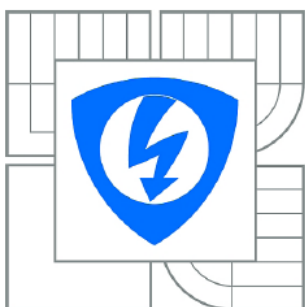


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÍZKOFREKVENČNÍ VÝKONOVÝ ZESILOVAČ VE TŘÍDĚ D S PŘEPÍNAČEM VSTUPŮ

CLASS D AUDIO POWER AMPLIFIER WITH INPUT SELECTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

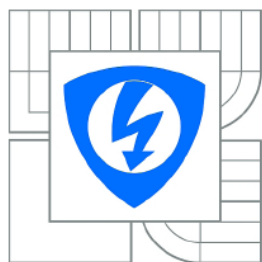
TOMÁŠ KRMELA

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. TOMÁŠ KRATOCHVÍL, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Tomáš Krmela
Ročník: 3

ID: 111076
Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Nízkofrekvenční výkonový zesilovač ve třídě D s přepínačem vstupů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete obvodové zapojení výkonového zesilovače 2 x 25 W ve třídě D (doporučeno např. TDA 7490) do vámi zvolené zátěže, který by obsahoval přepínač vstupů a korekční předzesilovač. Zapojení dále doplňte samostatným napájecím zdrojem. V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek, návrh mechanického uspořádání atd.). Navržené zařízení realizujte formou funkčního prototypu a experimentálním měření v laboratoři nízkofrekvenční elektroniky ověřte jeho činnost. Výsledky měření zpracujte formou standardního protokolu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN - technická literatura, 2003.
- [2] ŠTÁL, P. Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D - základní principy a konstrukce. Praha: BEN - technická literatura, 2008.
- [3] ST Microelectronics [online]. Datasheet TDA7490 - 25W + 25W Stereo Class-D Amplifier. ST Microelectronics, Inc., 2005 - [cit. 15. 5. 2008]. Dostupné na [www: http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/6871.pdf](http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/6871.pdf)

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 28.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Tomáš Krmela
Bytem: Heyrovského 856, Třebíč, 674 01
Narozen/a (datum a místo): 19. Března 1988 v Třebíči
(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Nízkofrekvenční výkonový zesilovač ve třídě D s přepínačem vstupů

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracování díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 28. května 2010

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Obsahem této bakalářské práce je nízkofrekvenční zesilovač ve třídě D s přepínačem vstupů a korekčním předzesilovačem. Předzesilovače je tvořen obvodem TDA1524A od firmy Philips. Výhodou tohoto obvodu je použití jednoduchých potenciometrů, a díky řízení všech korekcí napětím se neprojeví šum potenciometrů při ladění. Jádrem výkonového stupně je obvod TDA7490 od firmy STmicroelectronics. Je to stereofonní výkonový zesilovač ve třídě D s výkonem 2 x 25W.

Klíčová slova

Zesilovač, korekční předzesilovač, třída D, PWM

Abstract

This thesis deals with a Class D low-frequency amplifier in class D with an input selector and a tone preamplifier. The preamplifier consists of a Philips TDA1524A electrical circuit. The advantages of this circuit are the usage of simple potentiometers and the absence of potentiometer electronic noise when tuning due to the voltage control of corrections. Core power module is a STmicroelectronics TDA7490 electrical circuit. It is a stereophonic 2 x 25W Class D audio power amplifier.

KEYWORDS

Amplifier, correction preamplifier, class D, PWM

KRMELA, T. *Nízkofrekvenční výkonový zesilovač ve třídě D s přepínačem vstupů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 19 s., 7 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Nízkofrekvenční výkonový zesilovač ve třídě D přepínačem vstupů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 28. května 2010

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 28. května 2010

.....
podpis autora

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Třídy zesilovačů	1
2 Třída D.....	2
2.1 Princip činnosti	3
2.1.1 Modulátor	3
2.1.2 Koncový stupeň.....	4
2.1.3 Výstupní filtr	5
3 Konstrukce.....	6
3.1 Korekční předzesilovač	6
3.2 Koncový stupeň zesilovače ve třídě D.....	7
3.3 Přepínač vstupů	9
3.4 Zdroj stejnosměrného napětí.....	11
4 Naměřené parametry	12
4.1 Korekční předzesilovač	12
4.1.1 Naměřené grafické průběhy	12
4.1.2 Porovnání s údaji výrobce	16
4.2 Výkonový zesilovač ve třídě D.....	17
4.2.1 Naměřené grafické průběhy	17
4.2.2 Porovnání s údaji výrobce	18
5 Literatura.....	19
6 Přílohy.....	20
6.1 Deska korekčního předzesilovače	20
6.2 Seznam součástek korekčního předzesilovače:	21
6.3 Deska výkonového zesilovače	22
6.4 Seznam součástek výkonového zesilovače:	23
6.5 Deska přepínače vstupů:.....	25
6.6 Seznam součástek přepínače vstupů:.....	26
6.7 Deska zdroje ss napětí:	26
6.8 Seznam součástek zdroje ss napětí:.....	27

Seznam obrázků

Obr. 2.1	Základní dělení audio zesilovačů pracujících ve třídě D (převzato z [1]).	2
Obr. 2.2	Blokové schéma audio systému s výkonovým zesilovačem pracujícím ve třídě D (převzato z [1]).	3
Obr. 2.3	Průběhy na vstupu a výstupu komparátoru.	4
Obr. 2.4	půlmůstkové zapojení tranzistorů (převzato a upraveno z [1]).	4
Obr. 3.1	Blokové schéma zesilovače.	6
Obr. 3.2	Schéma korekčního předzesilovače (převzato a upraveno z [2]).	7
Obr. 3.3	Zapojení koncového stupně zesilovače (převzato z [3]).	8
Obr. 3.4	Simulace přenosu výstupního filtru pro zátěž 4Ω s vyznačeným mezním kmitočtem a útlumem pro modulační kmitočet ($L = 15 \mu\text{H}$; $C = 680 \text{ nF}$)	8
Obr. 3.5	Schéma prepínače vstupů	9
Obr. 3.6	Znázornění funkce obvodu 4017 (CLK představuje impulzy z tlačítka)	10
Obr. 3.7	Schéma zdroje stejnosměrného napětí, převzaté z [5], [6], [7].	11
Obr. 4.1	Modulová kmitočtová charakteristika bez korekcí. $U_1 = 0,3 \text{ V}$	12
Obr. 4.2	Modulová kmitočtová charakteristika s maximální a minimální korekcí. $U_1 = 0,3 \text{ V}$	13
Obr. 4.3	Závislost výstupní úrovně levého a pravého kanálu na natočení potenciometru α .	13
Obr. 4.4	Průběh nastavení hlasitosti. $U_1 = 0,3 \text{ V}$; $f = 1 \text{ kHz}$; bez korekcí	14
Obr. 4.5	Průběh nastavení hloubek. $U_1 = 0,3 \text{ V}$; $f = 40 \text{ Hz}$.	14
Obr. 4.6	Průběh nastavení výšek. $U_1 = 0,3 \text{ V}$; $f = 16 \text{ kHz}$.	15
Obr. 4.7	Závislost THD+N na výstupním napětí pro různé velikosti vstupního napětí. $f=1 \text{ kHz}$.	15
Obr. 4.8	Závislost THD + N na frekvenci pro různé velikost vstupní napětí. Při zesílení 0 dB.	16
Obr. 4.9	Modulová kmitočtová charakteristika vztažení k 1 kHz; $z = 4\Omega$	17
Obr. 4.10	Závislost THD+N na výstupním výkonu; $z = 4\Omega$	17
Obr. 6.1	Deska plošného předzesilovače spoje strana spojů M 1:1, rozměr: 80 x 51mm	20
Obr. 6.2	Rozložení součástek na desce plošného spoje předzesilovače M 1:1, rozměr: 80 x 51mm	20
Obr. 6.3	Foto korekčního předzesilovače.	21
Obr. 6.4	Deska plošného výkonového zesilovače spoje strana spojů M 1:1, rozměr: 100 x 80 mm	22
Obr. 6.5	Deska plošného spoje výkonového zesilovače strana součástek M 1:1, rozměr: 100 x 80 mm	22
Obr. 6.6	Rozložení součástek na desce plošného spoje výkonového zesilovače M 1:1, rozměr: 100 x 80 mm	23
Obr. 6.7	Foto výkonového zesilovače	24
Obr. 6.8	Foto výkonového zesilovače	24
Obr. 6.9	Deska plošného spoje strana spojů M 1:1, rozměr: 62 x 65 mm	25
Obr. 6.10	Rozložení součástek na desce plošného spoje M 1:1, rozměr: 62 x 65 mm	25
Obr. 6.11	Deska plošného spoje zdroje stejnosměrného napětí strana spojů M 1:1, rozměr: 86 x 69 mm	26

Obr. 6.12 Rozložení součástek na desce plošného spoje zdroje stejnosměrného napětí M 1:1, rozměr: 86 x 69 mm27

Seznam tabulek

Tab. 1.1	Porovnání běžně používaných tříd zesilovačů.....	2
Tab. 2.1	porovnání vlastností cívek v závislosti na druhu jádra (převzato z (1))......	5
Tab. 4.1	Porovnání katalogových a dosažených parametrů. Čerpáno z (2)	16
Tab. 4.2	Porovnání katalogových a dosažených parametrů. Čerpáno z (3)	18

1 Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem výkonového zesilovače ve třídě D. Třída D má několik výhod. Oproti třídě A, B, AB má malé napájecí napětí, velkou účinnost, malé nároky na chlazení a tudíž i mechanické rozměry a cenu. Nevýhodou je větší zkreslení.

V dnešní době je několik tříd zesilovačů, které se liší nejen zkreslením, účinností, ale i principem funkce a konstrukcí. První zesilovače byli elektronkové. Ty měly velkou spotřebu, protože potřebovaly velké napájecí napětí, a malou účinnost. S objevem polovodičů a polovodičových transistorů se začali vyrábět zesilovače v různých třídách. Nejprve byli konstruováni s bipolárními transistory. Dnes se používají i unipolární transistory a především integrované obvody.

Při výběru obvodu pro výkonový stupeň je nutné zohlednit jejich dostupnost. Obvody zesilovačů v třídě D se většinou nedají koupit jako běžné obvody a musí se objednávat. Běžně se dají sehnat jen sluchátkové zesilovače s výkonem do 2W. Jeden z dostupných obvodů je TDA7490 od firmy STMicroelectronics s výkonem 2x25W.

1.1 Třídy zesilovačů

Zesilovač ve třídě A je tvořen jedním transistorem, který má pracovní bod uprostřed své lineární charakteristiky, transistorem pořád teče proud. Díky tomu má malé zkreslení. V dnešní době se používají spíše jako předzesilovače, protože mají malou účinnost a tím pádem velké energetické nároky.

Zesilovač ve třídě B je tvořen dvěma transistory, kde každý zesiluje jednu půlvlnu vstupního signálu. Pracovní bod je umístěn tak, aby prvkem v klidu netekl proud. Proto má zesilovač přechodové zkreslení.

Třída AB je kompromis mezi třídou A a B. Obsahuje dva transistory s pracovním bodem nastaveným tak, aby v klidu transistorem tekla malý proud. Tím se zmenší zkreslení, ale i účinnost.

Třída C má navíc zavedené předpětí, které transistor drží déle zavřený. Zesilovač má díky tomu velkou účinnost, ale i zkreslení. Proto se v nízkofrekvenční technice nepoužívá.

Mezi moderní zesilovače patří zesilovače ve třídě D. Ty používají transistory ve spínacím režimu. Nízko frekvenční signál zpracovává pulzní šířkovou modulací. Tato třída má velkou účinnost a vyšší zkreslení.

Zesilovač ve třídě G vznikne úpravou napájení zesilovače ve třídě AB. Napájení transistorů se skokově mění v závislosti na velikosti vstupního signálu. Výhodou je vyšší účinnost. Nevýhodou je složitost zapojení.

Třída H je téměř totožná s třídou G, ale napájecí napětí kopíruje vstupní signál. Výhodou je ještě větší účinnost. Nevýhodou je ještě složitější zapojení než u G.

Tab. 1.1 Porovnání běžně používaných tříd zesilovačů

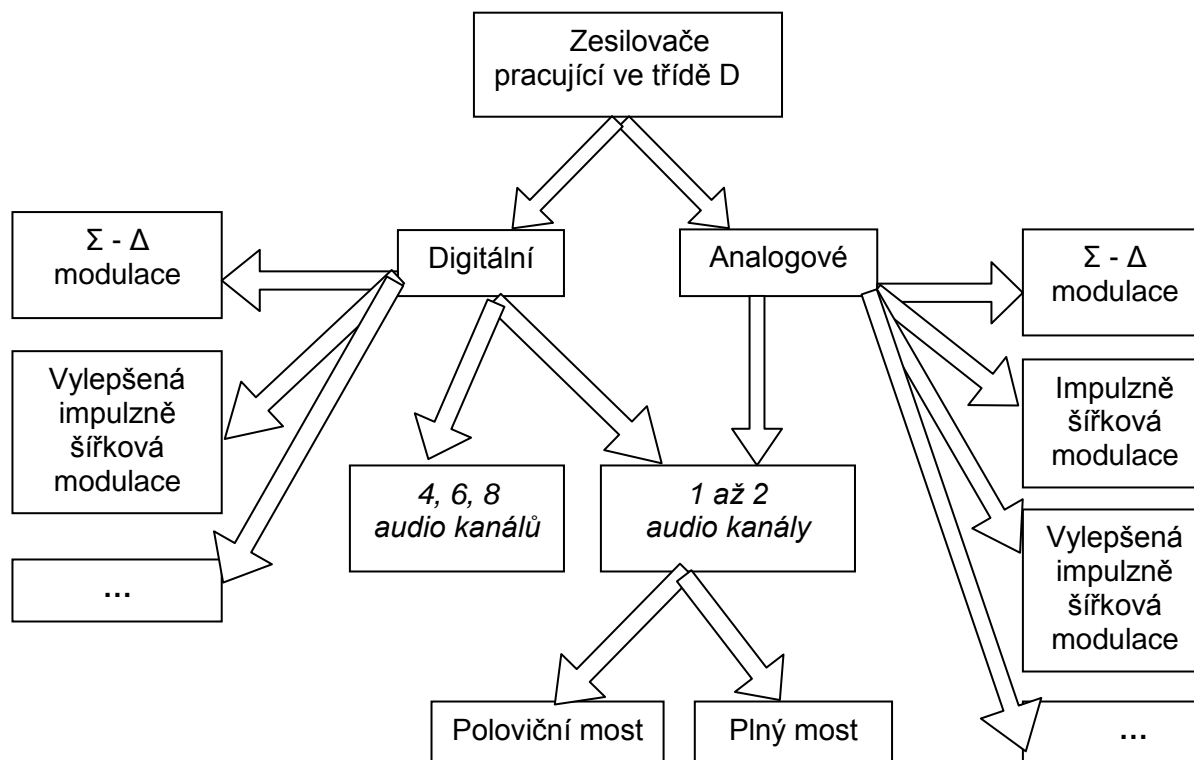
Třída	A	AB	D	G,H
Teoretická účinnost	50%	78,5%	> 90%	> 85%
THD+N	< 0,1%	0,1 – 1%	> 1%	0,1 – 1%

Účinnost v praxi je menší. Zejména u třídy A a AB je účinnost několikanásobně menší. Zkreslení je vždy závislé na použitých součástkách a kvalitě návrhu.

2 Třída D

Zesilovače ve třídě D můžeme dělit z několika hledisek, jak ukazuje

Obr. 2.1. Digitální zesilovače umožňují zpracovat přímo digitální signál. S analogovými zesilovači mají shodný způsob zpracování signálu, navíc ale obsahují A/D převodník. Jejich výhodou je malá citlivost na stárnutí součástek, zpracování více kanálového signálu a díky řízení signálu signálovým procesorem snadné nastavení ekvalizéru a mezních kmitočtů. Proto se často využívají u DVD (Digital Versatile Disc) přehrávačů a ve zvukových kartách PC.



Obr. 2.1 Základní dělení audio zesilovačů pracujících ve třídě D (převzato z [1]).

Mezi výhody analogových zesilovačů pracujících ve třídě D patří dobré audio parametry. Malé harmonické zkreslení, malý přeslech mezi kanály... Malý napájecí zdroj, jednoduché zapojení, velká účinnost a malé nároky na chlazení. Z toho plyne, že celé konstrukce zesilovače má malé rozměry.

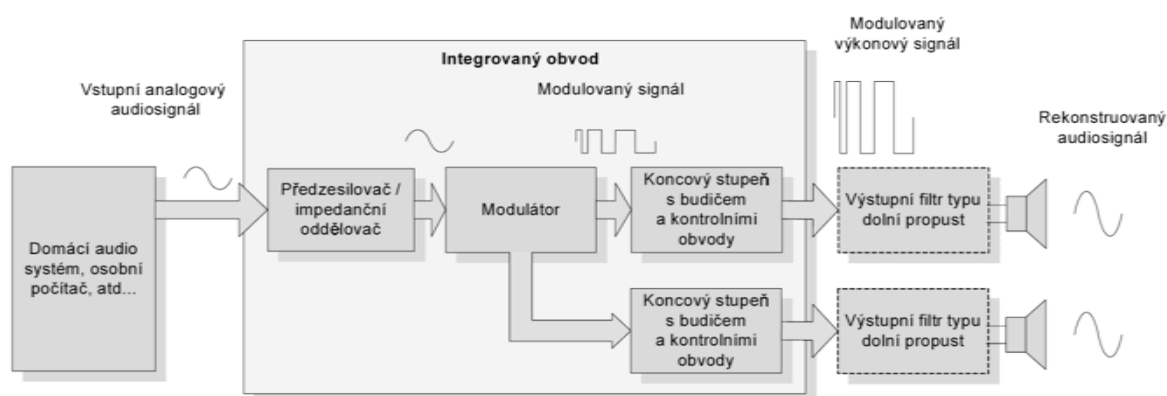
2.1 Princip činnosti

Každý výrobce používá jiný patentově chráněný algoritmus zpracování signálu. Zde popisovaný princip činnosti je vztažen pro použitý obvod TDA7490, od jiných obvodů pracujících ve třídě D se může lišit. Právě zpracováním signálu a zapojením koncových tranzistorů [3].

Obecné blokové zapojení zesilovače ve třídě D je na Obr. 2.2. Na vstup zesilovače můžeme připojit libovolný zdroj audio signálu (DVD, CD (Compact Disc), MP3 přehrávač). Předzesilovač tento signál zesílí a zároveň impedančně oddělí od výkonového stupně.

Modulátor převede vstupní signál na signál vhodný pro řízení spínání výkonových transistorů. Příklad modulací: $\Sigma - \Delta$ modulace, PWM modulace...

V koncovém stupni je modulovaný signál ještě zesílen. Koncový stupeň také obsahuje ochranné obvody proti přehřátí a nadproudovou ochranu.



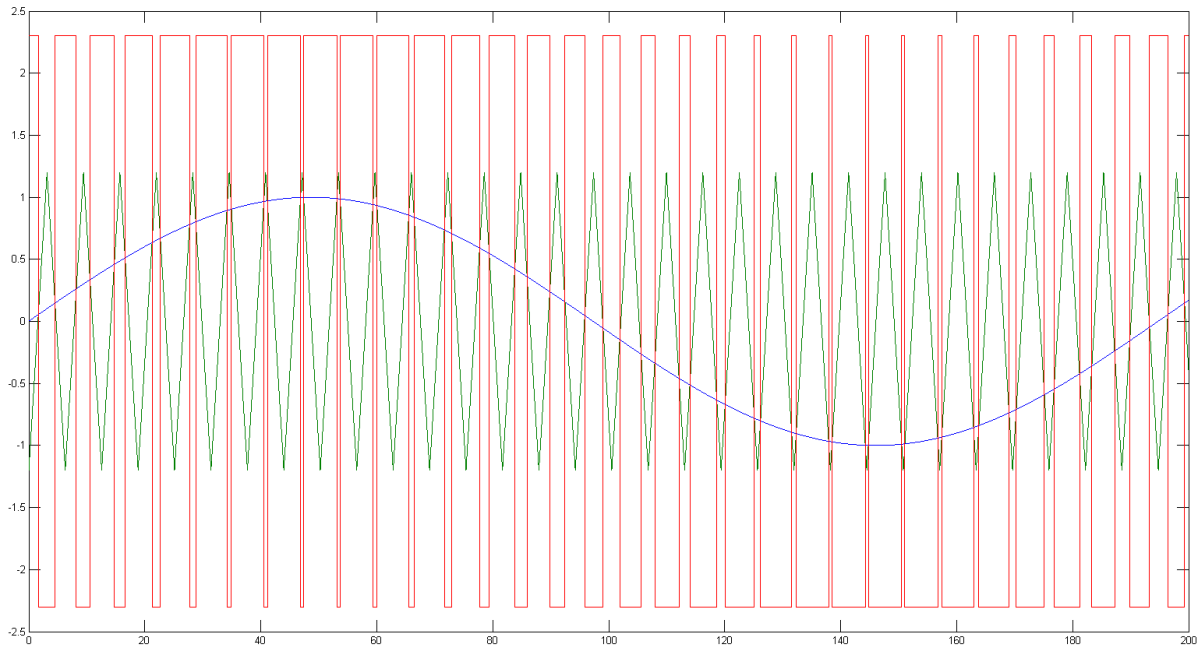
Výstupním filtrem typu dolní propust se z modulovaného signálu získá zesílený vstupní signál.

Obr. 2.2 Blokové schéma audio systému s výkonovým zesilovačem pracujícím ve třídě D (převzato z [1]).

2.1.1 Modulátor

Obvod TDA7490 používá impulzně šířkovou modulaci (PWM - Pulse Width Modulation). PWM modulace je dosaženo komparátorem. Ten porovnává vstupní audio signál se signálem trojúhelníkového průběhu. Tento signál musí být podle vzorkovacího teorému nejméně dvakrát větší než maximální kmitočet vstupního signálu. Tedy v audio pásmu $f_{vz} \geq 40 \text{ Hz}$. Většinou se tato frekvence pohybuje ve stovkách kHz.

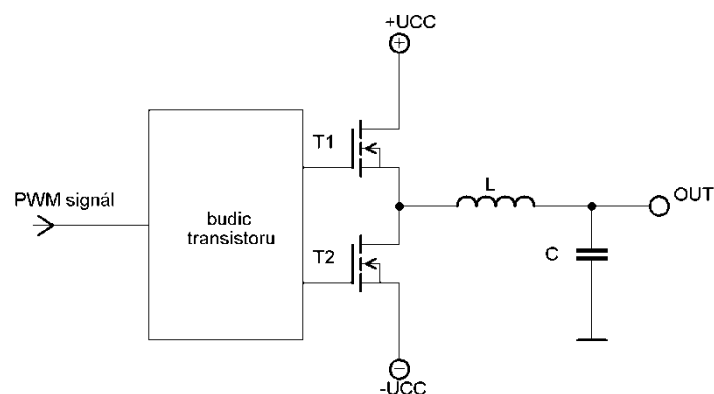
Princip funkce je zobrazen pomocí idealizovaných průběhů signálů v modulátoru na Obr. 2.3. Komparátor je ve vysoké úrovni, je-li vstupní signál větší než trojúhelníkový, a naopak v nízké úrovni, je-li vstupní signál menší než trojúhelníkový. Tímto na výstupu komparátoru dostaneme namodulovaný vstupní signál.



Obr. 2.3 Průběhy na vstupu a výstupu komparátoru.

2.1.2 Koncový stupeň

Koncový stupeň obsahuje budič transistorů a koncové transistory. Transistory jsou nejčastěji můstkového zapojení, nebo půlmůstkového zapojení. Půlmůstkové zapojení je znázorněno na Obr. 2.4. Volba transistorů je závislá na budiči. Transistory mohou být jak bipolární tak unipolární, stejné vodivosti, nebo komplementární.



Obr. 2.4 půlmůstkové zapojení tranzistorů (převzato a upraveno z [1]).

Výkonový stupeň je napájen symetrickým napětím vůči zemi. Transistor T1 připojuje k zátěži kladné napětí a transistor T2 záporné napětí. Mezi sepnutím

aktivního a neaktivního transistoru je malá časová prodleva, která zabraňuje zkratování zdroje.

U pŕlmŕstkového zapojení je nutné zavést zpětnou vazbu. Ta zabraňuje vzniku nežádoucího stejnosměrného napětí na výstupu. To vzniká nedokonalostí symetrie napájecího napětí a nemožností vyrobit dokonale stejné transistory.

2.1.3 Výstupní filtr

Űkolem filtru je z modulovaného signálu opěť získat vstupní zesílený signál. Proto tvoří důležitou část celého zesilovače. Svými parametry ovlivňuje jak účinnost zesilovače tak i jeho audio parametry. Proto je důležité ho dobře navrhnout.

Filtr je tvořen dolní propustí 2. řádu nejčastěji kombinací cívky a kondenzátoru. Je dobré volit fóliový kondenzátor pro spínané zdroje s označením LOW ESR (Equivalent Series Resistance). Ty mají požadované parametry:

- Malý ztrátový činitel $\tan \delta$
- Schopnost pracovat s rychlou změnou napětí
- Vysoký vlastní rezonanční kmitočet
- Malá závislost kapacity na frekvenci
- Malý sériový odpor
- atd.

Na cívku jsou kladeny následující požadavky:

- Nezávislost indukčnosti na velikosti protékaného proudu a kmitočtu
- Nízké ztráty na pracovním kmitočtu
- Lineární magnetizační křivka
- Malé rozměry
- atd.

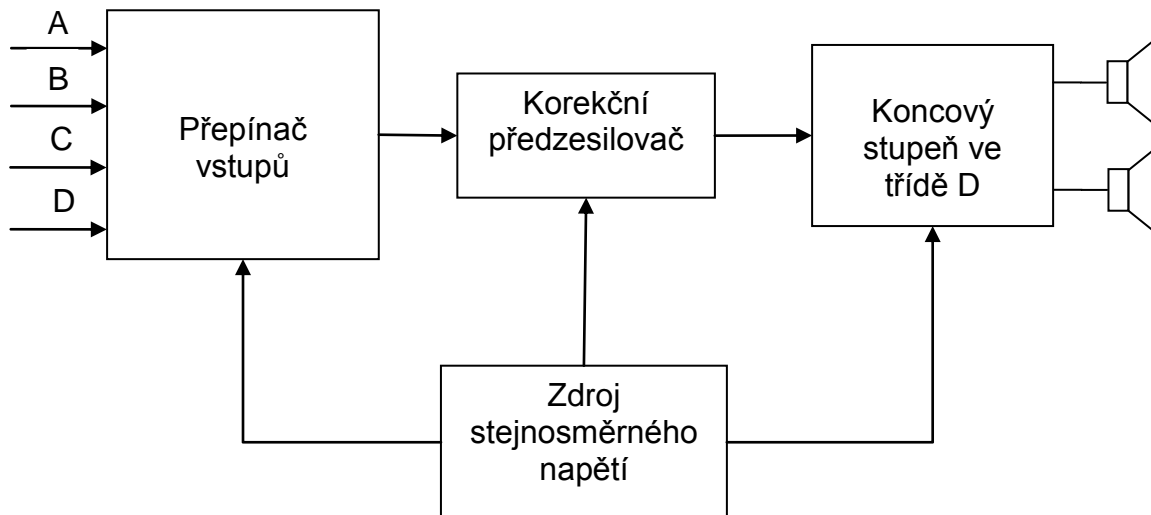
Splnění všech parametrů není možné. Proto je volba cívky vždy kompromis mezi velikostí cívky a zkreslením signálu. Lineární magnetizační křivku má vzduchová cívka, ale kvůli malé permeabilitě by cívka byla velká. Cívka s feritovým jádrem by díky velké permeabilitě byla malá, ale má silně nelineární magnetizační křivku. Proto se nejčastěji používají cívky železo prachové. Mají magnetizační křivku téměř lineární a rozměrově nejsou tak velké jako vzduchové. Vyrábí se jako toroidní jádra a díky tomu mají malé vnější magnetické pole a neruší okolí.

Tab. 2.1 porovnání vlastností cívek v závislosti na druhu jádra (převzato z [1]).

Cívka	Mechanické rozměry	Činitel jakosti	Harmonické zkreslení	Hodnota indukčnosti	Použitelnost do kmitočtu
Vzduchová	Velké	Střední	Žádné	Nejnižší	Velmi vysokého
Železo prachové jádro se vzduchovou mezerou	Střední-malé	Vysoký	Nízké	Nízká - střední	Středního
Feritová bez mezery	Malé	Nízký	Vysoké	Vysoká	Nízkého - středního

3 Konstrukce

Celý zesilovač bude tvořen čtyřmi bloky. Přepínačem vstupů, který vybírá jeden ze čtyř stereo vstupů. Korekčním předzesilovačem s možností nastavení hlasitosti, basů, výšek a stereo váhy. Výkonovým zesilovačem ve třídě D. Zdrojem stejnosměrného napětí, který ostatní bloky napájí.

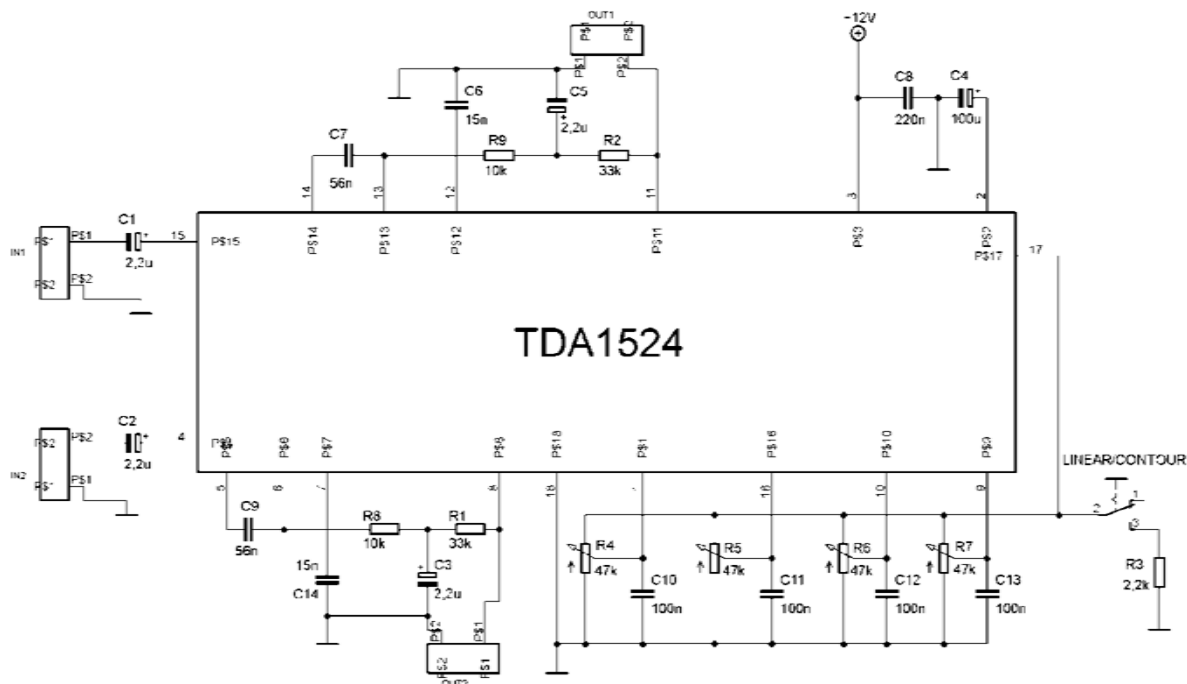


Obr. 3.1 Blokové schéma zesilovače.

3.1 Korekční předzesilovač

Hlavní částí korekčního předzesilovače je obvod TDA1524 od firmy Philips. Jeho zapojení je na Obr. 3.2. Tento obvod dokáže s minimem externích součástek měnit hlasitost, balanc, hloubky a výšky. Jeho výhodou je, že veškeré nastavení korekcí se provádí změnou napětí na odpovídajících pinech obvodu a to pro oba kanály zároveň. Díky tomu není nutné používat kvalitní tandemové potenciometry, které jsou drahé, ale stačí jednoduché potenciometry. Další výhodou je, že obvod není náchylný na šumění potenciometrů, které se projevuje např. při změně hlasitosti.

Katalogové zapojení převzaté z [2] je doplněno stejnosměrnou vazbou, která zlepšuje řízení signálu. Parametry udávané výrobcem budou uvedeny a porovnány s dosaženými dále v textu v kapitole 4.1.2.



Obr. 3.2 Schéma korekčního předzesilovače (převzato a upraveno z [2]).

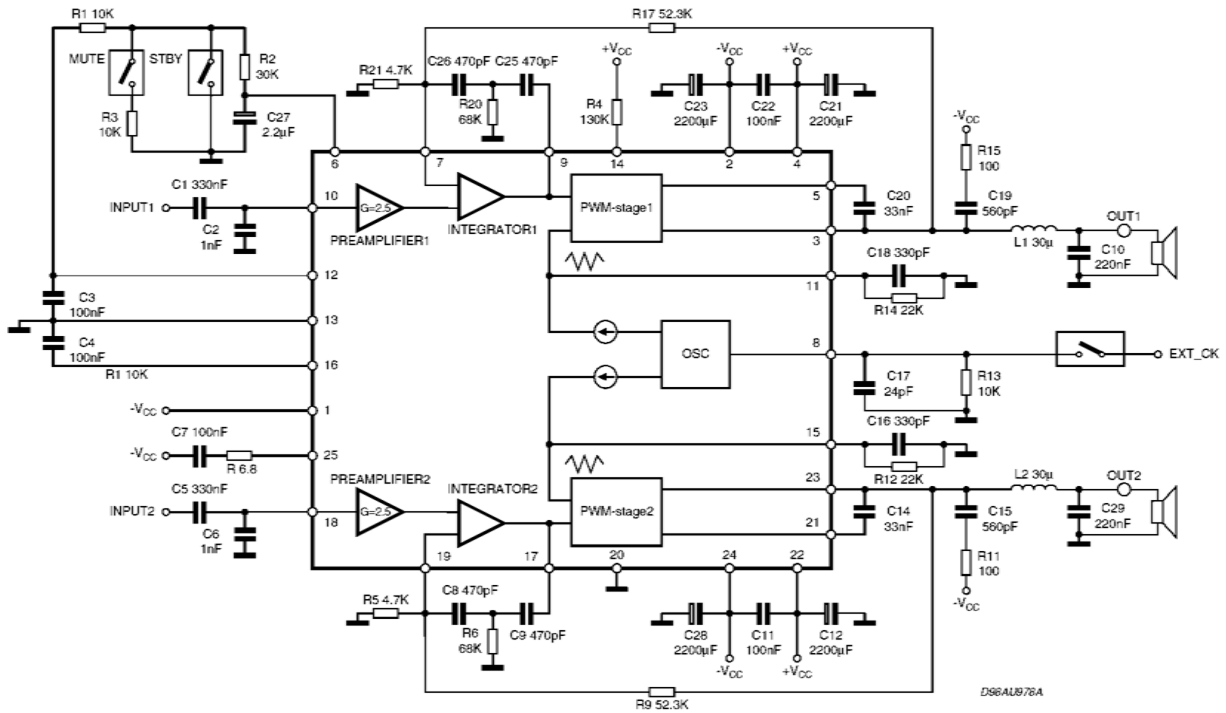
3.2 Koncový stupeň zesilovače ve třídě D

Jádrum koncového stupně je obvod TDA7490 od firmy STMicroelectronics. Katalogové zapojení je na obrázku Obr. 3.3. Způsob, na kterém tento zesilovač pracuje, byl rozebrán výše. Zde bude rozebrána jen funkce nejdůležitějších součástí.

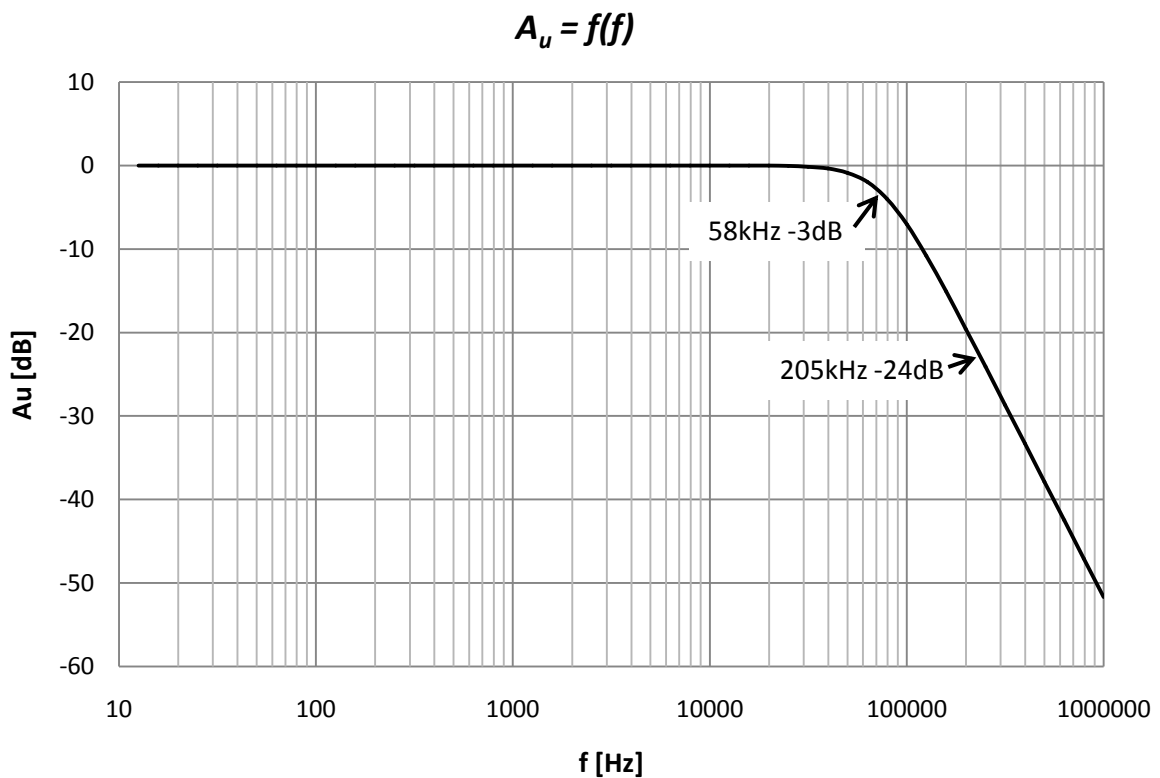
Na pinu 8 se vytváří modulační signál, nebo je možné na něj přivést externí modulační signál. Frekvence vytvořeného signálu je dle [3] dána hodnotami kondenzátoru C17 a rezistoru R13 podle rovnice (3.1).

$$f = 0,25 \cdot \frac{1}{300 \cdot 10^{-9} + R_{13} \cdot (C_{17} + 76 \cdot 10^{-12}) \cdot 0,85} \quad (3.1)$$

Na pinech 11 a 15 se modulační signál tvaruje pro každý kanál zvlášť. Pin 3 a 23 jsou výstupní. Na každém je připojen výstupní filtr tvořen cívkou L1, L2 a kondenzátorem C10, C29. Kondenzátory C14 a C20 vytváří bootstrap, který snižuje šum. Na pin 7, 9 a 17, 19 je přivedena zpětná vazba z výstupu. Prvky k nim připojené tvoří filtr dolní propust. Podle velikosti napětí na pinu 6 může být zesilovač v jednom ze tří stavů (play, mute, stand by). Na pinu 14 se velikostí odporu nastavuje proudová pojistka.



Obr. 3.3 Zapojení koncového stupně zesilovače (převzato z [3])

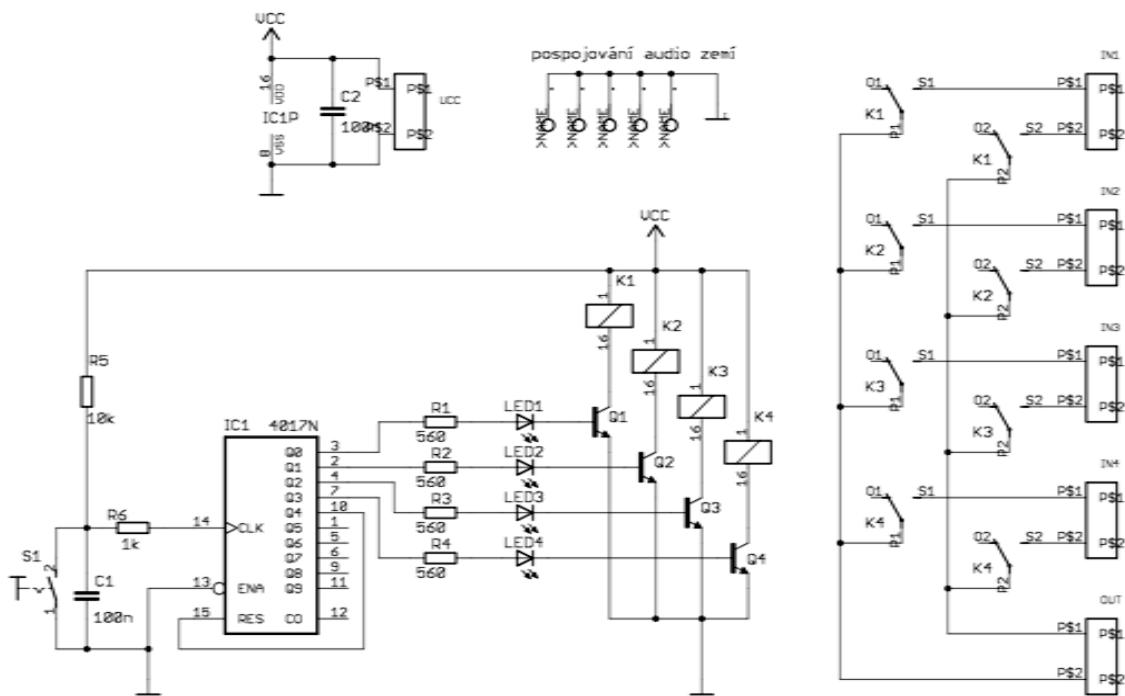


Obr. 3.4 Simulace přenosu výstupního filtru pro zátěž 4Ω s vyznačeným mezním kmitočtem a útlumem pro modulační kmitočet ($L = 15\ \mu\text{H}$; $C = 680\ \text{nF}$)

3.3 Přepínač vstupů

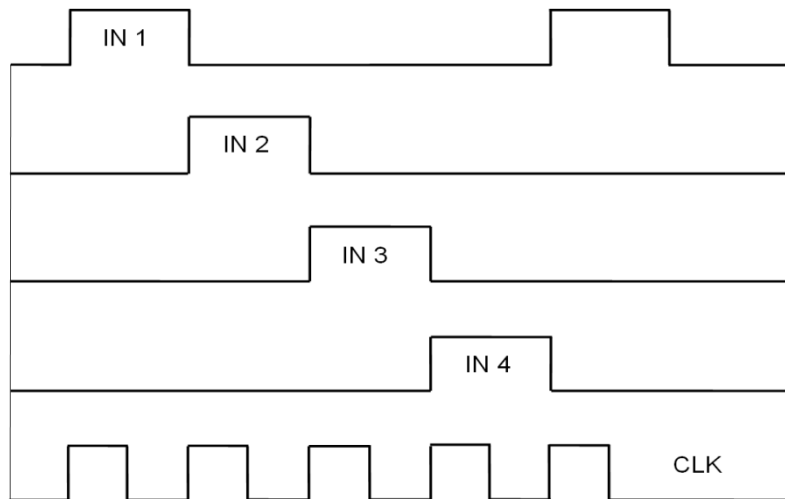
Hlavní částí přepínače vstupů je dekadický čítač 4017 [4]. Schéma přepínače je na Obr. 3.5. Rezistory R5 a R6 slouží k omezení vstupního proudu do čítače a spolu s kondenzátorem C1 tvoří RC dělič. Jeho úkol je zamezit několikanásobnému přepnutí, při stisku tlačítka vlivem mechanických oscilací kontaktů tlačítka. Aby čítač čítal, musí být na pinech ENA a reset log. 0.

Na výstupy 0 – 3 jsou připojeny rezistory pro omezení proudu LED diodou a transistorem. Transistory zde mají funkci spínače a spínají relátka, na jejichž, v klidu odpojených, kontaktech je připojen vstupní audio signál. Při sepnutí tranzistoru sepne relátko a připojí na výstup příslušný vstupní stereo signál.



Obr. 3.5 Schéma přepínače vstupů

Při zapnutí je aktivní vstup 1. Po zmáčknutí tlačítka se aktivuje následující vstup. Při zmáčknutí tlačítka při aktivním vstupu 4 se aktivuje znovu vstup 1. Toho je docíleno propojením výstupu 4 a resetu. Průběh aktivace vstupů v závislosti na zmáčknutí tlačítka je na Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Znáznění funkce obvodu 4017 (CLK představuje impulzy z tlačítka)

Na výstupu přepínače je tedy vždy jeden ze stereo vstupů, což je signalizováno příslušnou LED diodou.

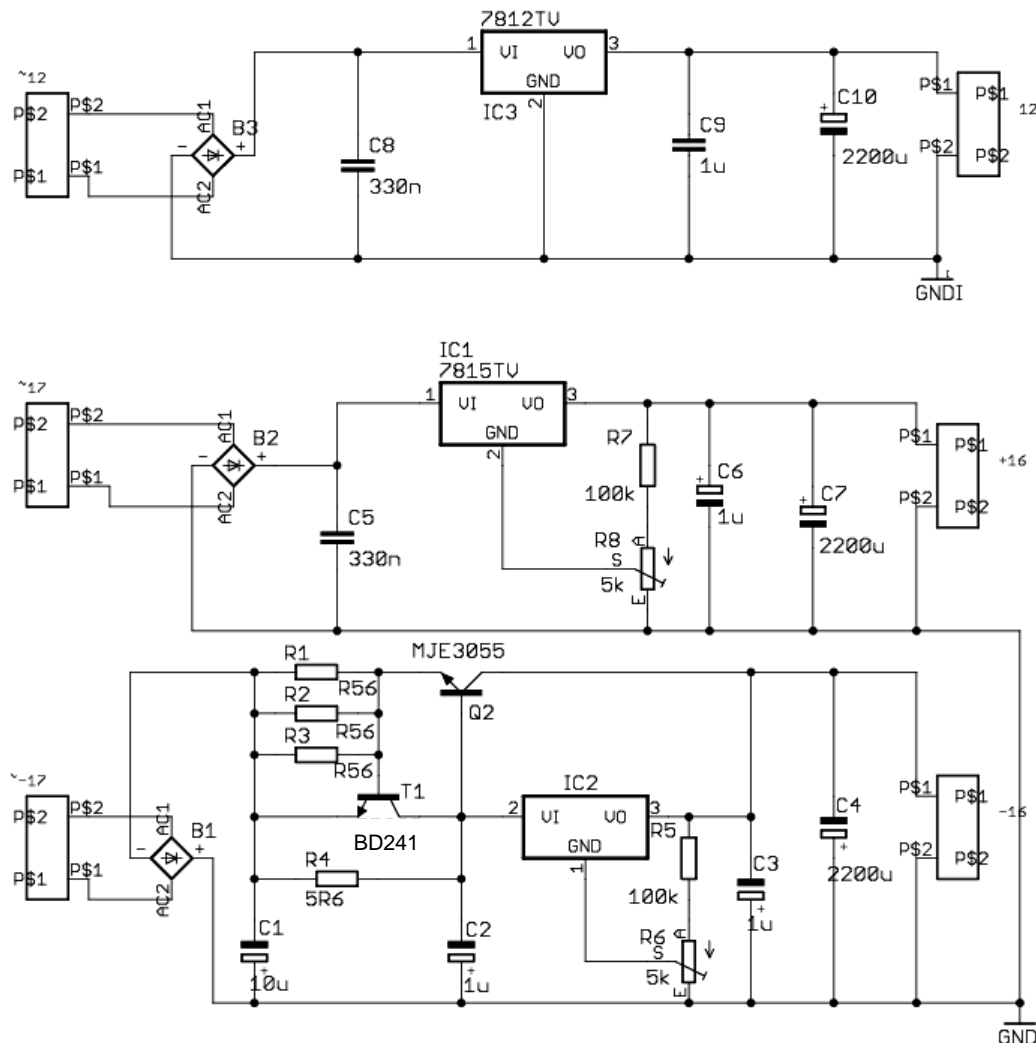
3.4 Zdroj stejnosměrného napětí

Celý zdroj se skládá ze dvou samostatných zdrojů. Stejnosměrného symetrického 16 V a jednoduchého stejnosměrného 12 V.

Stejnosměrný 12 V zdroj obsahuje pouze usměrňovací můstek, 12 voltový stabilizátor a kondenzátory pro lepší vyhlazení napětí. Schéma převzaté z [5] je na Obr. 3.7 v horní části.

Kladná část stejnosměrného symetrického zdroje má oproti 12 V použit jiný stabilizátor 15 voltový a z důvodu potřeby vyššího napětí mezi výstupem a zemí rezistor a trimr. Díky nim je možné výstupní napětí možné zvýšit na požadovaných 16 V. Schéma převzaté z [6] je na Obr. 3.7 v prostřední části.

Záporná část stejnosměrného symetrického zdroje je obdobou kladné části. Ale jelikož se záporné stabilizátory dělají pouze do 1 A, a maximální odběr výkonového stupně je 2,5 A, je stabilizátor doplněn několika odpory a výkonovými transistory. Stejně jako u kladné části i zde je rezistor a trimr pro nastavení požadovaného napětí. Schéma převzaté z [7] je na Obr. 3.7 v dolní části.



Obr. 3.7 Schéma zdroje stejnosměrného napětí, převzaté z [5], [6], [7].

4 Naměřené parametry

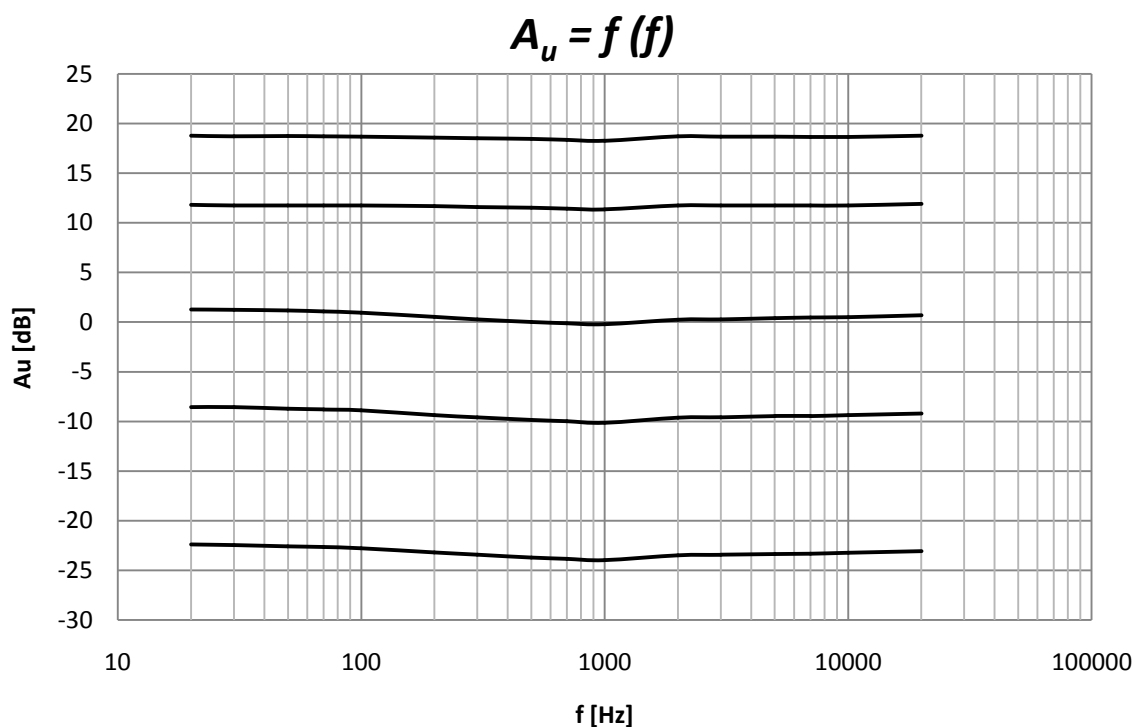
V této kapitole budou srovnány naměřené hodnoty a hodnoty udávané výrobcem, pro již zhotovený korekční předzesilovač a koncový zesilovač.

Oba zesilovače se měřily stejně. Na vstup byl připojen nízkofrekvenční generátor a na výstupu byl nízkofrekvenční voltmetr a osciloskop pro vizuální kontrolu průběhů. Zejména kvůli omezení výstupního signálu při přebuzení zesilovače, které se na voltmetru neprojeví.

4.1 Korekční předzesilovač

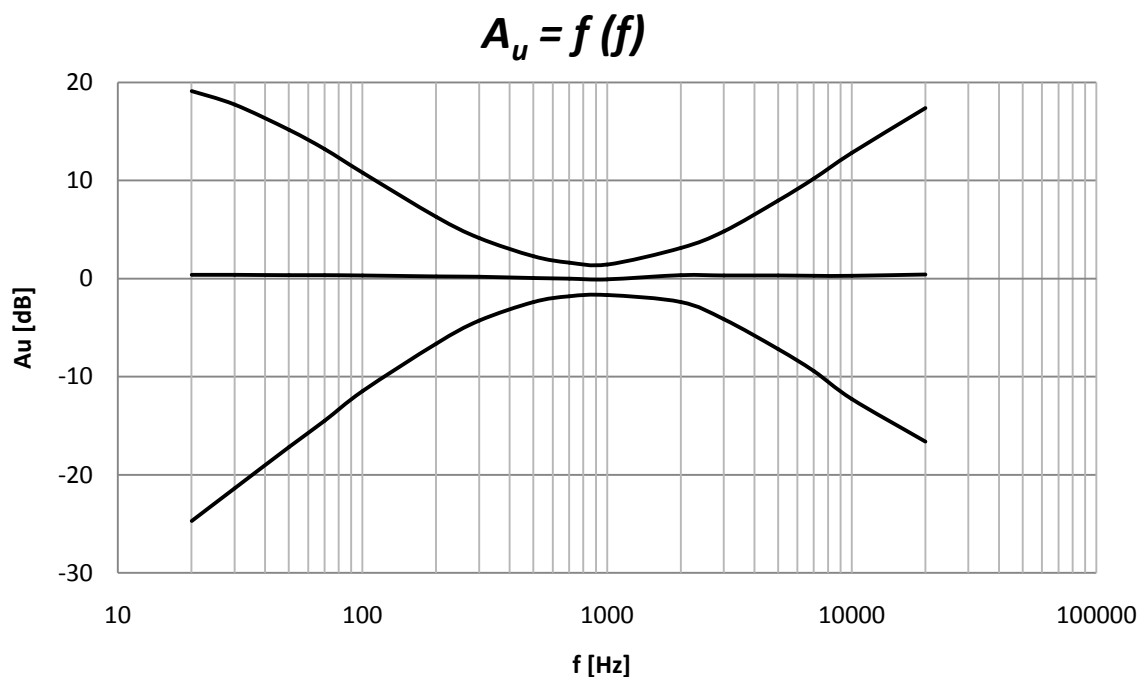
4.1.1 Naměřené grafické průběhy

Jedna z nejdůležitějších charakteristik předzesilovače je jeho modulová kmitočtová charakteristika. Na Obr. 4.1 je tato charakteristika bez korekcí. Je z ní patrné, že při malé výstupní úrovni napětí jsou nízké tóny zesíleny. A s rostoucím výstupním napětím se charakteristika stává lineární.



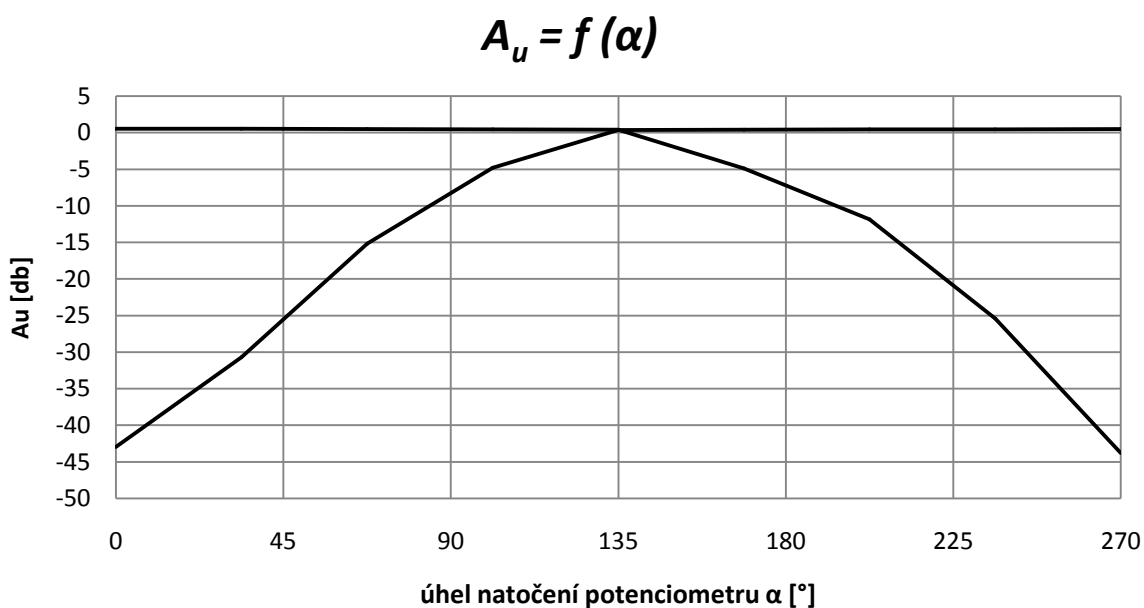
Obr. 4.1 Modulová kmitočtová charakteristika bez korekcí. $U_1 = 0,3 V$

Na Obr. 4.2 je modulová kmitočtová charakteristika s maximálními korekcemi. Je na ní vidět v jakých mezích se výstupní signál může nacházet při různém nastavení basů a výšek.



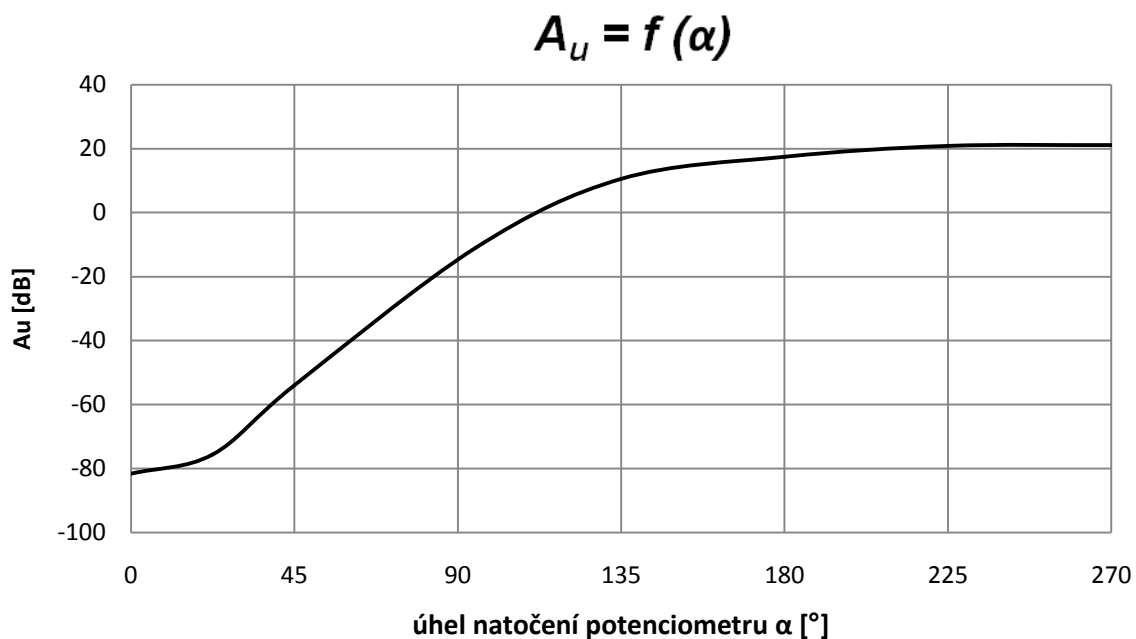
Obr. 4.2 Modulová kmitočtová charakteristika s maximální a minimální korekcí. $U_1 = 0,3\text{ V}$

Průběh vyvážení kanálů (balance) je na Obr. 4.3. Je patrné, že kanály mají stejnou úroveň, když je potenciometr v prostřední poloze. V závislosti na natočení na jednu nebo druhou stranu je druhý kanál postupně utlumován a to až na -43 dB.

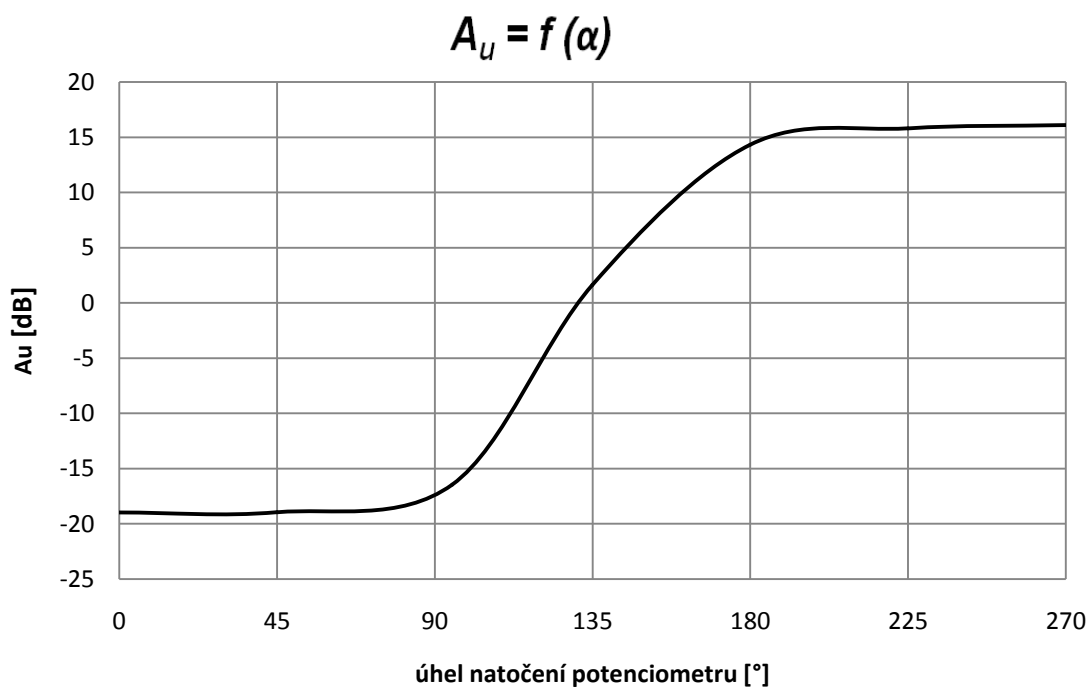


Obr. 4.3 Závislost výstupní úrovně levého a pravého kanálu na natočení potenciometru α .

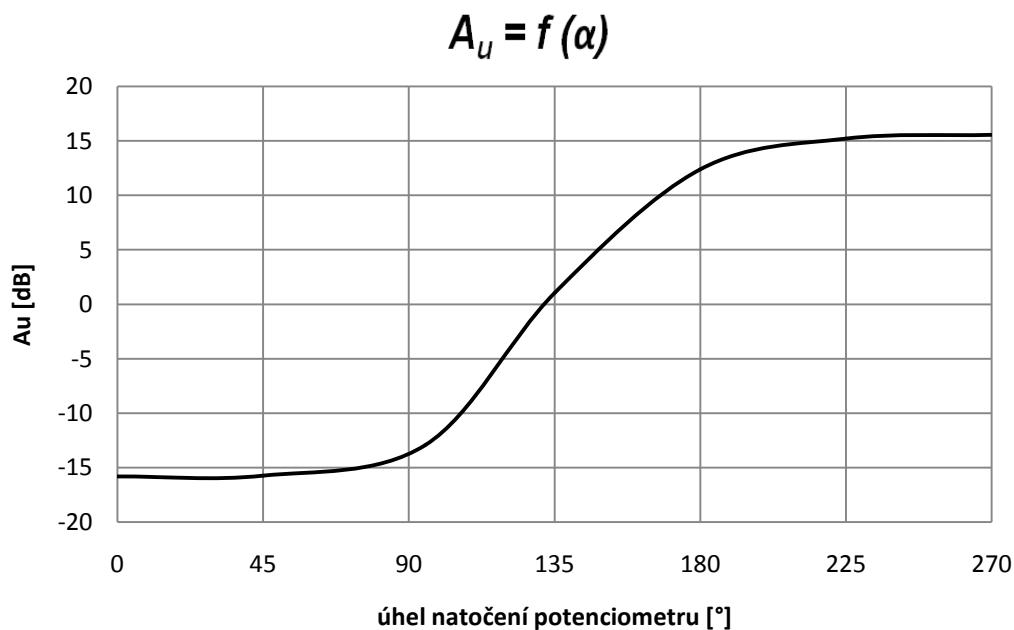
Závislost zesílení vstupního napětí na poloze potenciometru je na Obr. 4.4. Průběh nastavení hloubek je na Obr. 4.5 a výšek na Obr. 4.6.



Obr. 4.4 Průběh nastavení hlasitosti. $U_1 = 0,3$ V; $f = 1$ kHz; bez korekcí

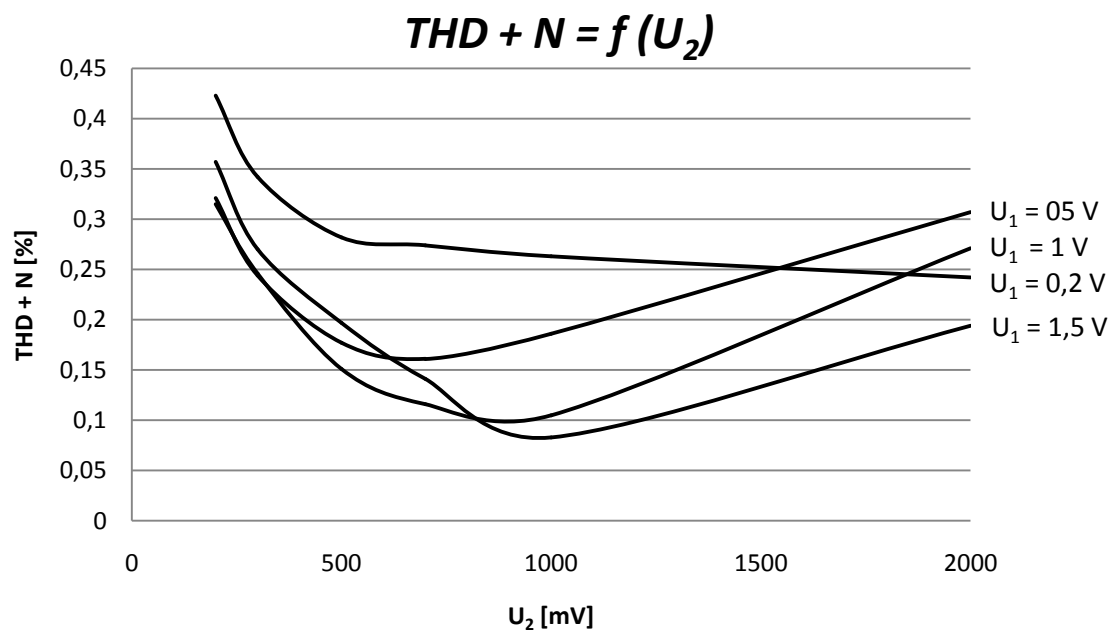


Obr. 4.5 Průběh nastavení hloubek. $U_1 = 0,3$ V; $f = 40$ Hz.

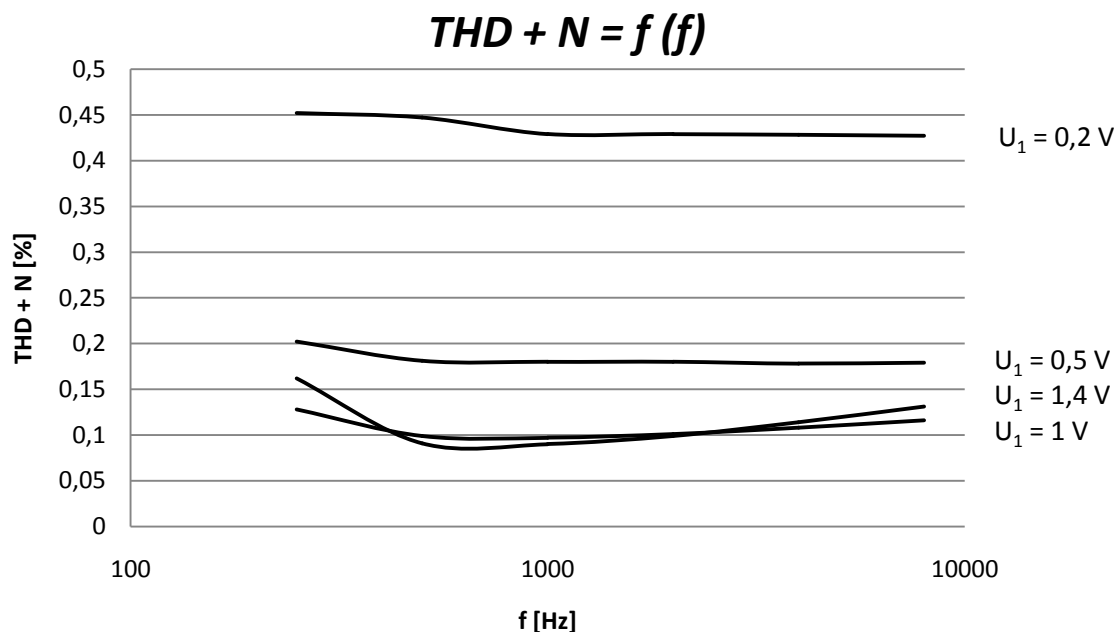


Obr. 4.6 Průběh nastavení výšek. $U_1 = 0,3 \text{ V}$; $f = 16 \text{ kHz}$.

Na obrázku Obr. 4.7 a Obr. 4.8 je závislost THD+N. Z nich vyplývá, že větší signály mají menší zkreslení. To je závislé na frekvenci, zesílení a velikosti vstupního signálu.



Obr. 4.7 Závislost THD+N na výstupním napětí pro různé velikosti vstupního napětí. $f=1 \text{ kHz}$



Obr. 4.8 Závislost $THD + N$ na frekvenci pro různé velikosti vstupní napětí. Při zesílení 0 dB.

4.1.2 Porovnání s údaji výrobce

V Tab. 4.1 jsou porovnány nejdůležitější parametry korekčního předzesilovače s obvodem TDA1524. Z nich vyplývá, že dosažené parametry korekčního předzesilovače odpovídají katalogovým hodnotám. Malé odchylky parametrů jsou dány tím, že v tabulce jsou užity typické (střední) hodnoty parametrů udávané výrobcem.

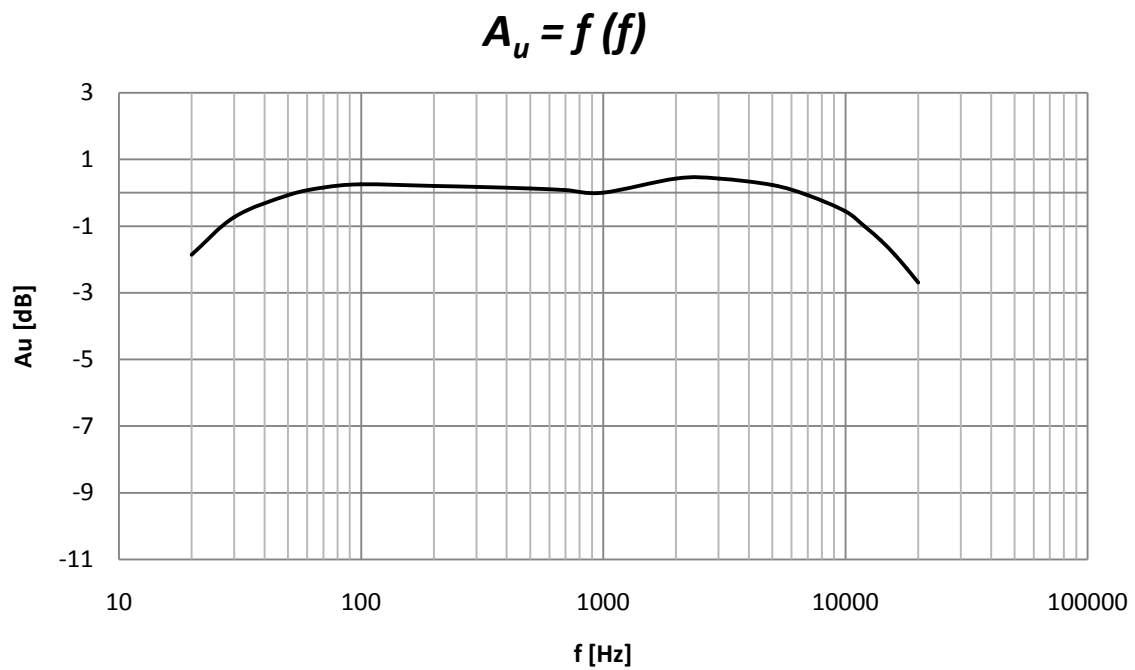
Tab. 4.1 Porovnání katalogových a dosažených parametrů. Čerpáno z [2]

Parametry	katalogové	dosažené	
Rozsah nastavení hlasitosti	-80 až +21,5	-81 až +21	dB
Rozsah nastavení hloubek (f = 40Hz)	-19 až +17	-19 až +16	dB
Rozsah nastavení výšek (f = 16 kHz)	± 15 dB	-15,8 až 15,6	dB
Maximální potlačení při balanc	-40	-43	dB
Přeslech mezi kanály	46 až 60	58,5	dB
Odběr	25 – 45	max 40	mA
Vstupní odpor	min 10	14,7	k Ω

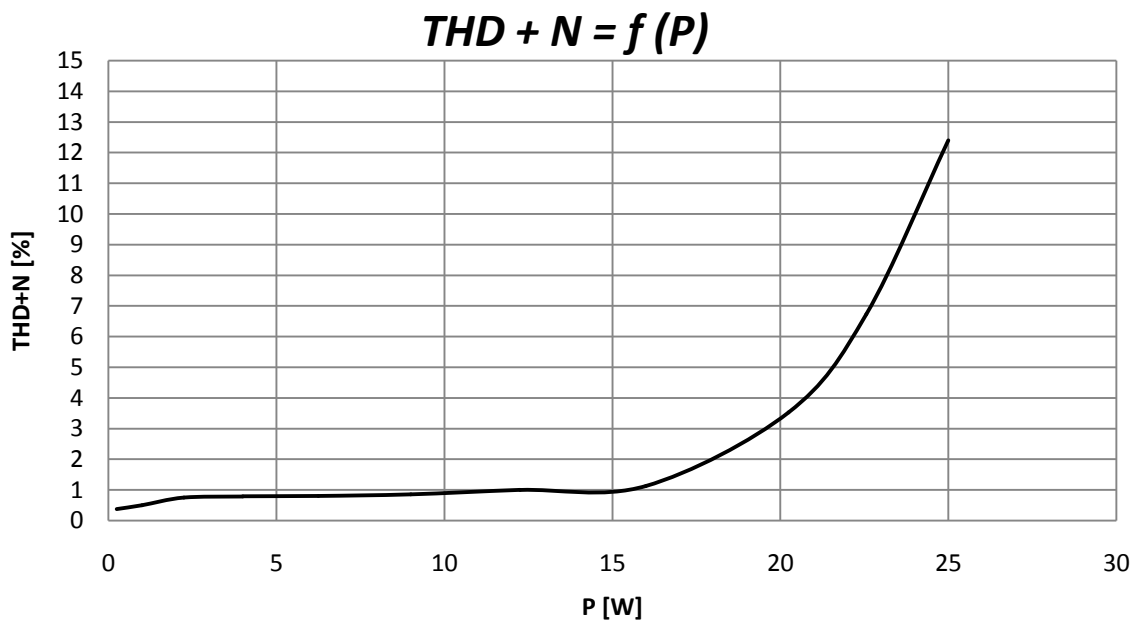
V Tab. 4.1 není uvedeno harmonické zkreslení zesilovače, protože by porovnání bylo zavádějící. Hodnoty výrobce jsou pouze pro celkové harmonické zkreslení a mnou naměřené hodnoty jsou pro celkové harmonické zkreslení + šum. Při porovnání grafických průběhů harmonického zkreslení udávaného výrobcem v (2) a naměřeného (Obr. 4.7 a Obr. 4.8) je vidět, že naměřené zkreslení je větší. A to zejména pro malé vstupní napětí, kde velkou část celkového zkreslení dělá právě šum. Při vstupním napětí $U_{in} > 0,5V$ se naměřené a katalogové hodnoty téměř shodují.

4.2 Výkonový zesilovač ve třídě D

4.2.1 Naměřené grafické průběhy



Obr. 4.9 Modulová kmitočtová charakteristika vztažení k 1 kHz; $z = 4\Omega$



Obr. 4.10 Závislost THD+N na výstupním výkonu; $z = 4\Omega$

4.2.2 Porovnání s údaji výrobce

V Tab. 4.2 jsou porovnány naměřené parametry s katalogovými. Dosažené parametry jsou s nimi téměř totožné, jejich odchylky jsou v toleranci udávané výrobcem, až na zkreslení, které je větší. To může být dáno výstupním filtrem. Musí se experimentálně vyzkoušet, jak velký vliv na zkreslení filtr má. A popřípadě změnit některý z prvků filtru. Zkreslení je také větší, protože výrobce stejně jako u TDA1524 udává pouze THD a naměřené hodnoty jsou THD+N.

Tab. 4.2 Porovnání katalogových a dosažených parametrů. Čerpáno z [3]

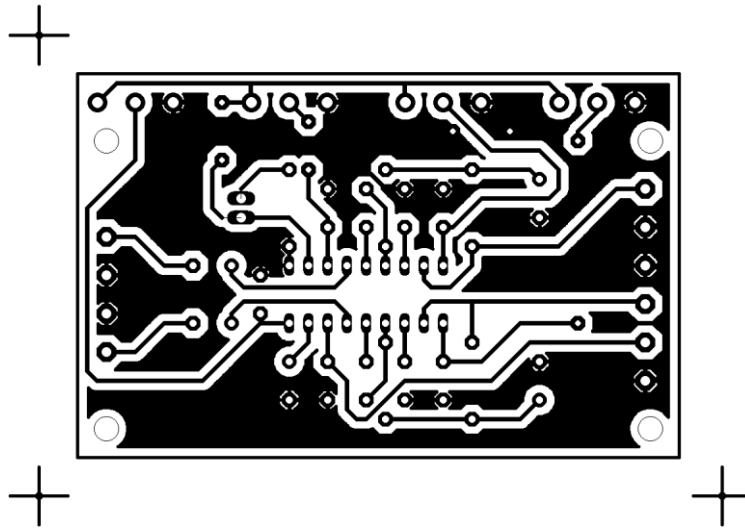
Parametry	podmínka	katalogové	dosažené	
Výstupní výkon	THD = 1%	15 - 18	16	W
Výstupní výkon	THD = 10%	20 - 25	24	W
Účinnost	THD = 10% P = 2 x 25 W	80 - 89	77,3	W
Zesílení		29 - 31	29	dB
Zkreslení	P = 1 W	0,1	0,5	%
Modulační kmitočet		200	205	kHz
Vstupní odpor		20 - 30	29,2	kΩ
Výstupní odpor		0,4 - 0,8	0,435	Ω

5 Literatura

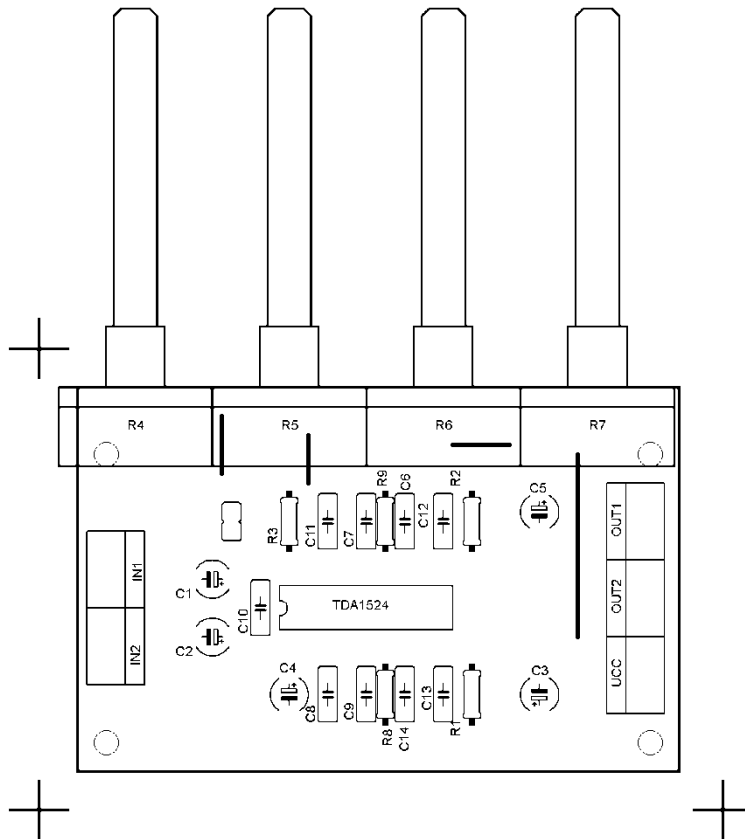
- [1] Štál, P. Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D - základní principy a konstrukce. Praha : BEN - technická literatura, 2008. str.
- [2] PHILIPS [online]. Datasheet TDA1524A - Stereo-tone/volume control circuit. PHILIPS, Inc., 1987 - [cit. 22. 12. 2009]. Dostupné na [www: http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/TDA1524.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/TDA1524.pdf).
- [3] ST Microelectronics [online]. Datasheet TDA7490 - 25W + 25W Stereo Class-D Amplifier. STMicroelectronics, Inc., 2005 - [cit. 22. 12. 2009]. Dostupné na [www: http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/6871.pdf](http://www.st.com/stonline/products/literature/ds/6871.pdf).
- [4] ON Semiconductor [online]. Datasheet MC4017B - decade counter, Inc., 2005 - [cit. 20. 5. 2010]. Dostupné na [www: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC14017B-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC14017B-D.PDF)
- [5] ON Semiconductor [online]. Datasheet MC7812 - Positive Voltage Regulators, Inc., 2009 - [cit. 20. 5. 2010]. Dostupné na [www: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC7800-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC7800-D.PDF)
- [6] ON Semiconductor [online]. Datasheet MC78T15 - Positive Voltage Regulators, Inc., 2009 - [cit. 20. 5. 2010]. Dostupné na [www: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC78T00-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC78T00-D.PDF)
- [7] ON Semiconductor [online]. Datasheet MC7915 - Negative Voltage Regulators, Inc., 2006 - [cit. 20. 5. 2010]. Dostupné na [www: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC7900-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC7900-D.PDF)

6 Přílohy

6.1 Deska korekčního předzesilovače



Obr. 6.1 Deska plošného předzesilovače spoje strana spojů M 1:1, rozměr: 80 x 51mm



Obr. 6.2 Rozložení součástek na desce plošného spoje předzesilovače M 1:1, rozměr: 80 x 51mm

6.2 Seznam součástek korekčního předzesilovače:

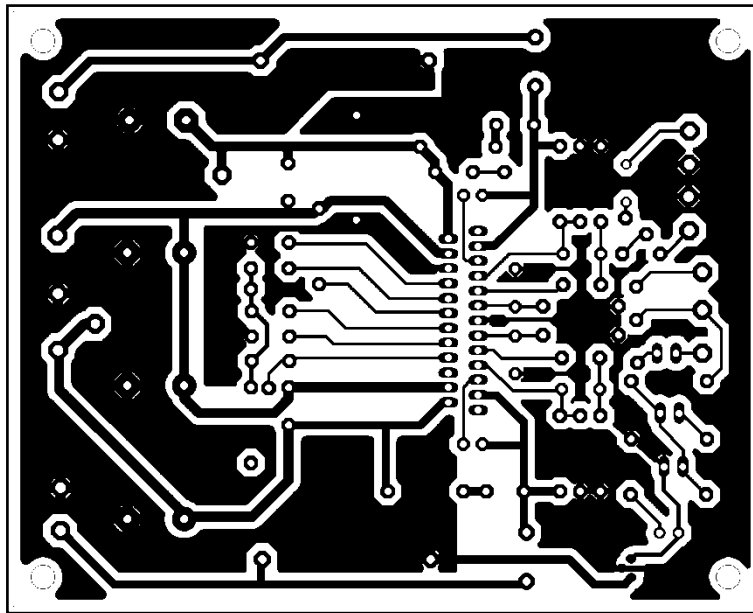
C1	2,2u/16V	C13	100n
C2	2,2u/16V	C14	15n
C3	2,2u/16V	R1	33k
C4	100u/16V	R2	33k
C5	2,2u16V	R3	2,2k
C6	15n	R4	47k
C7	56n	R5	47k
C8	220n	R6	47k
C9	56n	R7	47k
C10	100n	R8	10k
C11	100n	R9	10k
C12	100n	IO1	TDA1524

Všechny odpory jsou s přesností 1%, kondenzátory keramické vyjma C1 – C5, které jsou elektrolytické.

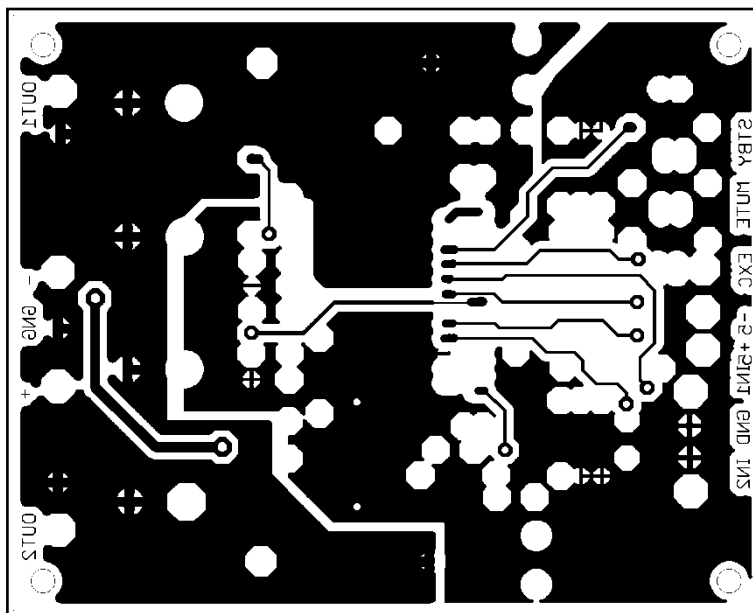


Obr. 6.3 Foto korekčního předzesilovače.

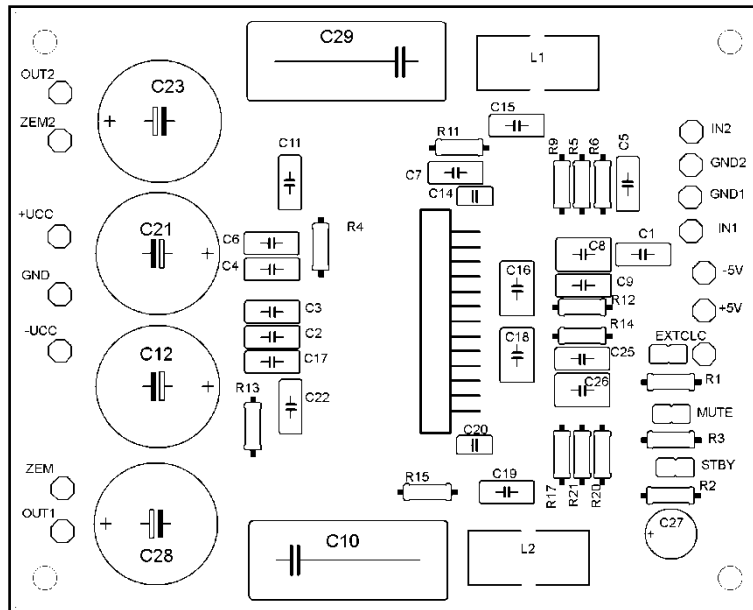
6.3 Deska výkonového zesilovače



Obr. 6.4 Deska plošného výkonového zesilovače spoje strana spojů M 1:1, rozměr: 100 x 80 mm



Obr. 6.5 Deska plošného spoje výkonového zesilovače strana součástek M 1:1, rozměr: 100 x 80 mm

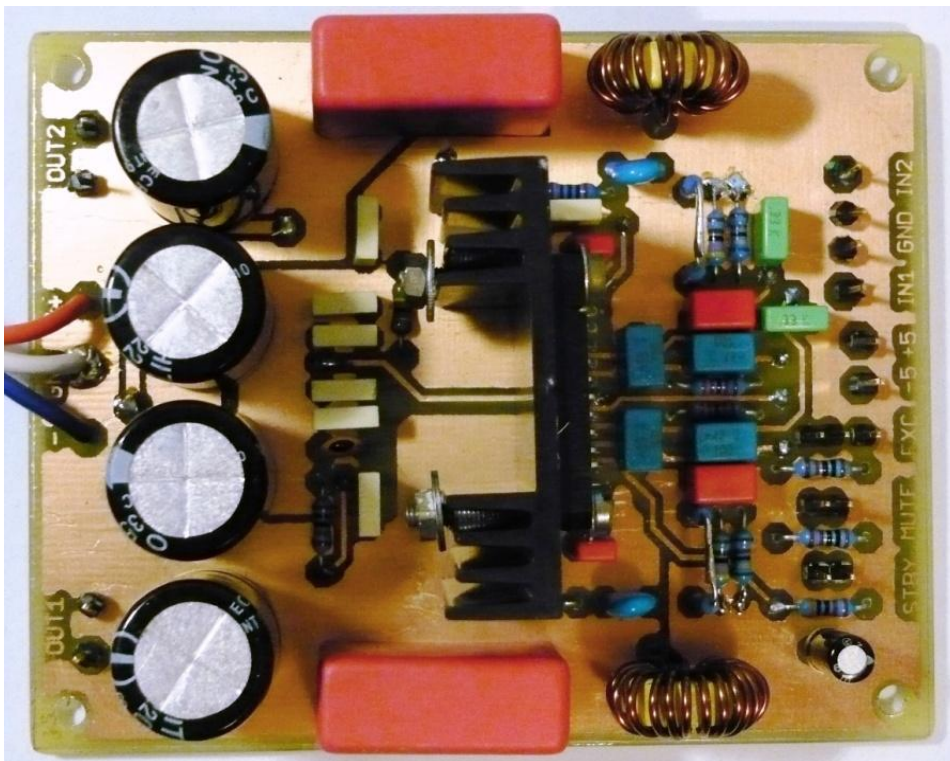


Obr. 6.6 Rozložení součástek na desce plošného spoje výkonového zesilovače M 1:1, rozměr: 100 x 80 mm

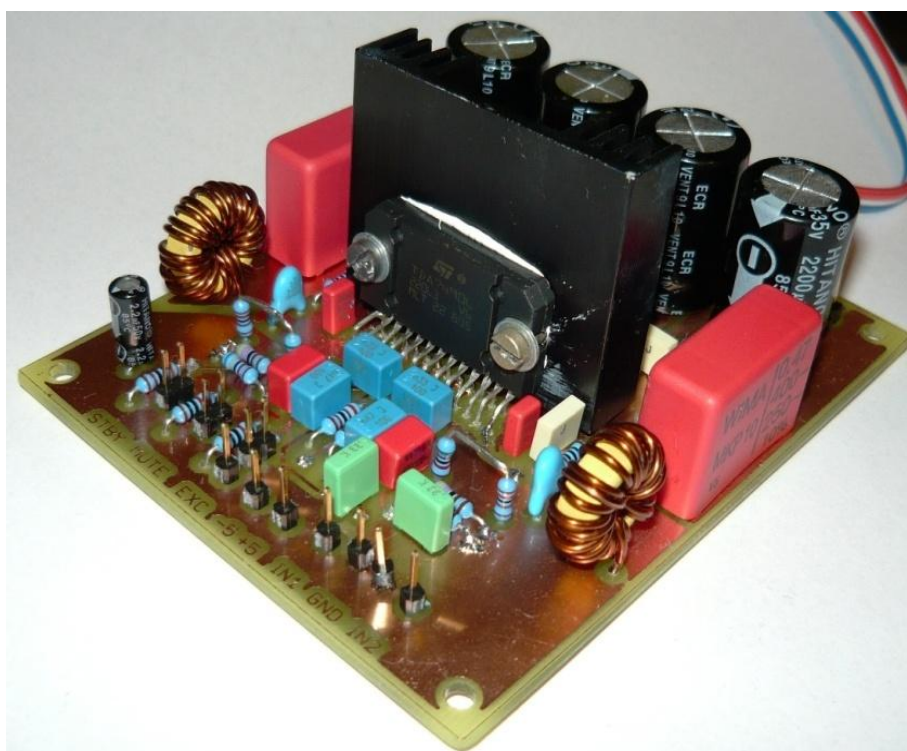
6.4 Seznam součástek výkonového zesilovače:

C1	330n	C19	560p	R4	130K
C2	1n	C20	33n	R5	4.7k
C3	100n	C21	2200u/35V	R6	68K
C4	100n	C22	100n	R9	52.3K
C5	330n	C23	2200u/35V	R11	100
C6	1n	C25	470p	R12	22K
C7	100n	C26	470p	R13	10K
C8	470p	C27	2,2u/35V	R14	22K
C9	470p	C28	2200u/35V	R15	100
C10	680n	C29	680n	R17	52.3K
C11	100n	L1	15u	R20	68K
C12	2200u/35V	L2	15u	R21	4.7K
C14	33n	R1	10K	IO1	TDA7490
C15	560p	R2	30K		
C16	330p	R3	10K		

Všechny odpory jsou s přesností 1%, kondenzátory fóliové a elektrolytické.

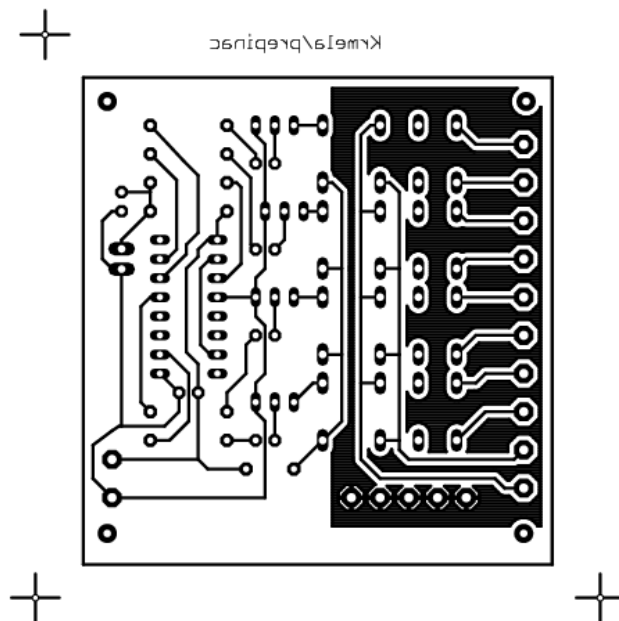


Obr. 6.7 Foto výkonového zesilovače

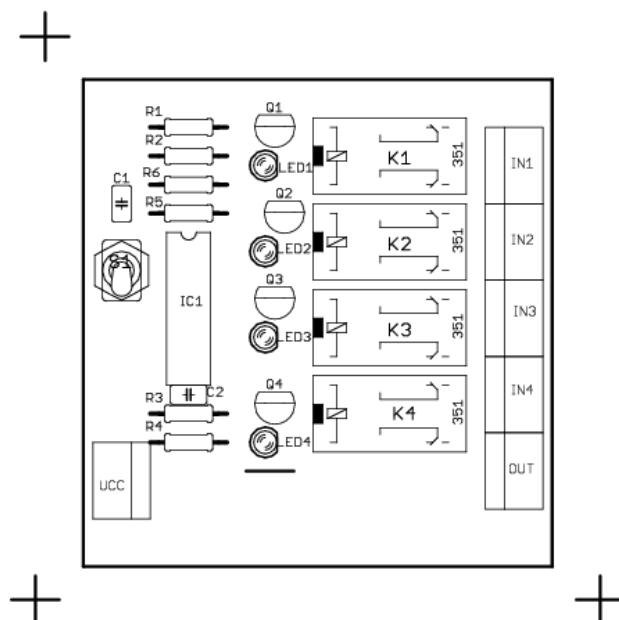


Obr. 6.8 Foto výkonového zesilovače

6.5 Deska přepínače vstupů:



Obr. 6.9 Deska plošného spoje strana spojů M 1:1, rozměr: 62 x 65 mm

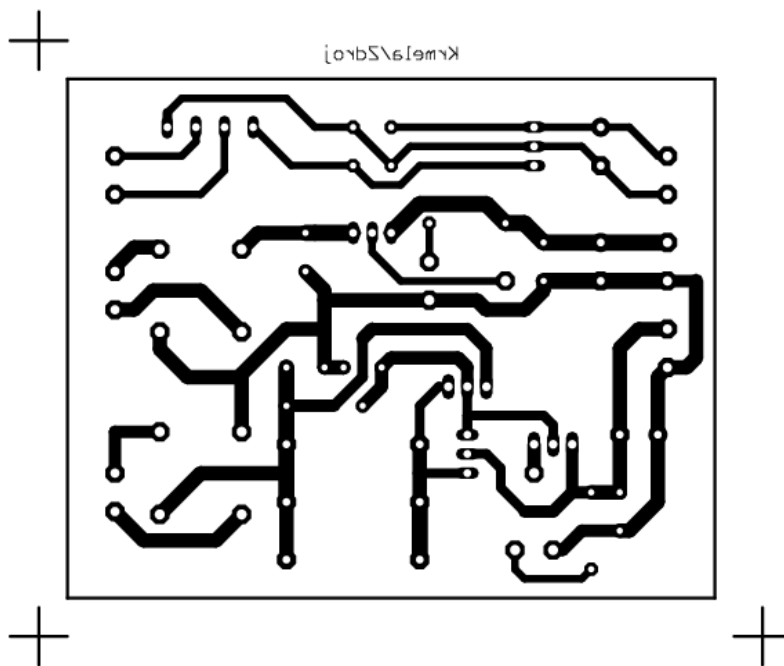


Obr. 6.10 Rozložení součástek na desce plošného spoje M 1:1, rozměr: 62 x 65 mm

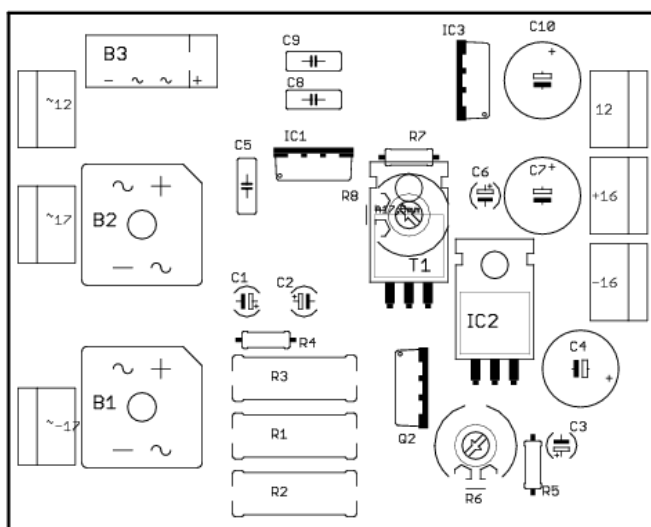
6.6 Seznam součástek přepínače vstupů:

C1	100n	Q1	BC546B
C2	100n	Q2	BC546B
IC1	4017N	Q3	BC546B
K1	M4-12-H	Q4	BC546B
K2	M4-12-H	R1	560
K3	M4-12-H	R2	560
K4	M4-12-H	R3	560
LED1	LED5MM	R4	560
LED2	LED5MM	R5	10k
LED3	LED5MM	R6	1k
LED4	LED5MM		

6.7 Deska zdroje ss napětí:



Obr. 6.11 Deska plošného spoje zdroje stejnosměrného napětí strana spojů M 1:1, rozměr: 86 x 69 mm



Obr. 6.12 Rozložení součástek na desce plošného spoje zdroje stejnosměrného napětí M 1:1, rozměr: 86 x 69 mm

6.8 Seznam součástek zdroje ss napětí:

B1	B200C6000DR	IC1	7815T
B2	B200C6000DR	IC2	7915T
B3	B250C1500F	IC3	7812T
C1	10u	Q2	MJE3055
C2	1u	R1	R56
C3	1u	R2	R56
C4	2200u	R3	R56
C5	330n	R4	5R6
C6	1u	R5	100k
C7	2200u	R6	5k
C8	330n	R7	100k
C9	1u	R8	5k
C10	2200u	T1	BD241