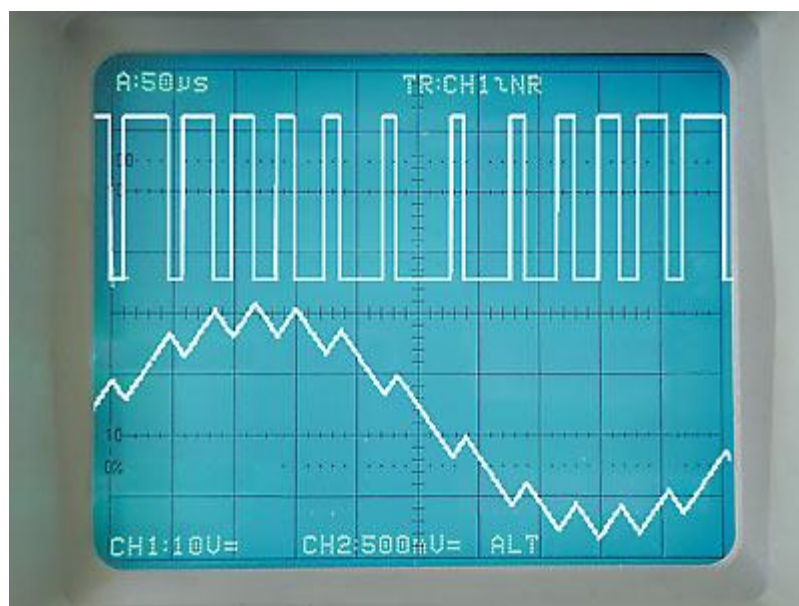
Filtry typu dolní propust, které jsou sestaveny touto technologií, nabízí zajímavé řešení, co se týče kompaktnosti a také nabízí výhodnou cenovou variantu oproti dražším LC filtrům. Velkou nevýhodou tohoto filtru je, že jeho filtrační účinky se projevují až u vysokých frekvencí (jednotky MHz), což činí značné problémy, protože zesilovače třídy D pracují nejčastěji s modulační frekvencí kolem 200 - 300 kHz. Filtry tohoto typu jsou využívány pro zesilovače, které disponují menším výstupním výkonem, který se pohybuje v rozmezí jednotek až desítek wattů. [3] [5] [6]

### 5.3 Filtr typu „dolní propust“

U zesilovačů třídy D s výkonem přesahujícím několik desítek wattů se používají převážně LC filtry typu dolní propust. Velkou nevýhodou těchto filtrů je jejich pořizovací cena a větší rozměry finálního produktu. U komerčně vyráběných spínaných zesilovačů je skrze zmíněné nedostatky časté poddimenzování. V některých případech se využívá kas-

kádového zapojení. Primárním filtrem je LC a druhým v řadě může být například filtr feristoru s kondenzátorem. [3]

K potlačení spektrální složky na svorkách zesilovače se používají filtry s aproximací 2. řádu. Prvním z nich je tzv. Butterworthova aproximace, která vyniká strmým přechodem z propustného do nepropustného pásma. Druhou možností je využití tzv. Besselovy aproximace, která má výhody především v linearitě fázové frekvenční charakteristiky, kde nedochází k významnému zpoždění signálu. [3]



*Obrázek 18 – Tvar PWM signálu po průchodu filtrem  
typu dolní propust [18]*

## 6 VYUŽITÍ ZESILOVAČE TŘÍDY D

Obecně se dá říci, že využití tohoto typu zesilovače je tam, kde je omezení možnosti přístupu k elektrickému zdroji nebo kde je omezení prostorem. V drtivé většině se jedná o zařízení, které jsou napájeny pomocí baterie: [5] [6]

- Notebooky
- MP3 přehrávače
- Mobilní telefony
- Tablety

Trendem dnešní doby je stále větší integrace elektronických zařízení na co nejmenší rozměry, ale zároveň se musí plnit požadavky na co nejdelší provozní výdrž, tedy nižší spotřebu elektrické energie. Zesilovače třídy D jsou pro tyto požadavky naprosto ideální. Mohou dosahovat velmi malých rozměrů, mají velkou účinnost, ale zároveň mají dobré parametry, které se mnohdy blíží lineárním zesilovačům. [5] [6]

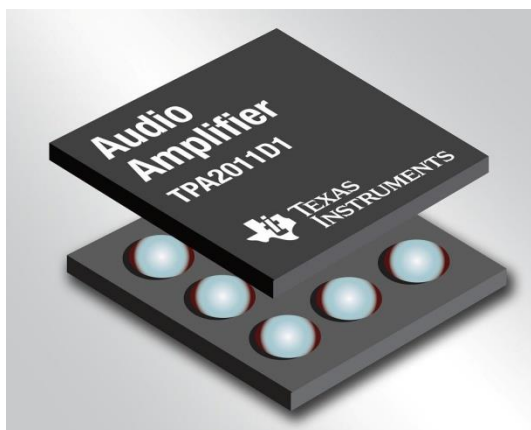
### 6.1 Nejmenší zesilovač třídy D - TPA2011D1

Jedná se o zesilovač od firmy TI (Texas Instruments), který disponuje výkonem 3,2 W při napájení 5 V a zátěži 4 ohmy. Využívá výhod vylepšené doplňkové filtrace, tudíž odpadá potřeba filtrace externími součástkami. [19]

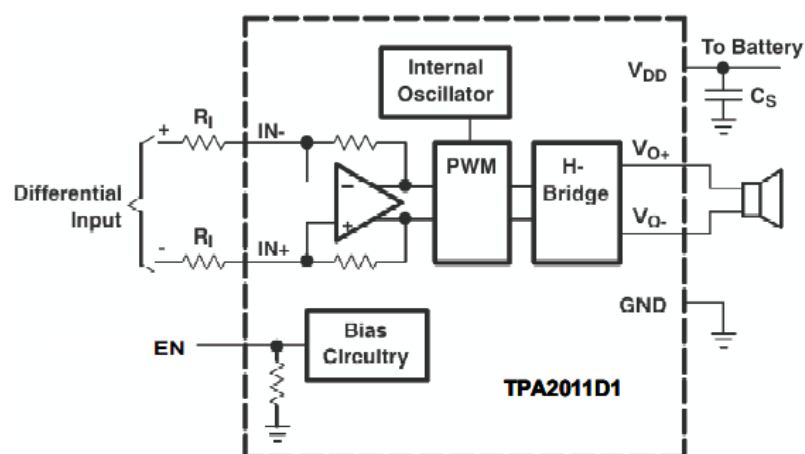
Hlavní vlastnosti zesilovače TPA2011D1: [19]

- Jedná se o jednokanálový zesilovač (MONO zesilovač)
- Výstupní výkon 3,2 W při 4 ohmové zátěži z napájení 5 V
- Vylepšená filtrace šetří místo i peníze za externí součástky
- Celková velikost zesilovače je 1,2 x 1,2 mm
- Pouzdro má 9 vývodů, které mají rozteč pouhých 0,4 mm
- Klidový odběr pouze 1,5 mA

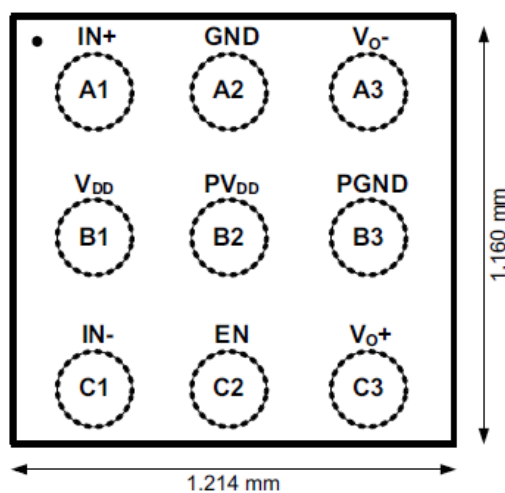
*Pozn. Při větším odběru (1000 ks) výrobce uvádí cenu za kus 0,85 \$ [19]*



Obrázek 19 - Pouzdro nejmenšího zesilovače TPA2011D1 [19]



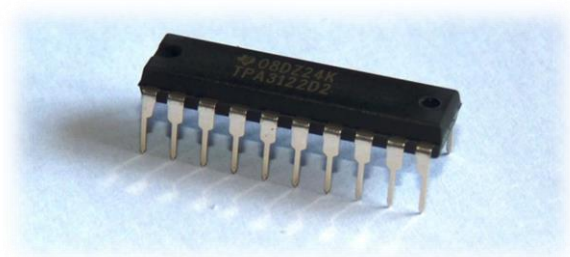
Obrázek 20 - Blokové schéma zesilovače TPA2011D1 [19]



Obrázek 21 - Rozměry zesilovače TPA2011D1 [19]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 7 INTEGROVANÝ OBVOD TPA3122D2



Obrázek 22 - Integrovaný obvod TPA3122D2 [12]

### 7.1 Popis funkcí čipu

Jedná se o dvou-kanálový zesilovač, který disponuje výkonem 15 W na kanál pro hudební signál v rozmezí 20 Hz – 20 kHz. Může být zapojen do polovičního i plného mostu. Zesilovač je konstruován pro nejmenší zátěž o velikosti 4 ohmů a vyšší. Nižší impedan-  
ce by mohla poškodit integrovaný obvod. Účinnost tohoto zesilovače eliminuje nutnost použití externího chlazení. Ziskovost (GAIN) signálu je nastavena pomocí dvou pinů na zesilovači za pomoci TTL logiky. Vstupní citlivost může být nastavena na čtyři pevně dané hodnoty a to: [12]

- 20 dB
- 26 dB
- 32 dB
- 36 dB

### 7.2 Vlastnosti zesilovače TPA3122D2

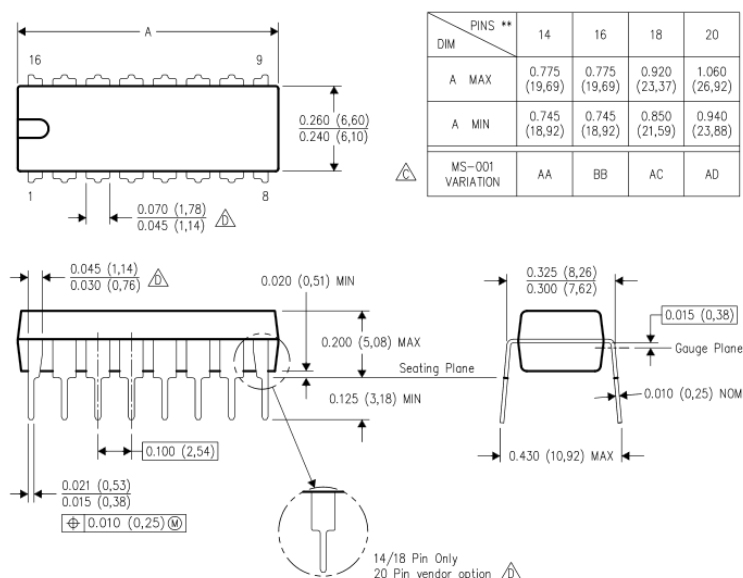
Informace a hodnoty garantované z datasheetu: [12]

- 10 W / kanál pro zátěž 4  $\Omega$ , Maximální napětí 17 V
- 15 W / kanál pro zátěž 8  $\Omega$ , Maximální napětí 30 V
- Provozní napětí 10 V až 30 V
- Čtyři volitelné, pevně stanovené piny pro ovládání vstupní citlivosti
- Vnitřní oscilátor (není potřeba žádných externích součástek)
- Analogový stereo-vstup
- Ochrana proti nadměrnému přehřátí a zkratu
- 20 pinová DIP patice

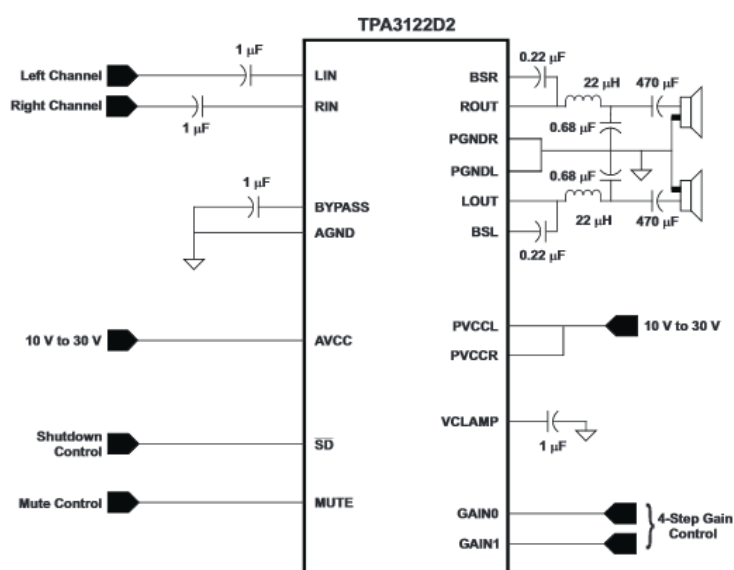
### 7.3 Informace o integrovaném obvodu

Jak je vidět na obrázku 23, integrovaný obvod je starší typ patice typu DIN, která má tyto výhody: [12]

- Dobrá manipulace
- Možnost využití nepájivého pole na zkušební vzorky
- Velmi snadná výměna při poškození IO (za použití vhodného adaptéru)

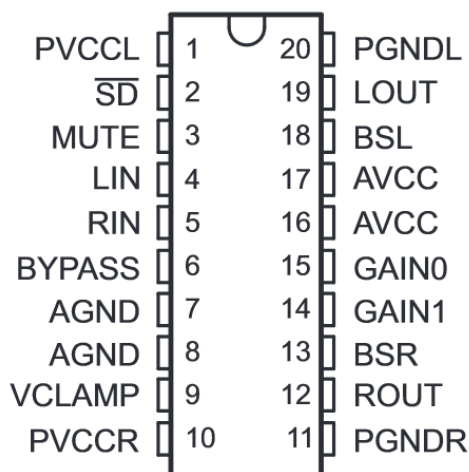


Obrázek 23 - Rozměry integrovaného obvodu TPA3122D2 [12]



Obrázek 24 - Zjednodušené elektronické schéma obvodu [12]





Obrázek 25 - Rozmístění pinů zesilovače [12]

Popis funkcí jednotlivých pinů je v tabulce 1. Jedná se o tabulku, která byla převzata z datasheetu výrobce tohoto čipu.

Tabulka 1 - Funkce jednotlivých pinů integrovaného obvodu [12]

TERMINAL		I/O	DESCRIPTION
NAME	20-PIN (DIP)		
SD	2	I	Shutdown signal for IC (low = disabled, high = operational). TTL logic levels with compliance to AVCC.
RIN	5	I	Audio input for right channel.
LIN	4	I	Audio input for left channel.
GAIN0	15	I	Gain select least significant bit. TTL logic levels with compliance to AVCC.
GAIN1	14	I	Gain select most significant bit. TTL logic levels with compliance to AVCC.
MUTE	3	I	Mute signal for quick disable/enable of outputs (high = outputs switch at 50% duty cycle; low = outputs enabled). TTL logic levels with compliance to AVCC.
BSL	18	I/O	Bootstrap I/O for left channel.
PVCCL	1		Power supply for left channel H-bridge, not internally connected to PVCCR or AVCC.
LOUT	19	O	Class-D -H-bridge positive output for left channel.
PGNDL	20		Power ground for left channel H-bridge.
VCLAMP	9		Internally generated voltage supply for bootstrap capacitors.
BSR	13	I/O	Bootstrap I/O for right channel.
ROUT	12	O	Class-D -H-bridge negative output for right channel.
PGNDR	11		Power ground for right channel H-bridge.
PVCCR	10		Power supply for right channel H-bridge, not connected to PVCCL or AVCC.
AGND	8		Analog ground for digital/analog cells in core.
AGND	7		Analog Ground for analog cells in core.
BYPASS	6	O	Reference for pre-amplifier inputs. Nominally equal to AVCC/8. Also controls start-up time via external capacitor sizing.
AVCC	16, 17		High-voltage analog power supply. Not internally connected to PVCCR or PVCCL.

## 8 PARAMETRY ZESILOVAČE

### 8.1 Nastavení vstupní citlivost zesilovače

Vstupní citlivost neboli zisk (GAIN) je nastavitelná pomocí TTL logiky, tedy připojením potenciálu buď na vstupní napětí ( $V_{cc} = \text{Log } 1$ ) nebo zem ( $GND = \text{Log } 0$ ). Jedná se o piny s číslem 14 a 15, které můžeme vidět na obrázku 25. [12]

Pro svou práci jsem si zvolil GAIN 20 dB, tedy oba piny jsou pevně připojeny na potenciál GND (log 0). Pro hlasitější přednes zesilovače bude zejména záviset na tom, jak silný vstupní signál se přivede na analogový vstup. Na druhou stranu nám nejnižší možná citlivost zaručí kvalitní reprodukci bez přidaného šumu. [12]

*Tabulka 2 – Hodnoty zisku pro nastavení pinů funkce GAIN [12]*

GAIN1	GAIN0	AMPLIFIER GAIN (dB)	INPUT IMPEDANCE (k $\Omega$ )
		TYPICAL	TYPICAL
0	0	20	60
0	1	26	30
1	0	32	15
1	1	36	9

### 8.2 Hodnoty výstupního filtru

Jedná se o hodnoty uvedené v datasheetu výrobce. Pro sestavení zesilovače byl zvolen typ topologie poloviční most (Single Ended) pro zátěž 8  $\Omega$ . Z tabulky vyplývá, že hodnota cívky musí být 47  $\mu\text{H}$  a filtrační kondenzátor 390 nF. Cívka se podařila sehnat v SMD provedení a kondenzátory jsou řešeny paralelním spojením (kdy se kapacita sčítá) o hodnotách 330 nF + 68 nF. [12]

*Tabulka 3 – Hodnoty výstupního filtru [12]*

Output Configuration	Speaker Impedance ( $\Omega$ )	Filter Inductor ( $\mu\text{H}$ )	Filter Capacitor (nF)
Single Ended (SE)	4	22	680
	8	47	390
Bridge Tied Load	4	10	1500
	8	22	680

### 8.3 Filtrační kondenzátor stejnosměrné složky

Tímto kondenzátorem se určuje, jaké dolní frekvence bude zesilovač schopen posílat do reprodukčního zařízení. Po delší úvaze byl použit mezní kmitočet 40 Hz pro 8  $\Omega$  (tedy kondenzátor o hodnotě 470  $\mu\text{F}$ ) a to z důvodu, že vysoká hodnota výstupního kon-

denzátoru posílá velké proudové špičky při zapnutí zesilovače (vyrovnání náboje nabitého kondenzátoru), což se projeví hlasitým prasknutím reproduktoru.

*Tabulka 4 – Hodnoty kondenzátoru pro filtraci stejnosměrné složky [12]*

Speaker Impedance ( $\Omega$ )	C <sub>SE</sub> – DC Blocking Capacitor ( $\mu$ F)		
	f <sub>c</sub> = 60 Hz	f <sub>c</sub> = 40 Hz	f <sub>c</sub> = 20 Hz
4	680	1000	2200
8	330	470	1000

## 8.4 Pracovní podmínky zesilovače

Zde jsou uvedeny hodnoty pro integrovaný obvod TPA3122D2, při kterých by měl zesilovač správně pracovat.

*Tabulka 5 – Pracovní podmínky zesilovače*

		VALUE	UNIT
V <sub>CC</sub>	Supply voltage, AVCC, PVCC	–0.3 to 36	V
V <sub>I</sub>	Logic input voltage	SD, MUTE, GAIN0, GAIN1	–0.3 to V <sub>CC</sub> +0.3 –0.3 to V <sub>CC</sub> +0.3
V <sub>IN</sub>	Analog input voltage	RIN, LIN	–0.3 to 7
	Continuous total power dissipation	See Dissipation Rating Table	
T <sub>A</sub>	Operating free-air temperature range	–40 to 85	°C
T <sub>J</sub>	Operating junction temperature range	–40 to 150	°C
T <sub>stg</sub>	Storage temperature range	–65 to 150	°C
R <sub>L</sub>	Load resistance (Minimum value)	3.2	kV
ESD	Electrostatic Discharge	Human body model (all pins)	±2
		Charged-device model (all pins)	±500

			MIN	MAX	UNIT
V <sub>CC</sub>	Supply voltage	PVCC, AVCC	10	30	V
V <sub>IH</sub>	High-level input voltage	SD, MUTE, GAIN0, GAIN1	2		V
V <sub>IL</sub>	Low-level input voltage	SD, MUTE, GAIN0, GAIN1		0.8	V
I <sub>IH</sub>	High-level input current	SD, V <sub>I</sub> = V <sub>CC</sub> , V <sub>CC</sub> = 30 V		125	$\mu$ A
		MUTE, V <sub>I</sub> = V <sub>CC</sub> , V <sub>CC</sub> = 30 V		125	
		GAIN0, GAIN1, V <sub>I</sub> = V <sub>CC</sub> , V <sub>CC</sub> = 24 V		125	
I <sub>IL</sub>	Low-level input current	SD, V <sub>I</sub> = 0, V <sub>CC</sub> = 30 V		1	$\mu$ A
		MUTE, V <sub>I</sub> = 0 V, V <sub>CC</sub> = 30 V		1	
		GAIN0, GAIN1, V <sub>I</sub> = 0 V, V <sub>CC</sub> = 24 V		1	
T <sub>A</sub>	Operating free-air temperature		–40	85	°C

## 9 ESD – ZÁSADY PRO PRÁCI S INTEGROVANÝMI OBVODY

Na každém izolovaném předmětu se při tření hromadí elektrostatický náboj. Například při chůzi po syntetickém koberci může na těle člověka vzniknout náboj o hodnotě až 30 000 V. Při pohybu na židli a případném zvednutí nohou od země může vznikat náboj od 100 V až 10 kV. Kapacita lidského těla se pohybuje v rozmezí 100 – 500 pF. Takto naakumulovaná energie se následně jednorázově vybijí (stejně jako kondenzátor) při dotyku vodivé plochy a dojde k vyrovnání náboje. Jde sice o velmi krátké výboje v řádech nanosekund, ale špičky protékajícího proudu mohou dosahovat až hodnot několik desítek ampér, které mohou ohrozit (degradovat nebo úplně zničit) součástky citlivé na elektrostatický výboj. Patří sem např. obvody MOS, vstupy operačního zesilovače a jiné integrované obvody. Je proto nutné chránit tyto zařízení především prevencí, tedy omezením vzniku náboje. Další zásady jsou: [7]

- Manipulace s integrovaným obvodem za pouzdro (ne za „nožičky“)
- Převrácení a manipulace ve vodivém balení
- Pracovní oděv bez syntetických vláken (aby se mohl náboj lépe šířit)
- Pracoviště s elektricky vodivou plochou a podlahovou krytinou v kombinaci s pracovní obuví, která umožňuje přenesení náboje.

Místa, kde se pracuje s elektronikou citlivou na elektrostatický výboj, jsou velmi často značeny různými cedulemi, vyznačenými páskami nebo zábradlím se vstupem přes turniket, kde se kontroluje výše náboje v těle člověka. Pokud tělo obsahuje nadměrné množství náboje, není vpuštěn do pracovních prostor, aby neohrozil elektronické součástky. [7]



Obrázek 26 – Ukázka varovné cedule ESD prostoru [20]

## 10 ELEKTRONICKÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ

Jak je na první pohled patrné z elektronického schématu na obrázku 26, tak zesilovač je postaven na topologii polovičního mostu (viz kapitola 4).

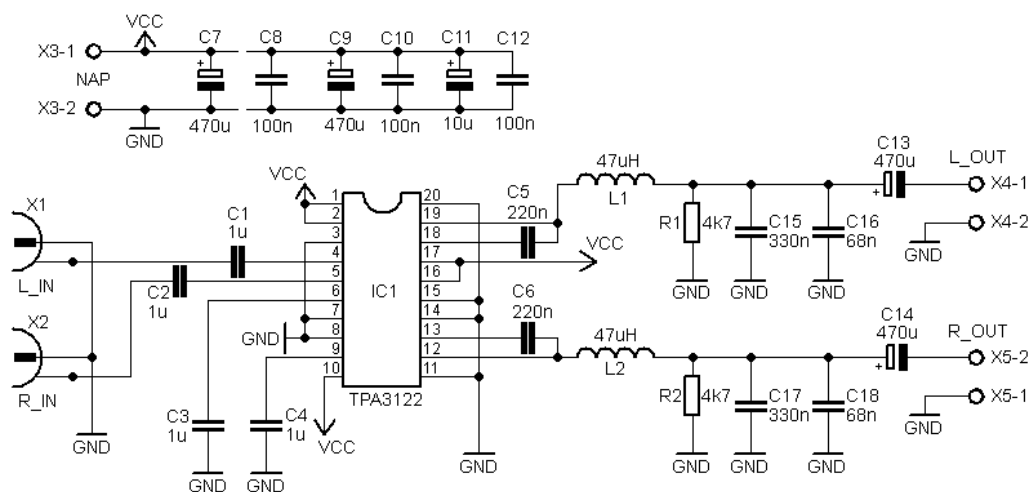
V horní části elektronického schématu jsou svorky napájecího napětí „X3-1“ (Vcc) a „X3-2“ (GND). Za nimi je řada kondenzátorů C7 - C12, které vyrovnávají úbytky napětí při odběru zesilovače.

Vlevo uprostřed jsou svorky typu RCA (cinch), které slouží jako vstup analogového signálu. Je tedy zaručeno velmi snadné připojení jakéhokoli zařízení, které disponuje buď výstupem RCA, nebo mnohem častěji výstupem JACK 3,5 mm. Hned za svorkami jsou kondenzátory C1 a C2, které mají za úkol filtrovat stejnosměrnou složku signálu.

Uprostřed schématu se nachází nejdůležitější část zesilovače, a to integrovaný obvod TPA3122D2, který má za úkol převedení analogového signálu do digitálního (obdél-níkového). Uvnitř čipu se nachází oscilátor trojúhelníkového průběhu o frekvenci 250 kHz, který za pomoci komparátoru převádí analogový signál (PWM modulace), jenž následně slouží k řízení MOSFET tranzistorů, u nichž dochází k zesílení amplitudy modulovaného signálu.

Za výstupem integrovaného obvodu se nachází filtr typu dolní propust, který se skládá z LC prvků. V tomto případě jsou to součástky s označením L1, C15, C16 pro levý kanál a L2, C17, C18 pro kanál pravý.

Mezi filtrem a svorkovnicí se nachází kondenzátor C13 a C14, které propouští pouze takové frekvence (od 40 Hz), které neohrozí zničení reproduktoru.



Obrázek 27 - Elektronické schéma zapojení

## 10.1 Seznam použitých součástek - BOM

Tabulka 6 - Seznam použitých součástek - BOM

Part	Value	Device	Package	Poznámka
C1	1u	#C0603	603	C 0603
C2	1u	#C0603	603	C 0603
C3	1u	#C0603	603	C 0603
C4	1u	#C0603	603	C 0603
C5	220n	#C0603	603	C 0603
C6	220n	#C0603	603	C 0603
C7	470u	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5	POLARIZED
C8	100n	#C0603	603	C 0603
C9	470u	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5	POLARIZED
C10	100n	#C0603	603	C 0603
C11	10u	CPOL-EUE2.5-6	E2,5-6	POLARIZED
C12	100n	#C0603	603	C 0603
C13	470u	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5	POLARIZED
C14	470u	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5	POLARIZED
C15	330n	#C1206	1206	C 1206
C16	68n	#C1206	1206	C 1206
C17	330n	#C1206	1206	C 1206
C18	68n	#C1206	1206	C 1206
IC1	TPA3122	DIL20	DIL20	Dual In L
L1	47uH	IHLP4040	IHLP4040	-
L2	47uH	IHLP4040	IHLP4040	-
R1	4k7	#R0603	603	R 0603
R2	4k7	#R0603	603	R 0603
X1	L_IN	CINCH	CINCH	-
X2	R_IN	CINCH	CINCH	-
X3	NAP	W237-02P	W237-132	WAGO SREW
X4	L_OUT	W237-02P	W237-132	WAGO SREW
X5	R_OUT	W237-02P	W237-132	WAGO SREW

## 11 LAYOUT – NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

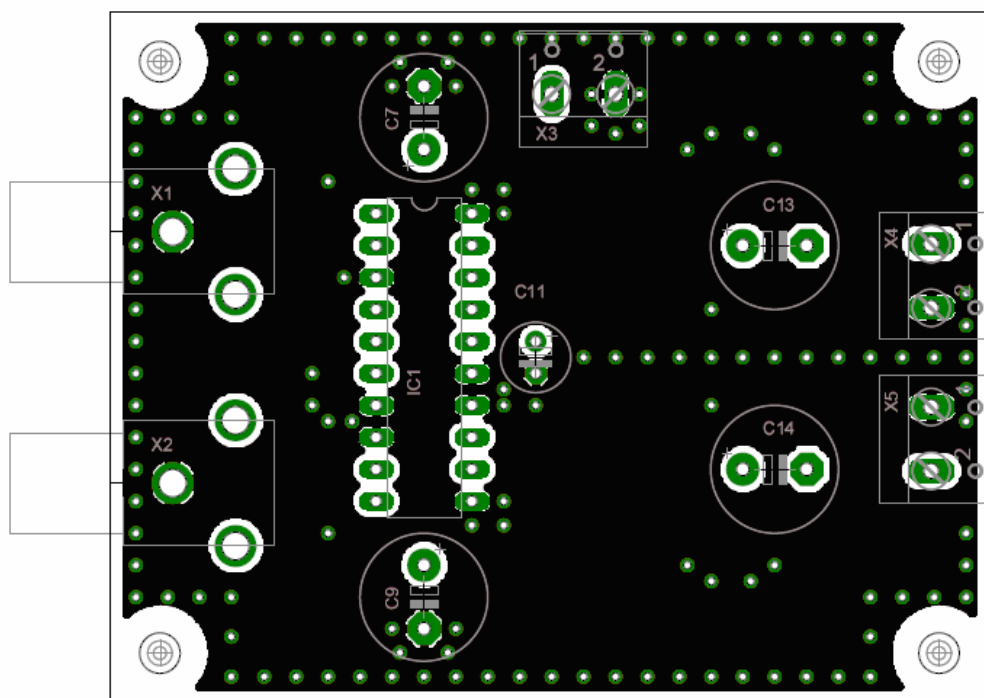
### 11.1 Popis layoutu – vrchní strana

Vrchní část desky plošného spoje je navržena tak, že obsahuje pouze komponenty typu THROUGH-HOLE, tedy součástky, které se pájí přes vyvrtané díry do DPS z druhé strany. V rozích jsou vyvrtané čtyři díry, které mohou sloužit k uchycení zesilovače na nějaký podklad (krabíčka apod.).

Na obrázku 28 je vidět, že na vrchní straně nevedou žádné cesty, ale je zde jeden velký (černý) polygon, který má potenciál GND, což má to řadu výhod:

- Je zajištěn dobrý tok záporného náboje
- V případě přehřívání součástek slouží jako externí chlazení
- Izoluje spodní SMD součástky (především cívky) od interferenčního rušení, díky čemuž je obvod méně ovlivňován externím rušením.

Po obvodu i uvnitř návrhu je vidět značné množství prokovů, které slouží k propojení potenciálu země (GND) se spodní stranou DPS, což taktéž zlepšuje tok záporného náboje. Propojení signálu je řešeno dvojicí RCA konektorů na levé straně. Připojení reproduktorů a vstupního napájení je realizováno přes šroubovací svorkovnice.



Obrázek 28 – Vrchní strana layoutu

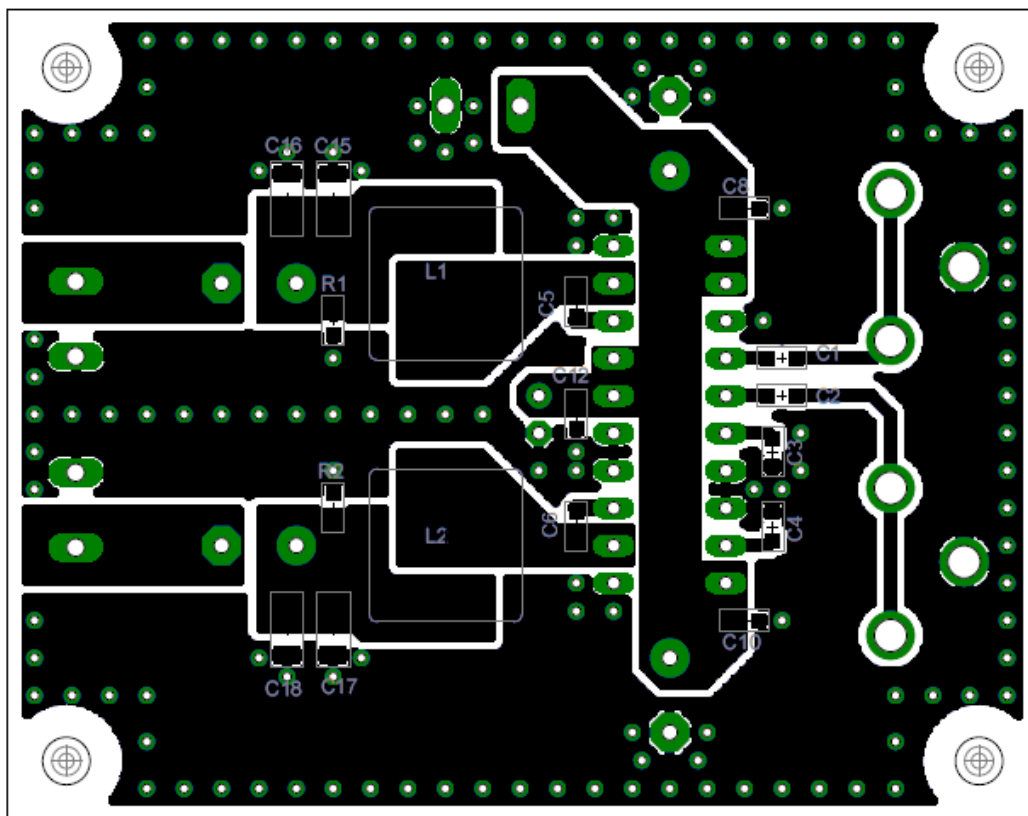
## 11.2 Popis layoutu – spodní strana

Na obrázku 29 je vidět snaha o návrh, který vypadá symetricky pro levý a pravý kanál. Je to hlavně z toho důvodu, aby oba kanály měly rovnocenné podmínky, hlavně co se týče toku elektrické energie z napájení.

Na spodní straně layoutu se nacházejí pouze součástky typu SMD, a to vstupní filtrační kondenzátory pro napájení a vstup i výstupní filtr typu dolní propust. Je zde také snaha vést elektrickou energii spíše přes polygony než po cestách s danou šířkou, aby nedocházelo k ovlivnění signálu kvůli velkému odporu vedení u užších cest.

Stejně jako na horní straně jsou zde vidět prokovy, které jednak zlepšují tok záporného náboje směrem k zemi (GND) a dále zlepšují chlazení celé desky plošných spojů. Je velmi vhodné využít možnosti patice pro integrovaný obvod, kde je výměna čipu (v případě poškození) velmi jednoduchá. Stačí jej vyjmout a zasunout nový. V případě, kdy je čip připájen natvrdo, je jeho výměna komplikovaná.

Přehlednější rozmístění součástek je v další podkapitole 11.3 a v příloze, kde je vyfocen finální produkt zesilovače.



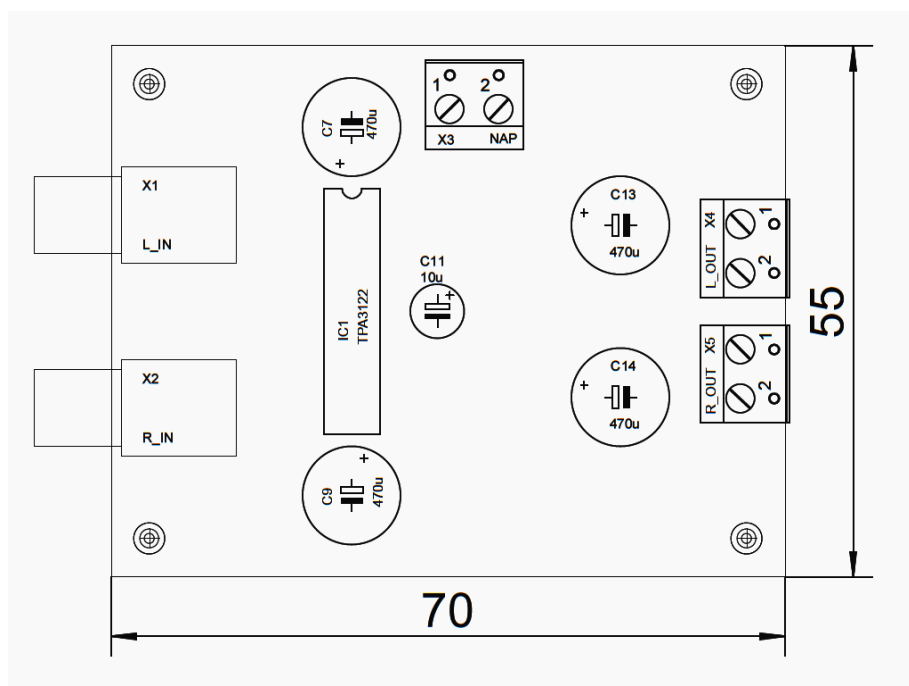
Obrázek 29 – Spodní strana layoutu



### 11.3 Rozmístění součástek

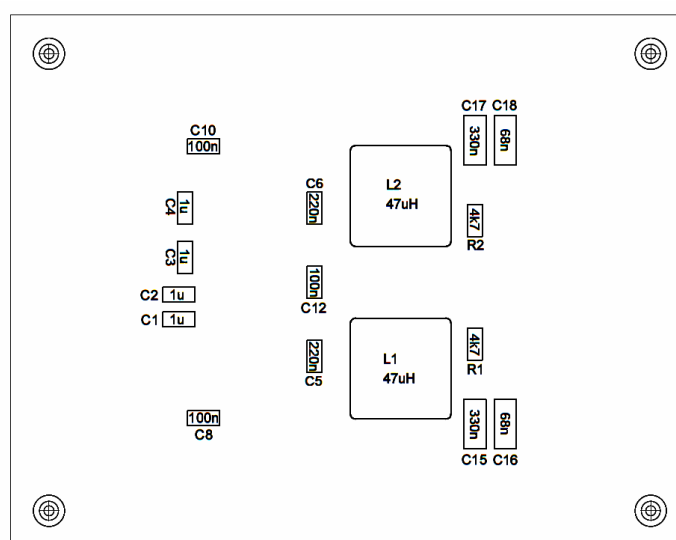
Zde je zobrazeno přehledněji rozmístění součástek na vrchní a spodní straně desky plošného spoje s rozměry obdélníkového tvaru.

#### 11.3.1 Horní strana PCB



Obrázek 30 - Rozmístění součástek - horní strana PCB

#### 11.3.2 Spodní strana PCB



Obrázek 31 - Rozmístění součástek - spodní strana PCB

## 12 ZPŮSOB OSAZENÍ DPS

Pro osazování byly použity jak SMD součástky, tak i klasické THROUGH-HOLE komponenty. Je to hlavně z toho důvodu, že byly použity kondenzátory o velké kapacitě (470  $\mu$ F) a ty se v SMD provedení nevyrábí.

### 12.1 Pájení mikropájkou a cínem

Tento způsob pájení je vhodný u větších komponent. U tohoto zesilovače se jednalo o tyto komponenty:

- Elektrolytické kondenzátory
- Svorkovnice
- RCA konektory
- Adaptér (20 pinů)



Obrázek 32 – Mikropájka [21]

Pájení probíhalo poměrně snadně, ale v případě pájení komponent, které byly připojeny na větší polygony, se teplo šířilo na všechny strany. Bylo potřeba využití externího ohřevu od horkovzdušné pistole, protože pájkou nebylo možné dosáhnout dostatečné teploty pro rovnoměrné rozlití cínu.

## 12.2 Pájení horkovzdušnou pistolí a pájecí pastou

Touto technologií byly pájeny součástky typu SMD. Nejprve se provedlo nanesení pájecí pasty pomocí injekční stříkačky na pájecí plošky desky plošného spoje a následně se na ně pinzetkou osadili malé SMD součástky (většinou v provedení 0603).

Protože má pájecí pasta tuhou viskozitu, součástky držely samovolně. Pak už jen stačilo přiložit horkovzdušnou pistoli rozeřátou na 380°C a pasta se rozvedla po odmaskované ploše pájecího padu a styčné plochy součástky.

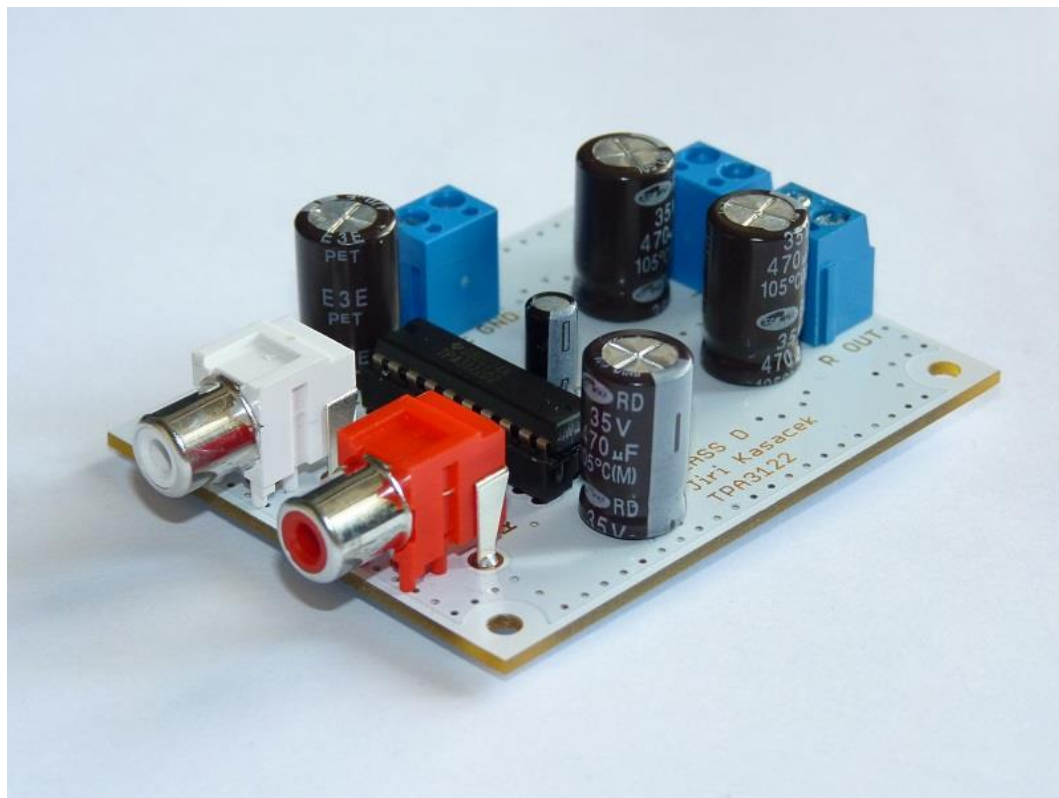


Obrázek 33 – Horkovzdušná pájecí pistole [22]

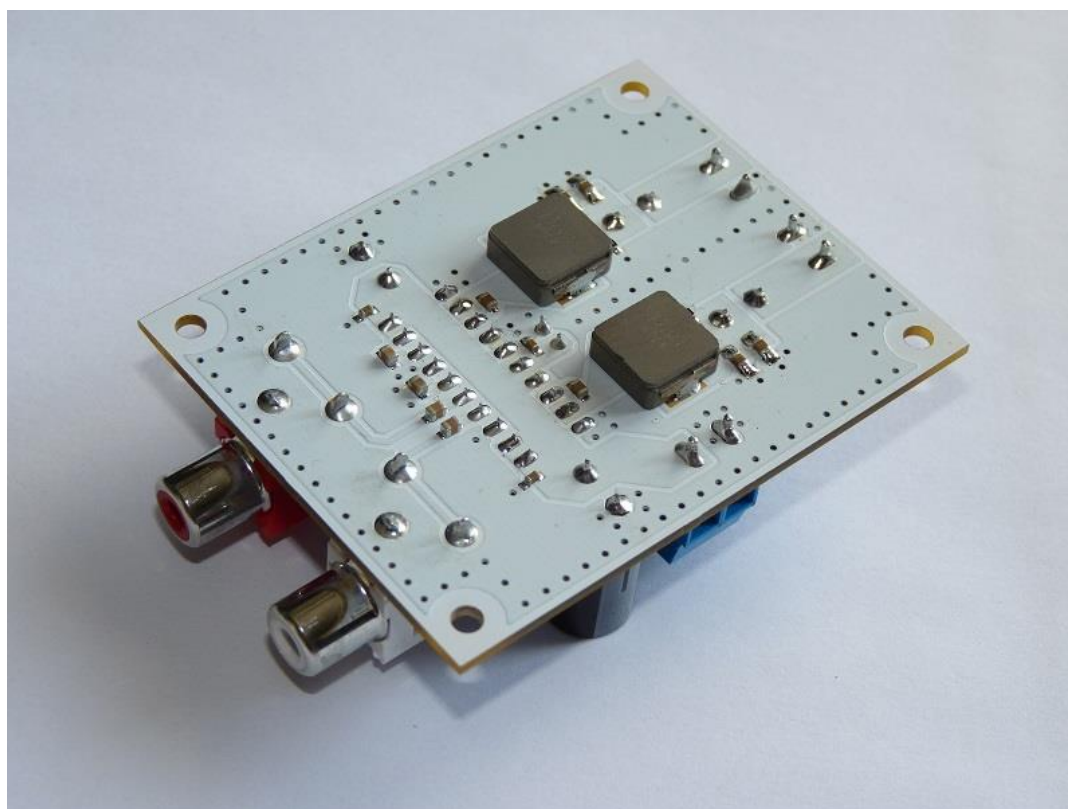


Obrázek 34 – Detail pájení SMD součástek

### 13 FINÁLNÍ PODOBA ZESILOVAČE



Obrázek 35 - Finální podoba zesilovače - celkový pohled



Obrázek 36 - Finální podoba zesilovače - pohled na spodní stranu

## 14 NAMĚŘENÉ HODNOTY

Měření bylo prováděno ve školní laboratoři a byla použita tato zařízení:

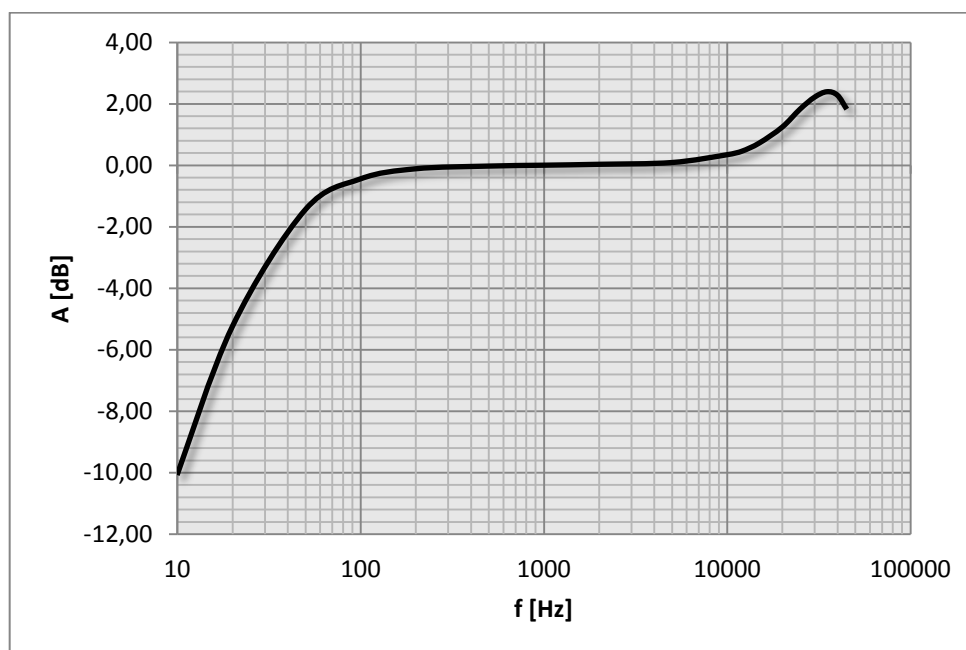
- Generátor signálu
- Nastavitelný zdroj napájení
- Zkonstruovaný zesilovač ve třídě D
- Osciloskop
- Přesný laboratorní voltmetr
- Zatěžovací výkonové odpory (dimenzované na výkon 20 W)

Prvotní oživení obvodu probíhalo s omezeným proudem ze zdroje, aby nedošlo v případě zkratu na desce plošného spoje k poškození zesilovače.

Napájecí napětí zesilovače bylo nastaveno na možné maximum, tedy 30 V pro zátěž  $8\ \Omega$  a na vstup se z generátoru signálu přivedl sinusový průběh o frekvenci 1 kHz.

K zesilovači byla připojena zátěž  $9,4\ \Omega$  a bylo provedeno měření frekvenční charakteristiky na širokém spektru frekvencí v rozmezí od 10 Hz do 45 kHz k referenčnímu napětí 3 V při 1 kHz, aby se zjistil rozsah lineárního zesílení. Hodnoty byly zaznamenány do tabulky 7 a následně byl vytvořen graf 1.

### 14.1 Frekvenční charakteristika pro zátěž $9,4\ \Omega$



Graf 1 - Frekvenční charakteristika pro zátěž  $9,4\ \Omega$

Tabulka 7 – Naměřené hodnoty frekvenční charakteristiky pro zátěž 9,4  $\Omega$ 

f[Hz]	U[V]	Poměr U/Uref	P[dB]
10	0,94	0,31	-10,08
20	1,64	0,55	-5,25
50	2,54	0,85	-1,45
100	2,85	0,95	-0,45
200	2,96	0,99	-0,12
500	2,99	1,00	-0,03
1000	3,00	1,00	0,00
2000	3,01	1,00	0,03
5000	3,03	1,01	0,09
10000	3,12	1,04	0,34
12000	3,16	1,05	0,45
15000	3,26	1,09	0,72
20000	3,46	1,15	1,24
25000	3,70	1,23	1,82
30000	3,87	1,29	2,21
35000	3,95	1,32	2,39
40000	3,90	1,30	2,28
45000	3,70	1,23	1,82

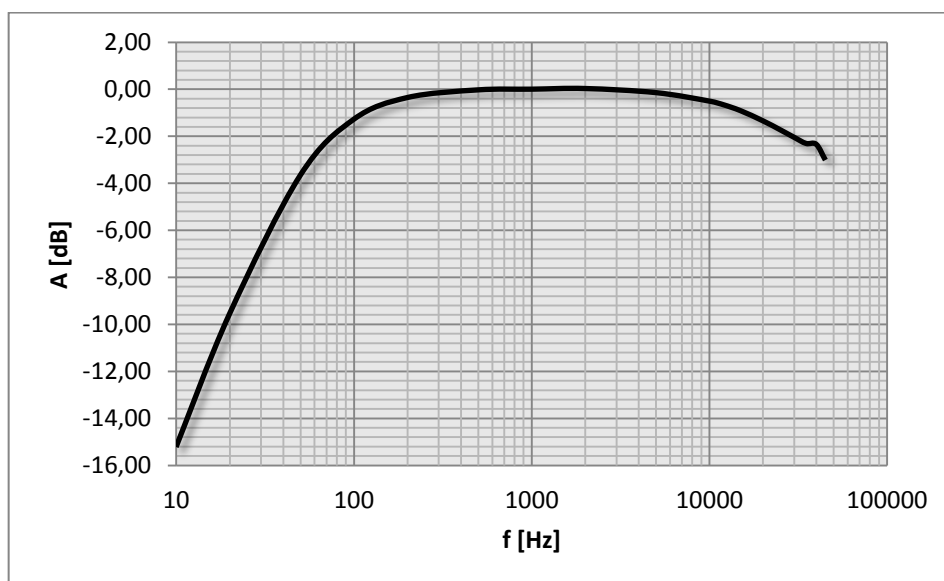
V<sub>cc</sub> = 30 V

Signál generátoru při 1 kHz = 3 V

Zátěž 9,4  $\Omega$ 

## 14.2 Frekvenční charakteristika pro zátěž 4,7 $\Omega$

Zde měření probíhalo obdobně, akorát se změnila zátěž na 4,7  $\Omega$  a v tabulce 8, se upravila stupnice vstupního napětí do maxima 17 V, aby nedošlo k poškození zesilovače.

Graf 2 - Frekvenční charakteristika pro zátěž 4,7  $\Omega$

Tabulka 8 - Naměřené hodnoty frekvenční charakteristiky pro zátěž 4,7  $\Omega$ 

f[Hz]	U[V]	Poměr U/Uref	P[dB]
10	0,52	0,17	-15,22
20	1	0,33	-9,54
50	1,97	0,66	-3,65
100	2,59	0,86	-1,28
200	2,88	0,96	-0,35
500	2,99	1,00	-0,03
1000	3,00	1,00	0,00
2000	3,01	1,00	0,03
5000	2,95	0,98	-0,15
10000	2,83	0,94	-0,51
12000	2,78	0,93	-0,66
15000	2,70	0,90	-0,92
20000	2,57	0,86	-1,34
25000	2,46	0,82	-1,72
30000	2,37	0,79	-2,05
35000	2,30	0,77	-2,31
40000	2,29	0,76	-2,35
45000	2,12	0,71	-3,02

Vcc = 17 V

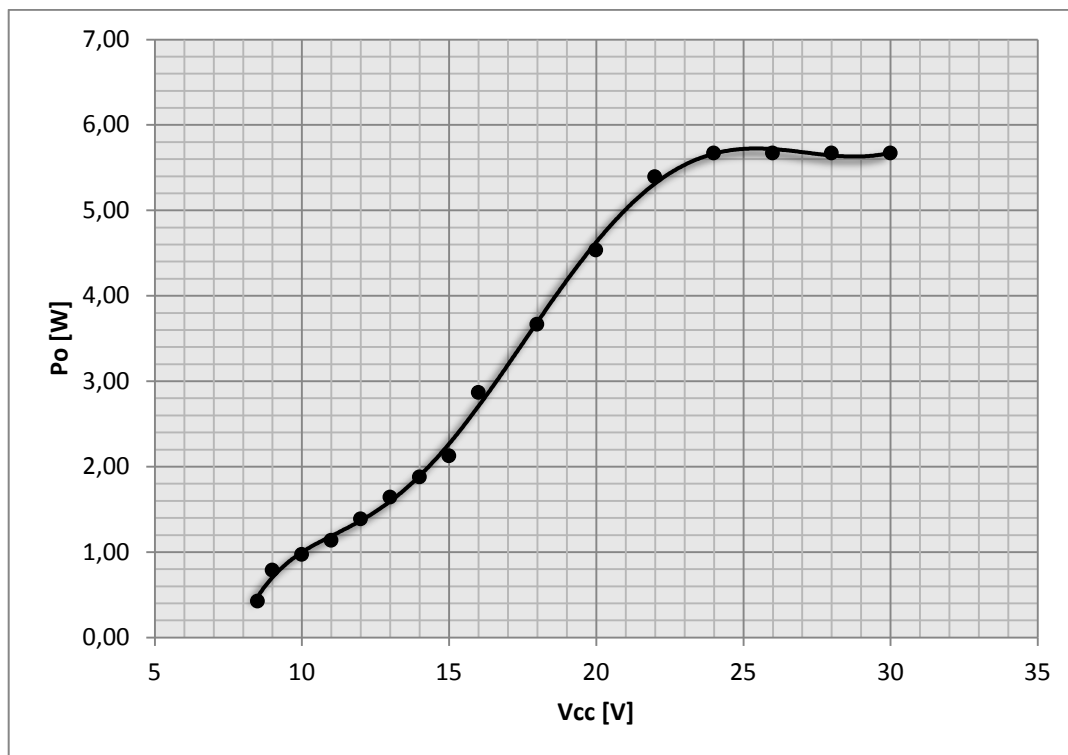
Signál generátoru při 1 kHz = 3 V

Zátěž 4,7  $\Omega$ 

### 14.3 Závislost výstupního výkonu na napájecím napětí pro zátěž 9,4 $\Omega$

Zde bylo prováděno měření, aby se zjistila hodnota napětí zesíleného signálu, při kterém se začne signál zkreslovat v závislosti na napájecím napětí.

Z grafu č. 3 lze vyčíst, že nejlineárnější oblast zesílení je v rozmezí 15 – 20 V napájecího napětí. Nutno ještě zmínit, že hodnoty byly zaznamenávány na hodnotě, kdy ještě nedocházelo ke zkreslení signálu, a tudíž nelze hovořit ani o THD při 1 % zkreslení. Když se podíváme na hodnoty zaznamenané v tabulce 9, může být trochu zvláštní, že výkon dosahuje tak malých hodnot. To je způsobené zejména tím, že výrobce uváděl výkon při zkreslení THD 10 %. Měření zesilovače bylo prováděno na větší zátěži (4,7 a 9,4  $\Omega$ ), což je do jisté míry velké omezení výkonu.



Graf 3 - Závislost výstupního výkonu na napájecím napětí pro zátěž 9,4  $\Omega$

Tabulka 9 – Naměřené hodnoty pro závislost výkonu na napájecím napětí pro zátěž 9,4  $\Omega$

Vcc	Uout [V]	Po [W]
8,5	2	0,43
9	2,72	0,79
10	3,02	0,97
11	3,27	1,14
12	3,61	1,39
13	3,93	1,64
14	4,2	1,88
15	4,47	2,13
16	5,19	2,87
18	5,87	3,67
20	6,53	4,54
22	7,12	5,39
24	7,3	5,67
26	7,3	5,67
28	7,3	5,67
30	7,3	5,67

Signál generátoru 1 kHz  
Zátěž 9,4  $\Omega$

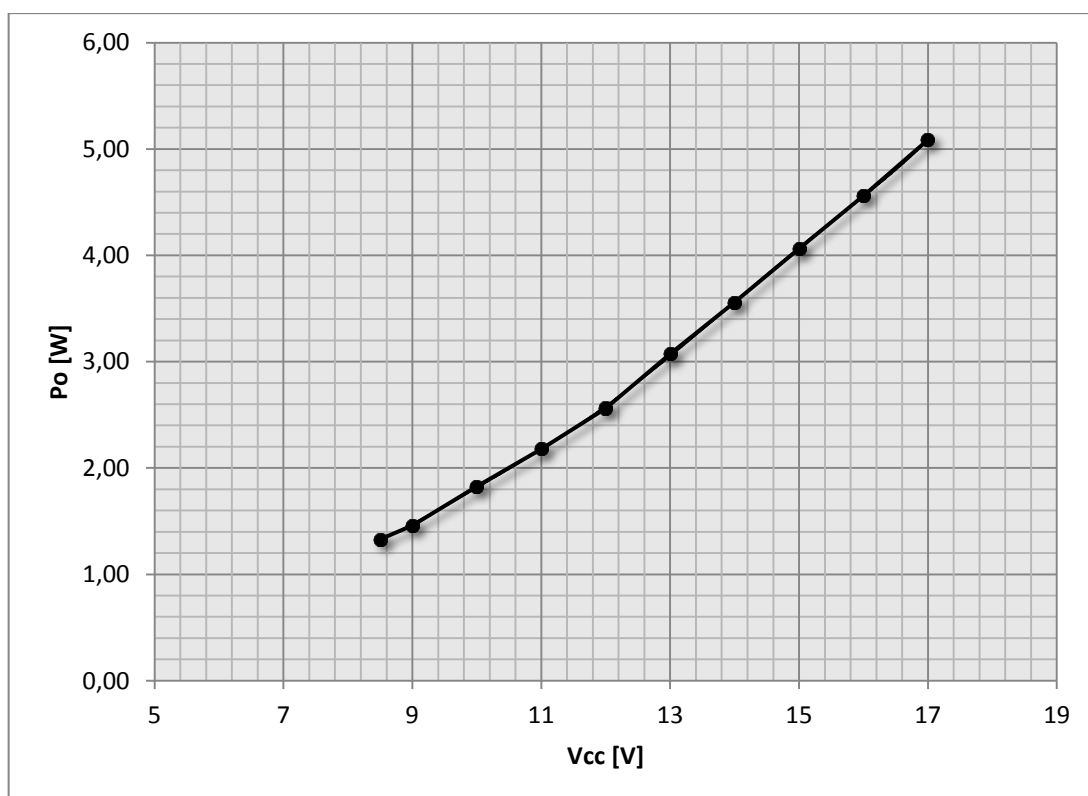


#### 14.4 Závislost výstupního výkonu na napájecím napětí pro zátěž $4,7\ \Omega$

Měření probíhalo obdobně jako v předchozím případě, jen se znovu musel upravit obvod na menší zátěž a bylo potřeba změnit stupnici napájecího napětí. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 10.

Omezení malého výstupního výkonu je způsobeno stejnými souvislostmi jako v předchozí podkapitole 14.3, tedy vyšší hodnota zatěžovacího odporu a výkon byl měřen při nulovém zkreslení výstupního signálu.

V grafu 4 můžeme pozorovat téměř lineární průběh po celém rozsahu napájecího napětí.



Graf 4 - Závislost výstupního výkonu na napájecím napětí pro zátěž  $4,7\ \Omega$

Tabulka 10 - Naměřené hodnoty pro závislost výkonu na napájecím napětí pro zátěž  $4,7 \Omega$ 

Vcc	Uout [V]	Po [W]
8,5	2,5	1,33
9	2,62	1,46
10	2,93	1,83
11	3,2	2,18
12	3,47	2,56
13	3,8	3,07
14	4,09	3,56
15	4,37	4,06
16	4,63	4,56
17	4,89	5,09

Signál generátoru 1 kHz  
Zátěž  $4,7 \Omega$

### 14.5 Přeslech mezi kanály

Měření bylo provedeno na jednom z kanálů, kde byla nastavena referenční hodnota zesílení 3 V pro signál 1 kHz. Měřicí přístroje byly ponechány na měření stejného kanálu, ale byl prohozen vstupní signál na opačný kanál a zvyšována amplituda vstupního signálu.

Po nastavení maximální amplitudy generátoru a vypnutí atenuátoru (-20 dB) byl přeslech tak malý, že nebyl téměř měřitelný. Přeslech mezi levým a pravým kanálem při 1 kHz byl tedy vyšší než 45 dB, což je velmi dobrá hodnota.

### 14.6 Provozní napětí zesilovače

Bylo provedeno měření provozního napětí zesilovače, které bylo zkoušeno od nulového napětí, přičemž se zjistilo, že zesilovač začíná pracovat od hodnoty 8,5 V při obou zátěžích. Proto můžeme v grafech a naměřených hodnotách vidět, proč bylo měření prováděno od tohoto napětí.

Provozní napětí bylo skokové, jelikož při 8,4 V zesilovač vůbec nereagoval a při 8,5 V se „otevřel“ podobně jako usměrňovací dioda.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vybrat vhodný integrovaný obvod a provést konstrukční řešení funkčního vzorku zesilovače třídy D, na kterém bude provedeno měření základních vlastností na vhodné impedanční zátěži.

V teoretické části byly porovnány zesilovače tříd A, B, AB, C a D, aby čtenář pochopil rozdíl mezi jednotlivými zesilovači a jejich princip zpracování vstupního signálu.

V kapitole 2 je uvedeno dělení zesilovačů třídy D, zpracování analogového a digitálního signálu a ucelený přehled šíření signálu v jednotlivých částech zesilovače. Kapitola 3 se zabývá impulzně šířkovou modulací, principem zpracování signálu a střídou signálu. V následujících kapitolách jsou následně rozebrány jednotlivé části zesilovače, a to výkonový stupeň a výstupní filtr, který je posledním krokem před výstupem na svorky reproduktoru.

Jako integrovaný obvod byl vybrán čip s označením TPA3122D2 od firmy Texas Instruments. Tento obvod může pracovat jak v polovičním, tak v plném mostu. Jeho udávaný výkon je 15 W pro zátěž  $8\ \Omega$  nebo 10 W pro zátěž  $4\ \Omega$  na kanál. Pro realizaci zesilovače byla zvolena topologie typu poloviční most, aby mohl zesilovač pracovat v režimu stereo, tedy samostatný levý a pravý kanál.

V praktické části diplomové práce jsou popsány funkce, vlastnosti a parametry integrovaného obvodu zesilovače, rozpis jednotlivých pinů a zásady bezpečné manipulace se součástkami citlivými na elektrostatický výboj.

V kapitole 10 se dostáváme k samotnému návrhu zesilovače. Kapitola obsahuje kompletní elektronické schéma s podrobným popisem účelu použití elektronických součástek v zesilovači. Součástí schématu je taktéž rozpis použitých součástek – BOM (Bill of material).

Kapitola 11 obsahuje informace o návrhu desky plošného spoje pro vrchní i spodní stranu DPS. Pro layout (návrh DPS) byl použit software „Eagle“, který je volně dostupný pro nekomerční účely. Návrh je udělán tak, že na horní straně DPS jsou pouze součástky typu THROUGH-HOLE (kondenzátory, RCA konektory a svorkovnice). Po celé ploše je vylitý polygon s potenciálem země (GND), přičemž výhody tohoto řešení jsou v této kapitole popsány.

Na spodní straně DPS se nacházejí pouze součástky typu SMD, většinou v provedení velikosti pouzdra 0603. Je zde umístěn i výstupní filtr typu dolní propust, který je sestaven ze součástek LC (cívky a kondenzátoru). Propojení jednotlivých komponentů je řešeno spíše pomocí vylitých polygonů než cestami s omezenou šířkou, aby jednotlivá propojení měla co nejmenší odpor. V případě zahřívání některého z komponentů je tak zajištěno i dodatečné chlazení.

Pro pájení součástek bylo využito jak klasické mikropájký s cínem, tak v případě malých SMD součástek bylo pájení provedeno pomocí horkovzdušné pistole s pájecí pastou.

Oživení obvodu proběhlo napoprvé bez jakýchkoliv problémů. Nicméně na zdroji napájení bylo nastaveno při prvním oživování obvodu proudové omezení několik miliampér z důvodu, že by se na desce plošného spoje vyskytoval zkrat.

Výstupem diplomové práce jsou naměřené hodnoty a grafy. Jedná se o graf frekvenční charakteristiky zesilovače a graf závislosti výstupního výkonu na napájecím napětí pro zátěž 4,7 i 9,7  $\Omega$ . Dále byl změřen přeslech mezi kanály, který má hodnotu větší než 45 dB při frekvenci generátoru 1 kHz. Provozní napětí zesilovače je od 8,5 V.

Vypočítaný výkon z naměřených hodnot je nižší než uvádí výrobce. Je to zapříčiněno tím, že byly použity trochu vyšší hodnoty výkonových odporů a zejména z důvodu odečtu měření při nulovém zkreslení signálu. Výkonové hodnoty z datasheetu jsou uváděny pro zkreslení 10 %. V domácích podmínkách byl pak zesilovač připojen na reproduktory a i výkon o hodnotě 5 W dokáže velmi dobře ozvučit středně velkou místnost.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Amplifier Classes. *Electronics Tutorials* [online]. 1999 – 2015 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html>
- [2] Výkonový zesilovač. *ACOUSTIC ELECTRIC* [online]. 2005 - 2015 [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://nf.duseknet.com/vykon.htm>
- [3] ŠTÁL, Petr. *Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D: [základní principy a konstrukce zesilovače]*. 1. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 198 s. ISBN 978-80-7300-230-5.
- [4] Class D Audio Amplifier Basics. *Infineon Technologies* [online]. 2005 [cit. 2015-04-16]. Dostupné z: <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-1071.pdf>
- [5] GAALAAS, Eric. *Class D Audio Amplifiers: What, Why, and How* [online]. 2006 [cit. 2015-05-17]. Dostupné také z: [http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/40-06/class\\_d.pdf](http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/40-06/class_d.pdf)
- [6] Amplifier Classes C to H. *Learn about electronics* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.learnabout-electronics.org/Amplifiers/amplifiers56.php>
- [7] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 495 s. ISBN 80-730-0059-8.
- [8] KOTISA, Zdeněk. *NF zesilovače 1*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2001, 95 s. ISBN 80-730-0030-X.
- [9] KOTISA, Zdeněk. *NF zesilovače 2*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 95 s. ISBN 80-730-0053-9.
- [10] KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 216 s. ISBN 80-730-0202-7.
- [11] VACULÍKOVÁ, Polina a Emil VACULÍK. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů: Praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vřrušení*. 1. vyd. Praha: Grada, 1998, 487 s. ISBN 80-716-9568-8.
- [12] TEXAS INSTRUMENTS. *15-W Stereo Class-D Audio Power Amplifier* [online]. 2007 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpa3122d2.pdf>

- [13] Class B Power Amplifiers. *Learn about electronics* [online]. 2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.learnabout-electronics.org/Amplifiers/amplifiers53.php>
- [14] Analog-digi. In: Corey Padveen's Digital Business Blog [online]. Corey Padveen 2015. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.coreypadveen.com/wp-content/uploads/2015/01/Analog-digi.png>
- [15] Quantization. In: Tutorials point [online]. 2015. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: [http://www.tutorialspoint.com/data\\_communication\\_computer\\_network/images/quantization.jpg](http://www.tutorialspoint.com/data_communication_computer_network/images/quantization.jpg)
- [16] Pulse width modulation. In: Prototype Robotics [online]. 2015. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <https://prototyp robotics.com/system/images/3/large/pwm.jpg>
- [17] Střída signálu. In: DH servis [online]. 2002-2015. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.dhservis.cz/psm.htm>
- [18] PMW-signal. In: Servowatt [online]. Corey Padveen 2015. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: [http://www.servowatt.de/cms/download/1258467182\\_PWM-Signal.jpg](http://www.servowatt.de/cms/download/1258467182_PWM-Signal.jpg)
- [19] Nejmenší zesilovač třídy D. *hw.cz* [online]. 2010 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/novinky/nejmensi-zesilovac-tridy-d.html>
- [20] ESD. *Safetyshop* [online]. 2003 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: [http://www.safetyshop.cz/data/products/01431\\_3fs2ffv0.gif](http://www.safetyshop.cz/data/products/01431_3fs2ffv0.gif)
- [21] Tipa. *Vše pro elektroniku* [online]. 1995 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.tipa.eu/fotocache/bigadd/06510012-1.jpg>
- [22] Pájecí pistole. *GME* [online]. 2015 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/800x600/730/590/horkovzdusna-stanice-pro-skit-ss-969b-obrazek-1.jpg>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

BOM	„Bill Of Material“ (výpis seznamu součástek)
BTL	Bridge Tied Load – jiné označení pro Plný most
dB	Jednotka výkonu v decibelech
DPS	Deska plošného spoje
GND	Nulový potenciál – odvádění záporného náboje
EMI	Elektro-magnetická interference (rušení)
ESD	Electrostatic discharge (Elektrostatický výboj)
Hz	Jednotka kmitočtu = 1 Hertz
kHz	Jednotka kmitočtu = 1000 Hertz
PWM	„Pulse Width Modulation“ (Pulzně šířková modulace)
Vcc	Napájecí napětí
Vout	Výstupní napětí
P	Výkon
SMD	Surface mount device (součástka pro povrchovou montáž plošných spojů)
Vcc	Napájecí napětí
V	Jednotka napětí [volt]
W	Jednotka výkonu [watt]
$\Omega$	Jednotka elektrického odporu [ohm]

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obrázek 1 – Zapojení zesilovače v třídě A [1]</i> .....	13
<i>Obrázek 2 – Zapojení zesilovače ve třídě B [1]</i> .....	13
<i>Obrázek 3 – Přechodové zkreslení zesilovače třídy B [13]</i> .....	14
<i>Obrázek 4 – Zapojení zesilovače ve třídě AB [1]</i> .....	15
<i>Obrázek 5 – Zapojení zesilovače ve třídě C [1]</i> .....	15
<i>Obrázek 6 – Blokové schéma zesilovače ve třídě D [1]</i> .....	16
<i>Obrázek 7 - Účinnosti jednotlivých tříd zesilovačů [1]</i> .....	16
<i>Obrázek 8 - Rozdělení zesilovače třídy D [3]</i> .....	17
<i>Obrázek 9 - Analogový signál [14]</i> .....	18
<i>Obrázek 10 - Digitální signál [14]</i> .....	18
<i>Obrázek 11 - Vzorkování a kvantizace [15]</i> .....	19
<i>Obrázek 12 - Tvar PWM signálu [16]</i> .....	20
<i>Obrázek 13 - Blokové schéma zesilovače s průběhem signálu [3]</i> .....	21
<i>Obrázek 14 - Idealizovaný průběh napětí</i> .....	23
<i>Obrázek 15 - Střída signálu [17]</i> .....	23
<i>Obrázek 16 - Zapojení do polovičního mostu [3]</i> .....	24
<i>Obrázek 17 - Zapojení do plného mostu [3]</i> .....	25
<i>Obrázek 18 – Tvar PWM signálu po průchodu filtru</i> .....	27
<i>Obrázek 19 - Pouzdro nejmenšího zesilovače TPA2011D1 [19]</i> .....	29
<i>Obrázek 20 - Blokové schéma zesilovače TPA2011D1 [19]</i> .....	29
<i>Obrázek 21 - Rozměry zesilovače TPA2011D1 [19]</i> .....	29
<i>Obrázek 22 - Integrovaný obvod TPA3122D2 [12]</i> .....	31
<i>Obrázek 23 - Rozměry integrovaného obvodu TPA3122D2 [12]</i> .....	32
<i>Obrázek 24 - Zjednodušené elektronické schéma obvodu [12]</i> .....	32
<i>Obrázek 25 - Rozmístění pinů zesilovače [12]</i> .....	33
<i>Obrázek 26 – Ukázka varovné cedule ESD prostoru [20]</i> .....	36
<i>Obrázek 27 - Elektronické schéma zapojení</i> .....	37
<i>Obrázek 28 – Vrchní strana layoutu</i> .....	39
<i>Obrázek 29 – Spodní strana layoutu</i> .....	40
<i>Obrázek 30 - Rozmístění součástek - horní strana PCB</i> .....	41
<i>Obrázek 31 - Rozmístění součástek - spodní strana PCB</i> .....	41
<i>Obrázek 32 – Mikropájka [21]</i> .....	42



---

<i>Obrázek 33 – Horkovzdušná pájecí pistole [22] .....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 34 – Detail pájení SMD součástek .....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 35 - Finální podoba zesilovače - celkový pohled .....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 36 - Finální podoba zesilovače - pohled na spodní stranu .....</i>	<i>44</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1 - Funkce jednotlivých pinů integrovaného obvodu [12].....</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 2 – Hodnoty zisku pro nastavení pinů funkce GAIN [12].....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 3 – Hodnoty výstupního filtru [12] .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 4 – Hodnoty kondenzátoru pro filtraci stejnosměrné složky [12] .....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 5 – Pracovní podmínky zesilovače.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 6 - Seznam použitých součástek - BOM.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 7 – Naměřené hodnoty frekvenční charakteristiky pro zátěž 9,4 <math>\Omega</math>.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 8 - Naměřené hodnoty frekvenční charakteristiky pro zátěž 4,7 <math>\Omega</math>.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 9 – Naměřené hodnoty pro závislost výkonu na napájecím napětí pro zátěž 9,4 <math>\Omega</math> .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 10 - Naměřené hodnoty pro závislost výkonu na napájecím napětí pro zátěž 4,7 <math>\Omega</math> .....</i>	<i>50</i>

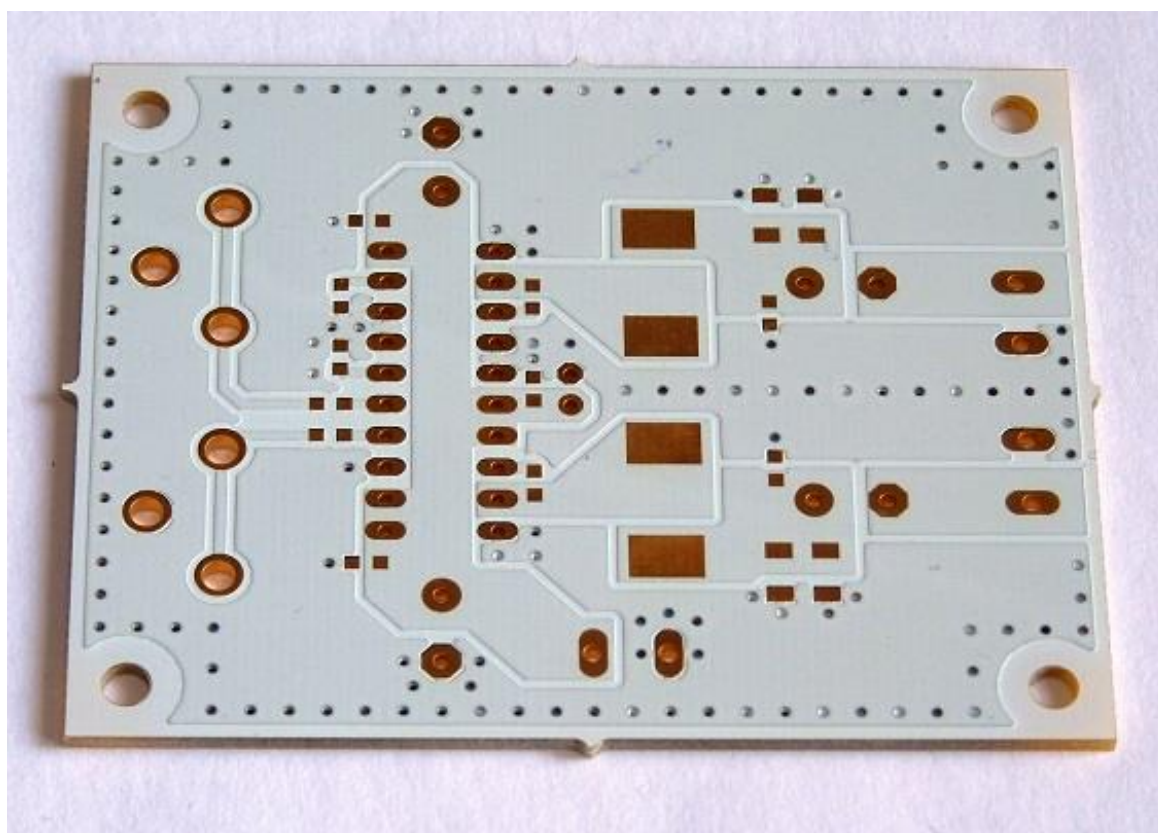
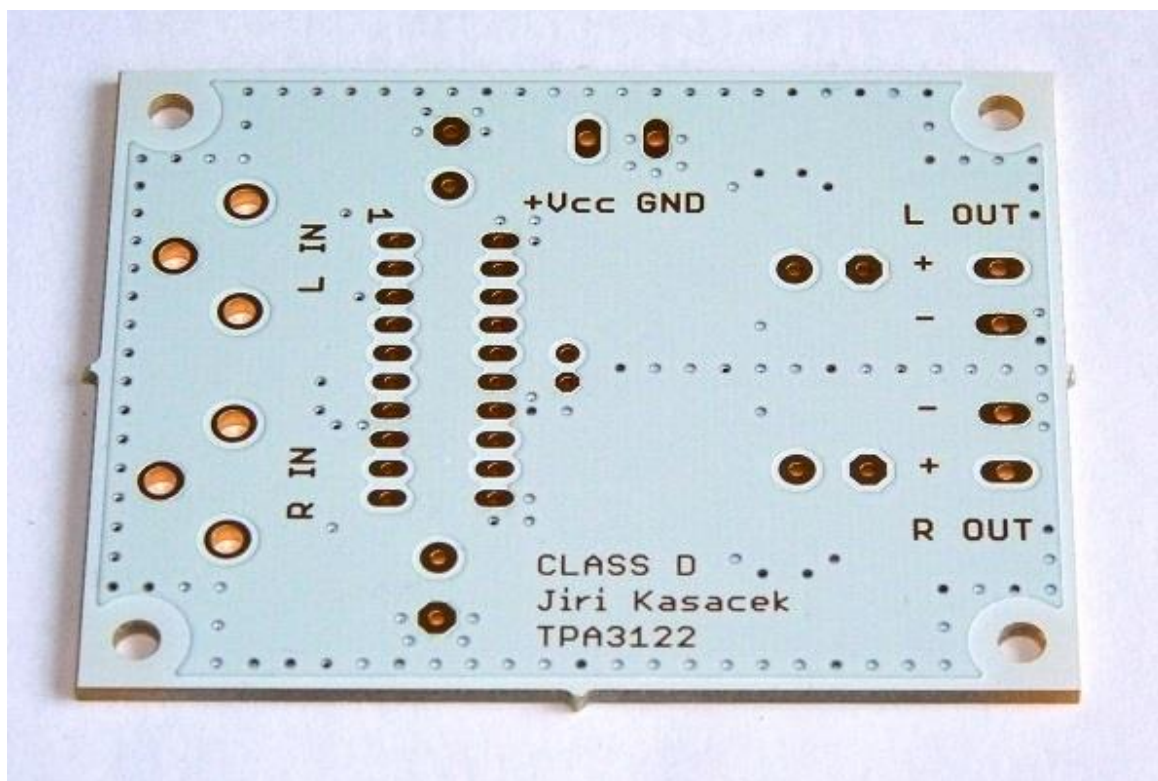
**SEZNAM GRAFŮ**

<i>Graf 1 - Frekvenční charakteristika pro zátěž <math>9,4 \Omega</math> .....</i>	<i>45</i>
<i>Graf 2 - Frekvenční charakteristika pro zátěž <math>4,7 \Omega</math> .....</i>	<i>46</i>
<i>Graf 3 - Závislost výstupního výkonu na napájecím napětí pro zátěž <math>9,4 \Omega</math> .....</i>	<i>48</i>
<i>Graf 4 - Závislost výstupního výkonu na napájecím napětí pro zátěž <math>4,7 \Omega</math> .....</i>	<i>49</i>

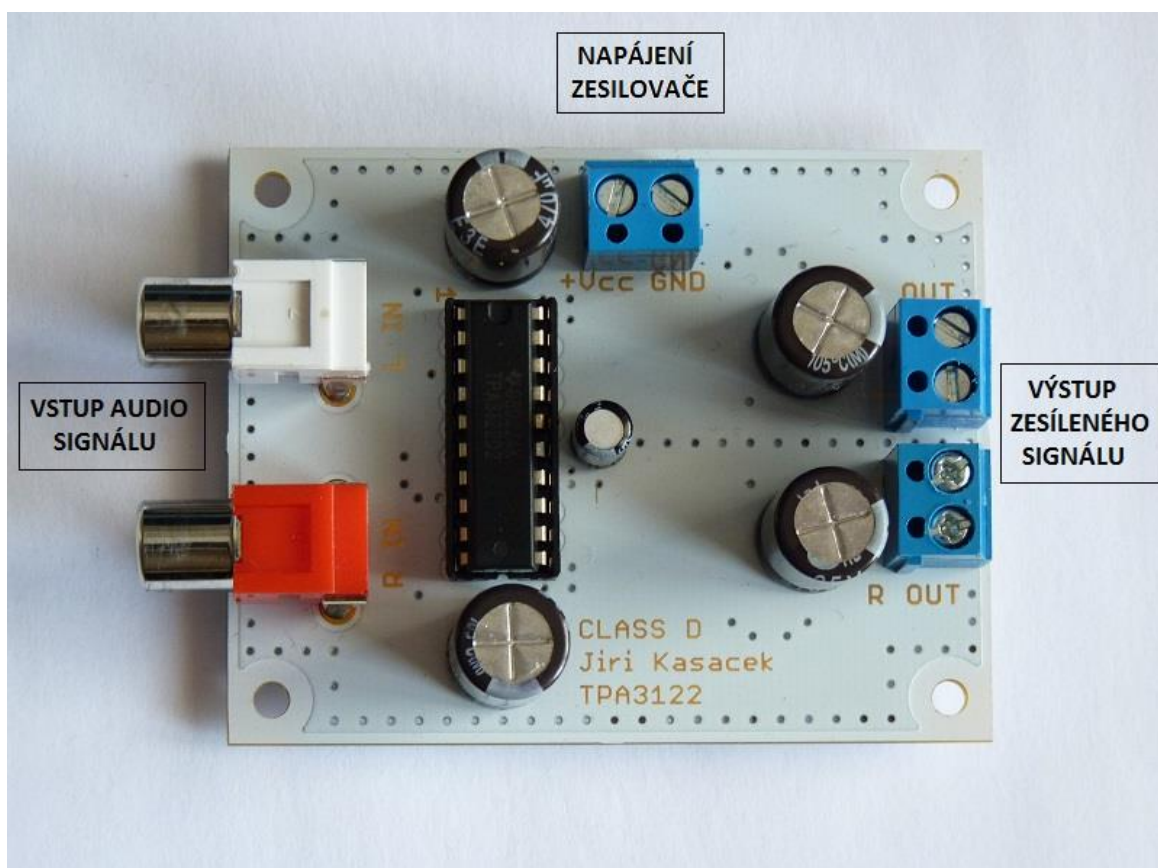
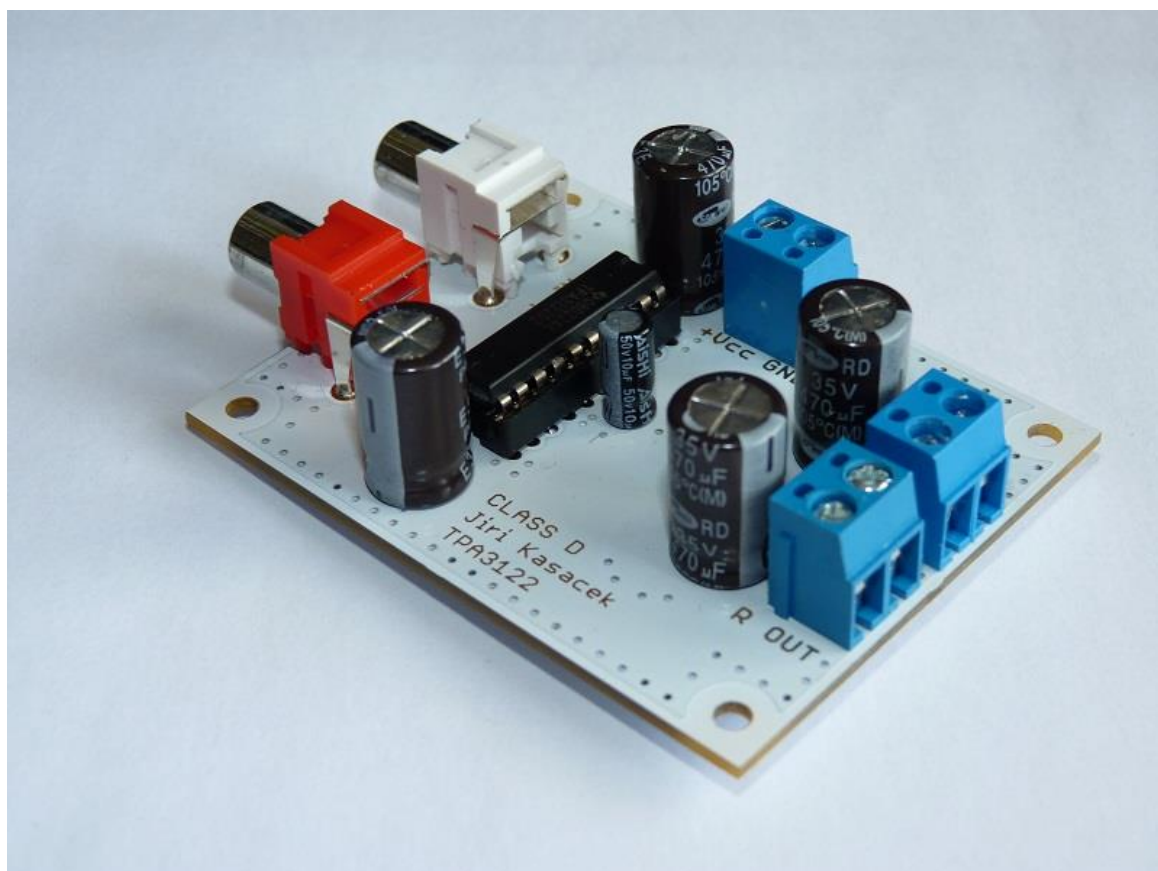
## SEZNAM PŘÍLOH

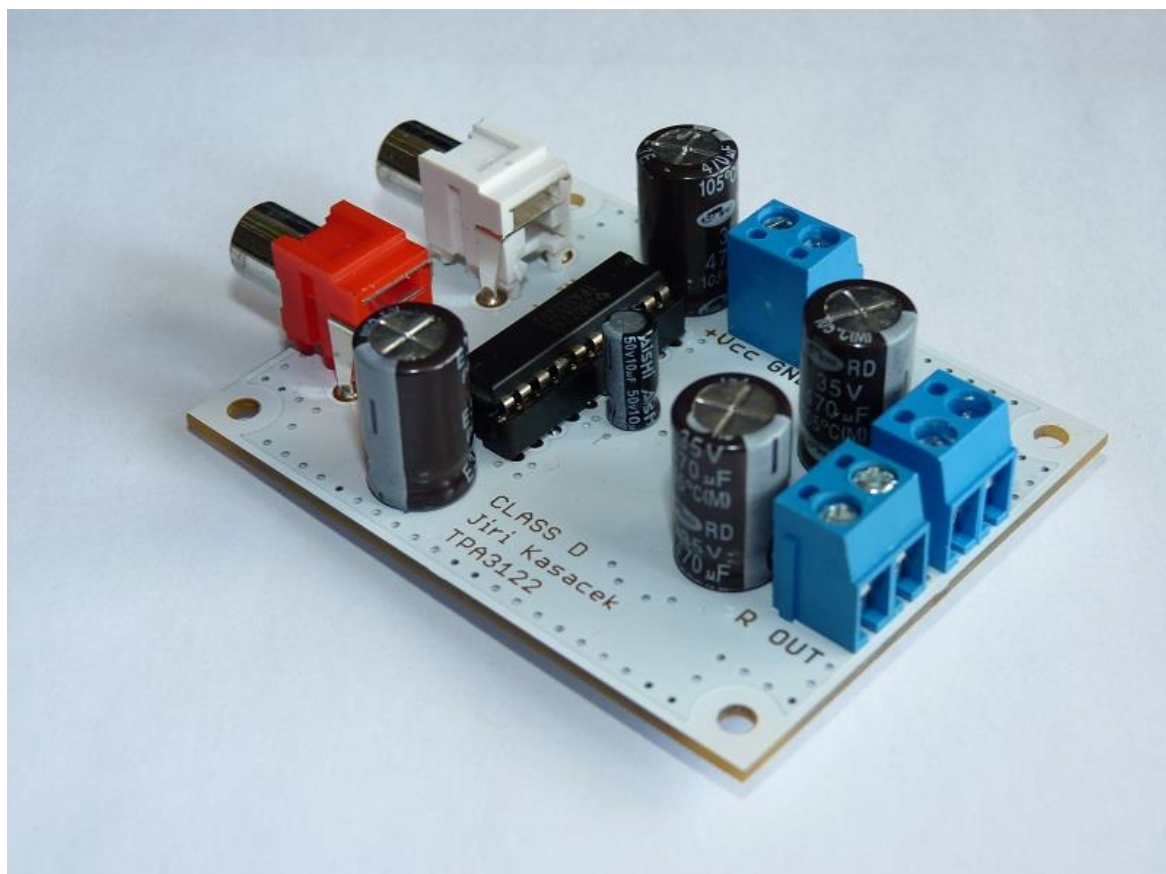
- [I] OBRÁZKY NEOSAZENÝCH DPS
- [II] FINÁLNÍ PODOBA ZESILOVAČE
- [III] VÝKONOVÉ REZISTORY
- [IV] VNITŘNÍ STRUKTURA ČIPU TPA3122D2

## PŘÍLOHA P I: OBRÁZKY NEOSAZENÝCH DPS



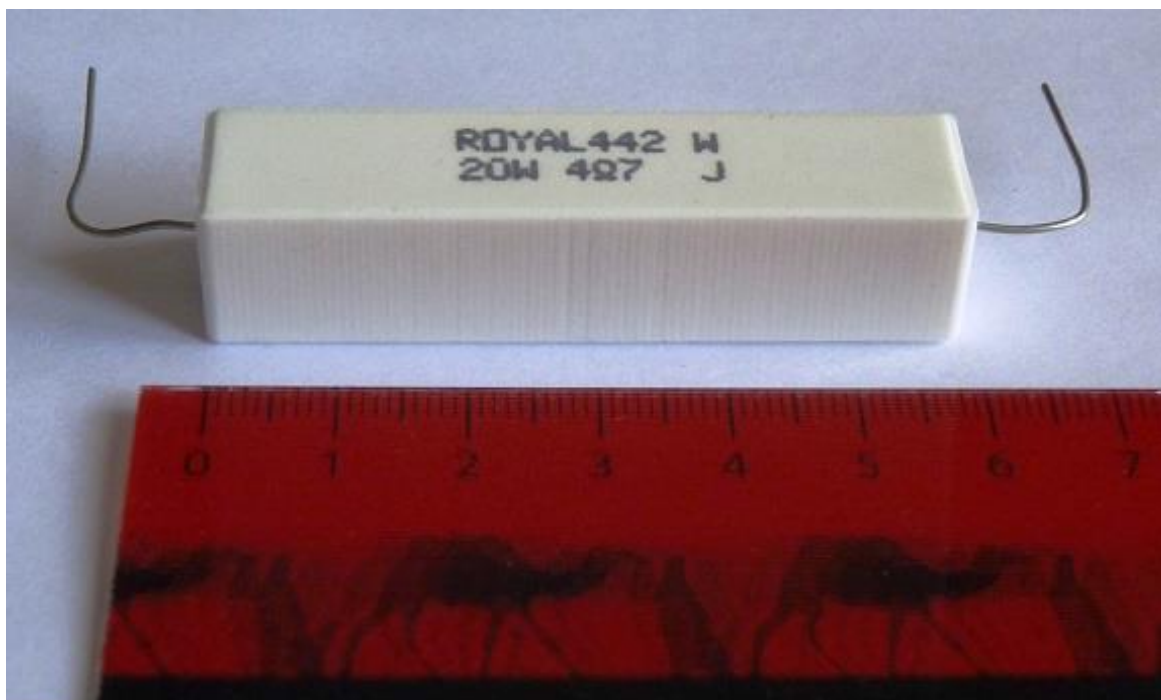
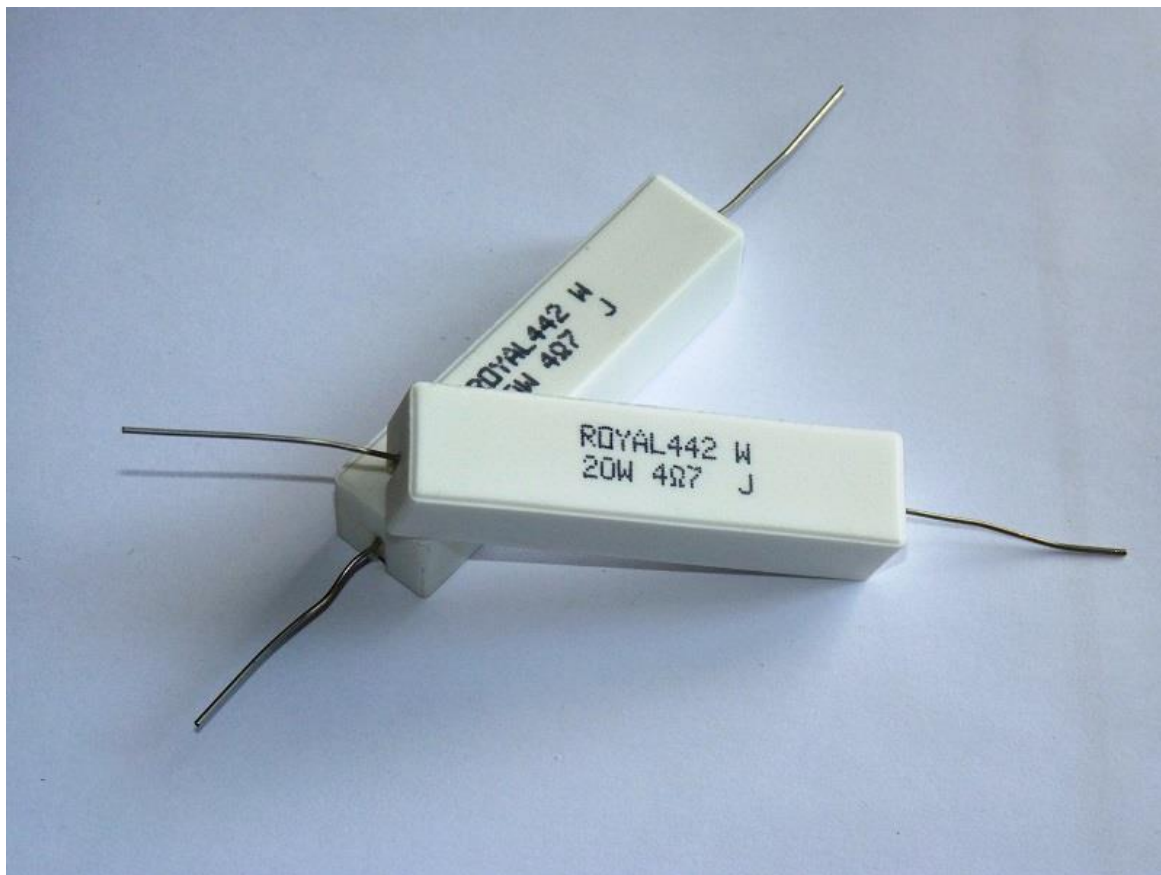
## PŘÍLOHA P II: FINÁLNÍ PODOBA ZESILOVAČE







### PŘÍLOHA P III: VÝKONOVÉ REZISTORY





## PŘÍLOHA P IV: VNITŘNÍ STRUKTURA ČIPU TPA3122D2

