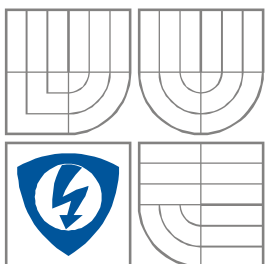


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH STEREO AUDIO VÝKONOVÉHO ZESILOVAČE SPÍNANÉ TŘÍDY

DESIGN OF SWITCH - MODE STEREO AUDIO POWER AMPLIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ CHRISTEN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. LUBOMÍR BRANČÍK, CSc.

BRNO, 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Jiří Christen

ID: 125460

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Návrh stereo audio výkonového zesilovače spínané třídy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte spínané třídy výkonových zesilovačů a pro vybranou třídu navrhnete stereo audio výkonový zesilovač s výstupním výkonem cca 2 x 80 W. Ke koncovému stupni navrhnete předzesilovač s možností ovládání hlasitosti, balance a korekce kmitočtové charakteristiky. Vlastnosti navržených zapojení ověřte simulacemi ve vhodném simulačním programu, např. PSpice.

Navrhnete vhodnou napájecí jednotku pro napájení výkonového stupně a předzesilovače. Pro jednotlivé části navrhnete desky plošných spojů v programu Eagle. Provedte kompletní konstrukci stereo audio výkonového zesilovače daných vlastností, včetně předzesilovače a napájecí jednotky. Zapojení oživte, proměřte jeho základní parametry a srovnajte s parametry získanými pomocí počítačové simulace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ŠTÁL, P. Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D - základní principy a konstrukce. Praha: BEN - technická literatura, 2008.

[2] DOUGLAS, D. Audio Power Amplifier Design Handbook. New York: Newnes - ELSEVIER, 2006.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

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.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá kompletním návrhem výkonového audio zesilovače spínané třídy D. První část práce popisuje základní principy výkonových zesilovačů spínaných tříd a jejich porovnání. Je proveden rozbor jednotlivých částí zesilovače z hlediska funkce i konstrukce.

Druhá část obsahuje konkrétní návrh a konstrukci zesilovače ve třídě D s minimálním výstupním výkonem 2x80W. Koncový stupeň je tvořen obvodem TAS5630B od firmy Texas Instruments. Pomocí LED diod je možno zobrazit základní stavy koncového stupně. Zesilovač je doplněn korekčním předzesilovačem pro ovládání hlasitosti a korekcí. Zařízení je napájeno ze spínaného napájecího zdroje. Pro jednotlivé části zesilovače byly změřeny základní parametry.

KLÍČOVÁ SLOVA

pulzně šířková modulace, PWM, třída D, audio zesilovač, předzesilovač, TOPSwitch

ABSTRACT

This work deals with complete design of switch - mode audio power amplifier. The first part of the work describes basic principles of power amplifier operating in switch mode and differences between classes. Specific parts of the amplifier are analysed according to function and construction.

The second part includes particular design and construction of the class D switching amplifier with a minimal output power 2x80W. The power stage is realized by an integrated circuit TAS5630 from Texas Instruments. Basic states of the power stage are signalized by LED diodes. The design includes correction preamplifier for adjusting volume and frequency response. The appliance is supplied from switch - mode power supply. Basic parametres were measured for individual parts.

KEYWORDS

pulse - width modulation, PWM, class D, audio amplifier, preamplifier, TOPSwitch

CHRISTEN, J. *Návrh stereo audio výkonového zesilovače spínané třídy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 64 s., 23 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. ing. Lubomír Brančík, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh stereo audio výkonového zesilovače spínané třídy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne.....

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Lubomíru Brančíkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne.....

.....
podpis autora

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 8 |
| SEZNAM TABULEK..... | 10 |
| 1 ÚVOD | 11 |
| 2 ZESILOVAČE SPÍNANÉ TŘÍDY | 12 |
| 2.1 Princip | 12 |
| 2.2 Rozdělení spínaných zesilovačů..... | 13 |
| 2.2.1 Třída D | 13 |
| 2.2.2 Třída S..... | 13 |
| 2.2.3 Třída T | 14 |
| 2.2.4 Třída I..... | 14 |
| 3 AUDIO ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ D | 16 |
| 3.1 Základní popis | 16 |
| 3.1.1 Vstupní obvody | 17 |
| 3.1.2 Modulátor | 18 |
| 3.1.3 Koncový stupeň s budičem..... | 19 |
| 3.1.4 Výstupní filtr | 22 |
| 3.2 Srovnání se třídou AB..... | 22 |
| 3.3 Příčiny vzniku zkreslení | 23 |
| 4 NÁVRH ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ D | 24 |
| 4.1 Korekční předzesilovač | 24 |
| 4.2 Koncový stupeň | 26 |
| 4.2.1 Předzesilovač..... | 28 |
| 4.2.2 Výstupní filtr | 29 |
| 4.2.3 Integrované ochrany..... | 31 |
| 4.2.4 Napájení..... | 32 |
| 4.2.5 Chlazení..... | 33 |
| 5 NAPÁJECÍ ZDROJ | 34 |
| 5.1 Stanovení parametrů zdroje | 35 |
| 5.2 Návrh zdroje | 35 |
| 5.2.1 Vstupní část | 35 |
| 5.2.2 Vstupní usměrňovač a filtr | 36 |
| 5.2.3 Řídící obvod..... | 36 |
| 5.2.4 Transformátor | 38 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.2.5 | Zpětná vazba | 40 |
| 5.2.6 | Výstupní usměrňovač a filtr | 40 |
| 5.2.7 | LC filtr | 42 |
| 5.3 | Chlazení..... | 42 |
| 6 | KONSTRUKCE ZESILOVAČE..... | 44 |
| 6.1 | Návrh desek plošných spojů..... | 44 |
| 6.1.1 | Korekční předzesilovač a indikátory stavu..... | 44 |
| 6.1.2 | Koncový stupeň..... | 44 |
| 6.1.3 | Napájecí zdroj..... | 44 |
| 6.2 | Přístrojová skříň..... | 45 |
| 7 | VÝSLEDKY MĚŘENÍ..... | 47 |
| 7.1 | Korekční předzesilovač | 47 |
| 7.2 | Koncový stupeň | 52 |
| 7.3 | Napájecí zdroj..... | 56 |
| 7.4 | Použité měřicí přístroje..... | 57 |
| 8 | ZÁVĚR..... | 58 |
| | LITERATURA | 59 |
| | SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK | 61 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 64 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 2.1: Princip zesilovače spínané třídy (převzato a upraveno z [2])..... | 12 |
| Obr. 2.2: Zjednodušené zapojení zesilovače ve třídě D (převzato a upraveno z [3])..... | 13 |
| Obr. 2.3: Třída I, průchod nulou (převzato a upraveno z [8])..... | 14 |
| Obr. 2.4: Třída I, kladná a záporná půlvlna vstupního signálu (převzato a upraveno z [8])..... | 15 |
| Obr. 3.1: Základní blokové schéma zesilovače ve třídě D (převzato a upraveno z [2]) | 16 |
| Obr. 3.2: Blokové schéma plně digitálního zesilovače ve třídě D (převzato a upraveno z [2])..... | 17 |
| Obr. 3.3: Vznik PWM modulovaného signálu. | 18 |
| Obr. 3.4: Zapojení zesilovače s impulzně šířkovým modulátorem (převzato a upraveno z [2])..... | 19 |
| Obr. 3.5: Zapojení koncových tranzistorů do polovičního mostu (převzato a upraveno z [9])..... | 20 |
| Obr. 3.6: Zapojení koncových tranzistorů do plného mostu (převzato a upraveno z [9])..... | 21 |
| Obr. 3.7: Srovnání třídy D a AB (převzato a upraveno z [9])..... | 23 |
| Obr. 3.8: Zkreslení u reálného zesilovače třídy D (převzato a upraveno z [10]) | 23 |
| Obr. 4.1: Kompletní blokové schéma zesilovače | 24 |
| Obr. 4.2: Zapojení korekčního předzesilovače | 25 |
| Obr. 4.3: Blokové schéma obvodu TAS5630B (převzato a upraveno z [12])..... | 27 |
| Obr. 4.4: Zapojení předzesilovače v simulačním programu PSpice..... | 28 |
| Obr. 4.5: Modulová kmitočtová charakteristika předzesilovače..... | 29 |
| Obr. 4.6: Zapojení výstupního filtru v simulačním programu PSpice | 30 |
| Obr. 4.7: Modulová a fázová kmitočtová charakteristika výstupního filtru | 30 |
| Obr. 4.8: Obvody pro signalizaci stavů zesilovače | 31 |
| Obr. 4.9: Obvod pro signalizaci teploty čipu a regulaci otáček ventilátoru ventilátoru.... | 32 |
| Obr. 4.10: Simulace regulátoru LM317 | 33 |
| Obr. 5.1: Obecné blokové schéma jednočinného blokovacího měniče (převzato a upraveno z [17]) | 34 |
| Obr. 5.2: Blokové schéma obvodu TOP 261EN (převzato a upraveno z [19])..... | 38 |
| Obr. 5.3: Elektrické schéma transformátoru | 39 |
| Obr. 5.4: Uspořádání jednotlivých vinutí | 40 |
| Obr. 7.1: Modulová kmitočtová charakteristika ($U_{VST} = 300 \text{ mV}$)..... | 47 |
| Obr. 7.2: Modulová kmitočtová charakteristika s maximální a minimální korekcí ($U_{VST} = 300 \text{ mV}$) | 48 |
| Obr. 7.3: Vyvážení pravého a levého kanálu ($U_{VST} = 300 \text{ mV}$, $f = 1 \text{ kHz}$)..... | 48 |
| Obr. 7.4: Závislost zesílení předzesilovače na poloze potenciometru hlasitosti ($U_{VST} = 300 \text{ mV}$, $f = 1 \text{ kHz}$)..... | 49 |
| Obr. 7.5: Závislost zesílení předzesilovače na poloze potenciometru výšek ($U_{VST} = 300 \text{ mV}$, $f = 16 \text{ kHz}$)..... | 49 |
| Obr. 7.6: Závislost zesílení předzesilovače na poloze potenciometru hloubek ($U_{VST} = 300 \text{ mV}$, $f = 40 \text{ Hz}$) | 50 |
| Obr. 7.7: Křivky fyziologické regulace hlasitosti ($U_{VST} = 300 \text{ mV}$)..... | 50 |
| Obr. 7.8: Závislost zkreslení THD+N na kmitočtu pro různé hodnoty vstupních napětí ($A = 0 \text{ dB}$) | 51 |
| Obr. 7.9: Modulová kmitočtová charakteristika koncového stupně ($U_{VST} = 300 \text{ mV}$) | 52 |

| | |
|--|----|
| Obr. 7.10: Linearita koncového stupně ($f = 1 \text{ kHz}$) | 53 |
| Obr. 7.11: Závislost účinnosti koncového stupně na výstupním výkonu ($f = 1 \text{ kHz}$) | 53 |
| Obr. 7.12: Závislost zkreslení THD+N na výstupním výkonu zesilovače ($f = 1 \text{ kHz}$) | 54 |
| Obr. 7.13: Závislost zkreslení THD+N na kmitočtu vstupního signálu ($P_{VYST} = 50 \text{ W}$, $U_{VST} = 410 \text{ mV}$) | 54 |
| Obr. 7.14: Zatěžovací charakteristika pro výstup 12 V ($I_{30} = 2,5 \text{ A}$) | 56 |
| Obr. 7.15: Zatěžovací charakteristika pro výstup 30 V ($I_{12} = 200 \text{ mA}$) | 57 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tab. 4.1: Základní parametry obvodu TDA1524A (převzato z [11]) | 25 |
| Tab. 4.2: Základní parametry obvodu TAS5630B (převzato z [12]) | 26 |
| Tab. 4.3: Tabulka chybových stavů (převzato a upraveno z [14]) | 31 |
| Tab. 5.1: Výkonové nároky jednotlivých bloků zesilovače..... | 35 |
| Tab. 5.2: Vybrané parametry obvodu TOP 261 (převzato z [19])..... | 36 |
| Tab. 5.3: Parametry vybraného jádra | 39 |
| Tab. 6.1: Seznam součástí pro konstrukci zesilovače | 46 |
| Tab. 7.1: Srovnání naměřených hodnot s údaji výrobce [11] | 52 |
| Tab. 7.2: Vybrané naměřené parametry koncového stupně [12]..... | 55 |

1 ÚVOD

Audioteknika a výkonové audio zesilovače patří k velmi často používaným elektronickým zařízením a lze se s nimi setkat v mnoha aplikacích. Nízkofrekvenční zesilovače slouží k zesílení audiosignálů na takovou úroveň, která je dostatečná pro vybudění membrány reproduktoru. Z tohoto hlediska lze zesilovače dělit podle velikosti výstupního výkonu, který se může pohybovat od desítek miliwattů až po jednotky kilowattů. Zesilovače prošli a stále prochází mohutným vývojem. První elektronkové zesilovače se postupně vyvinuly až po dnešní integrované koncepce.

Zesilovače se nejčastěji dělí do tříd, které se liší polohou pracovního bodu tranzistoru. Každá třída má své výhody a nevýhody a záleží tedy na požadovaných parametrech zesilovače, jakých má být dosaženo. Například ve třídě A lze dosáhnout velmi malého zkreslení a tím vynikající kvality zvuku. Tyto výhodné vlastnosti jsou ale vykoupeny malou účinností dosahující teoreticky pouze 50 %. V důsledku malé účinnosti vzniká velké odpadní teplo, které je třeba odvést ze zařízení do okolí. To vede ke konstrukci rozměrného chladiče. Další zástupce "klasických" lineárních tříd je třída AB. V porovnání se třídou A dosahuje vyšších hodnot zkreslení, ale i vyšší účinnosti (teoreticky až 78,5 %). Vylepšením stávajících tříd vznikly třídy G a H, kde pro napájení koncového stupně je využito více napájecích zdrojů. Tím došlo ke zvýšení účinnosti.

Dnes se často používají pro zesílení audiosignálů zesilovače některé spínané třídy, přičemž mezi nejznámější patří třídy D, T, S a I. Tato skupina zesilovačů se liší od lineárních tříd tím, že koncové výkonové tranzistory pracují jako spínače. Zátěž je k napájecímu zdroji připojována skokově pouze na krátký okamžik, který je řízen z bloku modulátoru. Spínané zesilovače díky tomu dosahují teoretické účinnosti až 100 %. Nevýhodou může být o něco větší zkreslení než u třídy A.

První audio zesilovače byly konstruovány jako diskrétní řešení. Postupem času však byla zdokonalována technologie výroby integrovaných obvodů a diskrétních součástek. Dnešní technologie umožňují integrovat téměř všechny části zesilovače na jediný čip. Integrované audio zesilovače zejména ve třídě D, se dnes používají v mnoha komerčních zařízeních jako mobilní telefony, notebooky, MP3 přehrávače atd..

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí výkonového audio zesilovače třídy D s minimálním výstupním výkonem 2x80W. Jelikož řada světových výrobců elektronických součástek a obvodů nabízí spoustu integrovaných zesilovačů, bylo zvoleno integrované řešení. To je velmi výhodné, neboť sestavení výsledného zapojení je poměrně jednoduché a navíc výrobci na čip integrují celou řadu funkcí, například ochrany integrovaného obvodu před zničením apod. Pro buzení koncového stupně je zesilovač doplněn korekčním předzesilovačem pro ovládání hlasitosti, korekcí hloubek, výšek a vyvážení kanálů.

Součástí návrhu je rovněž napájecí zdroj. Z důvodu velkého požadovaného výstupního výkonu byl zvolen spínaný zdroj. Celé zařízení je uloženo do přístrojové skříně s vhodným rozmístěním ovládacích prvků.

2 ZESILOVAČE SPÍNANÉ TŘÍDY

Všechny zesilovače se dělí do tříd, které charakterizují jejich pracovní vlastnosti a princip, na kterém zesilovač funguje. Zesilovače můžeme rozdělit na spínané a klasické lineární. Základní rozdíl je v pracovní oblasti, ve které pracují koncové tranzistory. U lineární třídy využívají koncové tranzistory lineární části převodní charakteristiky tranzistoru. Jejich funkce je tedy podobná rezistoru s plynule proměnnou hodnotou odporu. Jako zástupce této skupiny, které se používají pro zesílení audiosignálů, můžeme uvést třídu A nebo AB. Spínané zesilovače se odlišují zejména tím, že koncové tranzistory nepracují v lineární oblasti, ale v oblasti saturace. Principiální funkce je tedy spíše než rezistoru s plynule proměnnou hodnotou odporu podobná spínači, který je střídavě v poloze zapnuto a rozepnuto. Poměr mezi dobou sepnutí a rozepnutí je řízen z modulátoru. [1]

Jelikož jsou ztráty v koncových tranzistorech velmi malé, mají zesilovače spínané třídy velkou účinnost dosahující teoreticky až ke 100 %. Z velké účinnosti zesilovačů vyplývají minimální nároky na chlazení. Potřeba buď žádného nebo jen velmi malého chladiče přispívá k celkové robustnosti zesilovače a kompaktnosti řešení. Ke konstrukci výkonového audio zesilovače je obvykle použito pouze několik integrovaných obvodů spolu s několika pasivními prvky. Rozměry zesilovače tedy mohou být miniaturní při zachování vynikajících hodnot audio parametrů. [2]

2.1 Princip

Na obr. 2.1 je principiální schéma zesilovače spínané třídy. Vstupní audio signál je přiveden do bloku předzesilovače, realizující impedanční oddělení. Dále do modulátoru, kde je signál upraven do takové "podoby", která je použitelná pro efektivní řízení koncových tranzistorů. Jako příklad uveďme PWM modulaci. Modulovaný signál je zesílen v bloku koncových tranzistorů. Střední hodnota výkonových impulzů na výstupu koncového stupně nese užitečnou informaci o audiosignálu. Takový signál má velmi široké spektrum. Abychom na výstupu obdrželi nízkofrekvenční signál, je třeba výstup opatřit filtrem typu dolní propust.[2]



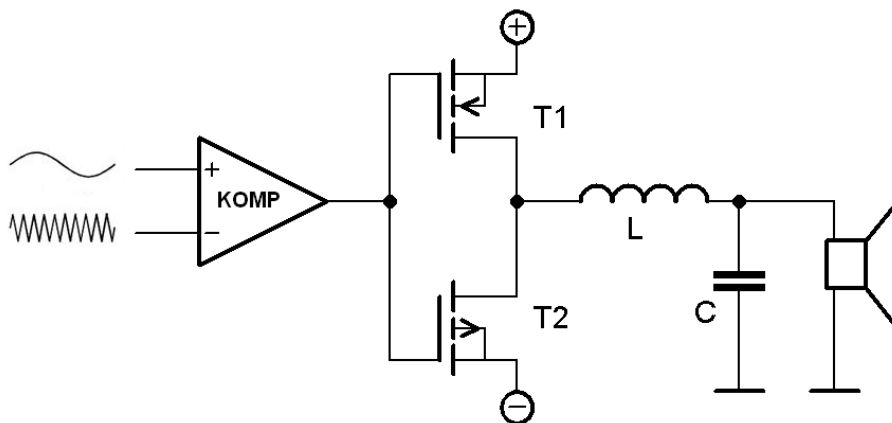
Obr. 2.1: Princip zesilovače spínané třídy (převzato a upraveno z [2])

2.2 Rozdělení spínaných zesilovačů

Spínané výkonové zesilovače rozdělujeme do několika pracovních tříd. Rozdělení se provádí podle různých modifikací zapojení, užitých modulací, účinností atd.. Dále můžeme spínané zesilovače rozdělit podle toho, zda zpracovávají digitální nebo analogový vstupní signál.

2.2.1 Třída D

Základní schéma zesilovače ve třídě D je na obr. 2.2. U této skupiny se používá PWM modulace, na kterou je převeden vstupní nízkofrekvenční signál pomocí komparátoru. Porovnáním s pilovitým napětím o vysokém kmitočtu vznikne PWM signál. Kmitočet pilovitého napětí musí být podle vzorkovacího teorému alespoň dvakrát větší než největší kmitočet obsažený ve spektru audiosignálu. Na výstupu komparátoru jsou tedy pravoúhlé impulsy o vysokém kmitočtu s proměnnou šířkou, která nese informaci o analogovém vstupním signálu. Pulzně šířkový modulovaný signál je poté zesílen koncovými tranzistory a spektrum výkonového signálu je omezeno výstupním LC filtrem.



Obr. 2.2: Zjednodušené zapojení zesilovače ve třídě D (převzato a upraveno z [3])

Největší předností zesilovačů ve třídě D je velká účinnost, pohybující se zpravidla kolem 80 % a více. Velká účinnost vyplývá z toho, že koncové tranzistory výkonového zesilovače ve třídě D pracují ve spínaném režimu - buď jsou vypnuté nebo plně sepnuté. Nevýhoda, která vyplývá ze samotného principu činnosti, je sice nevelké, ale přeci jen větší zkreslení, než se běžně dosahuje u zesilovačů ve třídě A.[4][5]

2.2.2 Třída S

Zesilovače třídy S jsou novější modifikací zesilovačů třídy D. Tato třída má vylepšenou konstrukci a také došlo ke zlepšení techniky zpracování signálu. Způsob jakým je toho dosaženo se může lišit výrobcem. Jedna z metod je zdokonalení modulační techniky. Příkladem je modulace s rozprostřeným spektrem, kdy frekvence nosné není konstantní,

ale mění se v čase. Mnoho světových výrobců používá své vlastní (většinou patentově chráněné) modulační techniky. Další technikou může být použití tzv. "aktivních bloků", které upravují spínání koncových tranzistorů. Dochází k prodloužení doby sepnutí a rozepnutí a tím ke snížení strmosti hran výstupních impulsů. Šířka spektra výstupního signálu je pak daleko menší. Zesilovače této třídy většinou nepotřebují na výstupu LC filtr pro odstranění vysokofrekvenční části spektra. V anglosaské literatuře jsou často označovány jako "filterless amplifier".[6]

2.2.3 Třída T

Výkonové zesilovače třídy T pracují na podobném principu jako zesilovače třídy D, ale s použitím vylepšeného a velice dobře propracovaného algoritmu řízení. Zpětná vazba není pevně daná, ale je řízena procesorem. Tento speciální algoritmus vyvinula firma Tripath Technology. Nízkofrekvenční výkonové zesilovače s těmito obvody dosahují vynikajících kvalitativních parametrů, mezi něž v první řadě patří velmi malé zkreslení a vysoká účinnost až kolem 90 % při dosažení velkých výstupních výkonech. Odstup signálu od šumu činí až 95 dB, zkreslení THD+N menší jak 0,1 %.[7]

2.2.4 Třída I

Třída I je firemním označením. Patent vynalezla firma Crown Audio. Tato třída je známa jako proudově vyvážený zesilovač - BCA (Balanced Current Amplifier). Technika využívá symetrické pulzně šířkové modulace.

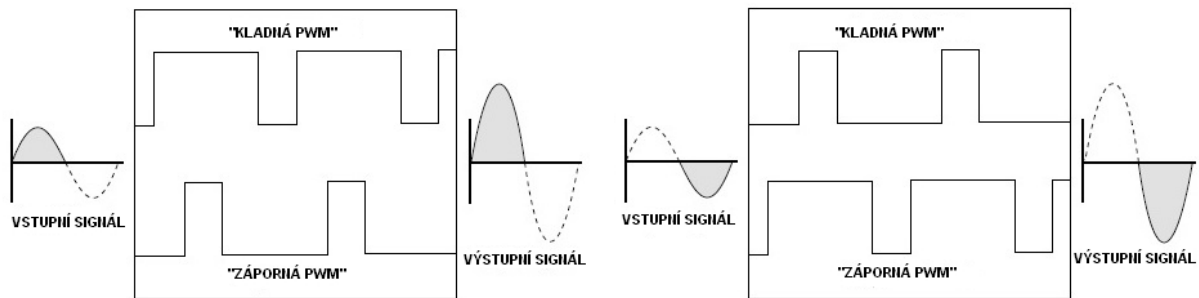
Používají se dva dvojčinně zapojené tranzistory. Na první tranzistor je přiváděna "kladná PWM" a na druhý tranzistor "záporná PWM". Podle polarity vstupního signálu se mění střída kladné a záporné PWM. Střední impulsů zůstávají ale nezměněny, jsou upnuty ke stále stejnému časovému okamžiku.

Na obr. 2.3 je ukázán případ, kdy buď na vstup není přiváděn žádný signál, nebo vstupní signál prochází nulou. Střída je 50% a tranzistory jsou střídavě spínány. Na výstupu není žádný signál.



Obr. 2.3: Třída I, průchod nulou (převzato a upraveno z [8])

Při kladné polaritě vstupního signálu se impulzy "kladné PWM" rozšiřují zatímco "záporné PWM" zužují. Při záporné polaritě vstupního signálu je tomu naopak, viz obr. 2.4.



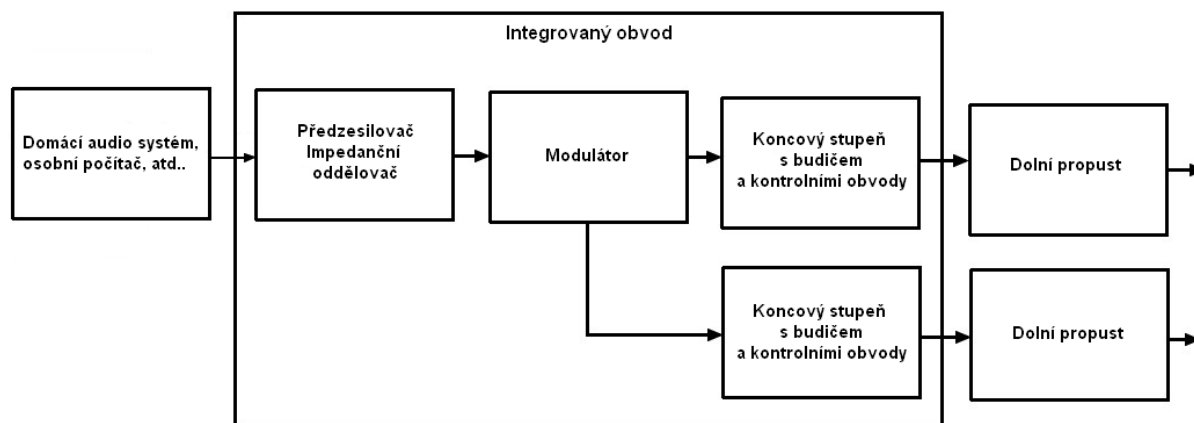
Obr. 2.4: Třída I, kladná a záporná půlvlna vstupního signálu (převzato a upraveno z [8])

Zesilovače ve třídě I mají vysokou účinnost až 90 % a velmi malé zkreslení. Energie, která se vrací z reproduktoru do zesilovače je s malými ztrátami opět vrácena zpět do reproduktoru. Například lineární (nespínané) zesilovače jsou nuceny vrácenou energií přeměnit v teplo. Díky tomu se zesilovače ve třídě I příliš nezahřívají a není třeba používat rozměrné chladiče.[8]

3 AUDIO ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ D

3.1 Základní popis

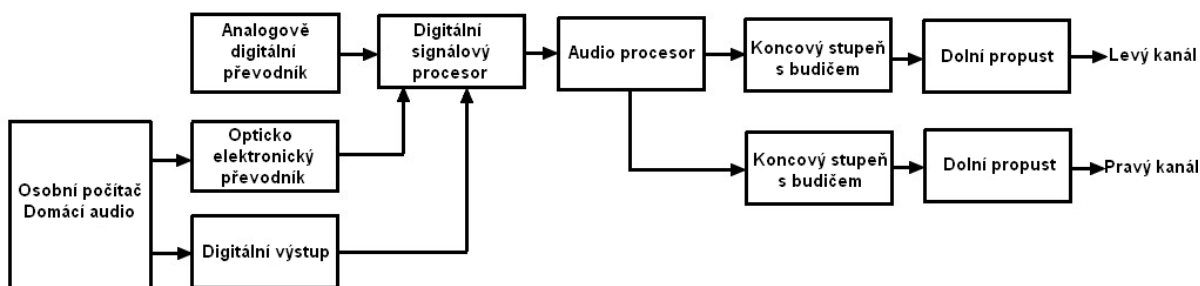
Princip těchto zesilovačů je založen na pulzně šířkové modulaci PWM. Koncové tranzistory nepracují v lineární oblasti ale fungují jako spínače. Jsou buď úplně vypnuté nebo plně sepnuté. Ztrátový výkon je tak relativně malý. To se příznivě promítá v účinnosti, která dosahuje přes 80 %.



Obr. 3.1: Základní blokové schéma zesilovače ve třídě D (převzato a upraveno z [2])

Blokové schéma zesilovače ve třídě D je na obr. 3.1. Vstupní signál (digitální nebo analogový) je přiváděn do bloku předzesilovače. Zde dochází k potřebnému zesílení signálu a k impedančnímu oddělení výkonového zesilovače od zdroje signálu (osobní počítač, CD přehrávač, atd..). Další důležitou částí je blok modulátoru. Zde se vstupní audiosignál převádí do takové podoby, kterou je možné efektivně řídit spínací proces tranzistorů v koncovém stupni. V případě detekce nadproudu nebo tepelného přetížení koncového stupně je obvykle možný přímý zásah do řízení spínacího procesu a tím jejich rozepnutí z bloku ochrany proti destrukci. Poslední částí zesilovacího řetězce je výstupní filtr. Úkolem filtru je potlačit nežádoucí vysokofrekvenční spektrální složky, které jsou obsaženy v modulovaném výkonovém signálu. [2]

Audio zesilovače ve třídě D je možné rozdělit na plně digitální a analogové zesilovače. Plně digitální výkonové zesilovače umožňují zpracovat vstupní signál přímo v digitální podobě, naopak u analogových audio zesilovačů, je potřeba na jejich vstup přivést analogový signál.



Obr. 3.2: Blokové schéma plně digitálního zesilovače ve třídě D (převzato a upraveno z [2])

Mezi velké výhody plně digitálních výkonových audio zesilovačů pracujících ve třídě D patří miniaturní rozměry, vysoká účinnost, vynikající hodnoty audio parametrů zesilovače a malá citlivost na časovou změnu hodnot parametrů součástek. K jejich konstrukci je obvykle využito pouze několik integrovaných obvodů. Výhodou je možnost regulace audio korekcí případně i dalších zvukových efektů digitálně v nějakém programovatelném obvodu DSP, FPGA nebo použitím digitálního audio procesoru. Kompletní blokové schéma digitálního zesilovače ve třídě D je na obr. 3.2.[2][3]

Výhodné vlastnosti analogových zesilovačů ve třídě D jsou v podstatě shodné s vlastnostmi digitálních zesilovačů. I analogové zesilovače lze sestavit pouze z jediného integrovaného obvodu s minimálním počtem externích prvků (většinou pasivních).

Případ, kdy je nutné na výstup integrovaného obvodu připojit i aktivní prvky tvoří tzv. "PWM drivers". Tyto prvky v sobě zahrnují budiče výkonových koncových tranzistorů a obvody zabráňující destrukci zesilovače. Dále mohou obsahovat i modulátor. [2]

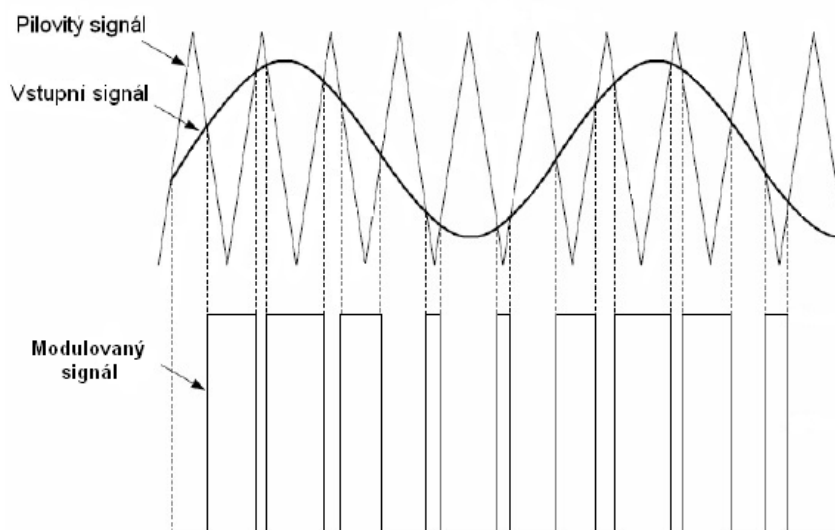
3.1.1 Vstupní obvody

Zesilovače třídy D je možné rozdělit do dvou skupin dle typu vstupních obvodů na zesilovače s analogovým vstupem a zesilovačem se vstupem digitálním. V prvním případě je vstupní blok tvořen analogovým předzesilovačem, který má za úkol vstupní signál pouze napěťově zesílit a impedančně přizpůsobit. V druhém případě jsou ve vstupním bloku obsaženy digitální obvody a zesilovač lze označit jako plně digitální. Toto provedení umožňuje připojení digitalizovaného audio signálu. Taková koncepce oproti analogovému řešení podstatně snižuje výrobní náklady při větších sériích. Nespornou výhodou může být i zmenšení počtu A/D nebo D/A převodů signálu, které by způsobovaly další zkreslení a kvantizační šum. [2]

3.1.2 Modulátor

Další blok na obr. 3.1 je modulátor, který tvoří nejdůležitější část zesilovače třídy D a značně ovlivňuje jeho výsledné parametry. Činnost zesilovače ve spínacím režimu je umožněna přeměnou nízkofrekvenčního signálu se spojitě se měnící velikostí okamžitého napětí na sled pravouhlých impulsů, jejichž šířka (tzv. střída) se mění v závislosti na změnách okamžitého napětí nízkofrekvenčního signálu.

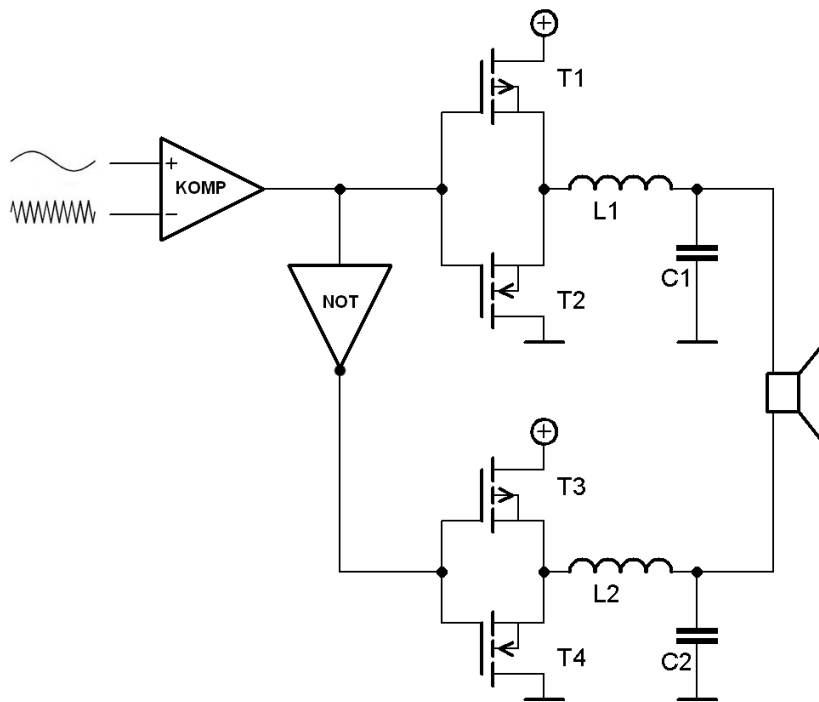
Mezi nepoužívanější patří modulátory s impulzně šířkovou modulací, vylepšené impulzně šířkové modulátory, delta modulátory a sigma-delta modulátory prvního i vyššího řádu. Mnoho světových výrobců používá své vlastní patentově chráněné modulační techniky.



Obr. 3.3: Vznik PWM modulovaného signálu.

Na obr. 3.4 je typické zapojení audio zesilovače s impulzně šířkovým modulátorem. Výstupní tranzistory jsou zapojeny do plného mostu (více následující kapitola).

Na výstupu komparátoru je logická nula, pokud referenční napětí na invertujícím vstupu překročí úroveň vstupního signálu na neinvertujícím vstupu. Tím dojde k sepnutí tranzistorů MOSFET T1 a T4. V opačném případě je na výstupu logická jednička a dojde k sepnutí tranzistorů T2 a T3. Na výstupu komparátoru obdržíme pulzně šířkový modulovaný signál (obr. 3.3). Invertor NOT slouží k negaci logické úrovně a vytváří tak komplementární řídicí signál pro tranzistory T3 a T4. [2]



Obr. 3.4: Zapojení zesilovače s impulzně šířkovým modulátorem (převzato a upraveno z [2])

Zesilovače s touto modulací je nutné na výstupu opatřit filtrem typu dolní propust. To zejména kvůli rušení, neboť PWM signál je tvořen strmými hranami pulzů o vysoké frekvenci. Vodiče tak mohou působit jako antény pro emitování vysokofrekvenčního rušení. Řešením je použití některé z vylepšených typů modulací.

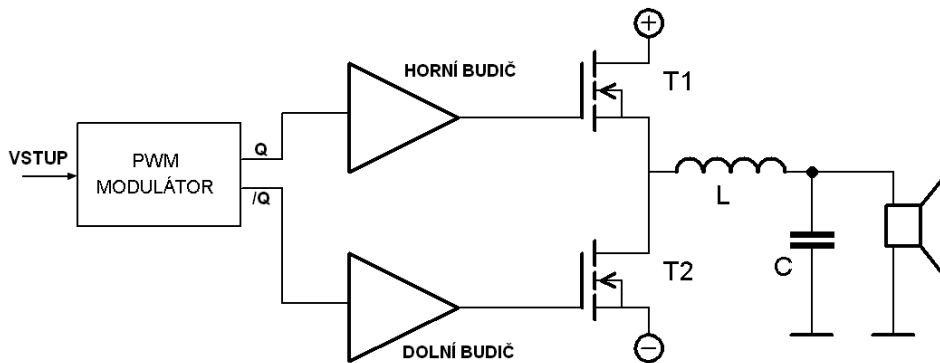
3.1.3 Koncový stupeň s budičem

Jako výkonové spínací prvky se nejčastěji používají tranzistory řízené elektrickým polem MOSFET. Jelikož koncové tranzistory spínají indukivní zátěž na vysoké frekvenci jsou na ně kladeny požadavky jako malý odpor v sepnutém stavu ($R_{DS(ON)}$), velmi krátká zapínací a vypínací doba a rovněž nízké hodnoty parazitních prvků spínače (kapacity). Výkonové tranzistory MOSFET musí být řízeny z tvrdého zdroje napětí, protože pro jejich sepnutí je třeba dodat do řídicí elektrody "gate" výkonový pulz. To souvisí s parazitními kapacitami MOSFETu, které je při sepnutí potřeba nabít a při vypnutí zase vybit. Obecně je výhodnější použití koncových výkonových tranzistorů MOSFET pouze s indukovaným kanálem typu N, neboť mají díky větší pohyblivosti elektronů než děr lepší vlastnosti.

Koncové tranzistory mohou být u spínaných zesilovačů zapojeny buď do polovičního mostu nebo do plného mostu.

3.1.3.1 Zapojení koncových tranzistorů do polovičního mostu

Na obr. 3.5 je ukázáno zapojení koncových tranzistorů do polovičního mostu. Napájení bývá většinou symetrické proti zemi. Řídicí obvod tzv. budič, musí být navrhnut tak, aby nemohlo dojít k současnému sepnutí obou tranzistorů. Tím by došlo ke zkratování napájecího zdroje a ke zničení tranzistorů. Zavádí se tedy jistá časová prodleva mezi rozepnutím sepnutého tranzistoru a sepnutím nevodivého tranzistoru. Tato doba se označuje jako "dead time". U tohoto typu zapojení je nutné zavést zpětnou vazbu, která eliminuje stejnosměrnou složku a napětovou nesymetrii na výstupu, což by mohlo způsobit poškození reproduktoru.[9]



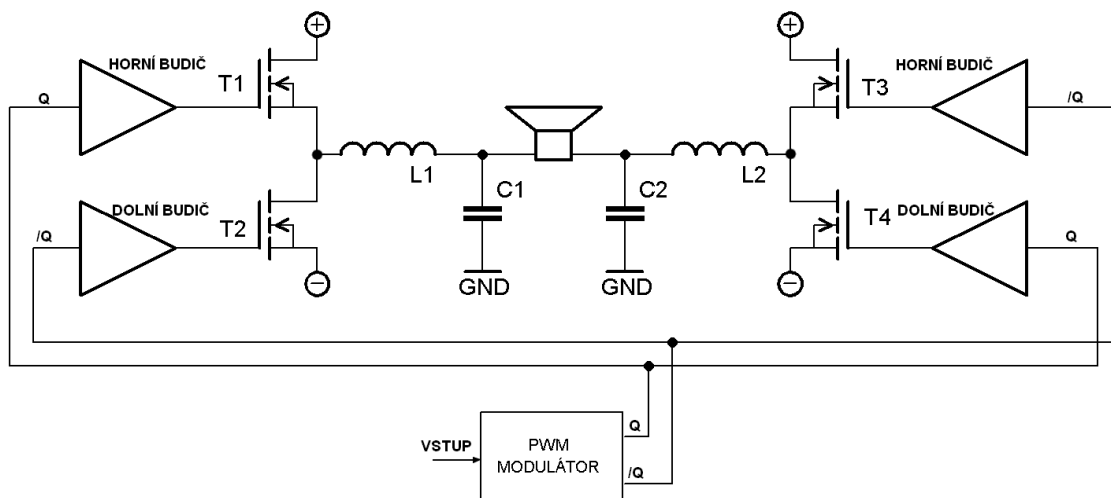
Obr. 3.5: Zapojení koncových tranzistorů do polovičního mostu (převzato a upraveno z [9])

Mezi výhody tohoto zapojení patří použití dvou tranzistorů na každý audio kanál, jednodušší budič i výstupní filtr. Nevýhodou polovičního mostu je jev známý jako "bus pumping", kdy část energie se z výstupního filtru snaží vracet zpět do napájecí sítě. Jev můžeme odstranit například použitím dostatečně dimenzovaných elektrolytických kondenzátorů na výstupu napájecího zdroje nebo zapojením koncových tranzistorů do plného mostu. [2]

3.1.3.2 Zapojení koncových tranzistorů do plného mostu

Na obr. 3.6 je zobrazeno zapojení koncových tranzistorů do plného mostu. Na rozdíl od polovičního mostu, zde je napájení pouze jedné polaridy. Budič musí být navržen tak, aby nedošlo k současném sepnutí obou tranzistorů v jedné větvi. Zpětná vazba u tohoto zapojení není podmínkou. Téměř vždy se ale zavádí z důvodů zlepšení parametrů zesilovače.

Výhodnou vlastností tohoto zapojení je absence jevu "bus pumping". Dále je možno dosáhnout daleko větších výstupních výkonu než v případě polovičního mostu. Nevýhodou může být použití více tranzistorů na jeden kanál, složitější budič a výstupní filtr.[3]



Obr. 3.6: Zapojení koncových tranzistorů do plného mostu (převzato a upraveno z [9])

Existuje nepřehledné množství možností, jak řídit spínací proces výkonových tranzistorů. K řízení lze využít jak diskrétní řešení tak integrované obvody. Každé řešení má své výhody a nevýhody. Právě integrované obvody se jeví jako velmi výhodné pro malé a střední výkony (do stovek W). Integrovanými budiči (tzv. "PWM drivers") je možné řídit jeden či více MOSFETů s indukovaným kanálem typu N nebo P, popřípadě i kombinaci obou.[2]

Podle počtu a umístění řízených tranzistorů dělíme budiče následovně:

- "Low-side Driver" - obvod určený k řízení MOSFET tranzistorů, kdy vývod "source" je připojen k nulovému potenciálu.
- "High-side Driver" - elektroda "drain" je připojena na kladný potenciál zdroje. Obvod budiče musí být galvanicky oddělen, tzv. "plovoucí".
- "Half-bridge Driver" - tento obvod se používá pro řízení dvojici tranzistorů zapojených do polovičního mostu.
- "Full-bridge Driver" - obvodem je možno řídit čtveřici tranzistorů zapojených do plného mostu (viz obr. 3.6). Často lze tento obvod použít pro řízení dvou dvojic tranzistorů zapojených do polovičního mostu.

K realizaci výkonového zesilovače ve třídě D lze využít i tzv. "power stage" obvody. Tyto integrované obvody v jednom pouzdru obsahují budiče i koncové tranzistory. Dále většinou obsahují i diagnostické obvody. Koncové tranzistory jsou zapojeny buď do polovičního nebo plného mostu. [2]

3.1.4 Výstupní filtr

Výstupní filtr je další velmi důležitou částí koncového zesilovače. Úkolem výstupního filtru je potlačit nežádoucí vysokofrekvenční část spektra výkonového modulovaného signálu. Používají se dolnopropustní filtry druhého (i vyššího) řádu. Výstupní filtr se často realizuje třemi způsoby:

- feristor a kondenzátor
- cívka a kondenzátor (LC filtr)
- na výstupu není žádný filtr

Volba výstupního filtru zesilovače je převážně závislá na délce spojovacího vodiče mezi zesilovačem a reproduktorem (resp. reproduktorovou soustavou), dále na výstupním výkonu zesilovače, použité modulaci a rozložení součástek na desce plošného spoje.

Výstupní filtr tvořený feristorem a kondenzátorem se používá výhradně při užití modulátorů s vylepšenými vlastnostmi z hlediska elektromagnetické interference. Je třeba pečlivý návrh desky plošného spoje spolu s vhodným rozmístěním součástek. Propojovací vodiče mezi reproduktorem a zesilovačem by měli být co nejkratší a také opatřeny stíněním. Velkou nevýhodou je rovněž fakt, že mezní kmitočet se pohybuje řádově v jednotkách MHz. Tento filtr se vyznačuje nižší cenou a rozměry ve srovnání s robustními LC filtry.[2]

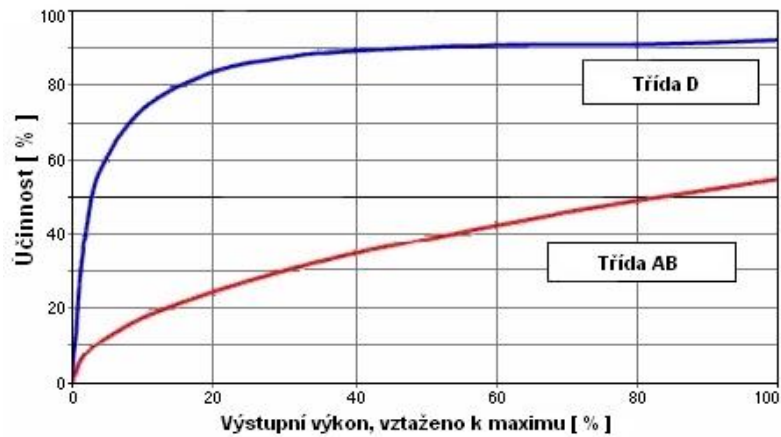
U zesilovačů jejichž výstupní výkon se pohybuje řádově nad desítkami wattů, jsou na svém výstupu prakticky výhradně opatřeny LC filtrem typu dolní propust 2. a vyššího řádu. Nevýhodou tohoto filtru jsou velké rozměry a také cena (zejména cívky). Při návrhu filtru je nutné volit zlomový kmitočet v řádu desítek kHz, aby se co nejvíce potlačila nežádoucí část spektra. Jako aproximace se používá Butterworthova nebo Besselova. Někdy se pro lepší potlačení vysokých frekvencí (nad 1 MHz) používá kombinace LC filtru a filtru tvořeného feristorem a kondenzátorem.[2][9]

Mechanicky rozměrná konstrukce a často vysoká cena spojená se zhotovením výstupního filtru zesilovače způsobila, že někteří výrobci integrovaných obvodů zesilovačů pracujících ve třídě D, vyvinuli vylepšené algoritmy pro řízení koncových tranzistorů. Tím odpadla nutnost výstup zesilovače opatřit filtrem. Zátěž (reproduktor) však musí vykazovat silně induktivní charakter. Rovněž propojovací vodiče by měli být co nejkratší a opatřeny stíněním.[2][3]

3.2 Srovnání se třídou AB

Zesilovače ve třídě D dosahují vynikajících kvalitativních parametrů mezi něž v první řadě patří nízké harmonické zkreslení a vysoká účinnost (kolem 80 %) při dosažených velkých výstupních výkonech. Z velké účinnosti automaticky vyplývá řada dalších výhod, jako jsou minimální nároky na chlazení a následně i nižší konstrukční náklady s chlazením spojené.

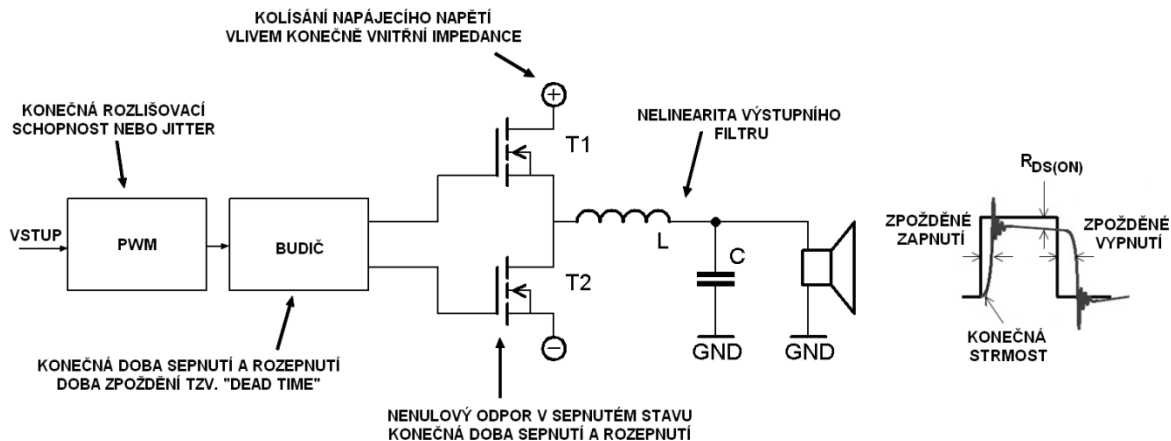
Obrázek 3.7 zobrazuje porovnání účinností třídy D a AB v závislosti na relativním výstupním výkonu. Účinnost třídy D je velká už od nízkého výstupního výkonu a dále se mění jen velmi málo. Kdežto u třídy AB účinnost postupně roste při vzrůstajícím výstupním výkonu.



Obr. 3.7: Srovnání třídy D a AB (převzato a upraveno z [9])

3.3 Příčiny vzniku zkreslení

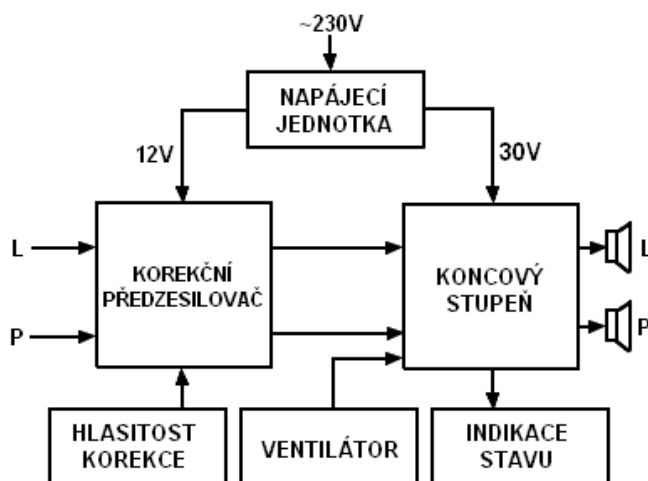
Ideální zesilovač ve třídě D nemá žádné zkreslení a nedochází ke generování šumu v audio pásmu. Navíc disponuje teoretickou účinností až 100 %. Jak je ale vidět na obr. 3.8, reálný zesilovač má nedokonalosti způsobující šum a zkreslení. Tyto nedokonalosti jsou způsobeny zejména koncovým stupněm - spínací prvky. Dále modulátorem a menší měrou přispívá i výstupní filtr.



Obr. 3.8: Zkreslení u reálného zesilovače třídy D (převzato a upraveno z [10])

4 NÁVRH ZESILOVAČE VE TŘÍDĚ D

Uspořádání zesilovače jako celku ukazuje obr. 4.1. Zařízení se skládá z několika bloků. Audiosignál je nejprve přiveden na vstup korekčního předzesilovače, který umožňuje korekci kmitočtové charakteristiky a ovládání hlasitosti. Takto upravený signál vstupuje do koncového stupně, kde je výkonově zesílen. V bloku indikace stavu dochází k signalizaci základních stavů koncového stupně, jakými jsou teplota, limitace, odpojení zátěže, aj. K chlazení výkonového zesilovače slouží kromě pasivního chladiče také ventilátor. Všechny bloky jsou napájeny z napájecí jednotky.



Obr. 4.1: Kompletní blokové schéma zesilovače

4.1 Korekční předzesilovač

Úkolem předzesilovače je zesílit vstupní audiosignál na takovou úroveň, která je vhodná pro další zpracování v koncovém stupni. Dále realizuje impedanční oddělení zesilovače, který nesmí příliš zatěžovat zdroj signálu. Korekční předzesilovač umožňuje upravit kmitočtovou charakteristiku audiosignálu v několika pásmech. Obvykle se jedná o hloubky, středy a výšky. Nastavením zesílení předzesilovače můžeme měnit hlasitost, tedy výstupní výkon koncového stupně.

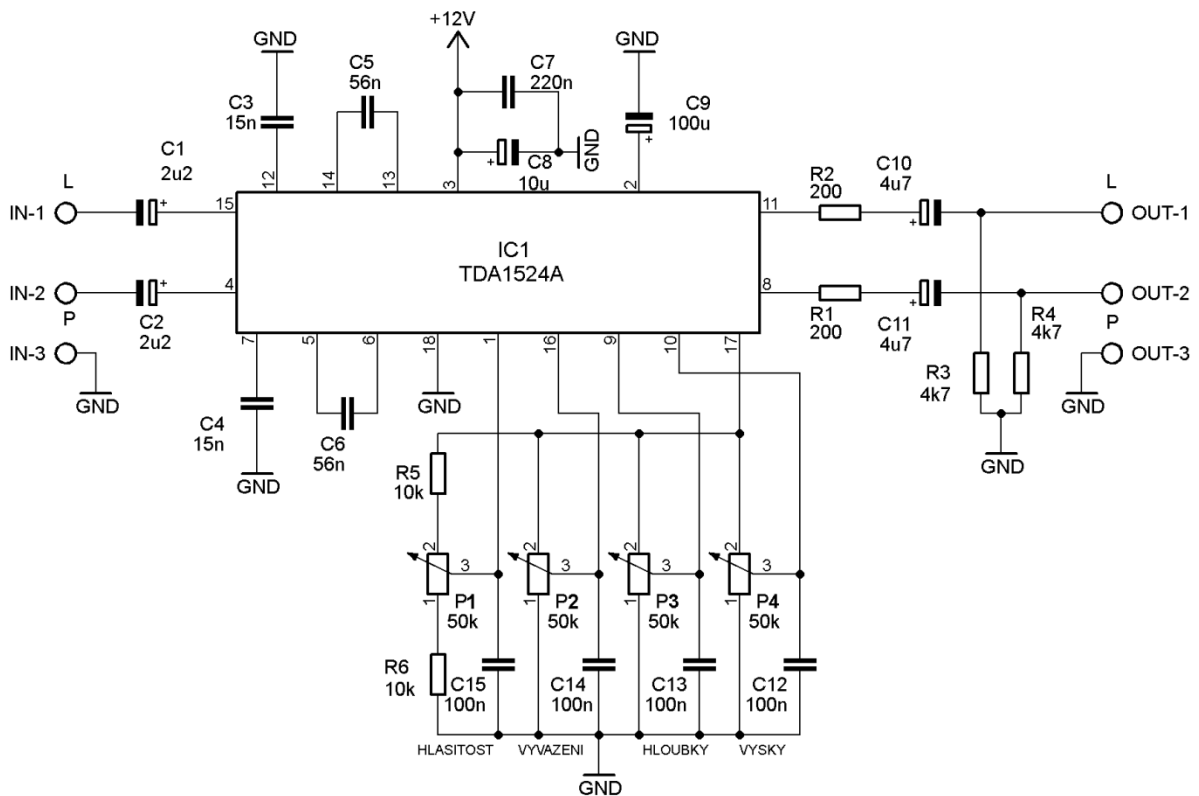
V této práci je jako korekční předzesilovač použit integrovaný obvod (IO) TDA1524A od firmy Philips [11]. Jedná se o obvod, který obsahuje funkce jak pro ovládání hlasitosti a kmitočtové korekce tak vyvážení kanálů. Dále umožňuje zapnutí funkce fyziologické regulace. Základní parametry obvodu jsou v tab. 4.1.

Zapojení předzesilovače je na obr. 4.2. Schéma je převzaté od výrobce. Veškeré funkce tohoto obvodu jsou řízeny stejnosměrným napětím z lineárních potenciometrů P1 až P4. Jelikož audiosignál neprochází přes tyto potenciometry, nedochází k ovlivňování signálu šumem. Ovládání může být umístěno libovolně daleko od integrovaného obvodu, což lze využít k realizaci dálkového ovládání.

Tab. 4.1: Základní parametry obvodu TDA1524A (převzato z [11])

| Parametr | Hodnota |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Napájecí napětí | 7,5 - 16,5 V |
| Maximální zisk | 22 dB |
| Maximální vstupní napětí | 300 mV (G = 20 dB) 3 V (G = 0dB) |
| Maximální výstupní napětí | 3 V |
| Vstupní impedance | 10 kΩ |
| Výstupní impedance | 300 Ω |
| Poměr S/N | 85 dB (G = 0 dB) |
| THD | 0,3 % |

Vstupní signál vstupuje do IO přes vazební kondenzátory C1 a C2. Výstup je vyveden na piny 11 a 8. Výrobce doporučuje použití rezistorů R1 a R2 pokud kapacitní zátěž přesahuje 200pF. Kondenzátory C12 až C15 slouží k oddělení střídavé složky ze vstupních pinů. Korekční předzesilovač je napájen napětím 12 V, které je blokováno kondenzátory C7 a C8.



Obr. 4.2: Zapojení korekčního předzesilovače

4.2 Koncový stupeň

Výkonový zesilovač musí mít dle zadání výstupní výkon minimálně 2x80 W. Z toho důvodu byl vybrán "power stage" obvod TAS5630B od firmy Texas Instruments [12]. Jedná se o vysoce výkonný analogový zesilovač třídy D s integrovanou zpětnou vazbou, jehož výstupní výkon dosahuje až 2x300 W ve stereo módu. Čip má integrovány všechny důležité bloky pro činnost koncového zesilovače. Základní parametry obvodu jsou uvedeny v tab. 4.2.

Tab. 4.2: Základní parametry obvodu TAS5630B (převzato z [12])

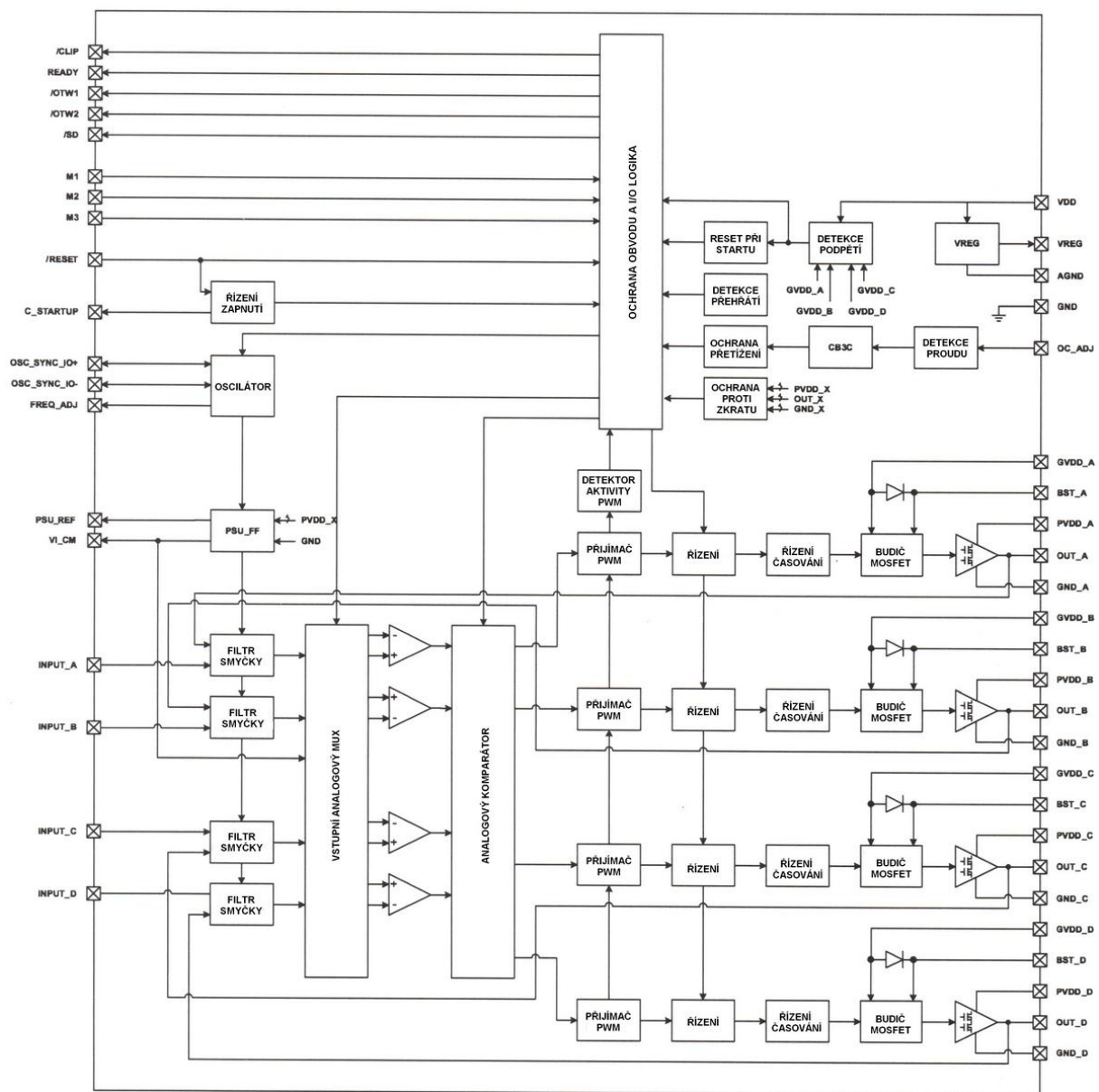
| Parametr | | Hodnota |
|---|-----------------------------------|---------------|
| P _{VYST} - výstupní výkon na kanál | Z _L = 4 Ω, THD+N = 10% | 300 W |
| | Z _L = 8 Ω, THD+N = 10% | 160 W |
| | Z _L = 4 Ω, THD+N = 1% | 240 W |
| | Z _L = 8 Ω, THD+N = 1% | 125 W |
| PVDD_X | | 25 - 52,5 V |
| GVDD_X, VDD | | 10,8 - 13,2 V |
| f _{PWM} | | 385 - 415 kHz |
| THD+N (100 W, 1 kHz) | | < 0,05 % |
| Účinnost | | > 88 % |
| Dynamický rozsah | | 100 dB |
| Poměr S/N | | 100 dB |
| Vstupní impedance | | 33 kΩ |
| Zisk | | 23 dB |

Blokové schéma integrovaného obvodu je na obr. 4.3. Vstupní signál se přivádí na piny INPUT_X, kde pokračuje do bloku FILTR SMYČKY. V tomto bloku se zpracovává vstupní signál spolu se zpětnovazebním signálem. Dále signál postupuje přes VSTUPNÍ ANALGOVÝ MUX do bloku ANALGOVÝ KOMPARÁTOR, kde dochází ke generování PWM modulace komparací vstupního signálu a signálu z oscilátoru. Blok PŘIJÍMAČ PWM zpracovává PWM signál a hlídá jeho parametry prostřednictvím zpětné smyčky. V bloku ŘÍZENÍ je možno provést odpojení koncových tranzistorů od zátěže při překročení maximální teploty nebo zkratu. K řízení vhodného časování pro spínání koncových tranzistorů dochází v části ŘÍZENÍ ČASOVÁNÍ. Zajišťuje například dobu zpožděného zapnutí "dead time". Poslední částí je BUDIČ MOSFET spolu s blokem výkonových tranzistorů. Výkonově zesílený modulovaný signál PWM je vyveden na výstupy OUT_X. Pro napájení koncových tranzistorů slouží napětí PVDD_X. Na pin GVDD_X se přivádí napětí pro budiče. Obvody společné pro všechny kanály jsou napájeny z pinu VDD.

Pomocí pinů M1, M2 a M3 je možné výstup zesilovače konfigurovat do různých režimů:

- 2x BTL - dva samostatné kanály zapojené do plného mostu (2x300 W)
- 1x PBTL - jediný kanál, výstup zapojený paralelně (1x400 W)
- 4xSE - čtyři samostatné kanály (4x145 W)
- 1x BTL + 2xSE - dva kanály zapojené do polovičního mostu a jeden kanál do plného mostu - vhodné pro subwoofer

V této práci je návrh proveden pro mód 2xBTL, tedy dva samostatné kanály (levý a pravý) s minimálním výstupním výkonem 80 W na kanál.

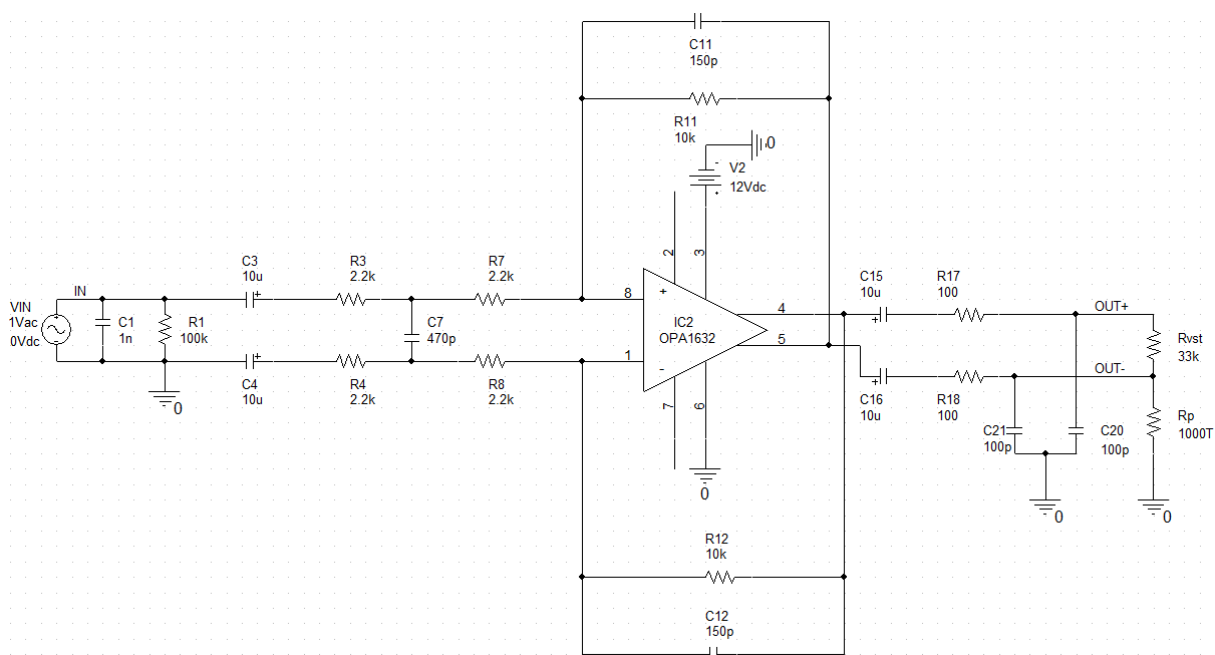


Obr. 4.3: Blokové schéma obvodu TAS5630B (převzato a upraveno z [12])

Kompletní zapojení výkonového zesilovače je uvedeno v příloze B.1. Vstupní signál je přiveden na vstupní svorky L_IN a R_IN. Dále je veden přes vazební členy a předzesilovač do integrovaného obvodu. Zesílený audiosignál je z výstupů OUT_X veden do výstupního filtru, který je tvořen LC filtrem a Boucherotovým členem. Na výstup je možno připojit reproduktor s impedancí 4 až 8 Ω . Návrh je proveden pro hodnotu 4 Ω . Napájecí napětí koncových tranzistorů je 30 V. Předpokládaný výstupní výkon je 2x100W. Budiče a společné obvody jsou napájeny 12 V. Kmitočet interního oscilátoru je nastaven pomocí rezistoru R22 na hodnotu 400 kHz.

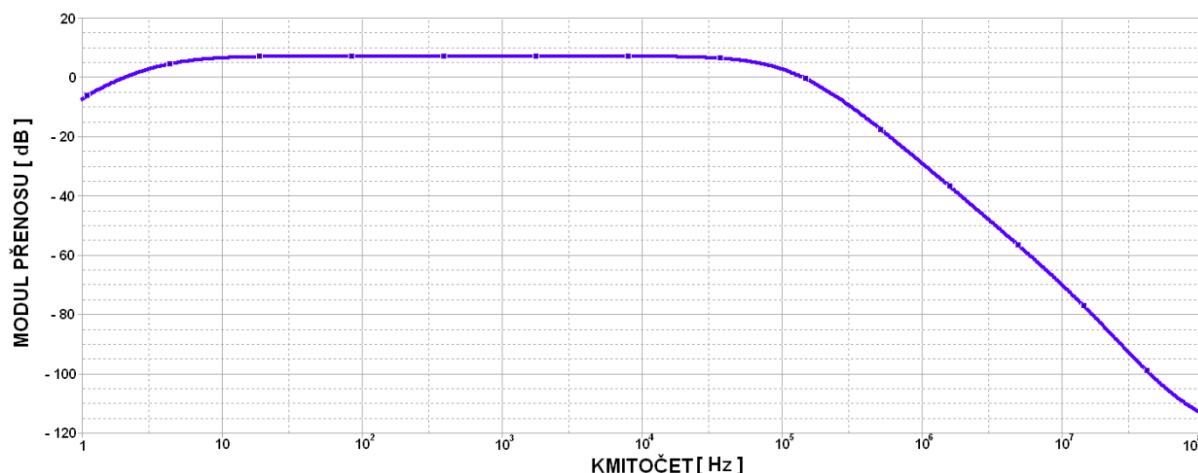
4.2.1 Předzesilovač

Jako předzesilovač koncového zesilovače je použit integrovaný obvod OPA1632 od firmy Texas Instruments [13]. Jedná se o diferenční operační zesilovač, který poskytuje nejvyšší audio kvalitu spolu s velmi malým šumem, zkreslením, velkou rychlostí přeběhu a šířkou pásma až 180 MHz. Pro správnou funkci koncového stupně je třeba signály B a D otočit o 180°. Úkolem předzesilovače je tedy převést vstupní nesymetrický signál vztahovaný vůči zemi na diferenční. Zapojení je realizováno jako pásmová propust s dolním mezním kmitočtem 3,8 Hz pro odstranění stejnosměrné složky ze vstupního signálu a horním mezním kmitočtem 81 kHz. Zisk v propustném pásmu činí 7 dB pro zesílení signálu z korekčního předzesilovače. Pro každý kanál je použit jeden předzesilovač.



Obr. 4.4: Zapojení předzesilovače v simulačním programu PSpice

Na obr. 4.4 je zapojení předzesilovače pro levý kanál v simulačním programu PSpice. Jako zdroj vstupního signálu byl zvolen generátor sinusového signálu s efektivní hodnotou napětí 1V. Rezistor R_{vst} představuje vstupní odpor koncového zesilovače TAS5630B. Pro korektní simulaci je třeba zátěž připojit na referenční zem. Jelikož je dle zapojení zátěž plovoucí, je připojena přes rezistor R_p s velkou hodnotou odporu na zem. Zpětná vazba je tvořena prvky R11, R12 a C11, C12. Napájení předzesilovače je nesymetrické 12 V a je blokováno paralelní kombinací tantalového a keramického kondenzátoru. Na obr. 4.5 je zobrazen výsledek simulace.



Obr. 4.5: Modulová kmitočtová charakteristika předzesilovače

4.2.2 Výstupní filtr

Výstupní filtr je typu dolní propust a skládá se z LC filtru a Boucherotova členu. Jeho úkolem je zadržet nežádoucí vysokofrekvenční složky obsažené ve výkonovém modulovaném signálu. Vhodně zvolenými komponenty pro jeho realizaci je ovlivněna účinnost zesilovače, elektromagnetická interference a harmonické zkreslení.

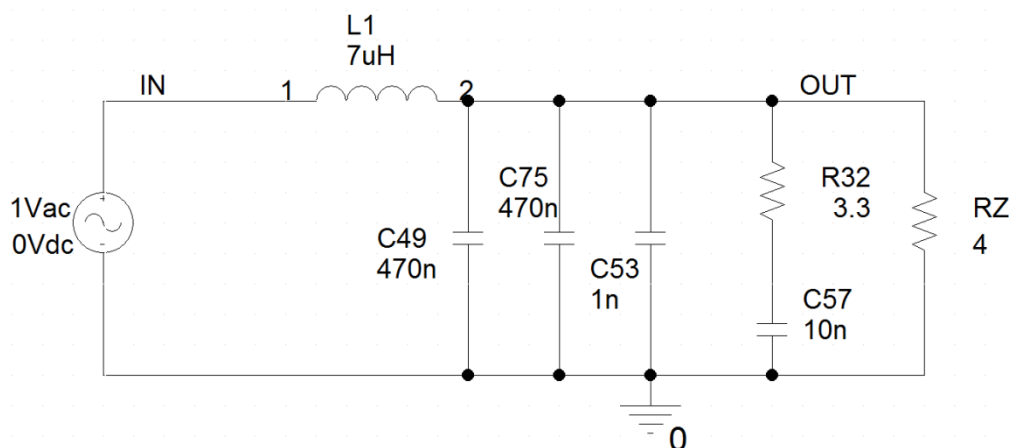
V zapojení výstupních filtrů se nejčastěji používají fóliové kondenzátory pro své vhodné vlastnosti pro tyto aplikace jakými jsou například nízký ztrátový činitel, vysoká proudová zatížitelnost, vysoký vlastní rezonanční kmitočet, dobrá časová a teplotní stálost kapacity, aj.. V tomto výstupním filtru budou použity kvalitní fóliové kondenzátory s polypropylenovým dielektrikem MKP4 od firmy Wima. Pro dosažení potřebné kapacity, která se běžně pohybuje okolo 1 uF, budou vždy zapojeny dva kondenzátory o kapacitě 470 nF paralelně.

Při výběru vhodných cívek výstupního filtru je třeba uvažovat požadavky jako nezávislost indukčnosti na protékajícím proudu, schopnost akumulování požadovaného množství energie, nezávislost indukčnosti na kmitočtu a zejména linearita magnetovací křivky. Nelinearita jádra cívky může způsobit značné zkreslení signálu na výstupu zesilovače. V takovém případě by bylo vhodné použití vzduchových cívek, jejichž magnetovací křivka je lineární. Jejich nevýhodou jsou ale velké rozměry při požadovaných hodnotách indukčností. V LC filtrech se nejčastěji používají železo prachová kruhová jádra. Vzájemným izolováním vodivých prachů je mezera rozptýlena, takže se do magnetického obvodu vzduchová mezera již nezavádí.[2]

Pro výrobu cívek tohoto filtru bylo zvoleno kruhové železo prachové jádro Micrometals USA s rozměry 34 x 16 mm (průměr x šířka). Požadovaná indukčnost cívek je 7 μH. Jelikož cívkou bude protékat proud až 5 A, je třeba aby vinutí bylo dostatečně dimenzované. Odpor vinutí musí být co nejmenší, aby na cívce nevznikal velký ztrátový výkon. Při volbě průměru vodiče je třeba počítat nejen s proudovou zatížitelností, ale i s elektrickým povrchovým jevem tzv. "skin efektem", kdy se zvyšujícím se kmitočtem

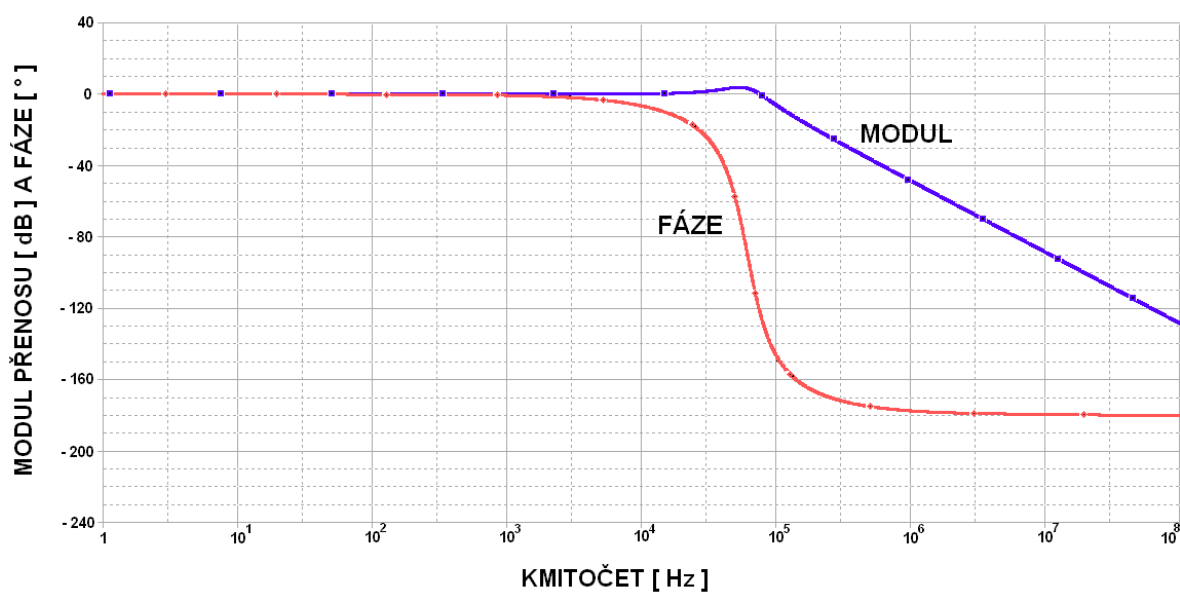
proud neteče celý průřezem vodiče, ale pouze po okrajích. Tím dojde ke zvýšení elektrického odporu vodiče a ke zvýšení ztrát. Pro zmenšení povrchového jevu se používají vysokofrekvenční lanka, která jsou vyrobena ze stočených lakovaných tenkých vodičů s danou délkou zkrutu. Na jádra cívek je navinuto 22 závitů tímto vf. lankem. Cívky byly dodány firmou PS Electronic.[2]

Na obr. 4.6 je zapojení výstupního LC filtru v programu PSpice. Rezistor R_Z představuje impedanci připojeného reproduktoru.



Obr. 4.6: Zapojení výstupního filtru v simulačním programu PSpice

Amplitudová a fázová kmitočtová charakteristika výstupního filtru je na obr. 4.7. Mezní kmitočet filtru je 87 kHz a strmost činí -40 dB/dek. Průběh fáze je od 0° do -180° .



Obr. 4.7: Modulová a fázová kmitočtová charakteristika výstupního filtru

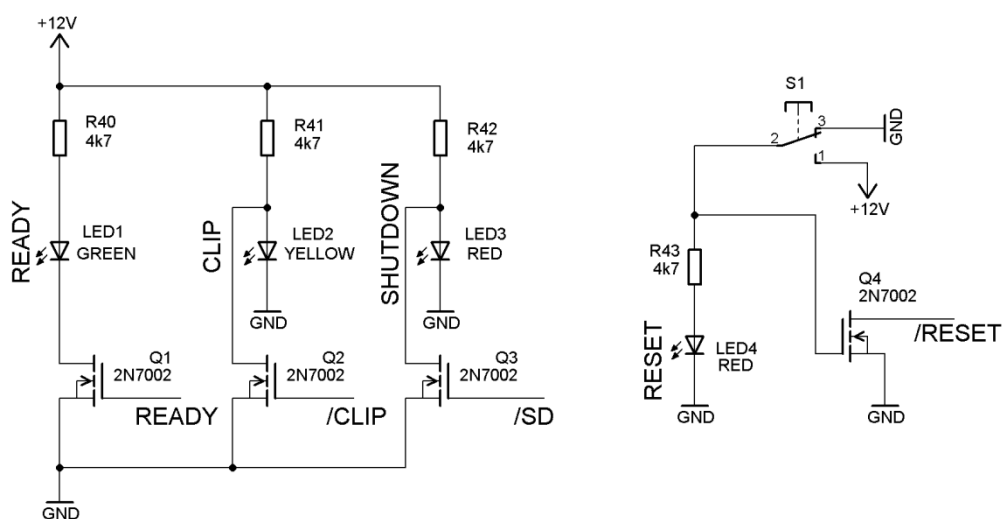
4.2.3 Integrované ochrany

Integrovaný obvod TAS5630B obsahuje několik ochran. Jedná se o ochrany proti podpětí v napájení, zkratu, přetížení a teplotě. Dále umožňuje signalizaci limitace zesilovače na pinu /CLIP (clipping). Pokud dojde na výstupu zesilovače ke zkratu, přetížení, podpětí nebo teplota čipu překročí 155°C, dojde k odpojení zátěže a koncové tranzistory se uvedou do stavu vysoké impedance (Hi - Z). To způsobí nízkou logickou úroveň na pinu /SD (shutdown). V případě zkratu a podpětí se zařízení samočinně uvede do normálního režimu, například až napájecí napětí vzroste nad definovanou hodnotu. Pokud nastane přetížení nebo přehřátí, je třeba změnit hodnotu logické úrovně na pinu /RESET. K tomu slouží tlačítko S1. Normální provoz je určen vysokou úrovní na pinu READY. Možné kombinace chyb, spolu s logickými úrovněmi na příslušných pinech, jsou uvedeny v tab. 4.3. [12]

Tab. 4.3: Tabulka chybových stavů (převzato a upraveno z [14])

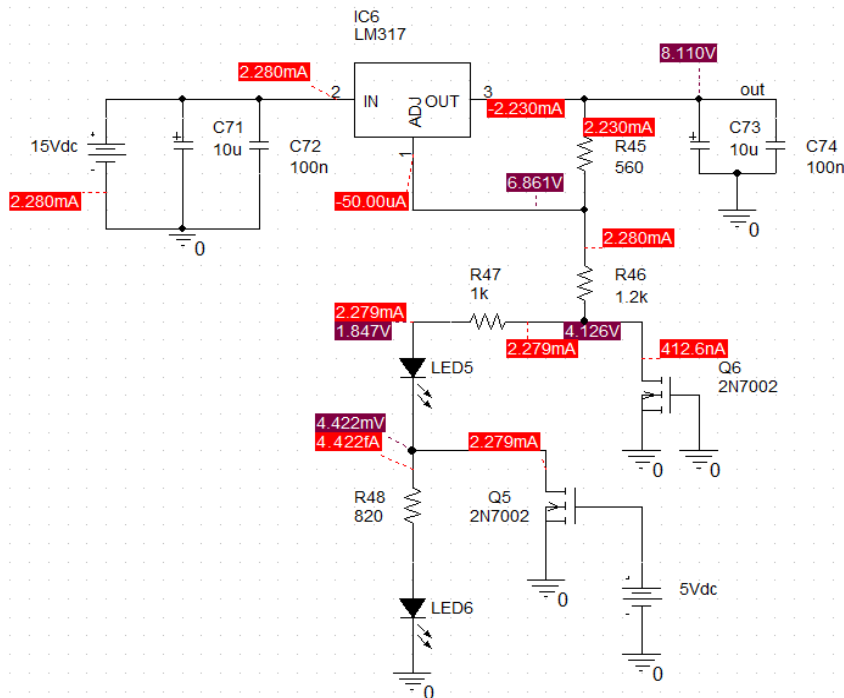
| /SD | /OTW1 | /OTW2 | Popis |
|-----|-------|-------|---|
| 0 | 0 | 0 | Nastalo přetížení nebo podpětí nebo přehřátí |
| 0 | 0 | 1 | Nastalo přetížení nebo podpětí, teplota čipu > 100°C |
| 0 | 1 | 1 | Nastalo přetížení nebo podpětí |
| 1 | 0 | 0 | Teplota čipu je vyšší než 125°C |
| 1 | 0 | 1 | Teplota čipu je vyšší než 100°C |
| 1 | 1 | 1 | Teplota čipu < 100°C, nenastalo přetížení ani podpětí |

Na obr. 4.8 je zapojení obvodů pro signalizaci stavů. K jejich napájení je použito napětí 12 V. Za normálního provozu svítí dioda LED1. Při limitaci signálu svítí LED2. Některý chybový stav signalizuje dioda LED3. Pro obnovení činnosti koncového zesilovače je třeba stisknout tlačítko S1, to oznamuje LED4.



Obr. 4.8: Obvody pro signalizaci stavů zesilovače

Na obr. 4.9 je simulace obvodu, který slouží pro signalizaci teploty čipu a regulaci otáček ventilátoru. Napájení je 15V. Pokud je teplota čipu menší než 100°C, jsou oba tranzistory Q5 a Q6 otevřeny. Diodami LED5 a LED6 neprochází téměř žádný proud a tudíž diody nesvítí. Jestliže teplota vzroste nad 100°C, na pinu /OTW1 se objeví nízká úroveň, což způsobí uzavření tranzistoru Q6. To je modelováno uzemněním elektrody "gate". Tranzistor Q5 zůstane otevřený. Luminiscenční diodou LED5 tedy prochází proud a je na ni příslušný úbytek napětí - dioda svítí. Tento stav je zachycen na obr. 4.9. Pokud teplota čipu překročí 125°C, uzavře se i tranzistor Q5 a celý proud prochází přes obě světelné diody na zem. Spolu se zvyšující se teplotou se zvětšuje napětí na výstupu *out* a tím se mění otáčky ventilátoru.



Obr. 4.9: Obvod pro signalizaci teploty čipu a regulaci otáček

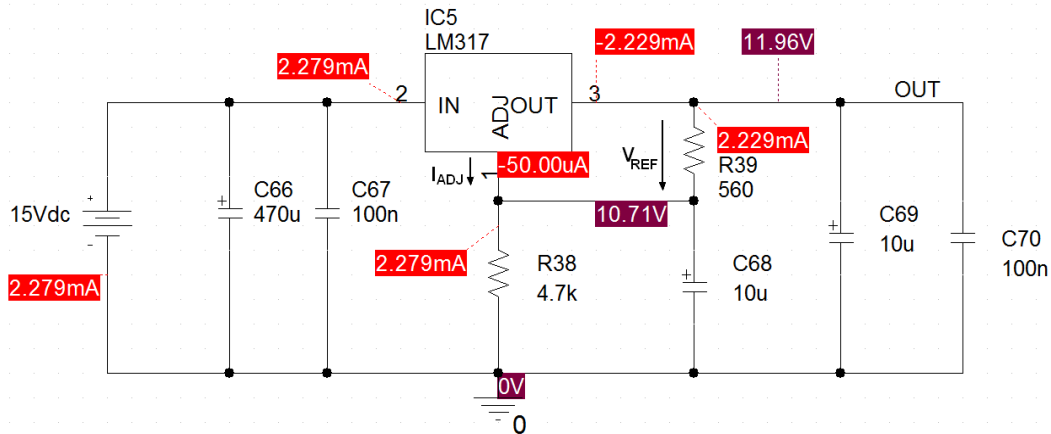
4.2.4 Napájení

Pro napájení koncového stupně slouží napětí 30V. Tímto napětím jsou napájeny koncové tranzistory. Napětí 30 V je následně sníženo spínaným regulátorem TL2575HV-15 [15] na 15 V, které slouží pro napájení obvodu na obr. 4.9. Toto napětí je dále sníženo lineárním nastavitelným regulátorem LM 317 na 12 V pro napájení budiče a všech společných obvodů důležitých pro činnost integrovaného obvodu TAS5630B. Simulace regulátoru je na obr. 4.10. Regulátor LM 317 stačí pro správnou činnost doplnit pouze několika pasivními prvky. Na rezistoru R39 je referenční napětí V_{ref} o velikosti 1,25V. Proud I_{ADJ} , který vytéká z pinu ADJ, má výrobcem definovanou velikost 50 μ A. Velikost výstupního napětí se nastavuje rezistory R38 a R39. Hodnotu můžeme dle [16] spočítat podle vztahu:

$$V_0 = V_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_{38}}{R_{39}}\right) + (I_{ADJ} \cdot R_{38}). \quad (4.1)$$

Po dosazení do 4.1 dostaneme:

$$V_0 = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{4700}{560}\right) + (50 \cdot 10^{-6} \cdot 4700) = 11,98 \text{ V.}$$



Obr. 4.10: Simulace regulátoru LM317

4.2.5 Chlazení

Z katalogového listu [12] obvodu TAS5630B byly odečteny následující hodnoty pro výpočet chladiče:

- Ztrátový výkon P_Z : 30 W
- Maximální teplota čipu θ_J : 150°C
- Tepelný odpor čip - pouzdro $R_{\theta JC}$: 0,2°C/W

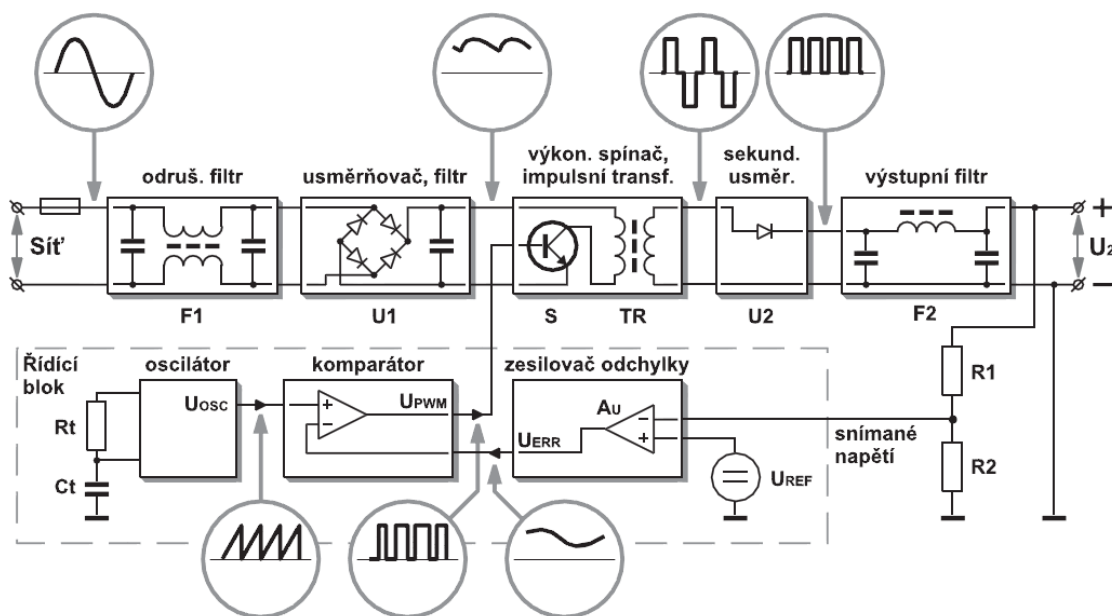
Jako okolní teplotu uvnitř skříně uvažujeme $\theta_A = 50^\circ\text{C}$. Tepelný odpor $R_{\theta CH}$, který vznikne při nedokonalém styku chladiče s pouzdem obvodu, předpokládáme 1°C/W. Tepelný odpor chladiče pak určíme ze vztahu:

$$R_{\theta H} = \frac{\theta_J - \theta_A}{P_Z} - R_{\theta JC} - R_{\theta CH} = \frac{150 - 50}{30} - 0,2 - 1 = 2,13^\circ\text{C/W.} \quad (4.2)$$

Z výsledku vyplývá, že chladič musí mít tepelný odpor menší nebo roven 2,13°C/W. Chladič je rozměrově omezen, neboť kondenzátory C42 až C45 musí být umístěny co nejbližší pinům integrovaného obvodu. Z toho důvodu bude použit menší chladič s tepelným odporem 4,4°C/W, rozměry 90x40 mm a výškou žeber 25 mm. Pasivní chladič bude navíc doplněn malým ventilátorem s rozměry 40x40 mm, pro jehož napájení a regulaci bude použit obvod na obr. 4.9.

5 NAPÁJECÍ ZDROJ

Hlavními nevýhodami lineárních napájecích zdrojů jsou hmotnost, objem, cena a energetická účinnost. S rostoucím požadovaným výstupním výkonem se tyto nevýhody stále více projevují. To je způsobeno zejména síťovým transformátorem, neboť pracuje se síťovým kmitočtem 50 Hz. Z toho důvodu se čím dál více prosazují spínané napájecí zdroje, které pracují s kmitočtem desítek až stovek kHz. To vede ke zmenšení rozměrů a hmotnosti transformátoru. Další výhodou spínaných zdrojů je vysoká účinnost. Lineární zdroje dosahují účinnosti kolem 50%, spínané zdroje i přes 80 %. V minulosti hovořily v neprospěch spínaných zdrojů hlavně cena a obvodová složitost. Dostupný sortiment specializovaných integrovaných obvodů pro spínané zdroje je dnes značný. Tyto obvody sdružují prakticky všechny důležité části řídicí elektroniky a některé obsahují i výkonové spínací prvky - tranzistory. Mezi nevýhody, které přetrvávají dodnes, patří například pomalejší reakce při rychlé změně zatěžovacího proudu a větší zvlnění výstupního napětí, což klade zvýšené nároky na filtrační obvody. Nevhodným návrhem spínaného zdroje dochází k vyzařování elektromagnetického rušení do okolí, neboť pracuje s poměrně velkými spínanými proudy se strmými hranami. Zdroj musí být umístěn v celokovové a uzemněné skříňce. Další nevýhodou může být, zejména u zdroje s více výstupy, obtížné dosažení přesné regulace všech výstupů. [17][18]



Obr. 5.1: Obecné blokové schéma jednočinného blokovačného měniče (převzato a upraveno z [17])

Na obr. 5.1 je zobrazeno blokové schéma jednočinného blokovačného měniče, na kterém jsou ukázány všechny důležité bloky obecného spínaného zdroje. Síťové napětí je nejprve vedeno na pojistku, která při zkratu odpojí zdroj od sítě a ochrání tak součástky před zničením. Následuje odrušovací filtr, který zabraňuje vyzařování rušení do sítě a rovněž filtruje rušení vznikající v napájecí síti od jiných spotřebičů. Odrušená síť je v bloku U1 usměrněna a vyhlazena kondenzátorem. Poté je přivedena na vstup výkonového měniče. Používá se několik typů měničů a jeho volba závisí hlavně na požadovaném výstupním výkonu. Napětí přerušované spínačem S je přiváděno na

primární vinutí transformátoru TR. Ten zajistí potřebný napěťový převod a galvanické oddělení sekundární strany od sítě. Na sekundární straně je napětí v bloku U2 usměrněno a v bloku F2 vyhlazeno na konstantní výstupní napětí. U spínaných zdrojů se zavádí zpětná vazba, jejíž podstatou je působení na střidu spínání spínače S tak, aby výstupní napětí bylo udržováno na konstantní hodnotě. Výstupní napětí je snímáno odporovým děličem a přivedeno do řídicího bloku. Řídicí blok je tvořen zpravidla jedním integrovaným obvodem, který v sobě sdružuje všechny potřebné bloky pro řízení zdroje a zpracování signálu ze zpětné vazby. Signál z odporového děliče je přiveden na zesilovač odchytky, který toto napětí porovnává s referenčním napětím a na svém výstupu vytváří chybový analogový signál. Tento signál je pak porovnáván s pilovitým napětím z interního oscilátoru. Výsledkem je šířkově modulovaný signál s proměnnou střídou, který je přiváděn na vstup spínače S.[17]

5.1 Stanovení parametrů zdroje

Napájecí zdroj musí být schopen dodat dostatečný výkon do všech napájených částí zesilovače. Požadavky na napájecí zdroj jsou uvedeny v tab. 5.1.

Tab. 5.1: Výkonové nároky jednotlivých bloků zesilovače

| | Napětí [V] | Proud[A] | Příkon [W] |
|----------------|------------|----------|------------|
| Koncový stupeň | 30 | 10 | 300 |
| Předzesilovač | 12 | 0,6 | 7,2 |

Příkon zesilovače je 307,2 W. S uvažováním rezervy je výstupní výkon zdroje stanoven na 325 W. Z důvodu velkých rozměrů a hmotnosti lineárního zdroje byl zvolen spínaný zdroj.

5.2 Návrh zdroje

Návrh napájecího zdroje byl proveden za pomoci programu PIExpert, který je možno získat ze stránek výrobce řídicího obvodu TOPSwitch [19]. Program umožňuje jednoduše navrhnout zapojení spínaného zdroje s obvodem TOPSwitch spolu s doporučenými součástkami. Součástí návrhu je rovněž konstrukční řešení transformátoru. Kompletní schéma navrženého spínaného napájecího zdroje se nachází v příloze C1.

5.2.1 Vstupní část

Síťové napětí je nejprve vedeno na odrušovací filtr, který zabrání šíření rušení produkované spínacím prvkem, tak aby nebyla překročena povolená úroveň rušení dle EMC předpisů. Tento filtr je vhodné umístit přímo do panelu šasi. Uvnitř skříně by měla být vedena již odrušená síť. Kovová skříň zesilovače slouží zároveň jako stínící kryt.

Odrušené síťové napětí je dále vedeno na pojistku, která se při výskytu zkratu přetaví a ochrání tak zdroj před zničením. Použitá pojistka je dimenzována na proud 4A. Pojistka by měla být pomalá, aby se nepřetavila již při zapnutí zdroje, kdy se nabíjejí vstupní kondenzátory. Z tohoto důvodu je na vstupu umístěn termistor NTC. Termistor

má za studena velký odpor a potlačuje tak proudové špičky vznikající při zapnutí zdroje. Po zahřátí jeho odpor klesne na jednotky ohmů a dále se neuplatňuje.

5.2.2 Vstupní usměrňovač a filtr

Pro usměrnění sítě se nejčastěji používá greatzův můstek. Na usměrňovací diody nejsou kladeny žádné zvláštní požadavky. Lze použít diody určené pro usměrňování síťového napětí se závěrným napětím minimálně 600 V. Dále musí vyhovovat požadovaným proudům v propustném směru. Vybrán byl můstek KBL506 dimenzovaný až na 5 A.

Filtrační kondenzátor musí snést napětí alespoň 340 V a musí mít i malý ESR (ekvivalentní stejnosměrný odpor), aby byl schopen dodávat krátké a velké proudové impulzy. Výrobce doporučuje použít 1 μF kapacity na 1 W výstupního výkonu. Použit je kondenzátor o kapacitě 330 μF dimenzovaný na napětí 400 V. Jedná se o typ snap-in určený přímo pro tyto aplikace.

5.2.3 Řídící obvod

Jako řídicí obvod byl pro spínaný zdroj vybrán integrovaný obvod TOP 261 z nejvýkonnější rodiny TOPSwitch-HX od firmy Power integrations [19][20]. Jedná se o integrované řešení s implementovanými analogovými a číslicovými řídicími obvody pro regulaci a ochranu obvodu spolu s výkonovým spínacím tranzistorem. Pomocí tohoto obvodu lze realizovat zdroj s výstupním výkonem až 333W.

Obvod TOP 261 se vyrábí ve třech různých pouzdrech. Pro návrh bylo vybráno pouzdro eSIP-7C, které má 6 pinů a umožňuje využít spínací kmitočet 66 nebo 132 kHz. Kmitočet 66 kHz výrobce doporučuje použít pro video aplikace. V tab. 5.2 jsou uvedeny základní parametry obvodu.

Tab. 5.2: Vybrané parametry obvodu TOP 261 (převzato z [19])

| Parametr | Hodnota |
|--|--------------|
| Maximální výkon | 333 W |
| Maximální střída spínání | 78 % |
| Maximální teplota čipu | 150 °C |
| Odpor kanálu sepnutého tranzistoru | 1,8 Ω |
| Trvání soft startu | 17 ms |
| Spínací kmitočet | 132/66 kHz |
| Maximální proud elektrodou drain | 11,1 A |
| Maximální napětí mezi elektrodou D a S | 700 V |

Obvod je vybaven funkcí pro detekci podpětí a přepětí. Obě prahové hodnoty lze nastavit jediným externím rezistorem připojeným k pinu V. Detekce podpětí ponechá obvod ve vypnutém stavu do té doby, než napětí na vstupním filtračním kondenzátoru dosáhne definované úrovně. Při výpadku vstupního napětí brání autorestartu tak dlouho, dokud se výstupní napětí nedostane mimo povolené regulační rozpětí. Detekce

přepětí vypne obvod při překročení vstupního napětí nad určitou hranici. Když je tranzistor MOSFET vypnut, pak jeho schopnost vydržet zvýšené přepětí dosahuje až 700V vlivem absence indukovaného napětí a přepětíových špiček na jeho kolektoru.

Obvod je dále vybaven tepelnou ochranou, která uvede spínací tranzistor do vypnutého stavu při překročení teploty čipu 150°C. K samočinnému zapnutí zdroje dojde po ochlazení čipu o 70°C.

Na čipu je integrováno proudové omezení, které spočívá ve snímání proudu kolektorem sepnutého MOSFETu na odporu $R_{DS(ON)}$. Napětí vznikající na tomto odporu je komparátorem porovnáváno s nastavenou hodnotou proudového omezení. Při překročení interní prahové hodnoty dojde k vypnutí tranzistoru až do jeho dalšího řádného sepnutí v následujícím hodinovém cyklu. Proudové omezení je přednastaveno na hodnotu 7,4 A. Externím rezistorem lze tuto hodnotu měnit v rozsahu 30 až 100 % z původní hodnoty.

Při každém zapnutí zdroje je aktivována funkce měkkého startu, kdy se střída spínání lineárně zvětšuje z nuly až do maximální hodnoty 78 %. Doba trvání měkkého startu je 17 ms. Tato funkce účinně potlačuje proudový a napětíový překmit na výstupu tranzistoru během zapnutí.

Obvody řady TOPSwitch-HX mohou být zapnutelné nebo vypnutelné pomocí pinů V nebo X a uvedeny tak do stavu standby, při kterém je spotřeba zdroje okolo 160 mW. Tímto je možno zdroj libovolně zapínat a vypínat například pomocí mikroprocesoru.

Blokové schéma použitého řídicího obvodu TOP 261 je na obr. 5.2. Piny D a S jsou vývody spínacího tranzistoru MOSFET. Pin D se připojuje k vývodu transformátoru a pin S je signálová zem obvodu. Pomocí pinu F můžeme nastavit spínací kmitočet. Pokud jej spojíme s vývodem S , využíváme maximální kmitočet 132 kHz. Poloviční kmitočet nastavíme spojením pinu F a C .

Vstupní pin X slouží pro nastavení proudového omezení a pro uvedení zdroje do standby režimu. Velikost odporu rezistoru lze určit z katalogového listu [18]. Hodnota odporu byla zvolena 6,8 kΩ. To odpovídá proudovému omezení 7,4 A. Spojením pinu s vývodem S deaktivujeme všechny funkce tohoto pinu.

Vstup s označením V je určen k připojení externího rezistoru pro nastavení přepětíové a podpětíové ochrany. Prahové hodnoty obou ochran vypočítáme dle [19]:

$$V_{UV} = I_{UV} \cdot R_{LS} + V_V, \quad (5.1)$$

$$V_{OV} = I_{OV} \cdot R_{LS} + V_V, \quad (5.2)$$

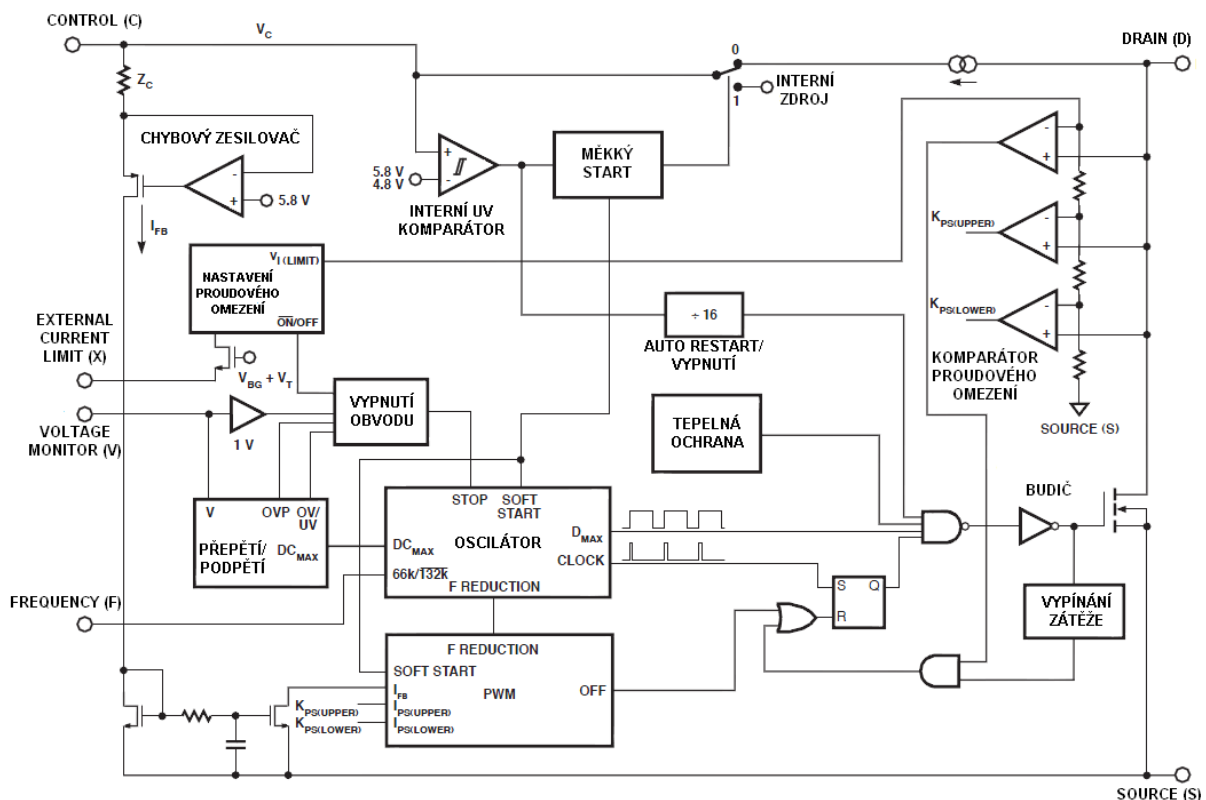
kde V_{UV} je mezní hodnota podpětí, I_{UV} je proud tekoucí do vstupu V (25μA), R_{LS} je velikost odporu pro nastavení ochran, V_V je napětí na pinu V (3V), V_{OV} je mezní hodnota přepětí, I_{OV} je velikost proudu tekoucí do vstupu V při přepětí (112μA).

Velikost odporu R_{LS} bývá typicky okolo 4 M Ω . Zvolená hodnota činí 4,4 M Ω . Po dosazení všech hodnot do vztahů 5.1 a 5.2 dostáváme:

$$V_{UV} = 113 V,$$

$$V_{OV} = 495,8 V.$$

Vývod C je nízkoimpedančním vstupem, který slouží pro napájení integrovaného obvodu a zpracovává signál zpětné vazby. K tomuto pinu se rovněž připojuje kompenzační kondenzátor.



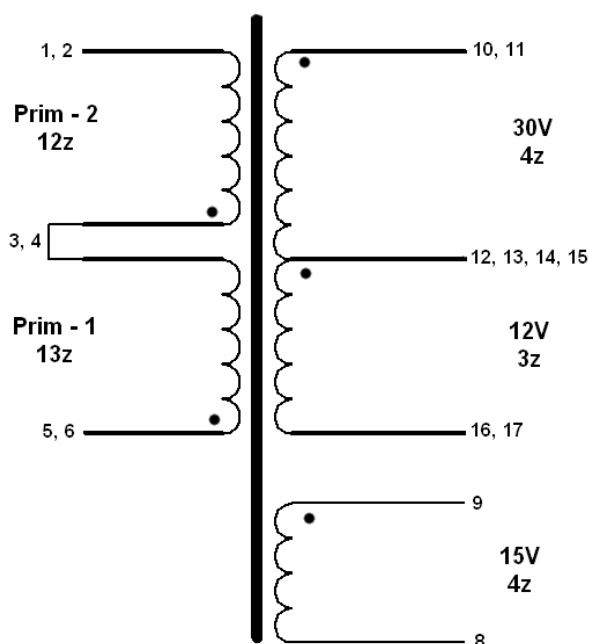
Obr. 5.2: Blokové schéma obvodu TOP 261EN (převzato a upraveno z [19])

5.2.4 Transformátor

Transformátor je součástka, která velkou měrou určuje vlastnosti celého zdroje. Důležité je použití vhodného materiálu feritového jádra pro dané kmitočtové pásmo a přenášený výkon. Mezi nejpoužívanější tvary jader pro spínané zdroje patří typy ETD, EE nebo EI. Vliv na výsledné vlastnosti transformátoru má také způsob vinutí. Je třeba co nejvíce minimalizovat rozptylovou indukčnost, jinak dochází k rozptýlení velkého množství energie v primárním omezovacím obvodu a snižuje se účinnost. Pro snížení rozptylové indukčnosti se v praxi obvykle primární vinutí rozdělí do dvou částí a mezi ně se pak vkládají jednotlivá sekundární vinutí. Dále je vhodné minimalizovat počet závitů, počet vrstev a izolaci mezi vinutími. [21][22]

Je třeba uvažovat fakt, že čím větší je pracovní kmitočet měniče, tím méně se uplatňuje průřez vodiče za součastného zvýšení povrchové vodivosti (skin efekt). Pro vinutí se používá několik tenčích paralelních vodičů nebo přímo vysokofrekvenční lanko. Pro sekundární vinutí například měděná fólie či pásek. Provozní kmitočet zdroje by měl být vybrán jako kompromis mezi velikostí zdroje (transformátoru) a sníženou účinností vlivem ztrát v jádru transformátoru a mědi, přepínacích ztrát diod a tranzistoru MOSFET. [21][22]

Pro návrh transformátoru byl s výhodou použit program PIExpert. Výstupem programu je doporučené jádro, kostra a elektrické schéma zobrazující uspořádání jednotlivých vinutí s počtem závitů. Elektrické schéma navrženého transformátoru je na obr. 5.3.



Obr. 5.3: Elektrické schéma transformátoru

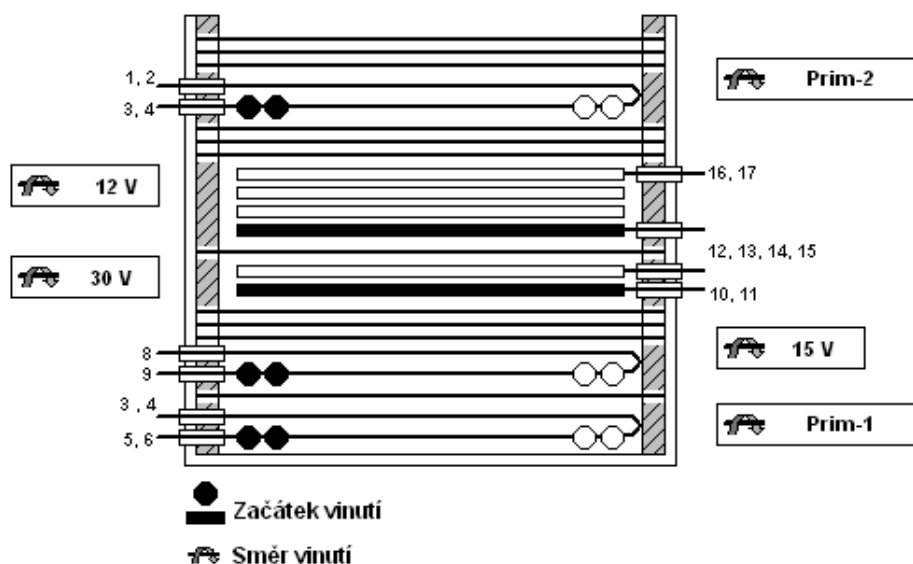
Ke konstrukci transformátoru bylo použito doporučené feritové jádro ETD44/22/15 z materiálu N87 od výrobce Epcos. Kostra téhož výrobce určená pro toto jádro obsahuje 18 pinů. Parametry vybraného jádra jsou uvedeny v tabulce 5.3.

Tab. 5.3: Parametry vybraného jádra

| Parametr | Hodnota |
|---|---------------------|
| Efektivní plocha jádra A_E | 173 mm ² |
| Efektivní délka magnetické siločáry L_E | 103 mm |
| Fyzická šířka vinutí cívky BW | 29,5 mm |
| Indukční konstanta bez vzduchové mezery A_L | 298 nH |

Na obr. 5.4 je zobrazeno uspořádání jednotlivých vinutí na kostře transformátoru. Primární vinutí je rozděleno na dvě části pro snížení rozptylové

indukčnosti. Obě vinutí jsou spojena na pinech č. 3 a 4. Vývody č. 5 a 6 jsou spojeny s elektrodou drain spínacího tranzistoru. Zpětnovazební vinutí 15 V je vinuto jako druhé v pořadí a vývody jsou vyvedeny na primární stranu pro snadnější návrh desky plošného spoje. Sekundární vinutí 30 a 12 V jsou vinuta v sérii pro lepší křížovou regulaci. Nejvýkonnější sekundární vinutí 30 V je umístěno nejbliže primárnímu. Kvůli značnému proudovému namáhání jsou piny na primární i sekundární straně zdvojeny. Z tohoto důvodu byla použita kostra obsahující 18 pinů. Navržený transformátor byl vyroben firmou PS Electronic.



Obr. 5.4: Uspořádání jednotlivých vinutí

5.2.5 Zpětná vazba

V tomto návrhu je použita zpětná vazba s optronem a přesnou napěťovou referencí TL431 pro snímání regulační odchylky a je použitelná v celém výkonovém spektru výstupních napěťových rozsahů. Napětí pro zpětnou vazbu je snímáno z hlavního sekundárního vinutí 30 V. Optron slouží pro galvanické oddělení signálu mezi sekundární a primární stranou. Signál zpětné vazby je přiváděn na pin C řídicího obvodu TOP 261, kde dochází k úpravě střídy spínání zpětnovazebním signálem. S touto zpětnou vazbou lze dosáhnout přesnosti $\pm 5\%$ pro hlavní výstup 30 V a přesnosti $\pm 10\%$ pro výstup 12 V. Obvod TL431 umožňuje zapojení zpětné vazby ze dvou nebo i více výstupů současně do jeho referenčního vstupu. To je vhodné tehdy, pokud požadujeme, aby regulační smyčka reagovala na změny zatížení na několika výstupech současně. Vliv jednotlivých výstupů můžeme také váhovat. [21]

5.2.6 Výstupní usměrňovač a filtr

Výstupní usměrňovač se výraznou měrou podílí na celkové účinnosti napájecího zdroje. Usměrňovače mají dvě důležité složky ztrát - ztráty úbytkem napětí na diodě v

propustném směru vlivem procházejícího proudu a ztráty vznikající vyprazdňováním vyčerpané oblasti při přechodu diody z propustného do vypnutého stavu (přepínací ztráty). Je tedy bezpodmínečně nutné použít ultra rychlé diody s krátkou zotavovací dobou. Nejlépe je použít shottkyho diody, které se vyznačují velmi krátkou zotavovací dobou a rovněž menším úbytkem napětí v propustném směru než klasické křemíkové diody. Je třeba si uvědomit, že pracovní kmitočet spínaných zdrojů se pohybuje od desítek do stovek kHz a použitím pomalých diod určených pro kmitočet 50 Hz by docházelo ke vzniku velkého ztrátového výkonu. [21]

Dioda musí být dle [21] dimenzována na závěrné napětí:

$$U_R = 1,25 \cdot \left(U_x + U_{max} \cdot \frac{N_x}{N_p} \right), \quad (5.3)$$

kde U_R je hledané závěrné napětí, U_x je napětí jednotlivého výstupu, U_{max} je maximální primární stejnosměrné napětí, N_x je počet závitů daného výstupu a N_p je počet primárních závitů.

Napětí U_{max} představuje vrcholovou hodnotu síťového napětí 230 V s připočtenou tolerancí sítě 15 %. Po dosazení do vztahu 5.3 získáme pro výstup 30V:

$$U_R = 1,25 \cdot \left(U_{30} + U_{max} \cdot \frac{N_{30}}{N_p} \right) = 1,25 \cdot \left(30 + 375 \cdot \frac{7}{25} \right) = 168,75 \text{ V.}$$

Dále je diodu třeba dimenzovat na protékající proud, který dosahuje hodnoty až 10,4 A. Pro výstup 30 V je použita ultra rychlá dioda BYV32-200 se závěrným napětím 200 V a proudem až 18 A.

Obdobně pro druhé sekundární napětí 12 V dostaneme:

$$U_R = 1,25 \cdot \left(U_{12} + U_{max} \cdot \frac{N_{12}}{N_p} \right) = 1,25 \cdot \left(12 + 375 \cdot \frac{3}{25} \right) = 71,25 \text{ V.}$$

Zvolena byla ultra rychlá dioda BYV27-200 se závěrným napětím 200 V a maximálním proudem v propustném směru až 2 A.

Po usměrňovací diodě následuje vyhlazovací kondenzátor. Je nutné použít kondenzátory s malou hodnotou ESR, která přímo určuje zvlnění výstupního napětí spínaného zdroje. Při výběru vhodného vyhlazovacího kondenzátoru je třeba vybrat

takový, jehož zvlněný proud uvedený v katalogovém listu bude větší než vypočtená hodnota. Tento proud musí být specifikovaný při teplotě 105°C a kmitočtu 100 kHz. Pro dosažení co nejmenší hodnoty ESR je vhodné zapojit několik kondenzátorů paralelně.[21]

Pomocí programu PIExpert byl vypočten zvlněný proud kondenzátorem v obou sekundárních větvích. Pro hlavní výstup 30 V tento proud činí 11,79 A. Pro vyhlazení napětí bude použita paralelní kombinace pěti impulzních kondenzátorů 1000 μF/50V od firmy Nippon chemi-con. Zvlněný proud 12 V větve činí 0,68 A. Bylo zvoleno paralelní zapojení dvou impulzních kondenzátorů 220 μF/35V stejné značky.

5.2.7 LC filtr

Požadavky kladené na cívku LC filtru byly popsány v kapitole 4.2.2. Pro nižší proudy lze použít feritové korálky. Pro velké proudy je třeba, aby cívka vykazovala malý stejnosměrný odpor vinutí. Výstup 30 V je opatřen cívkou dimenzovanou na proud 15 A. Pro výrobu cívky bylo zvoleno kruhové železo prachové jádro Micrometals USA s rozměry 41 x 22 mm (průměr x šířka). Požadovaná indukčnost činí 5 μH. Cívka je vinuta vysokofrekvenčním lankem a byla dodána firmou PS Electronic. Pro výstup 12 V bude použita axiální cívka o indukčnosti 3,3 μH.

Pro kondenzátor platí stejné požadavky jako v předešlé kapitole. Každá napájecí větev bude opatřena jedním kondenzátorem o kapacitě 220 μF.

5.3 Chlazení

Obvod TOPSwitch a výstupní usměrňovač D4 jsou kritické součástky z hlediska jejich výkonového zatížení. Tyto obvody je nutné opatřit řádně dimenzovaným pasivním chladičem.

Z katalogového listu [19] řídicího obvodu TOP 261 byly odečteny následující hodnoty pro výpočet chladiče:

- Maximální teplota čipu θ_j : 150°C
- Tepelný odpor čip - pouzdro $R_{\theta jc}$: 2°C/W
- Odpor kanálu sepnutého tranzistoru $R_{DS(ON)}$: 1,8 Ω

Pomocí programu PIExpert byl stanoven maximální proud 2,8 A primárním obvodem. Z procházejícího proudu a odporu sepnutého tranzistoru můžeme přibližně určit ztrátový výkon na obvodu TOPSwitch:

$$P_Z = I^2 \cdot R_{DS(ON)} = 2,8^2 \cdot 1,8 = 14 \text{ W}. \quad (5.4)$$

Tepelný odpor chladiče můžeme vypočítat po dosazení do vztahu 4.2:

$$R_{\theta H} = \frac{\theta_J - \theta_A}{P_Z} - R_{\theta JC} - R_{\theta CH} = \frac{150 - 50}{14} - 2 - 1 = 4,14^\circ\text{C/W}.$$

Bude použit chladič s tepelným odporem 4°C/W , rozměry 79x50 mm a výškou žeber 15 mm. Chladič bude k pouzdru upevněn pomocí montážního pérka.

Usměrňovací dioda BYV32-200 je umístěna v pouzdru TO-220, které obsahuje dvě paralelně zapojené diody se společnou katodou. Z katalogového listu [23] byly odečteny tyto hodnoty:

- Maximální teplota čipu θ_J : 150°C
- Tepelný odpor čip - pouzdro $R_{\theta JC}$: $1,6^\circ\text{C/W}$

Střední hodnota proudu I_{AVG} procházející diodou je 10,4 A. Prahové napětí diody U_P bylo stanoveno na 1 V. Ztrátový výkon můžeme přibližně určit podle vztahu:

$$P_Z = U_P \cdot I_{AVG} = 1 \cdot 10,4 = 10,4 \text{ W}. \quad (5.5)$$

Pro tepelný odpor chladiče pak platí:

$$R_{\theta H} = \frac{\theta_J - \theta_A}{P_Z} - \frac{R_{\theta JC}}{2} - R_{\theta CH} = \frac{150 - 50}{10,4} - 0,8 - 1 = 7,82^\circ\text{C/W}.$$

Jako vhodný se jeví chladič CH 17/50 s tepelným odporem $7,5^\circ\text{C/W}$, rozměry 50x44 mm a výškou žeber 11 mm. Chladič bude k pouzdru připevněn pomocí šroubku přes izolační podložku.

6 KONSTRUKCE ZESILOVAČE

6.1 Návrh desek plošných spojů

Desky plošných spojů byly navrženy v programu Eagle 5.11. Předlohy DPS, osazovací výkresy a seznamy součástek jsou uvedeny v příloze. Při osazování desek bylo postupováno standardním způsobem. Nejdříve byly osazeny konektory, tlumivky, rezistory, kondenzátory a až jako poslední polovodičové prvky.

6.1.1 Korekční předzesilovač a indikátory stavu

Deska plošného spoje je navržena jako jednostranná s vhodným rozložením součástek pro montáž desky do předního panelu přístrojové skříně. Rozměry desky činí 200x60 mm. Integrovaný obvod předzesilovače a rezistory pro klasickou montáž jsou umístěny na straně BOTTOM. Všechny ostatní součástky jsou na straně TOP. Pro signalizaci stavů koncového stupně slouží diody LED o průměru 3 mm. Signalizační prvky umístěné na desce jsou spojeny s koncovým stupněm pomocí konektoru J4. Rezistory R7 až R9 s nulovým odporem slouží jako propojky pro vedení signálu. Namísto prokovů jsou taktéž použity dvě drátové propojky. Vstupní signál je přiveden na konektor J1. Deska je napájena napětím 12 V, které je přivedeno na konektor J2. Do DPS jsou vyvrtány otvory pro potenciometry 16 mm, které jsou přišroubovány přímo do panelu a s deskou spojeny pomocí drátových propojek.

6.1.2 Koncový stupeň

Koncový stupeň je navržen na oboustranné prokovené desce s rozměry 140x155 mm. Při návrhu desky bylo třeba dodržet některá doporučení výrobce. Kondenzátory C34 až C41 musí být umístěny co nejbližší pinům obvodu TAS5630B. Spoje jsou přednostně vedeny na TOP straně. Pro snadné pájení kondenzátorů jsou některé spoje převedeny na stranu BOTTOM. Zemní plochy obou stran jsou spolu propojeny prokovy o průměru 0,8 mm. Kondenzátory pro filtraci napájení 30 V musí být rovněž umístěny co nejbližší integrovanému obvodu. Vzdálenost je určena rozměry chladiče. Z toho důvodu je použit menší chladič s aktivním chlazením. Ventilátor je přišroubován k hornímu víku šasi, pro přívod vzduchu do skříně. Pro napájecí napětí a výstup zesilovače je použit konektor FAST-ON. Minimální šířka spoje na desce je 0,6 mm. Na výstupu zesilovače a pro rozvod napájení je třeba kvůli velkému proudovému zatížení použít spoje širší.

6.1.3 Napájecí zdroj

Pro napájecí zdroj byla zvolena jednostranná deska s rozměry 105x190 mm. Z důvodu použití součástek pro klasickou montáž jsou spoje vedeny na straně BOTTOM. Výjimku tvoří pouze kondenzátor C4 pro povrchovou montáž, který je umístěn na straně BOTTOM co nejbližší k pinům řídicího obvodu. Primární omezovací člen RCD včetně diody D2 musí být blízko primárnímu vinutí transformátoru. Rezistory pro nastavení

předpětí, podpětí a proudového omezení jsou umístěny těsně k pinům V a X. V okolí signálových cest nejsou vedeny spoje s velkými proudy o vysokém kmitočtu, aby nedošlo k přenosu rušení. Jedná se o primární obvod a sekundární výstup 30 V. Rezistory R1 a R2 jsou spojeny přímo se vstupním vyhlazovacím kondenzátorem. Vývod kolektoru obvodu TOP 261 je propojen krátkým spojem s vývodem primárního vinutí. Vývod SOURCE řídicího obvodu nesmí být spojen s kondenzátorem C1 vodivou cestou, protékanou jinými proudy. Zpětnovazební vinutí (spodní konec) musí být propojen přímo s elektrodou SOURCE. Jiné součástky by neměly být připojené do této dráhy. Spoje vedené do elektrody SOURCE jsou spojeny přímo na pinu v jednom bodě, neboť je třeba oddělit vodiče protékající velkými proudy od signálových vodičů. Usměrnovací dioda je umístěna co nejbližší vinutí transformátoru. Země obou výstupních větví jsou oddělené a spojeny v jednom bodě blízko vinutí transformátoru. Spoje primární smyčky a sekundárního výstupu 30 V jsou navrženy dostatečně široké a musí být co nejkratší z důvodu omezení vzniku parazitních indukčností. Výstupní napětí 12 V je vyvedeno na konektor J4. Pro napětí 30 V je kvůli proudovému zatížení zvolen konektor FAST-ON. Síťové napětí je přivedeno z odrušovacího filtru na svorkovnici ARK500/2.

6.2 Přístrojová skříň

Navržené desky plošných spojů je třeba umístit do vhodné přístrojové skříň. Z důvodu spínané koncepce zesilovače i zdroje je vhodné umístit celé zařízení do kovové šasi, která tak bude sloužit rovněž jako stínící kryt zabraňující vyzařování rušení. K tomuto účelu byla vybrána skříň s označením KK09-35251 s vnějšími rozměry 352x83x257 mm. Krabice je vyrobena s ocelového plechu tloušťky 1 mm a nastříkaná černým komaxitem. Do horního a spodního víka jsou již z výroby vytvořeny větrací otvory.

Do zadní části skříň je třeba vyvrtat otvory pro umístění síťového odrušovacího filtru a kolébkového vypínače pro odpojení zesilovače od sítě. Fázový a nulový vodič je poté veden na svorky napájecího zdroje. Ochranný vodič je spojen s kostrou šasi. Dále je nutné do zadního víka připravit otvory pro vstupní konektory typu CINCH a reproduktorovou svorkovnici pro připojení reproduktoru.

Deska plošného spoje s předzesilovačem a indikačními diodami je umístěna na předním panelu tak, aby bylo možné snadno ovládat korekční předzesilovač pomocí potenciometrů. Do přední části je potřeba vyvrtat otvory pro tyto potenciometry a LED diody o průměru 3 mm. Otvory pro LED jsou osazeny objímkami. Potenciometry jsou přišroubovány přímo do panelu a s deskou plošného spoje spojeny pomocí drátových propojek. Na předním panelu je rovněž umístěn kolébkový spínač pro zapnutí zesilovače.

Pro chlazení koncového stupně je použit kromě pasivního chladiče umístěného na DPS také ventilátor o rozměrech 40x40 mm. Ventilátor je přišroubován do horního víka a přes stínící mřížku je tak přiváděn čerstvý vzduch do skříň.

V tabulce 6.1 jsou uvedeny konstrukční prvky použité při konstrukci zesilovače. Rozměry potřebné k vyvrtání všech děr jsou uvedeny v příloze D.

Tab. 6.1: Seznam součástek pro konstrukci zesilovače

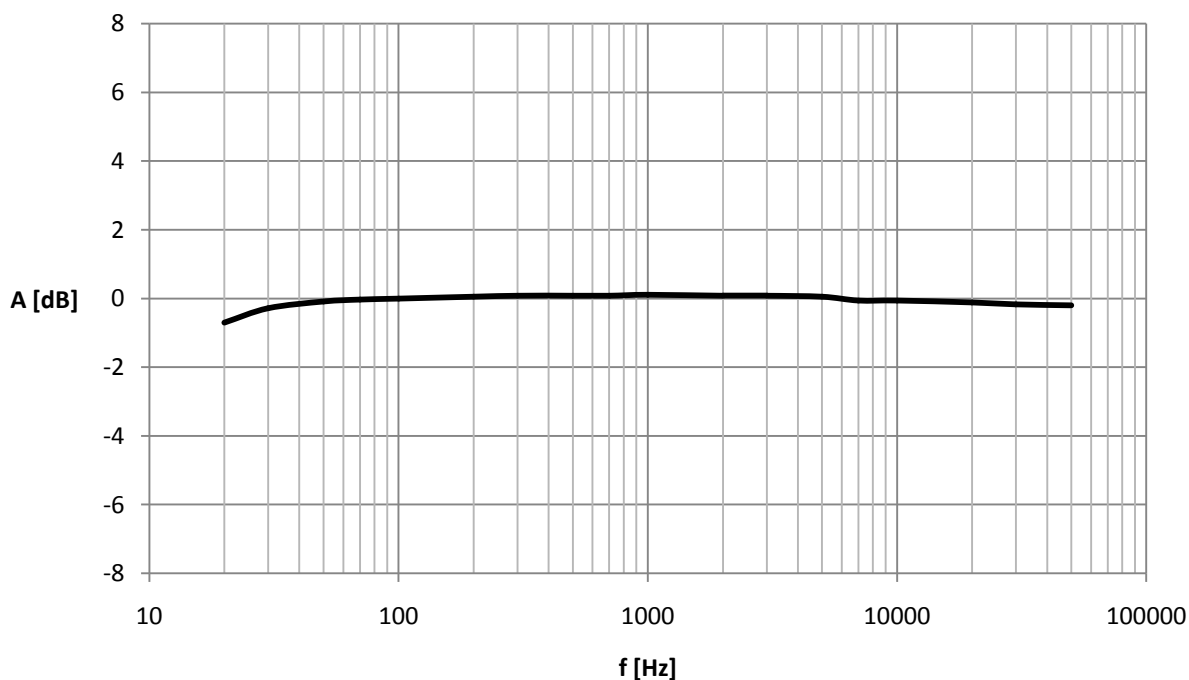
| Konstrukční prvek | Typ |
|--|----------------------|
| Vstupní signál | 2x CINCH |
| Výstupní signál | Svorkovnice PT 932 |
| Odrušovací filtr | FIL 2560 |
| Kolébkový vypínač | P-H8500VB01 |
| Objímka pro LED | LDC300 |
| Ventilátor | HA40201V4 |
| Stínící mřížka pro ventilátor | Sunon FG-04 40x40 mm |
| Přístrojový knoflík Vyvážení, Hloubky, Výšky | P-S1315GF |
| Přístrojový knoflík Hlasitost | P-S3017GF |
| Kolébkový přepínač | P-B100H |

7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Mezi základní parametry zesilovače patří modulová kmitočtová charakteristika, zkreslení THD, vstupní a výstupní odpor, účinnost a jiné. Naměřené parametry jednotlivých částí budou porovnány s parametry, které udávají výrobci ve svých katalogových listech.

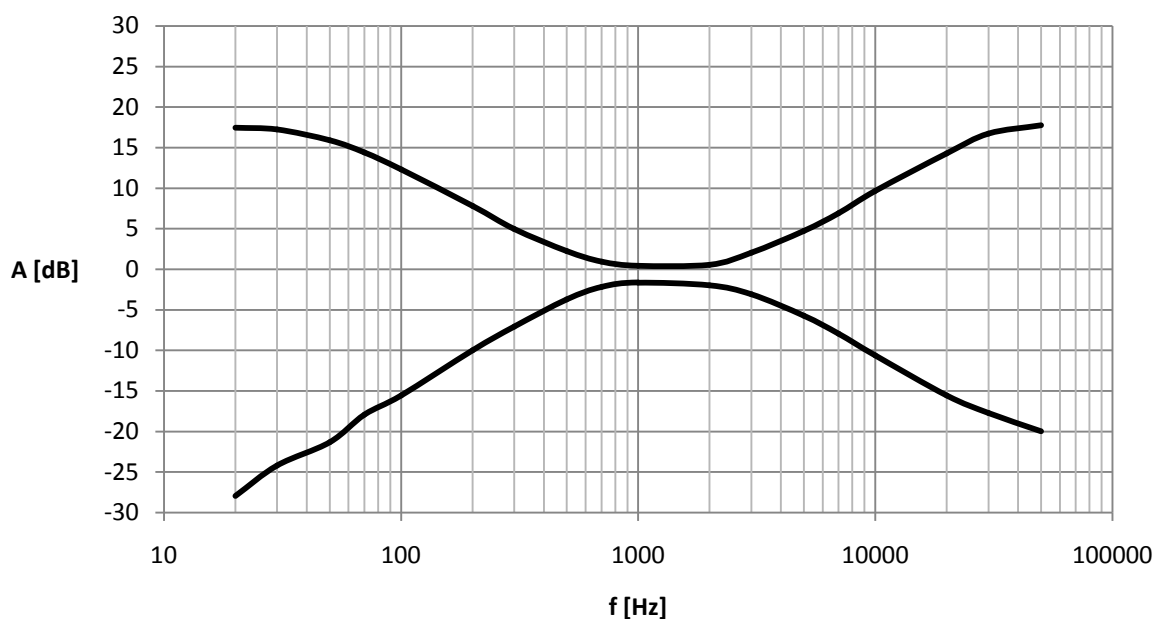
7.1 Korekční předzesilovač

Modulová kmitočtová charakteristika je zobrazena na obr. 7.1. Potenciometrem hlasitosti bylo nastaveno zesílení 0 dB na kmitočku 1 kHz. Potenciometry pro ovládání korekcí byly ponechány ve středové poloze. Měření probíhalo pro vstupní napětí 300mV. V audio pásmu 20 Hz až 20 kHz se přenos pohybuje okolo 0 dB. Od kmitočku 40Hz směrem k nižším kmitočtům se začíná projevovat útlum, který je způsoben vstupními kondenzátory pro odstranění stejnosměrné složky.



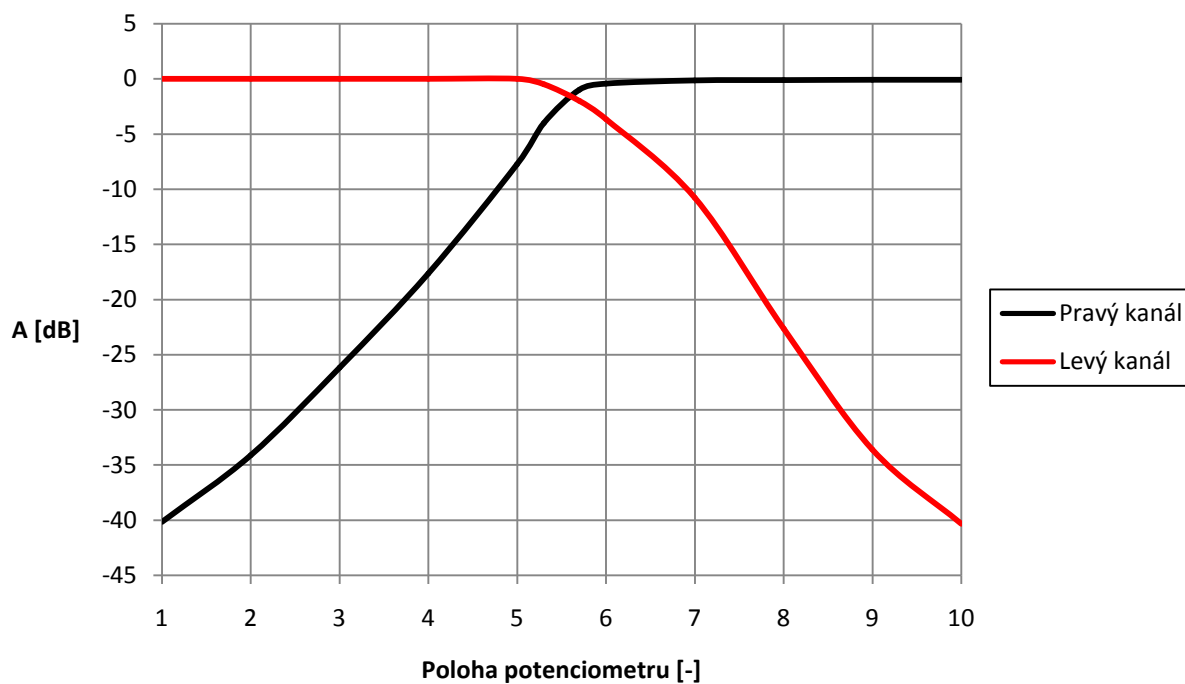
Obr. 7.1: Modulová kmitočtová charakteristika ($U_{VST} = 300 \text{ mV}$)

Na obr. 7.2 se nachází modulová kmitočtová charakteristika s maximální a minimální korekcí hloubek a výšek. Hloubky a výšky lze v krajních polohách zesílit až o 18 dB. Útlum lze nastavit potenciometrem hloubek až na -28 dB. Střední pásmo v okolí kmitočtů 1 - 2 kHz, kde se korekce příliš neprojevují, se blíží zisku 0 dB.



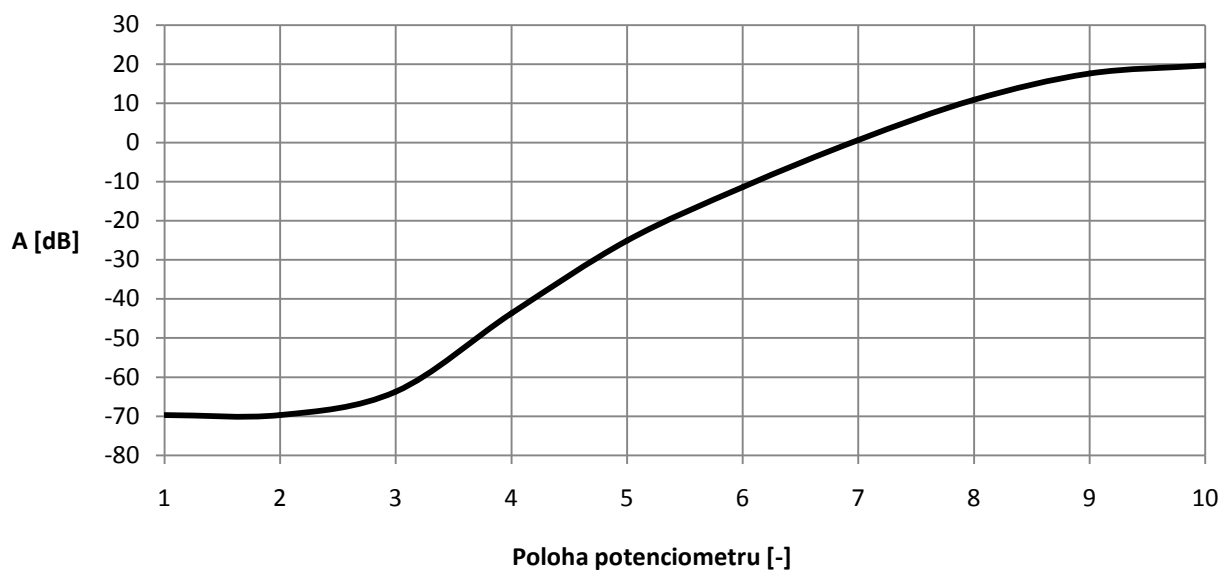
Obr. 7.2: Modulová kmitočtová charakteristika s maximální a minimální korekcí ($U_{VST} = 300\text{mV}$)

Závislost útlumu pravého a levého kanálu na poloze potenciometru vyvážení je na obr. 7.3. Z průběhu lze vyčíst, že oba kanály lze utlmit až na -40 dB v krajních polohách.



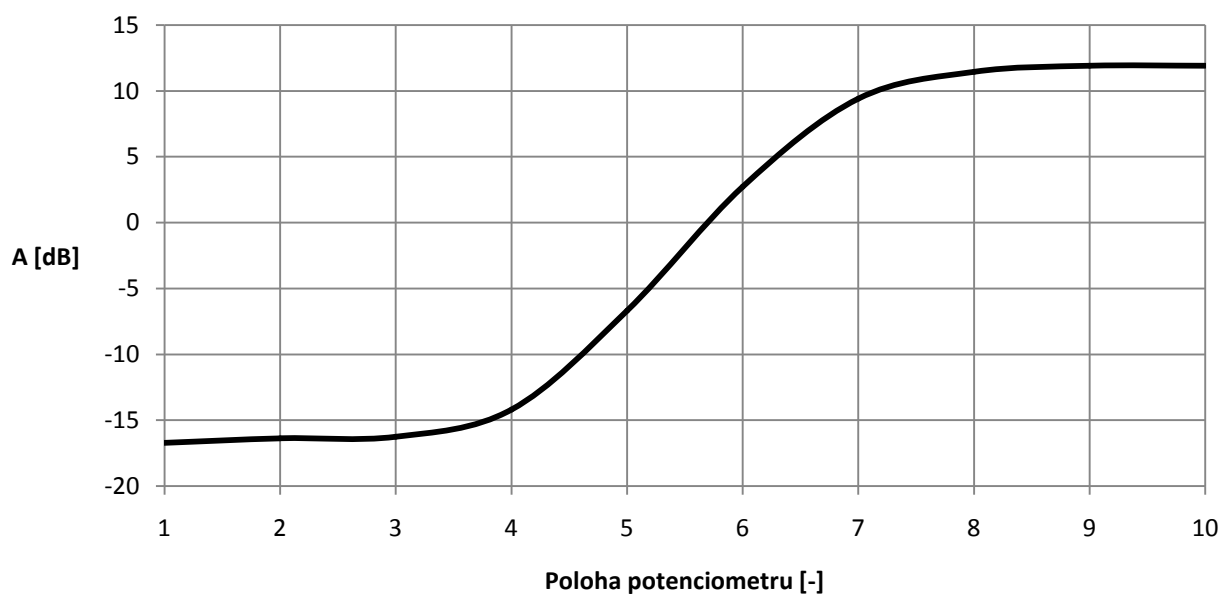
Obr. 7.3: Vyvážení pravého a levého kanálu ($U_{VST} = 300\text{mV}$, $f = 1\text{ kHz}$)

Na obr. 7.4 se nachází závislost zesílení předzesilovače na poloze potenciometru hlasitosti. Hlasitost lze regulovat od -70 dB do 20 dB, tedy v rozsahu 90 dB. Maximální zesílení korekčního předzesilovače je 20 dB.



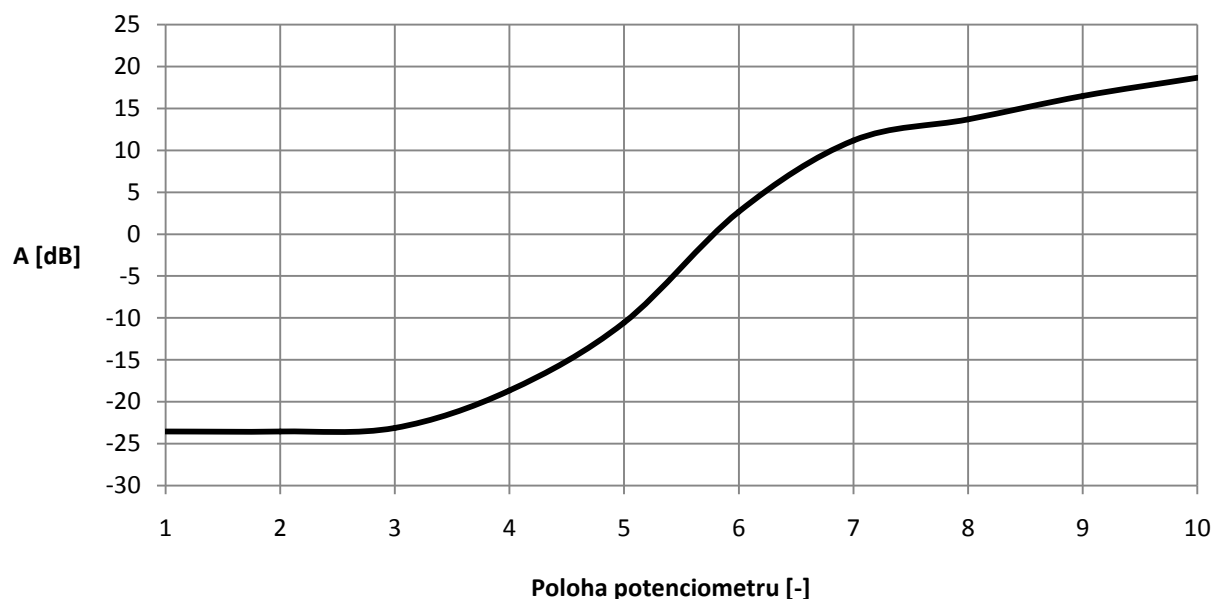
Obr. 7.4: Závislost zesílení předzesilovače na poloze potenciometru hlasitosti ($U_{VST} = 300\text{mV}$, $f = 1\text{ kHz}$)

Závislost zesílení výšek na poloze potenciometru ukazuje obr. 7.5. V poloze 1 lze výšky potlačit až na -17 dB, naopak v poloze 10 je zisk až 12 dB. Regulace probíhá mezi polohami 3 až 8. V ostatních je zisk respektive útlum konstantní.



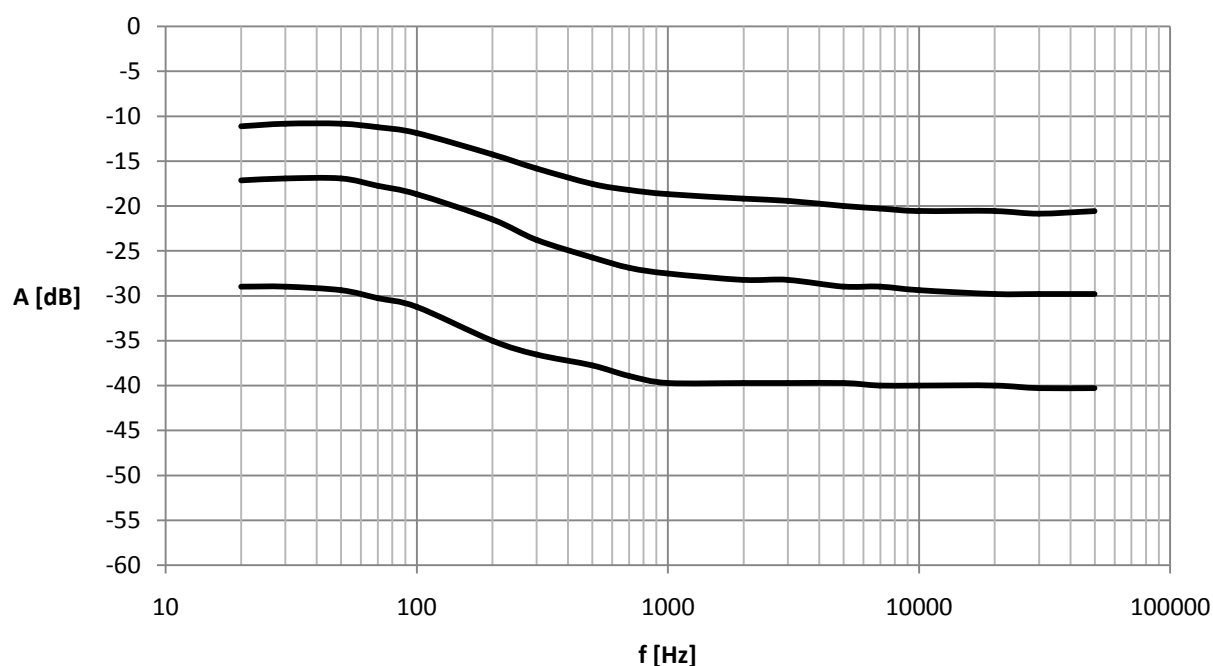
Obr. 7.5: Závislost zesílení předzesilovače na poloze potenciometru výšek ($U_{VST} = 300\text{mV}$, $f = 16\text{ kHz}$)

Průběh zesílení na poloze potenciometru hloubek je patrný z obr. 7.6. Rozsah regulace je asi 40 dB. Maximální zesílení je 18,5 dB.



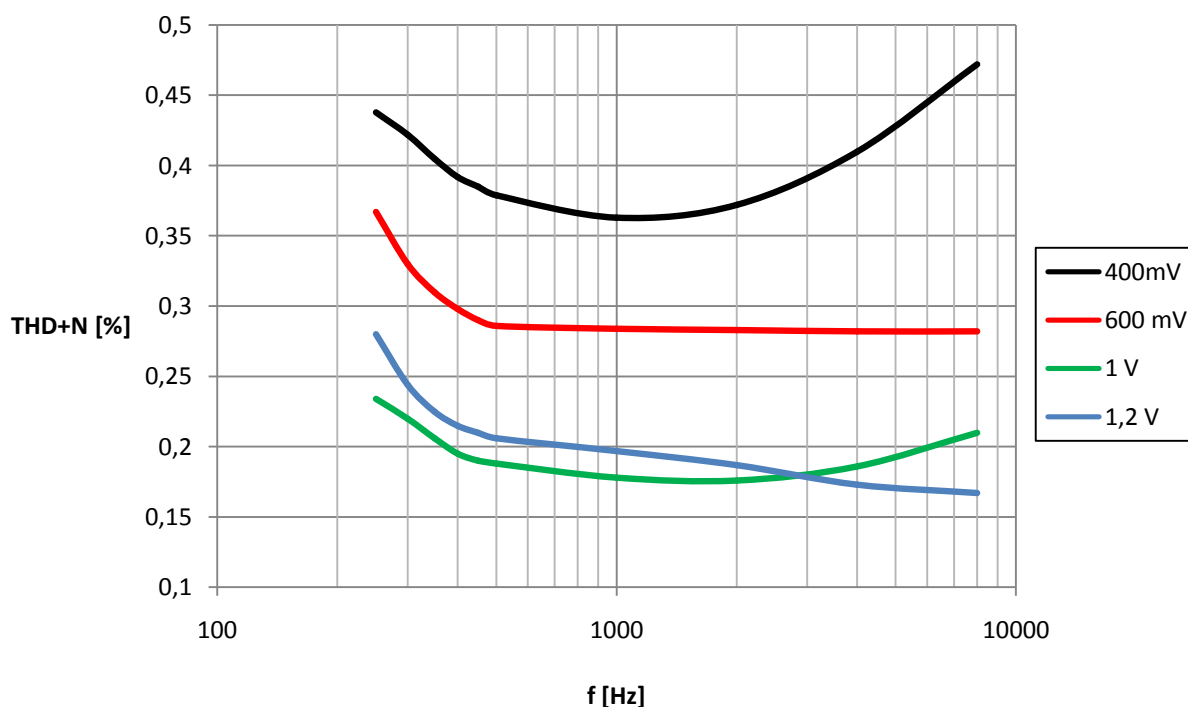
Obr. 7.6: Závislost zesílení předzesilovače na poloze potenciometru hloubek ($U_{VST} = 300\text{mV}$, $f = 40\text{ Hz}$)

Korekční předzesilovač obsahuje rovněž funkci fyziologické regulace hlasitosti, která při nízkých hlasitostech zesílí nízké kmitočty. Průběh regulace pro tři různé hlasitosti je na obr. 7.7.



Obr. 7.7: Křivky fyziologické regulace hlasitosti ($U_{VST} = 300\text{mV}$)

Na obr. 7.8 je závislost harmonického zkreslení THD+N na kmitočtu pro čtyři různé velikosti vstupních napětí. Velikost zkreslení je závislé na zesílení, velikosti vstupního napětí a kmitočtu. Z grafů je patrné, že pro dosažení uspokojivých hodnot zkreslení je na vstup korekčního předzesilovače potřeba přivést napětí okolo 1 V. Zkreslení THD+N bylo měřeno pomocí přístroje Grundig MV100, který umožňuje měřit pouze v rozsahu 250 Hz až 8 kHz.



Obr. 7.8: Závislost zkreslení THD+N na kmitočtu pro různé hodnoty vstupních napětí ($A = 0$ dB)

U korekčního předzesilovače byl také změřen vstupní a výstupní odpor metodou vloženého cejchovaného odporu. Vstupní odpor je závislý na zesílení předzesilovače. Při zesílení 0 dB hodnota vstupního odporu činí 80 k Ω , což přesně odpovídá údajům výrobce. Výstupní odpor má hodnotu 317 Ω .

Srovnání naměřených parametrů s údaji od výrobce se nachází v tabulce 7.1. Průběh modulové kmitočtové charakteristiky je dle předpokladů v akustickém pásmu vyrovnaný. Rozsah regulace hlasitosti je o 10 dB menší než udávaná katalogová hodnota. Korekční charakteristiky se liší o jednotky dB oproti údajům výrobce. Menším zklamáním je vyšší hodnota zkreslení THD+N při nižších hodnotách vstupních napětí. Ze závislosti zesílení předzesilovače na poloze potenciometru hloubek a výšek je patrné, že tyto korekce jsou velice citlivé. Při maximálním zesílení předzesilovače byl změřen i odběr, který činí 55 mA.

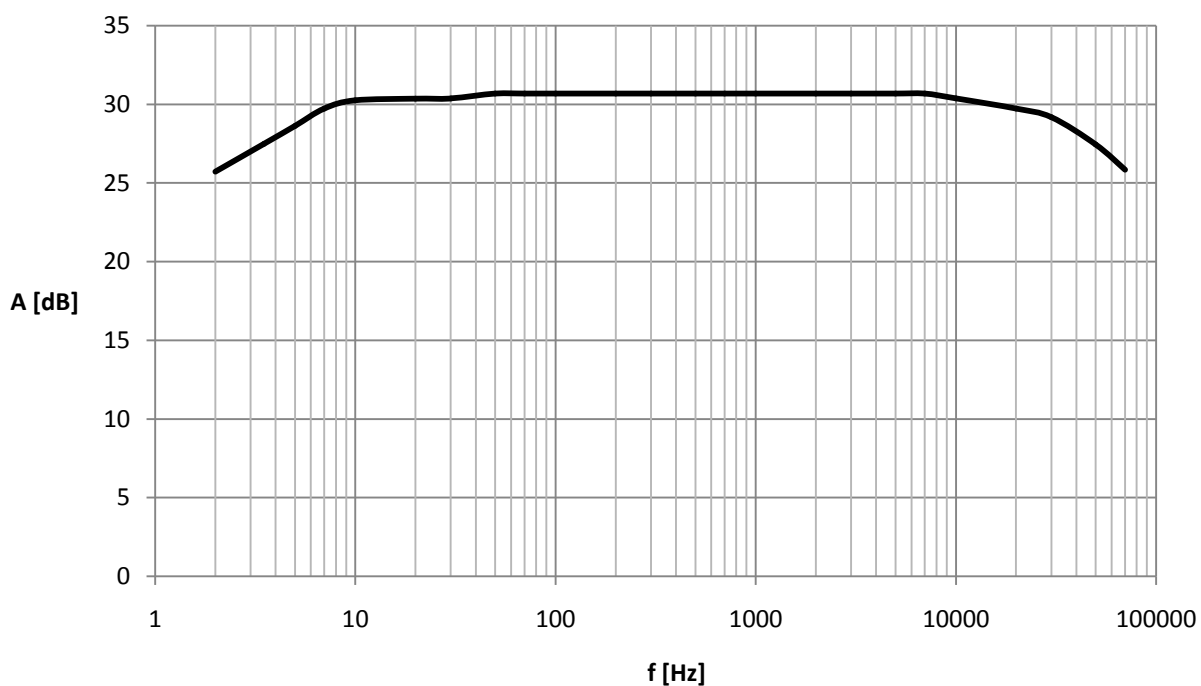
Tab. 7.1: Srovnání naměřených hodnot s údaji výrobce [11]

| Parametr | Katalogová hodnota | Změřená hodnota |
|---|--------------------|-----------------|
| Maximální zesílení | 23 dB | 20 dB |
| Rozsah regulace hlasitosti | 100 dB | 90 dB |
| Korekce hloubek | -19 až 17 dB | -23 až 19 dB |
| Korekce výšek | -15 až 15 dB | -17 až 12 dB |
| Potlačení kanálů | -40 dB | -40 dB |
| Vstupní odpor ($A = 0$ dB) | 80 k Ω | 80 k Ω |
| Výstupní odpor | 300 Ω | 317 Ω |
| THD+N ($U_{VST}=1V, f = 1kHz, A = 0$ dB) | 0,10 % | 0,18 % |
| Maximální odběr | 45 mA | 55 mA |

7.2 Koncový stupeň

Jelikož je zesilovač navržen pro impedanci 4 Ω , byla při oživení koncového stupně použita výkonová zátěž o hodnotě 4 Ω a ztrátovém výkonu maximálně 150 W. Protože obvod TAS5630B má diferenční vstupy, je třeba jej budit přes vstupní předzesilovač OPA1632. Z tohoto důvodu mohou být některé naměřené výsledky ovlivněny tímto obvodem.

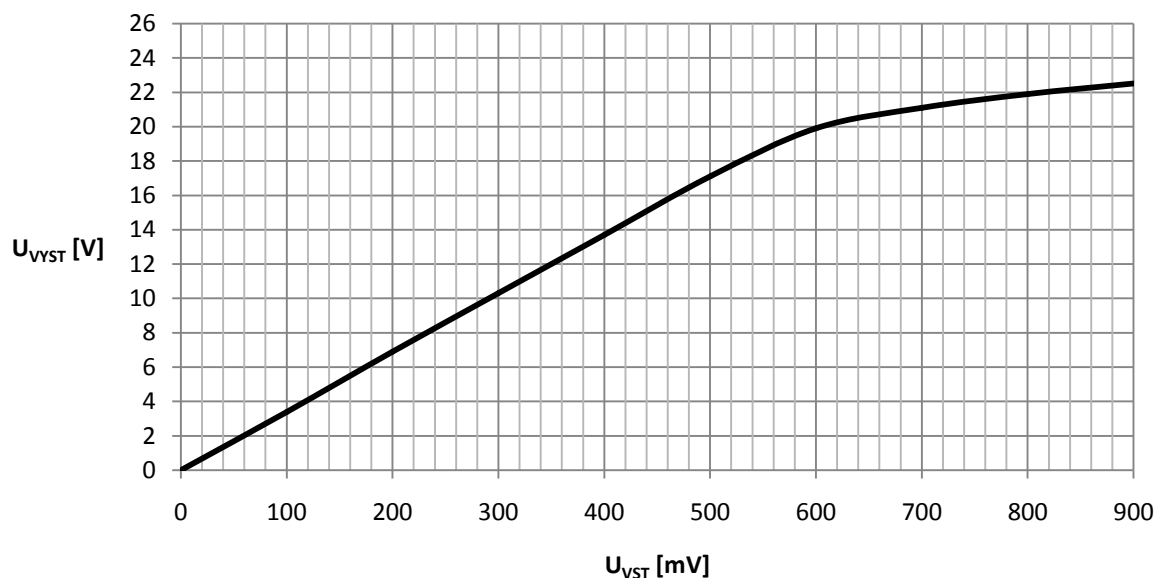
Na obr. 7.9 je modulová kmitočtová charakteristika zesilovače. Šířka pásma, stanovená při poklesu o 3 dB oproti maximální hodnotě, činí téměř 40 kHz. Maximální



Obr. 7.9: Modulová kmitočtová charakteristika koncového stupně ($U_{VST} = 300$ mV)

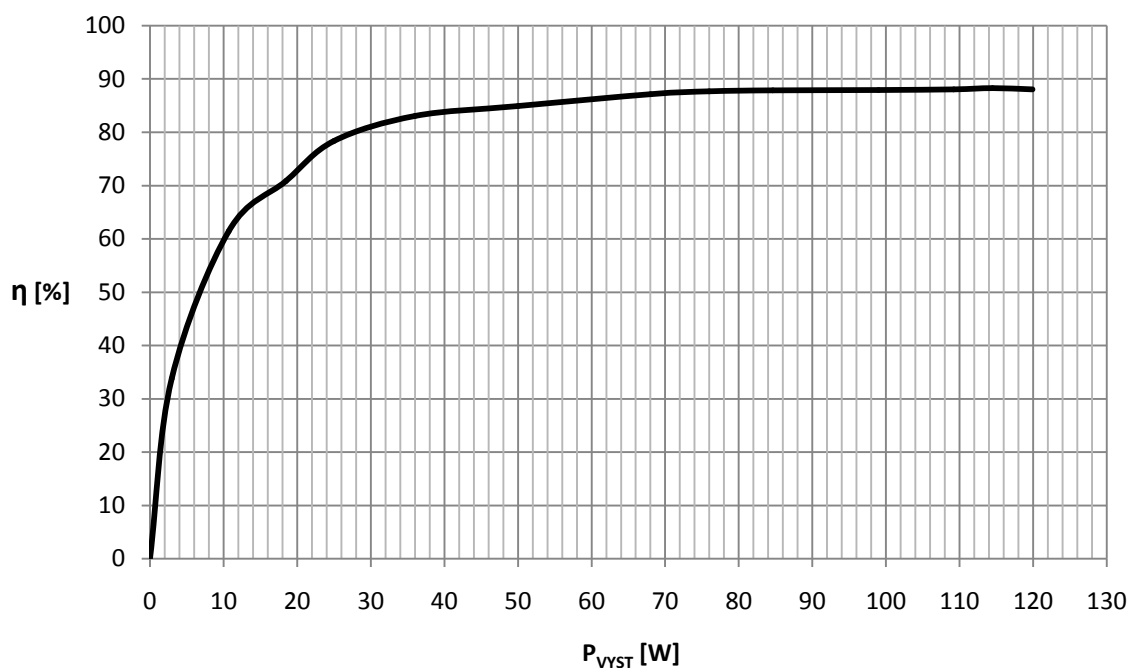
zeslení je 30,6 dB, ve kterém je započítán i zisk předzesilovače, který činí asi 7 dB. Zisk koncového stupně je tedy přibližně 23 dB, což odpovídá údajům výrobce.

Linearita koncového stupně je ukázána na obr. 7.10. Ke zkreslení začíná docházet při vstupním napětí 500 mV, to odpovídá výstupnímu výkonu 73 W.



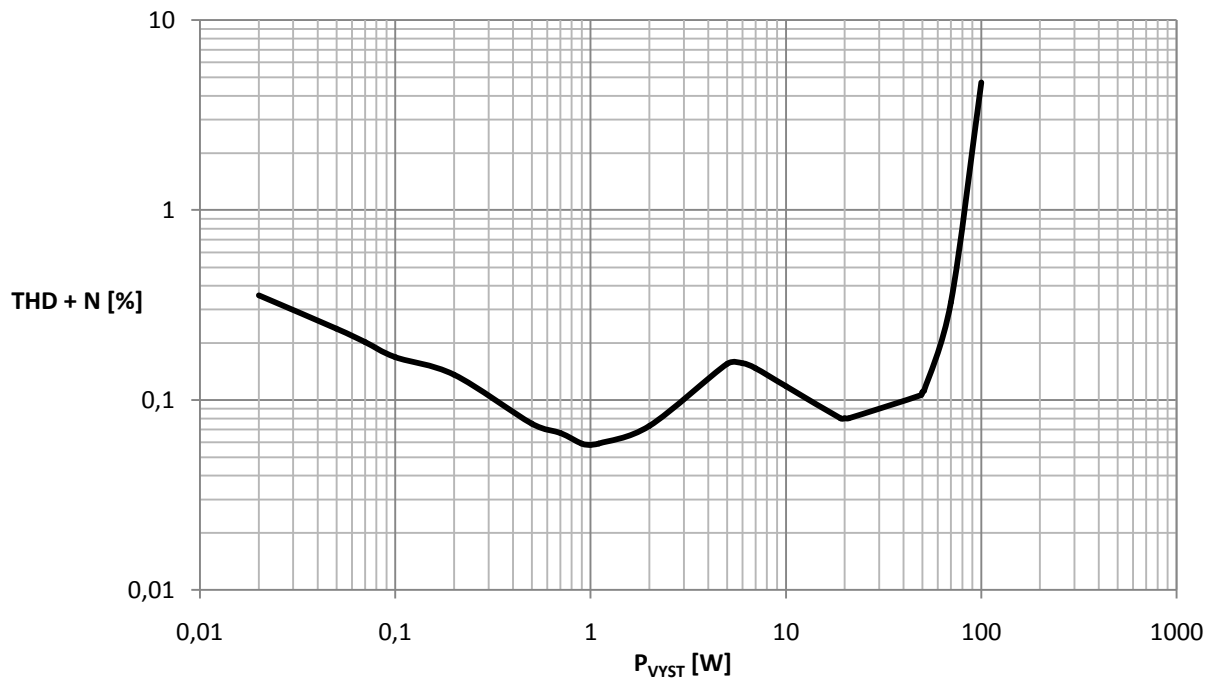
Obr. 7.10: Linearita koncového stupně ($f = 1$ kHz)

Účinnost lze určit jako poměr výstupního výkonu ku jeho příkonu. Tato závislost, změřená pro jeden kanál, je na obr. 7.11. Do výstupního výkonu 30 W je účinnost menší jak 80 %. Nad 30 W se účinnost blíží až 90 %, přesněji 88 %.

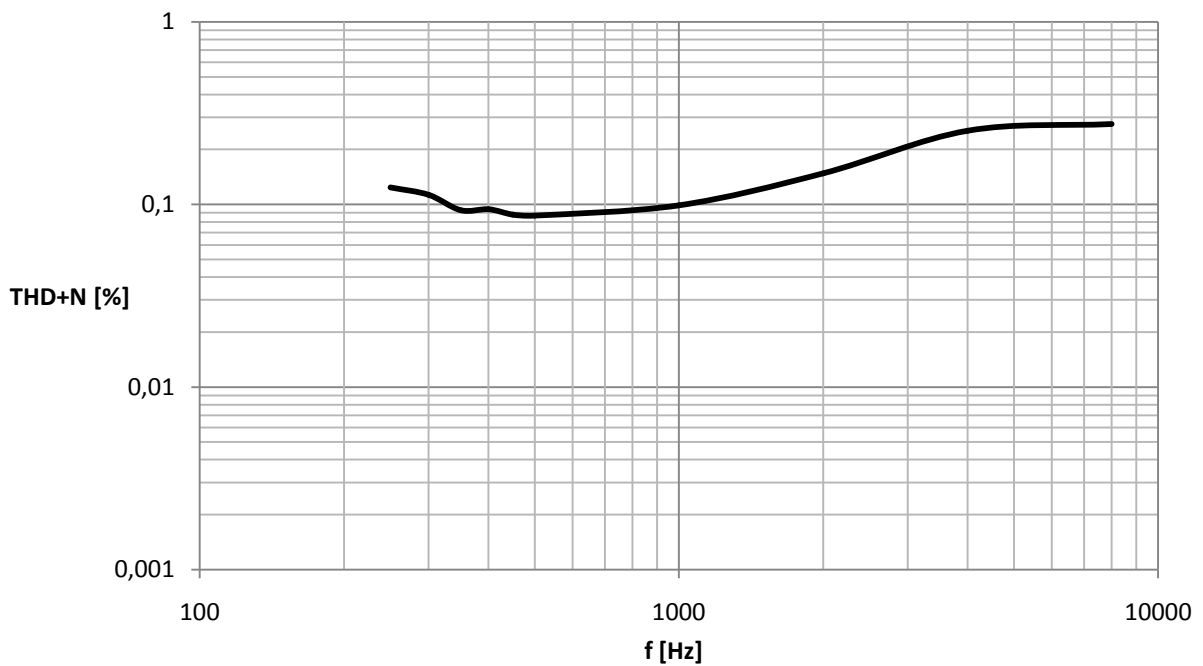


Obr. 7.11: Závislost účinnosti koncového stupně na výstupním výkonu ($f = 1$ kHz)

Na obr. 7.12 je zobrazena závislost zkreslení THD+N na výstupním výkonu. Do výkonu 80 W je zkreslení pod 1 % a dále narůstá. Při požadovaném výstupním výkonu 100 W činí hodnota zkreslení už 4,7 %.



Obr. 7.12: Závislost zkreslení THD+N na výstupním výkonu zesilovače ($f = 1$ kHz)



Obr. 7.13: Závislost zkreslení THD+N na kmitočtu vstupního signálu ($P_{VYST} = 50$ W, $U_{VST} = 410$ mV)

Pro měření charakteristiky, která je na obr. 7.13, byl použit milivoltmetr Grundig MV100. Velikost vstupního signálu je 410 mV, což odpovídá výstupnímu výkonu 50 W. Na kmitočtu 1 kHz je zkreslení 0,1 %. Směrem k vyšším kmitočtům je zkreslení větší.

Metodou vloženého cejchovaného odporu byl změřen vstupní odpor, který činí 7,1 kΩ. Tato hodnota se podstatně odlišuje od údaje výrobce 33 kΩ. Výstupní odpor lze změřit tak, že se při zátěži 4 Ω přesně změří výstupní napětí $U_{VYST} = 3,42$ V. Pak se zátěž přepne do stavu $R_Z = \infty$ a znovu se změří výstupní napětí $U_{VYST2} = 3,68$ V. Výstupní odpor se pak určí podle vztahu 7.1:

$$R_{VYST} = R_Z \cdot \frac{R_{VYST2} - R_{VYST}}{R_{VYST}} = 4 \cdot \frac{3,68 - 3,42}{3,42} = 0,3 \Omega. \quad (7.1)$$

Nízkofrekvenční zesilovače jsou provozované jako zdroje napětí a nebývají impedančně přizpůsobené, platí tedy $R_{VYST} < R_Z$. Podílem obou odporů získáme vztah 7.2 pro činitel tlumení D :

$$D = \frac{R_Z}{R_{VYST}} = \frac{4}{0,3} = 13,33. \quad (7.2)$$

Tabulka 7.2 srovnává naměřené a katalogové hodnoty. Zesílení zesilovače 23,67dB na kmitočtu 1 kHz je přibližně totožné s katalogovou hodnotou. Zisk předzesilovače činí 7 dB. Účinnost koncového stupně dosahuje 88 %, což je více než udává výrobce. Zkreslení signálu je přijatelné pouze pro výstupní výkony desítek wattů. Při požadovaném výstupním výkonu 100 W je zkreslení už 4,7 %. Na zkreslení má vliv velikost napájecího napětí. Při oživení bylo použito napětí 30 V. Napájením vyšším

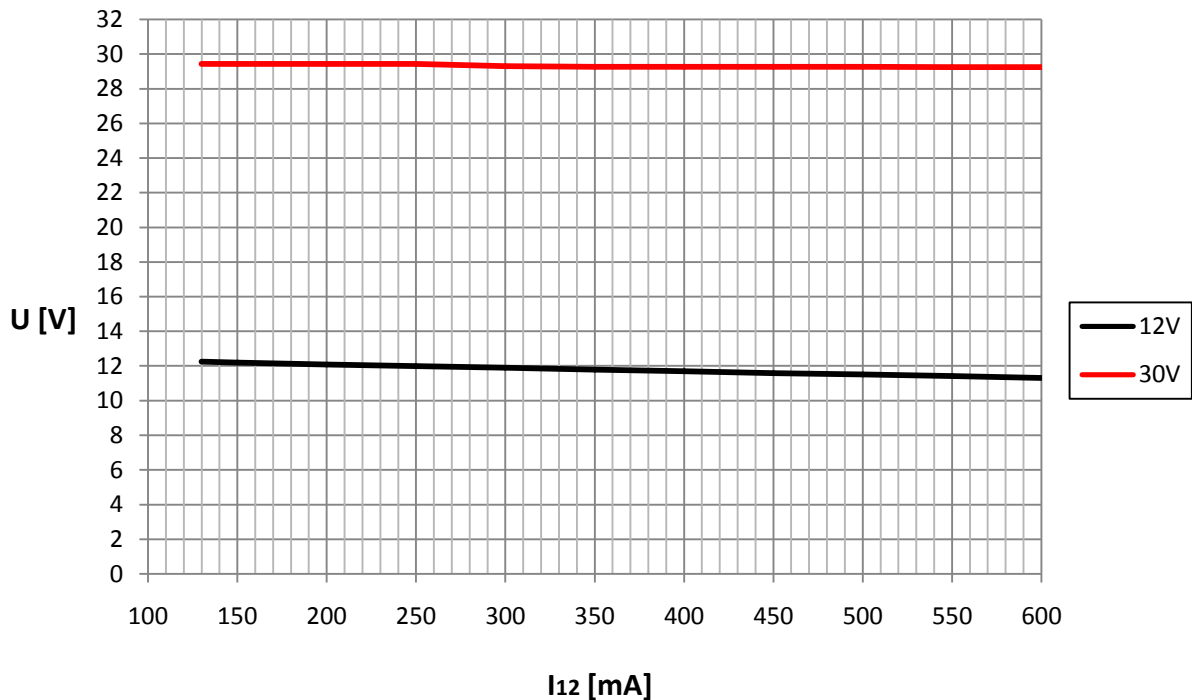
Tab. 7.2: Vybrané naměřené parametry koncového stupně [12]

| Parametr | Katalogová hodnota | Změřená hodnota |
|---|--------------------|-----------------|
| Maximální zesílení ($U_{VST} = 300$ mV, $f = 1$ kHz) | 23 dB | 23,67 dB |
| Vstupní odpor | 33 kΩ | 7,1 kΩ |
| THD+N ($P_{VYST} = 1$ W, $f = 1$ kHz, $R_Z = 4$ Ω) | 0,03 % | 0,058 % |
| THD+N ($P_{VYST} = 100$ W, $f = 1$ kHz, $R_Z = 4$ Ω) | 0,09 % | 4,7 % |
| P_{VYST} ($R_Z = 4$ W, $THD+N = 1$ %) | 240 W | 80 W |
| Účinnost ($P_{VYST} = 100$ W) | 85 % | 88 % |

napětím by došlo ke snížení zkreslení na přijatelnější hodnoty. Nižších hodnot THD+N by bylo možno dosáhnout také použitím profesionálního měřícího filtru zapojeného na výstup koncového stupně. Signál na výstupu zesilovače totiž obsahuje jisté množství vysokofrekvenční složky, způsobené vysokým spínacím kmitočtem koncového stupně. To může ovlivnit naměřené hodnoty. Další příčinou může být rušení indukované do vodičů.

7.3 Napájecí zdroj

Při oživování napájecího zdroje byl výstup 12 V zatížen reostatem $90\Omega/2A$ a pro hlavní výstup 30 V byla použita elektronická programovatelná zátěž se ztrátovým výkonem až 300 W. Pro obě napájecí větve byly změřeny zatěžovací charakteristiky.

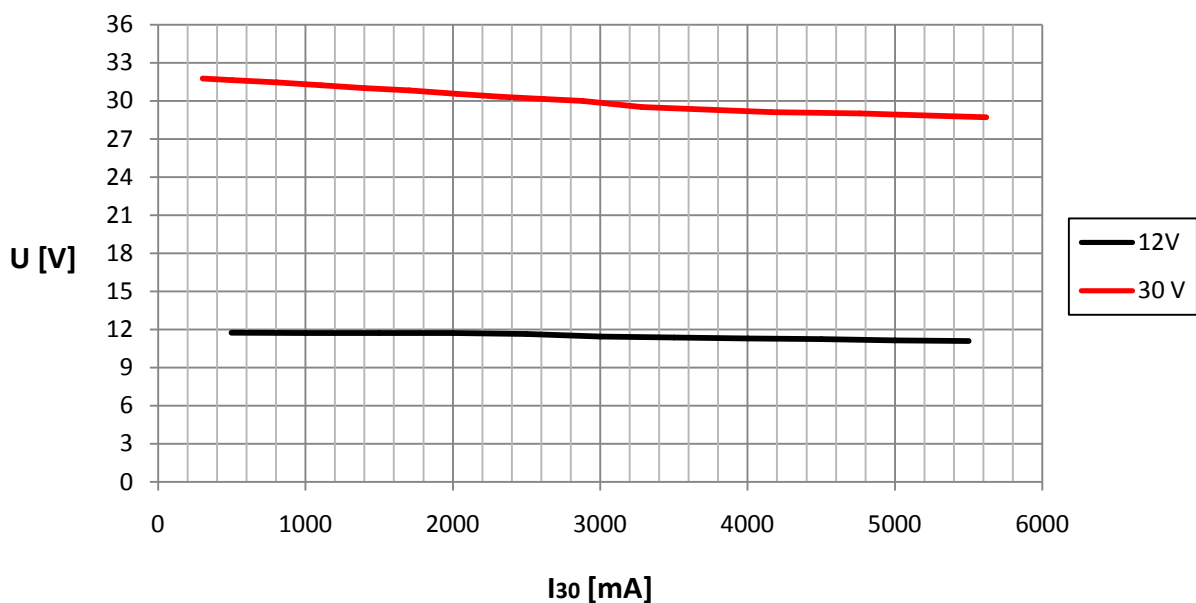


Obr. 7.14: Zatěžovací charakteristika pro výstup 12 V ($I_{30} = 2,5$ A)

Zatěžovací charakteristika pro výstupní větev 12 V je na obr. 7.14. Výstup 30 V byl zatížen proudem 2,5 A. Z charakteristiky je patrné, že při zatížení větve 12 V napětí klesá jen velmi pozvolna. Největší odchylka při maximálním zatížení proudem 600 mA činí asi 6 %. To je v toleranci této napájecí větve ± 10 %.

Na obr. 7.15 je zatěžovací charakteristika pro výstup 30 V. Při velmi malém zatížení (téměř naprázdno) výstupní napětí vzroste na 31,8 V. Řešením je použít tzv. předzátěž připojenou paralelně k výstupu. Zatížením výstupní větve 30 V dochází k poklesu napětí. Při proudu $I_{30} = 5,5$ A napětí poklesne až na 28,7 V. Pro proudy větší než 5,6 A již dochází k vypínání řídicího obvodu. To je způsobeno reakcí některé z ochranných obvodů TOP261. Příčinou může být:

- Nedostatečné omezení velikosti naindukovaného primárního napětí při rozepínání tranzistoru
- Primární proud řídicím obvodem je příliš velký
- Nedostatečné chlazení obvodu TOP261
- Nevhodně zvolené hodnoty součástek ve zpětné vazbě (zisk smyčky)



Obr. 7.15: Zatěžovací charakteristika pro výstup 30 V ($I_{12} = 200$ mA)

7.4 Použité měřicí přístroje

- Funkční generátor Agilent 33220A
- Analogový osciloskop HP 54603B
- Napájecí zdroj MCP M10-DP-305E
- Laboratorní zdroj Diametral P230R51D
- Střídavý napájecí zdroj Diametral AC250K2D
- Nízkofrekvenční milivoltmetr Grundig MV100
- Elektronická programovatelná zátěž GW INSTEK PEL-300
- Reostat 90 Ω /2 A
- Výkonová zátěž 4 Ω /150 W
- Multimetr DMM-3900
- Cejchovaný proměnný odpor 100 k Ω

8 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout výkonový audio zesilovač spínané koncepce spolu s korekčním předzesilovačem a napájecím zdrojem. Byla vybrána třída D, jelikož se těší veliké oblibě řady výrobců integrovaných obvodů, ale i amatérských konstruktérů. Součástí návrhu je také simulace vybraných částí zesilovače v programu Pspice.

V první části je proveden konkrétní návrh zesilovače ve třídě D. Napájecí napětí bylo zvoleno 30 V, což dle katalogového listu odpovídá výstupnímu výkonu 2x100 W. Koncový stupeň je tvořen "power stage" obvodem TAS5630B od firmy Texas Instruments. Předpokládá se připojení zátěže o impedanci 4 Ω . Návrh je proveden včetně korekčního předzesilovače TDA1524A od firmy Philips. Ovládání předzesilovače je realizováno čtyřmi potenciometry. Integrovaný obvod koncového stupně umožňuje signalizaci jeho základních stavů. Návrh tedy obsahuje zapojení pro signalizaci pomocí LED diod, které jsou spolu s potenciometry vhodně rozmístěny na přední straně šasi. V programu Pspice byli simulovány ty části zesilovače, jejichž modely byly obsaženy v knihovně simulačního programu. Výstupem simulace předzesilovače koncového stupně je modulová kmitočtová charakteristika. Horní mezní kmitočet činí 81 kHz a zisk v propustném pásmu 7 dB. Simulován byl rovněž výstupní filtr s mezním kmitočtem 87kHz. Modulová a fázová kmitočtová charakteristika výstupního filtru je na obr. 4.7. Navržen byl rovněž napájecí zdroj spínané koncepce s řídicím obvodem TOPSwitch. S tímto typem obvodu je možné poměrně jednoduše realizovat napájecí zdroj do výkonu až 333 W.

Po navržení všech desek plošných spojů v programu Eagle byly tyto desky osazeny součástkami a následně změřeny jejich základní parametry. Zesílení korekčního předzesilovače činí 20 dB. Zkreslení THD+N je závislé jak na kmitočtu, tak na velikosti vstupního napětí. Toto napětí by se mělo pohybovat okolo 1 V. Při menších napětích zkreslení narůstá. Změřený vstupní odpor nabývá hodnoty 80 k Ω , což se shoduje s údajem výrobce. Korekční charakteristiky mají předpokládané průběhy. Hodnoty útlumů respektive zisků se odlišují od hodnot udávané výrobcem v jednotkách decibelů. Koncový stupeň má zisk asi 23,7 dB, účinnost dosahuje až 88 %. Toto jsou hodnoty, které se přibližně shodují s údaji výrobce. Harmonické zkreslení THD+N se výrazně odlišuje od očekávaných hodnot. Při požadovaném výstupním výkonu 100 W zkreslení činí 4,7 %. Výrobce udává 0,09 %. Lepších hodnot by bylo možno dosáhnout například větším napájecím napětím. U napájecího zdroje bylo dosaženo uspokojujících hodnot pouze pro výstupní větev 12 V, kde je při zatížení pokles maximálně o 6 % a napětí je tak v toleranci ± 10 %. Zatížením napájecí větve 30 V toto napětí klesá a při proudu asi 5,6 A dojde k vypnutí zdroje vlivem reakce některé z integrovaných ochranných řídicích obvodů. Možné příčiny jsou uvedeny v odstavci 7.3. Všechny části zesilovače jsou umístěny do skříňky s označením KK09-35251.

LITERATURA

- [1] SVADBÍK, V. *Návrh a konstrukce spínaného audio koncového zesilovače*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010.
- [2] ŠTÁL, P. *Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D*. Praha: Technická literatura BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-230-5.
- [3] Elweb, *Audio zesilovače pracující ve třídě D* [online]. 2008 [cit. 2011-10-25]. Dostupné na WWW: <<http://www.elweb.cz/clanky.php?clanek=109>>
- [4] DUŠEK, T. Pandatron, *Třídy zesilovačů* [online]. 2009 [cit. 2011-10-2]. Dostupné na WWW: <http://pandatron.cz/?632&tridy_zesilovacu>
- [5] DOUGLAS, D. *Audio Power Amplifier Design Handbook*. New York: Newnes - ELSEVIER, 2006. ISBN 978-0-240-52162-6.
- [6] *Maxim application notes, Spread-spektrum-modulation mode minimizes electromagnetic interference in class D amplifiers* [online]. 2006 [cit. 2011-10-7]. Dostupné na WWW: <<http://www.maxim-ic.com/appnotes/index.mvp/id/3881>>
- [7] *Pracovní třídy výkonových zesilovačů* [online]. 2002 [cit. 2011-10-7]. Dostupné na WWW: <http://elnika.sweb.cz/zesilovace/tridy_vykon_zes.htm>
- [8] Crownaudio, *The Class-I Amplifier* [online]. 2003 [cit. 2011-10-7]. Dostupné na WWW: <<http://www.crownaudio.com/pdf/amps/137234.pdf>>
- [9] MORENO, S. S.. Elliott Sound Products, *Class D Audio Amplifiers - Theory and Design* [online]. Austrálie: 2001 [cit. 2011-9-30]. Dostupné na WWW:<<http://sound.westhost.com/articles/pwm.htm>>
- [10] HONDA, J., ADAMS, J. International IOR Rectifier, *Class D audio amplifier basics* [online]. Kalifornie: 2005 [cit. 2011-10-3]. Dostupné na WWW: <<http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-1071.pdf>>
- [11] Datasheet - 1524A, Stereo-tone/volume control circuit [online]. Philips, 1987. Dostupné na WWW: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/TDA1524A_CNV_2.pdf>
- [12] Datasheet - TAS5630B, 300W stereo/600W mono PurePath™ HD analog-input power stage [online]. Texas instruments, 2010. Dostupné na WWW: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tas5630b.pdf>>
- [13] Datasheet - OPA1632, High-Performance, Fully-Differential audio operational amplifier [online]. Texas instruments, 2010. Dostupné na WWW: <<http://www.ti.com/lit/ds/sbos286b/sbos286b.pdf>>
- [14] *User's Guide TAS5630PHD2EVM* [online]. Texas instruments, 2010. Dostupné na WWW: <<http://www.ti.com/lit/ug/slau287a/slau287a.pdf>>

- [15] Datasheet - TL2575HV, *1-A simple step-down switching voltage regulator* [online]. Texas instruments, 2007. Dostupné na WWW: <<http://www.ti.com/lit/ds/slvs638b/slvs638b.pdf>>
- [16] Datasheet - LM317, *3-terminal adjustable regulator* [online]. Texas instruments, 2008. Dostupné na WWW: <<http://www.ti.com/lit/ds/slvs044u/slvs044u.pdf>>
- [17] Rádio plus - KTE, magazín elektroniky. *Univerzální regulovatelný spínaný zdroj* [online]. Praha, 2001, č. 9 [cit. 2012-03-24]. ISSN 1212-3730. Dostupné na WWW: <<http://www.gmelectronic.eu/kte/0901.pdf>>
- [18] BROWN, M. *Power supply cookbook*. Library of Congress, 2001. ISBN 0-7506-7329X.
- [19] Datasheet - TOP 261, *Integrated Off-Line Switcher with Advanced Feature Set and Extended Power Range* [online]. Power Integrations, 2009. Dostupné na WWW: <http://www.powerint.com/sites/default/files/product-docs/tophx_family_datasheet.pdf>
- [20] *Design guide TOPSwitch-HX Family* [online]. Power Integrations, 2008. Dostupné na WWW: <<http://www.powerint.com/sites/default/files/product-docs/an43.pdf>>
- [21] Krejčířík, A. *Spínané napájecí zdroje s obvody TOPSwitch*. Praha: Technická literatura BEN, 2002. ISBN 80-7300-031-8.
- [22] Faktor, Z. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. Praha: Technická literatura BEN, 2002. ISBN 80-86056-91-0.
- [23] Datasheet - BYV32-200, *Dual Common-Cathode Ultrafast Rectifier* [online]. Vishay, 2008. Dostupné na WWW: <<http://www.vishay.com/docs/88558/88558.pdf>>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

| | |
|----------------------|--|
| A/D | Analogově digitální převod |
| BTL | Zapojení zátěže do plného mostu |
| BOTTOM | Spodní strana desky plošného spoje |
| DSP | Digitální signálový procesor |
| DPS | Deska plošného spoje |
| D/A | Digitálně analogový převod |
| dead time | Ochranná doba spínání tranzistorů |
| drain | Elektroda unipolárního tranzistoru |
| EMC | Elektromagnetická kompatibilita |
| ESR | Ekvivalentní sériový odpor |
| filterless amplifier | Zesilovač bez výstupního filtru |
| FPGA | Programovatelná hradlová pole |
| full-bridge driver | Budič pro řízení tranzistorů v plném mostu |
| gate | Řídící elektroda unipolárního tranzistoru |
| GVDD | Napájecí napětí budičů koncových tranzistorů |
| GND | Nulový potenciál |
| high-side driver | Budič pro řízení tranzistorů v horní části mostu |
| half-bridge driver | Budič pro řízení tranzistorů v polovičním mostu |
| Hi-Z | Stav vysoké impedance |
| IO | Integrovaný obvod |
| IC | Integrovaný obvod |
| KOMP | Komparátor |
| LED | Světlo emitující dioda |
| low-side driver | Budič pro řízení tranzistorů v dolní části mostu |
| MOSFET | Tranzistor řízený elektrickým polem |
| MUX | Multiplexer |
| NOT | Negace |
| PWM | Pulzně šířková modulace |
| PWM drivers | Obvod obsahující budič spolu s ochrannými obvody |
| power stage | Obvod obsahující budič i koncové tranzistory |
| PVDD | Napájecí napětí koncových tranzistorů |
| PBTL | Zapojení zátěže paralelně do plného mostu |
| S/N | Poměr signál - šum |
| source | Elektroda unipolárního tranzistoru |
| SE | Zapojení zátěže do polovičního mostu |
| THD+N | Harmonické zkreslení + šum |
| TOP | Horní strana desky plošného spoje |

| | |
|-----------------|--|
| VDD | Napájecí napětí logických a řídicích obvodů |
| A | Zisk |
| D | činitel tlumení |
| dB | Jednotka decibel |
| f | Kmitočet |
| f_{PWM} | Kmitočet interního oscilátoru |
| G | Zisk |
| H | Jednotka indukčnosti henry |
| I_{adj} | Referenční proud |
| I_{UV} | Proud tekoucí do vstupu V |
| I_{OV} | Proud tekoucí do vstupu V při přepětí |
| I_{AVG} | Střední hodnota proudu diodou |
| I_{12} | Zatěžovací proud výstupní větve 12 V |
| I_{30} | Zatěžovací proud výstupní větve 30 V |
| kHz | Jednotka kmitočtu kilohertz |
| $k\Omega$ | Jednotka odporu kiloohm |
| MHz | Jednotka kmitočtu megahertz |
| N_x | Počet závitů na daném výstupu transformátoru |
| N_p | Počet primárních závitů |
| N_{30} | Počet závitů výstupní větve 30 V |
| N_{12} | Počet závitů výstupní větve 12 V |
| P_{VYST} | Výstupní výkon |
| P_z | Ztrátový výkon |
| pF | Jednotka kapacity pikofarad |
| R_{VST} | Vstupní odpor |
| $R_{\Theta JC}$ | Tepelný odpor čip - pouzdro |
| $R_{\Theta CH}$ | Tepelný odpor pouzdro - chladič |
| $R_{\Theta H}$ | Tepelný odpor chladiče |
| R_p | Rezistor pro simulaci impedančního oddělení |
| R_{LS} | Hodnota rezistoru pro nastavení přepětí a podpětí |
| R_z | Odpor zátěže |
| $R_{DS(ON)}$ | Odpor kanálu unipolárního tranzistoru v sepnutém stavu |
| U_{VST} | Vstupní napětí |
| U_{VYST} | Výstupní napětí |
| U_R | Závěrné napětí diody |
| U_P | Prahové napětí diody |
| U_{MAX} | Maximální primární stejnosměrné napětí |
| U_x | Napětí jednotlivého sekundárního výstupu |
| U_{30} | Napětí na sekundární straně 30 V |

| | |
|--------------------|----------------------------------|
| U_{12} | Napětí na sekundární straně 12 V |
| V_{REF} | Referenční napětí |
| V_o | Výstupní napětí |
| V | Jednotka napětí volt |
| V_{UV} | Mezní hodnota podpětí |
| V_V | Napětí na pinu V řídicího obvodu |
| V_{OV} | Mezní hodnota přepětí |
| W | Jednotka výkonu watt |
| Z_L | Impedance zátěže |
| Ω | Jednotka odporu ohm |
| $^{\circ}\text{C}$ | Jednotka teploty stupeň celsia |
| % | Jednotka procento |
| θ_A | Teplota okolí |
| θ_J | Maximální teplota čipu |

SEZNAM PŘÍLOH

| | | |
|----------|--|-----------|
| A | NÁVRH KOREKČNÍHO PŘEDZESILOVAČE | 65 |
| A.1 | Schéma zapojení..... | 65 |
| A.2 | Deska plošného spoje - strana top..... | 66 |
| A.3 | Rozložení součástek - strana top | 67 |
| A.4 | Rozložení součástek - strana bottom | 68 |
| A.5 | Seznam součástek..... | 69 |
| B | NÁVRH KONCOVÉHO STUPNĚ..... | 70 |
| B.1 | Schéma koncového stupně | 70 |
| B.2 | Schéma regulátorů napětí..... | 71 |
| B.3 | Schéma signalizace teploty čipu a regulátoru ventilátoru | 71 |
| B.4 | Deska plošného spoje - strana top..... | 72 |
| B.5 | Deska plošného spoje - strana bottom..... | 73 |
| B.6 | Rozložení součástek - strana top | 74 |
| B.7 | Rozložení součástek - strana bottom | 75 |
| B.8 | Seznam součástek..... | 76 |
| C | NÁVRH NAPÁJECÍHO ZDROJE..... | 78 |
| C.1 | Schéma zapojení..... | 78 |
| C.2 | Deska plošného spoje - strana bottom..... | 79 |
| C.3 | Rozložení součástek - strana top | 80 |
| C.4 | Rozložení součástek - strana bottom | 81 |
| C.5 | Seznam součástek..... | 82 |
| D | VRTACÍ PLÁN | 83 |
| E | FOTODOKUMENTACE..... | 85 |
| E.1 | Koncový stupeň | 85 |
| E.2 | Napájecí zdroj..... | 86 |
| E.3 | Sestavený zesilovač..... | 87 |