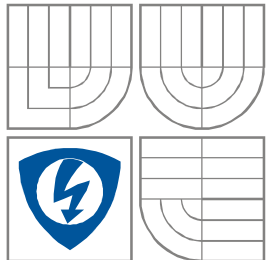




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÍZKOFREKVENČNÍ VÝKONOVÝ ZESILOVAČ VE TŘÍDĚ D

CLASS D AUDIO POWER AMPLIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUKÁŠ KALÁB

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. TOMÁŠ KRATOCHVÍL, Ph.D.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Lukáš Kaláb
Ročník: 3

ID: 106521
Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Nízkofrekvenční výkonový zesilovač ve třídě D

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete obvodové zapojení výkonového zesilovače 2 x 50 W ve třídě D (doporučeno např. TPA3100D2 - s výstupním filtrem LC nebo MAX 9709 - bez výstupního filtru LC) do vámi zvolené zátěže, který by obsahoval korekční předzesilovač a tranzistory MOSFET pro výkonové zesílení výstupů. Zapojení dále doplňte samostatným napájecím zdrojem. V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek atd.). Navržené zařízení realizujte formou funkčního prototypu a experimentálním měření v laboratoři nízkofrekvenční elektroniky ověřte jeho činnost. Výsledky měření zpracujte formou standardního protokolu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ŠTÁL, P. Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D - základní principy a konstrukce. Praha: BEN - technická literatura, 2008.
- [2] Texas Instruments [online]. Datasheet TPA3100D2 - 20-W Stereo Class-D Audio Power Amplifier. Texas Instruments, Inc., 2007 - [cit. 15. 5. 2008]. Dostupné na [www: http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tpa3100d2.pdf](http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tpa3100d2.pdf)
- [3] Maxim Integrated Products [online]. Datasheet MAX9709 - 25W/50W, Filterless, Spread-Spectrum, Stereo/Mono, Class D Amplifier. Maxim, Inc., 2008 - [cit. 15. 5. 2008]. Dostupné na [www: http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX9709.pdf](http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX9709.pdf)

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 28.5.2010

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

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na kompletní návrh a následnou realizaci prototypu nízkofrekvenčního výkonového zesilovače pracujícího ve třídě D. Zesilovač slouží pro domácí poslech a měl by dosahovat výkonu 2 x 50 W. Přístroj obsahuje koncový stupeň, korekční předzesilovač a napájecí zdroj. Podklady pro realizaci návrhu (schéma zapojení, návrhy desek plošných spojů, rozložení a soupiska součástek) jsou vytvořeny v programu Eagle. Součástí práce je také mechanické uspořádání všech částí ve skříni zesilovače.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nízkofrekvenční zesilovač, výkonový zesilovač, třída D, koncový stupeň, korekční předzesilovač.

ABSTRACT

This project aims on completed design and consequential realization of prototype of the class D audio power amplifier. Amplifier works for home listening and should power at 2 x 50 W. The machine contains finall degree, correcting pre-amplifier and power supply. The basis for realization of the design (connection diagram, design of printed connections boards, distribution and list of parts) are made in Eagle software. Mechanic configuration of all parts in the body of the amplifier is also part of the work.

KEYWORDS

Audio amplifier, power amplifier, class D, final degree, correction preamplifier.

KALÁB, L. *Nízkofrekvenční výkonový zesilovač ve třídě D*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 16 s., 17 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Nízkofrekvenční výkonový zesilovač ve třídě D 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 doc. Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	viii
Úvod	1
1 ZESILOVAČE PRACUJÍCÍ VE TŘÍDĚ D	2
1.1 Blokové schéma zesilovače třídy D.....	2
1.2 Princip funkce	3
1.2.1 Vznik PWM signálu.....	3
1.3 Možnosti realizace	4
1.3.1 Realizace s diskrétními součástkami	4
1.3.2 Realizace pomocí integrovaných obvodů.....	4
2 BLOKOVÉ SCHÉMA NAVRHOVANÉHO ZESILOVAČE	4
2.1 Popis blokového schématu.....	5
2.1.1 Korekční předzesilovač.....	5
2.1.2 Koncový zesilovač.....	5
3 KOREKČNÍ PŘEDZESILOVAČ MAX5406	6
3.1 Popis obvodu.....	6
3.2 Základní parametry	6
3.3 Typické zapojení.....	7
4 KONCOVÝ ZESILOVAČ MAX9709	8
4.1 Popis obvodu.....	8
4.2 Blokové schéma.....	8
4.3 Základní parametry	9
4.4 Typické zapojení.....	10
5 NAPÁJECÍ ZDROJ	11
5.1 Výpočet zdroje.....	12
5.1.1 Výpočet sekundárního napětí transformátoru.....	12
5.1.2 Výkon transformátoru.....	12

5.1.3	Filtrační kondenzátor	13
6	NÁVRH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ	13
7	SESTAVENÍ A OŽIVENÍ ZESILOVAČE	14
8	ZÁVĚR	15
	LITERATURA	16
	SEZNAM PŘÍLOH	17

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 : Blokové schéma zesilovače třídy D. (Převzato z [1])	2
Obr. 2 : Vznik PWM signálu komparací harmonického a pilového průběhu napětí (Převzato z [3])	3
Obr. 3 : Blokové schéma navrhovaného zesilovače	4
Obr. 4 : Typické zapojení obvodu MAX5406 (Převzato a upraveno z [6])	7
Obr. 5 : Blokové schéma koncového zesilovače MAX9709 v můstkovém zapojení (mono). (Převzato z [7]).....	9
Obr. 5 : Typické zapojení obvodu MAX9709 (Převzato z [8]).....	10

SEZNAM TABULEK

Tab.1 : Tabulka základních parametrů obvodu MAX5406. [6]	6
Tab. 2 : Tabulka základních parametrů obvodu MAX9709. [7]	9

ÚVOD

Tato práce se zaměřuje na kompletní návrh a následnou realizaci prototypu nízkofrekvenčního výkonového zesilovače pracujícího ve třídě D. Zesilovač slouží pro domácí poslech a měl by dosahovat výkonu $2 \times 50 \text{ W}$ do zátěže 4Ω . Obsahuje koncový stupeň, korekční předzesilovač s možností regulace hlasitosti, basů a výšek pomocí tlačítek a napájecí zdroj s toroidním transformátorem. Je zde využito integrovaných obvodů od firmy Maxim. Vybraný koncový stupeň nevyžaduje nezbytně použití výstupního LC filtru, proto není filtr v návrhu uvažován a bude testována funkce zesilovač bez výstupního LC filtru. Podklady pro realizaci návrhu (schéma zapojení, návrhy desek plošných spojů, rozložení a soupiska součástek) jsou vytvořeny v programu Eagle. Součástí práce je také mechanické uspořádání všech částí ve skříni zesilovače a realizace prototypu.

1 ZESILOVAČE PRACUJÍCÍ VE TŘÍDĚ D

Zesilovače pracující ve třídě D vychází ze zcela jiného principu, než známe ze tříd A, B, AB apod. Výkonové tranzistory totiž pracují ve spínaném režimu, tedy v oblasti saturace. Proto je na nich minimální úbytek napětí a tedy i velmi malý ztrátový výkon. Z toho také vychází velmi vysoká účinnost dosahující teoretické hodnoty až 100 %, v praxi to bývá kolem 90 %. Díky malému ztrátovému výkonu je možné ve většině konstrukcí audio zesilovače ve třídě D zcela vynechat chladiče, které značně uspoří rozměry, hmotnost a v neposlední řadě i cenu celého zařízení.

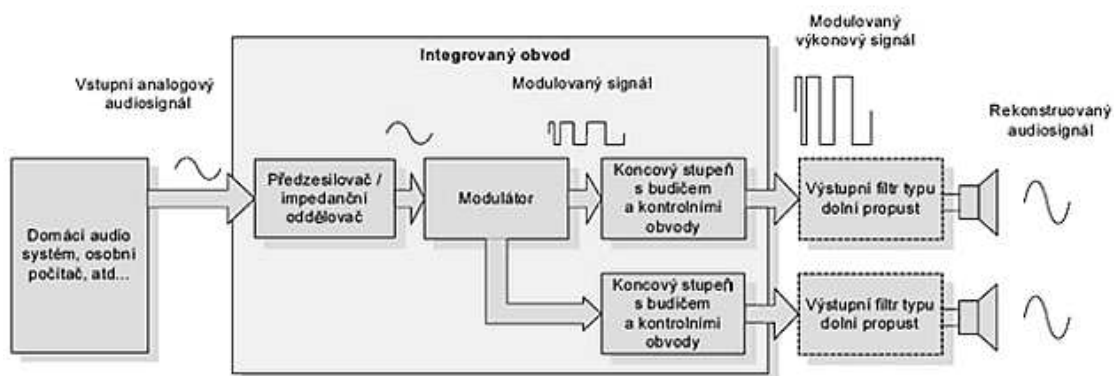
Zesilovače třídy D lze podobně jako zesilovače třídy AB integrovat na jeden jediný čip, který potřebuje ke své funkci jen minimum externích součástek. Použití integrovaných zesilovačů pracujících ve třídě D je díky malému ztrátovému výkonu velice výhodné i v aplikacích využívajících napájení z baterií jako jsou např. MP3 přehrávače, mobilní telefony nebo notebooky. [1]

Jako menší nevýhoda objevující se u zesilovačů třídy D se může jevit vyšší hodnota zkreslení THD+N v porovnání se třídou AB. V dnešní době už ovšem technologie pokročily natolik, že většina integrovaných zesilovačů pracujících ve třídě D má hodnoty zkreslení podobné jako třída AB, tedy desetiny až setiny procenta.

Zesilovače, které pracují ve třídě D, jsou někdy označovány jako digitální zesilovače (možná podle písmene D). Toto označení není úplně správné, protože tyto zesilovače můžou zpracovávat signál na vstupu jak plně digitální (v tomto případě by se dalo označení „digitální“ použít), tak i signál analogový a zde je takové označení zavádějící. [2]

1.1 Blokové schéma zesilovače třídy D

Blokové schéma zesilovače pracujícího ve třídě D, který zpracovává analogový signál může vypadat následovně:



Obr. 1 : Blokové schéma zesilovače třídy D. (Převzato z [1])

Jak už bylo zmíněno, na vstupu zesilovače můžou být místo analogového předzesilovače použity digitální vstupní obvody pro přímé připojení digitalizovaného audio signálu. Existují také zesilovače, jejichž výstup není nutné za určitých podmínek opatřit výstupním filtrem typu dolní propust.

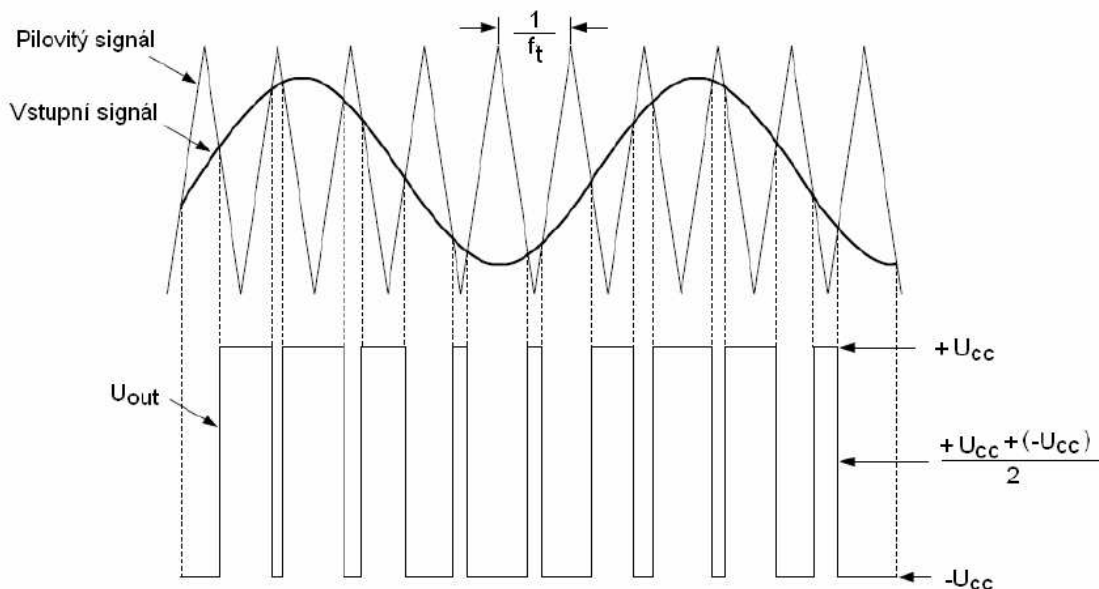
Uspořádání jednotlivých bloků v integrovaném obvodu není přesně dáno, někdy nemusí být například předzesilovač součástí integrovaného obvodu, záleží na výrobci a vlastnostech jednotlivých integrovaných zesilovačů.

1.2 Princip funkce

Základním principem zesilovačů třídy D je použití pulsně šířkové modulace PWM (Pulse Width Modulation). Díky ní můžou koncové tranzistory pracovat ve spínaném režimu jako spínače pravouhloúhého průběhu napětí s mnohem kratší délkou periody, než u zesilovaného nízkofrekvenčního signálu. Z toho vychází již zmíněná vysoká účinnost zesilovače.

1.2.1 Vznik PWM signálu

Nízkofrekvenční signál se spojitě se měnící velikostí okamžitého napětí je pomocí PWM modulátoru přeměněn na sled pravouhloúhých impulsů, kterým se jejich šířka (tzv. střída) mění v závislosti na změnách okamžitého napětí nízkofrekvenčního signálu. Je zde využito komparace vstupního nízkofrekvenčního signálu s pilovým průběhem napětí o řádově vyšší frekvenci než je maximální frekvence vstupního signálu. Střída tedy nese informaci o vstupním harmonickém signálu. [3]



Obr. 2 : Vznik PWM signálu komparací harmonického a pilového průběhu napětí (Převzato z [3])

1.3 Možnosti realizace

Zesilovač pracující ve třídě D je možné sestavit pouze z diskretních součástek nebo je možno využít integrované obvody některého výrobce integrovaných obvodů.

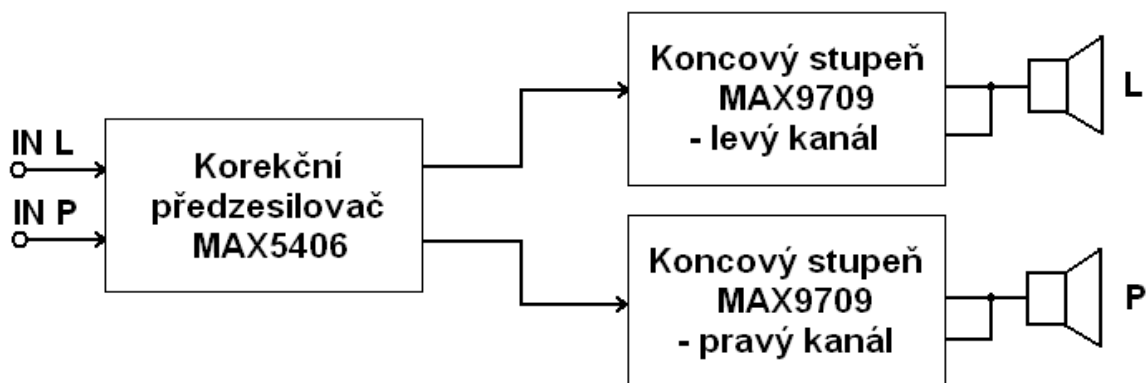
1.3.1 Realizace s diskretními součástkami

Realizace zesilovače pracujícího ve třídě D pomocí diskretních součástek je podstatně složitější, než při použití integrovaných obvodů. Problémy mohou nastat hlavně při návrhu desky plošných spojů, kdy je potřebné dodržet principy a pravidla vysokofrekvenčního návrhu, jinak mohou nastat problémy s rušením jednotlivých bloků a celkovou elektromagnetickou kompatibilitou celého zesilovače. [2]

1.3.2 Realizace pomocí integrovaných obvodů

Použití plně integrovaného zesilovače třídy D návrh velmi zjednodušuje. Stačí podle požadovaných parametrů vyhledat vhodný integrovaný obvod a k němu katalogový list, ve kterém jsou obvykle uvedena doporučená zapojení. Nabídka integrovaných obvodů zesilovačů třídy D je dnes velmi široká a neustále se rozrůstá. V případě potřeby výrobci poskytují rozsáhlou technickou podporu, vzorky integrovaných obvodů nebo celé vývojové moduly pro laboratorní testování a vývoj. [2]

2 BLOKOVÉ SCHÉMA NAVRHOVANÉHO ZESILOVAČE



Obr. 3 : Blokové schéma navrhovaného zesilovače

2.1 Popis blokového schématu

Po prostudování nabídky výrobců integrovaných obvodů byl pro realizaci korekčního předzesilovače zvolen integrovaný obvod firmy Maxim MAX5406 protože umožňuje elektronickou regulaci hlasitosti, basů, výšek a stereováhy pomocí tlačítkového rozhraní, která vhodně doplňuje moderní koncový zesilovač pracující ve třídě D. Jako koncové zesilovače byly vybrány obvody Maxim MAX9709, které v sobě integrují modulátor a výkonový stupeň, pro jejich vysoký výstupní výkon, dobré hodnoty účinnosti, zkreslení a také možnosti použití bez výstupního LC filtru.

2.1.1 Korekční předzesilovač

Vstupním obvodem celého zesilovače je korekční předzesilovač MAX5406.

Korekční předzesilovač by měl mít co nejmenší hodnoty šumu a zkreslení protože signál z předzesilovače se dále zesiluje v koncovém zesilovači. Jeho úkolem je napěťově zesílit vstupní signál na požadovanou úroveň pro koncový zesilovač, impedanční přizpůsobení a také regulace hlasitosti, basů, výšek a stereováhy.

2.1.2 Koncový zesilovač

Za korekčním předzesilovačem následuje koncový zesilovač MAX9709. Ten má za úkol výkonově zesílit signál z předzesilovače na úroveň potřebnou pro optimální vybuzení membrán připojených reproduktorů.

Na koncovém zesilovači vznikají největší ztráty, proto většinou bývá opatřen chladičem. Zde je velká výhoda koncových zesilovačů třídy D, které mají vysokou účinnost, a proto nemusí být koncové stupně opatřeny rozměrnými chladiči. Stačí použít miniaturní chladiče přiložené přímo na integrovaný obvod nebo je chlazení zajištěno pouze pomocí desky plošných spojů.

Zvolený koncový zesilovač firmy Maxim MAX9709 může pracovat za určitých podmínek bez připojeného výstupního LC filtru, proto jím v návrhu není výstup opatřen. Odstraní se tak problémy spojené s použitím výstupního filtru, kdy na návrhu cívky záleží většina vlastností celého zesilovače.

Koncové stupně jsou zapojeny do můstku pro dosažení maximálního výstupního výkonu. Použijí se tedy dva obvody, každý pro jeden kanál.

3 KOREKČNÍ PŘEDZESILOVAČ MAX5406

3.1 Popis obvodu

Jedná se o stereofonní zvukový procesor s tlačítkovým rozhraním, který umožňuje elektronicky regulovat hlasitost, basy, výšky a stereováhu.

Obsahuje dvojitý logaritmický potenciometr hlasitosti s 32 kroky po 2 dB, dále lineární digitální potenciometry pro tónové korekce a dvojitě potenciometry pro stereováhu. Přidržením některého ovládacího tlačítka déle jak 1 sekundu dojde k automatickému krokování s frekvencí 4 Hz a podržením tlačítka déle jak 4 sekundy s frekvencí 16 Hz.

Obvod umožňuje použití pohotovostního režimu tlačítkem SHUTDOWN, ve kterém má celý obvod odběr proudu typicky pouze 0,2 μ A a pamatuje si naposledy nastavené úrovně hlasitosti. Pomocí tlačítka MUTE obvod umožňuje úplné umlčení hlasitosti a tlačítkem AMBIENCE se aktivuje „prostorovější“ stereo mód, který je vhodný pro použití například se sluchátky nebo reproduktory na stole blízko u sebe, kdy se oba kanály „slévají“ do sebe a zaniká tak stereo.

Zvolený obvod MAX5406 obsahuje dva vstupy pro připojení standardních jednoduchých signálů například z tuneru, CD přehrávače, MP3 přehrávače, notebooku a podobně a také možnost připojení diferenciálních signálů. Dále obsahuje výstup pro subwoofer, který kombinuje oba kanály a hodnotou externího filtračního kondenzátoru je možno nastavit mezní kmitočet pro tento výstup. [6]

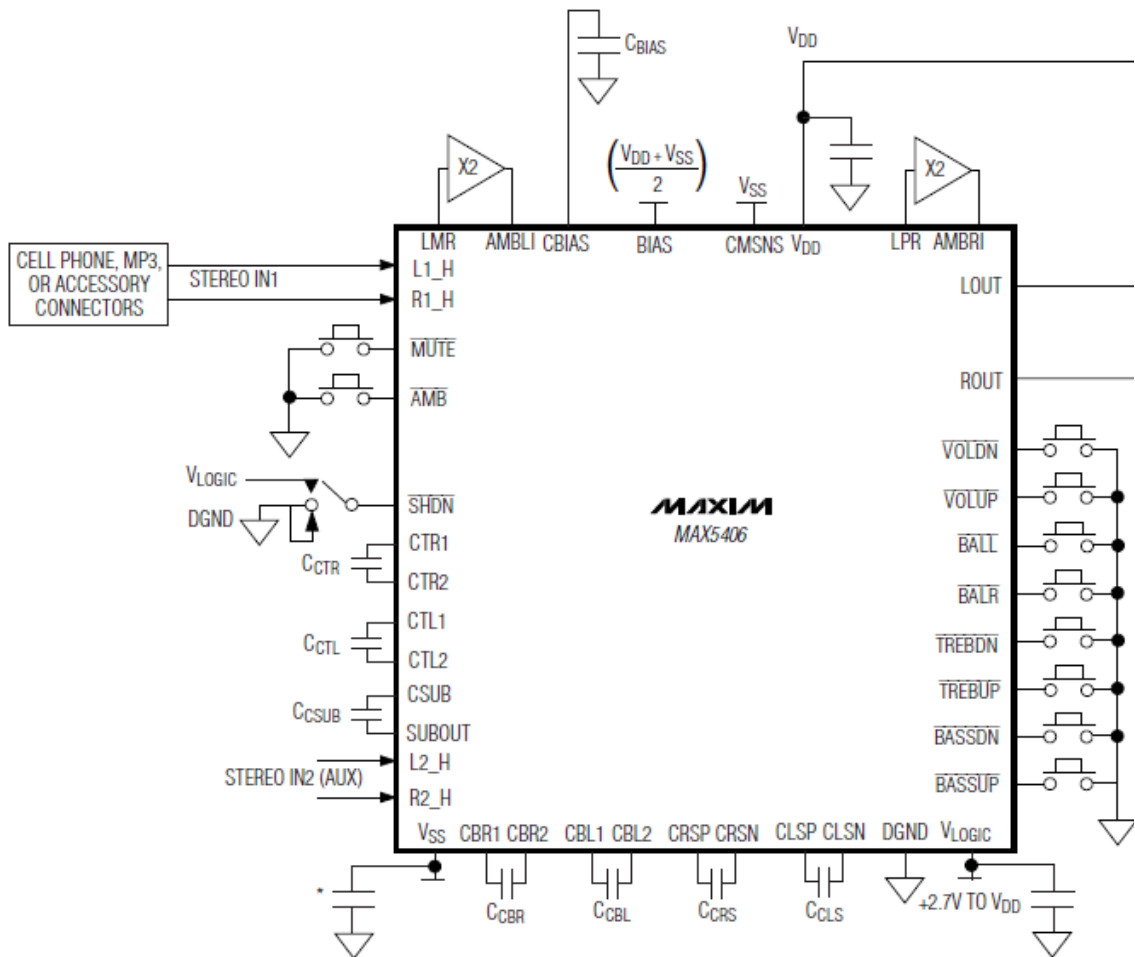
3.2 Základní parametry

Parametr	Typická hodnota
Napájecí napětí	+2,7 V až +5,5 V
Rozsah ovládání hlasitosti	-62 dB
Rozsah korekce hloubek	14 dB
Rozsah korekce výšek	15 dB
THD+N	0,02 %
Odstup mezi kanály	-70 dB
Pouzdro	TSSOP 48 pinů

Tab.1 : Tabulka základních parametrů obvodu MAX5406. [6]

3.3 Typické zapojení

Pro vlastní konstrukci navrhovaného prototypu zesilovače je použito doporučeného zapojení výrobce.



Obr. 4 : Typické zapojení obvodu MAX5406 (Převzato a upraveno z [6])

4 KONCOVÝ ZESILOVAČ MAX9709

4.1 Popis obvodu

Hlavním požadavkem na koncový zesilovač byl výstupní výkon, který by měl dosahovat až 50 W. Proto byl po prostudování nabídky výrobců obvodů vybrán obvod od firmy Maxim MAX9709. Tento obvod obsahuje dva kanály s výkonem 25 W do zátěže 8 Ω , které mohou být spojeny do můstku a výsledný výkon tak dle údajů výrobce dosahuje až 50 W do zátěže 4 Ω .

I přes takto vysoký výstupní výkon je možné tento zesilovač provozovat bez přídavného chladiče, aniž by za standardních podmínek došlo k aktivaci ochrany proti přehřátí. Pouze musí být některé vývody pouzdra použity pro odvod tepla z čipu integrovaného obvodu do desky plošného spoje. Může za to vysoká účinnost zesilovače, která dosahuje až 87 %. [1]

Obvod je vybaven modulátorem, který dokáže pracovat v režimu modulace s pevnou frekvencí nosné (160 kHz, 200 kHz, 250 kHz) a v režimu s rozprostřeným spektrem, kdy frekvence nosné je časově proměnná (200 kHz \pm 4 kHz), což má velmi příznivý vliv na elektromagnetické rušení zesilovače. [1]

Díky použití speciálních modulačních technik (zřejmě díky použití modulace s rozprostřeným spektrem a proměnnou frekvencí nosné) není nutné za určitých podmínek výstup tohoto obvodu opatřit výstupním LC filtrem typu dolní propust. Těmito podmínkami jsou například dostatečně krátké kabely k reproduktorům, které jsou navíc nejlépe stíněné, například uvnitř nějakého zařízení a podobně. [1]

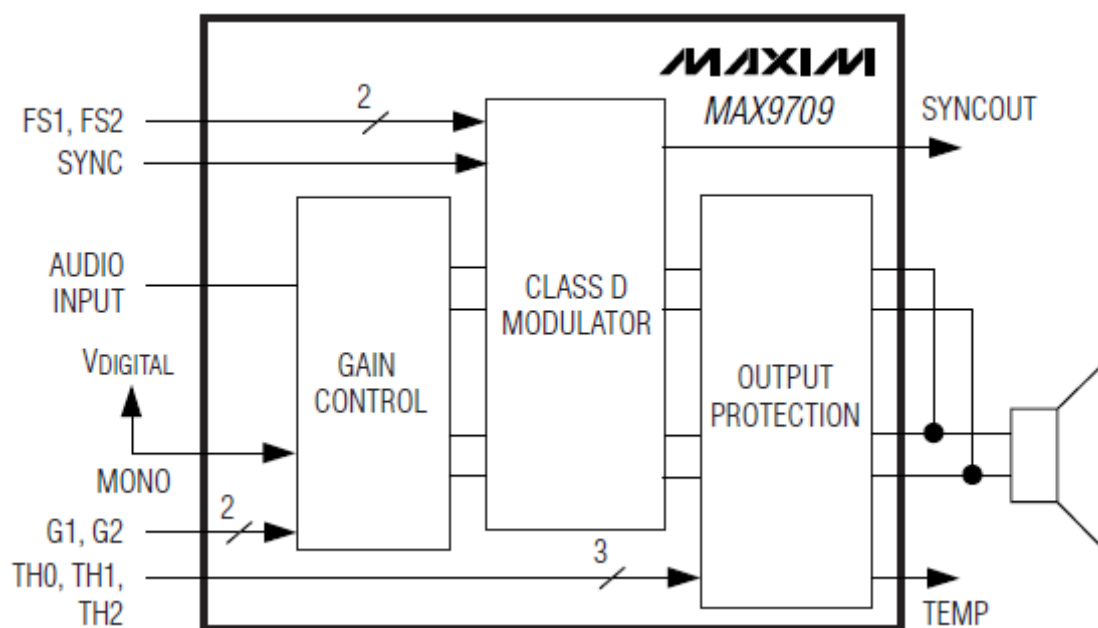
Dále obvod obsahuje funkci umlčení celého obvodu MUTE, funkci pro klidový režim SHUTDOWN, kdy má celý obvod odběr proudu jen 0,1 μ A, ochranu proti zkratu a tepelnou ochranu proti přehřátí, kterou je možno nastavit na sedm různých hodnot aktivace od 80 $^{\circ}$ C do 158 $^{\circ}$ C. [7]

4.2 Blokové schéma

Na vstupu celého integrovaného obvodu je obvod pro regulaci zisku, který lze nastavit ve čtyřech krocích pomocí pinů G1 a G2 (22 dB, 25 dB, 29,5 dB a 36 dB). Zde se nastavuje také režim celého zesilovače na stereo nebo mono.

Dalším obvodem je vlastní modulátor, který je pomocí pinů FS1 a FS2 možno nastavit na čtyři různé frekvence nosné.

Na výstupu integrovaného obvodu jsou obvody výstupní ochrany, které zahrnují ochranu proti zkratu výstupních svorek a tepelnou ochranu proti přehřátí celého integrovaného obvodu. Tu lze nastavit pomocí pinů TH0, TH1 a TH2 na sedm různých hodnot aktivace. [7]



Obr. 5 : Blokové schéma koncového zesilovače MAX9709 v můstkovém zapojení (mono). (Převzato z [7])

4.3 Základní parametry

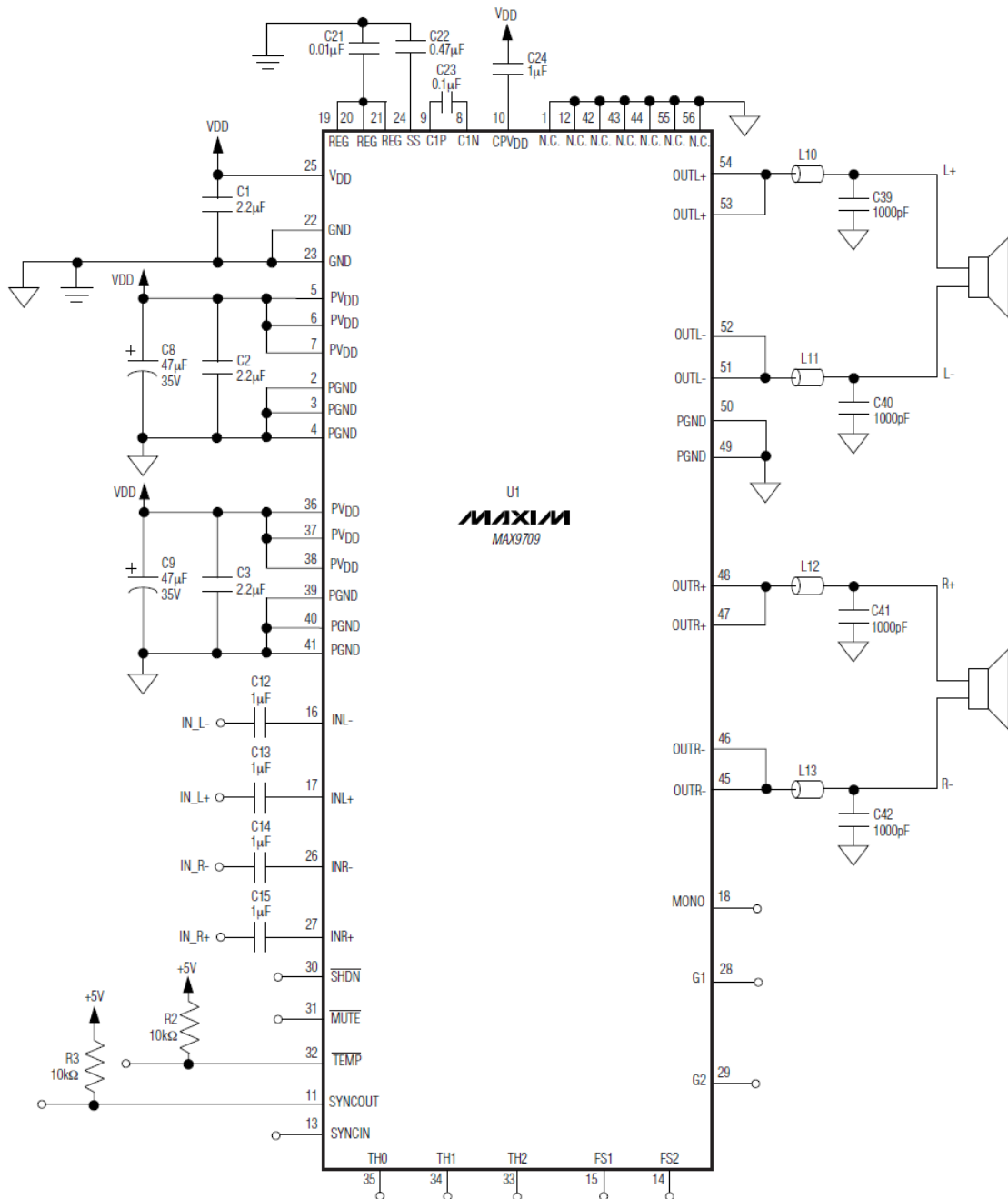
- můstkové zapojení, zátěž 4Ω

Parametr	Typická hodnota
Napájecí napětí V_{DD}	+10 V až +22 V
Výstupní výkon	50 W
THD+N	0,09 %
SNR	91 dB
Účinnost	86 %
Pouzdro	TQFN 56 pinů

Tab. 2 : Tabulka základních parametrů obvodu MAX9709. [7]

4.4 Typické zapojení

Pro vlastní konstrukci navrhovaného prototypu zesilovače je použito doporučeného zapojení výrobce s výjimkou použití výstupního LC filtru typu dolní propust a celý obvod je použit v mono módu, tedy v můstkovém zapojení pro každý kanál zvlášť. Bude tedy zapotřebí dvou desek, pro každý kanál jedna.



Obr. 5 : Typické zapojení obvodu MAX9709 (Převzato z [8])

5 NAPÁJECÍ ZDROJ

Při návrhu napájecího zdroje se nabízejí dvě možnosti realizace. První je použití klasického zdroje s transformátorem a usměrňovačem s filtrací, které je méně náročné na návrh zapojení a případné vysokofrekvenční rušení, ovšem za cenu menší účinnosti zdroje a vyšší hmotnosti a rozměrů díky použití transformátoru. Druhé je použití spínaného zdroje, kde odpadá potřeba rozměrného a těžkého transformátoru, ale konstrukce takového zdroje je složitější.

Napájecí zdroj by měl být schopen napájet obvod předzesilovače a dva obvody koncových zesilovačů. Je tedy nutné, aby dokázal dodat potřebné hladiny napětí. Protože zesilovač nevyžaduje symetrické napájení a pouze tři hladiny napájecího napětí, (10 – 22 V pro koncové stupně a ± 5 V pro předzesilovač) takže vystačí k realizaci zdroje transformátor s jedním sekundárním vinutím bez vyvedeného středu, bude využit klasický zdroj s transformátorem i z důvodu jednoduššího návrhu.

Nejčastějším typem transformátoru používaných v napájecích zdrojích jsou transformátory s jádrem EI. Tyto transformátory mají ale velké rozměry (hlavně výšku), ztráty a rozptylové pole. Proto se u nízkofrekvenčních zesilovačů s výhodou využívají toroidní transformátory, které mají nižší profil a menší elektromagnetické vyzařování do okolí. Mezi primárním a sekundárním vinutím je umístěna stínící fólie zabraňující průniku rušivých impulzů ze sítě na sekundární vinutí.

Za transformátorem je připojen můstkový usměrňovač. Ten může být tvořen čtyřmi diodami v Graetzově zapojení nebo lze použít usměrňovací můstek v jednom pouzdře se čtyřmi vývody. Je třeba správně dimenzovat diody na maximální odebíraný proud ze zdroje a maximální napětí. Diody jsou blokovány paralelně zapojenými kondenzátory s hodnotou $47\mu\text{F}$ kvůli odvedení možné napěťové špičky, která by se mohla dostat ze sítě až na spotřebič.

Za usměrňovačem následuje vyhlazovací filtrační elektrolytický kondenzátor s velkou kapacitou, za kterým už lze odebírat nestabilizované napětí pro napájení koncových zesilovačů a následují stabilizátory jednotlivých napěťových úrovní. Zde konkrétně stabilizátor 7805 pro napětí +5 V sloužící k napájení předzesilovače a digitálních obvodů koncového zesilovače. Pro napájení operačního zesilovače v předzesilovači je zapotřebí získat také záporné napětí -5 V. To je realizováno pomocí zdvojovače napětí, jehož největší výhodou je, že není nezbytný vyvedený střed vinutí transformátoru. Bez tohoto zdvojovače by bylo nutné použít standardní symetrický zdroj s transformátorem s odbočkou na vinutí. [13]

5.1 Výpočet zdroje

5.1.1 Výpočet sekundárního napětí transformátoru

Pro napájení koncových zesilovačů je zapotřebí napětí 10 – 22 V stejnosměrných. Podle vztahu pro výpočet efektivní hodnoty střídavého napětí:

$$U_{ef} = [U_m + (2 \cdot U_d)] / \sqrt{2} = [10 + (2 \cdot 1)] / \sqrt{2} = 8,5 \text{ V AC} \quad (1)$$

, kde U_d je úbytek napětí na jedné diodě můstku, který je podle typu diod 0,4 až 1 V. Protože proud protéká vždy dvěma diodami současně, násobí se úbytek napětí dvěma.

Bude tedy zapotřebí transformátoru o výstupním střídavém napětí 8,5 – 17 V.

Je zde ale také potřeba vzít v úvahu dostupnost toroidních transformátorů na trhu a jejich cenu. Nejběžnější a nejdostupnější hodnoty výstupního napětí transformátorů jsou 12 V, proto bude také tato hodnota použita.

Maximální hodnota stejnosměrného napětí tedy přibližně bude:

$$U_m = U_{ef} \cdot \sqrt{2} = 12 \cdot \sqrt{2} = 17 \text{ V} \quad (2)$$

5.1.2 Výkon transformátoru

Maximální výkon transformátoru je třeba zvýšit minimálně o výkonovou ztrátu na diodách oproti maximálnímu příkonu zařízení zapojeného na výstupu zdroje. Každý kanál zesilovače má maximální odběr 5 A. Výkonová ztráta na diodách se vypočte dle vztahu:

$$P_d = 2 \cdot U_d \cdot I_m = 2 \cdot 1 \cdot 10 = 20 \text{ W} \quad (3)$$

Z toho pak minimální výkon transformátoru je:

$$P = P_2 + P_d = P_2 + 2 \cdot U_d \cdot I_m = U_m \cdot I_m + 2 \cdot U_d \cdot I_m = 17 \cdot 10 + 2 \cdot 1 \cdot 10 = 190 \text{ VA} \quad (4)$$

, kde:

P_d je maximální výkonová ztráta na jedné diodě; $[P_d] = \text{W}$

P_2 je maximální příkon zařízení zapojeného na výstupu zdroje; $[P_2] = \text{W}$

P je výkon transformátoru; $[P] = \text{VA}$ [12]

Zvolený toroidní transformátor bude mít parametry 1x12 V / 200 VA. Tento je běžně dostupný například v GM electronics.

5.1.3 Filtrační kondenzátor

Z definice Faradu vyplývá:

$$C = (I_m \cdot t) / U_r \quad (5)$$

Dosadíme-li vzorec pro čas $t = 0,5 \cdot T$ a pro napětí $U_r = U_{\max} - U_x$:

$$C = (I_m \cdot 0,5 \cdot T) / (U_m - U_x) \quad (6)$$

Po dosazení vzorce pro frekvenci $f = 1 / T$ a jednoduché úpravě dostaneme výsledný vztah:

$$C = I_m / [2f \cdot (U_m - U_x)] = 10 / [2 \cdot 50 \cdot (17 - 13)] = 25 \text{ mF} \quad (7)$$

, kde:

U_m je maximální napětí na výstupu; $[U_r] = V$

U_x je minimální napětí na výstupu při maximální zátěži; $[U_r] = V$

U_r je rozdíl U_m a U_x ; $[U_r] = V$

I_m je maximální proud odebíraný ze zdroje; $[I_m] = A$

t je přibližný čas, po který se filtrační kondenzátor vybíjí; $[t] = s$

T je perioda; $[T] = s$

C je kapacita filtračního kondenzátor; $[C] = F$

f je frekvence střídavého napětí; $[f] = \text{Hz}$ (pro el. síť 50Hz) [12]

Bude použit elektrolytický kondenzátor z běžné řady s kapacitou 22 mF / 25 V a na desce ponecháno místo pro další kondenzátor pro případné zvětšení kapacity.

6 NÁVRH DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

Pro každou část zesilovače (napájecí zdroj, předzesilovač, koncové stupně) byla navržena samostatná deska plošného spoje. Je to výhodnější z hlediska měření jednotlivých modulů a případné diagnostiky chyb. Jednotlivé části budou následně v krabici propojeny kabely, v případě signálových cest stíněnými.

Pro předzesilovač a koncové zesilovače byla navržena oboustranná deska plošných spojů pro povrchovou montáž s SMD součástkami, pro napájecí zdroj pak jednostranná vrтанá deska pro standardní montáž součástek s drátovými vývody.

Jednotlivá schémata zapojení a vlastní motivy desek plošných spojů společně s rozmístěním součástek jsou uvedeny v příloze.

7 SESTAVENÍ A OŽIVENÍ ZESILOVAČE

Po postupném zapájení fastonů, rezistorů, kondenzátorů, diod, můstku, stabilizátorů a následné kontrole zapojení byl napájecí zdroj připojen na sekundární vinutí toroidního transformátoru, který byl přes síťový vypínač a pojistku zapojen do sítě 230 V. Po zapnutí vypínače se rozsvítila LED dioda indikující správnou činnost napájecího zdroje a byly proměřeny všechny hladiny napětí. Poté byla provedena zatěžovací zkouška výkonové větve zdroje pomocí ohmické zátěže až do hodnoty proudu 10 A. Napětí na výstupu zdroje pokleslo z maximálních 16,5 V na 13 V, což by se dalo zlepšit použitím dalšího filtračního kondenzátoru, pro který je na desce přichystané místo.

Pro předzesilovač byla také osazena deska plošného spoje postupně od fastonů přes SMD kondenzátory až po zapájení operačního zesilovače a 48-mi pinového pouzdra TSSOP vlastního obvodu MAX5406 precizní mikropáječkou za použití tekutého tavidla a tenkého 0,5 mm cínu. Pouzdro bylo nejprve třeba pečlivě umístit aby sedělo na všechny kontakty a poté v protilehlých rožcích přichytit cínem. Následně byly zapájeny jednotlivé vývody pouzdra pin po pinu. Poté bylo pájení zkontrolováno pod mikroskopem a proběhla kontrola celého zapojení. Dalším krokem bylo samotné oživení. Deska byla přes fastony propojena na zdroj a na obvod bylo přivedeno napájecí napětí +5 V. Odběr proudu ze zdroje byl v pořádku, v řádech mA. Po připojení signálu z generátoru na vstup předzesilovače a osciloskopu na výstup bylo ovšem zjištěno, že předzesilovač znatelně šumí a zkresluje tak výstupní signál, což je nežádoucí. Deska tedy byla překontrolována a kritické součástky přepájeny. Bohužel problém do odevzdání textové části této práce stále přetrvával.

Podobně byly osazeny desky koncových stupňů. Zde byla situace s pájením ještě složitější, protože obvody MAX9709 jsou v 56-pinovém pouzdře TQFN, které nemá klasické vývody, ale jen plošky zespod pouzdra. Bylo třeba precizně pocínovat desku plošného spoje a přesně umístit obvod. Následovalo pájení tak, aby se cín rozlil pod pouzdro obvodu a správně spojil jednotlivé vývody obvodu na desce plošného spoje. Poté proběhla kontrola pájení pod mikroskopem a pokus o oživení. Ten nebyl bohužel úspěšný a zesilovač osciloval. Proběhlo překontrolování zapojení a další zkoušení, ale problém se do odevzdání textové části bohužel nepovedlo odstranit. Funkce SHUTDOWN funguje dobře, odběr je v řádu desítek mA také v pořádku.

8 ZÁVĚR

V této práci bylo úkolem vybrat vhodné obvody pro realizaci nízkofrekvenčního zesilovače pracujícího ve třídě D a následně navrhnout obvodové zapojení celého zesilovače. Po prostudování nabídky výrobců integrovaných obvodů byl zvolen koncový zesilovač od firmy Maxim MAX9709, který dosahuje maximálního výkonu až 50 W, který díky jeho vysoké účinnosti není nutné doplnit přídatným chladičem a za určitých podmínek není nutné na jeho výstup připojit výstupní LC filtr typu dolní propust. Tento koncový zesilovač byl poté doplněn obvodem korekčního předzesilovače s tlačítkovým rozhraním od stejného výrobce MAX5406.

Pro oba obvody bylo vytvořeno obvodové zapojení a následně i navrhnutý desky plošných spojů pomocí programu Eagle. Každá část zesilovače, tedy korekční předzesilovač a koncový zesilovač, jsou na samostatné oboustranné desce plošných spojů kvůli snadnější případné diagnostice možných závad. Koncový zesilovač je zapojen v můstkovém zapojení kvůli dosažení maximálního výkonu a pro každý kanál je tedy použito jednoho obvodu. Dále byla navržena jednostranná deska plošného spoje napájecího zdroje včetně výpočtu a výběru vhodného toroidního transformátoru a navrženo mechanické uspořádání jednotlivých částí zesilovače pro zabudování do přístrojové skříně.

Následovala výroba desek plošných spojů a jejich postupné osazení součástkami. V případě koncového stupně a předzesilovače se jednalo o povrchovou montáž, napájecí zdroj byl proveden standardní montáží s vrtnou deskou. Napájecí zdroj byl oživen a ověřena jeho správná funkce včetně zatěžovací zkoušky. Při ožívování předzesilovače se ovšem vyskytl problém s větším šumem obvodu, který může být způsoben přílišnou vzdáleností některého blokovacího kondenzátoru od integrovaného obvodu či nesprávným propojením zemí. Zřejmě bude třeba pozměnit návrh desky plošného spoje.

U koncového zesilovače bohužel nemohla být ověřena správná funkce a změřeny výkonnostní parametry protože se při ožívování objevily oscilace. Ty mohou být do jisté míry způsobeny ne zcela správným dodržáním vysokofrekvenčního návrhu desky plošného spoje. Přeci jen modulátor pracuje s frekvencí několika set kHz. Spíše bude ale problém ve správném oddělení a následném spojení pouze v jednom bodě analogové a digitální země. Mohlo by se také jednat o nedokonale zapájené „bezvývodové“ pouzdro TQFN, které je v domácích podmínkách poměrně obtížné správně zapájet a ověřit přesné propojení jednotlivých pinů.

Do odevzdání této textové části práce se i přes usilovnou práci na prototypu přesná příčina bohužel nepodařila odstranit a proto je předmětem dalšího zkoumání.

Po odstranění uvedených problémů by bylo vhodné ještě navrhnout výstupní LC filtr a ověřit vlastnosti zesilovače s připojeným filtrem a bez něj.

LITERATURA

- [1] ŠTÁL, P. *Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D - základní principy a konstrukce*. Praha: BEN - technická literatura, 2008.
- [2] Elweb [online]. *Audio zesilovače pracující ve třídě D*. Olejář Martin, 2009 - [cit. 12. 12. 2009]. Dostupné na www: <http://www.elweb.cz/clanky.php?clanek=109>
- [3] KRATOCHVÍL, T. *Princip koncového zesilovače s PWM modulací*. BNFE Laboratorní úloha č. 5. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.
- [4] BELLOŇ, M. [online]. *Konstrukce audio zesilovače s pulzně šířkovou modulací*. Belloň Michal, 2008 - [cit. 12. 12. 2009]. Dostupné na www: <http://www.kutil.borec.cz/classdamp.pdf>
- [5] ARVAI, L. *Nízkofrekvenční zesilovač ve třídě D s PWM modulací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009.
- [6] Maxim Integrated Products [online]. *Datasheet MAX5406 - Audio Processor with Pushbutton Interface*. Maxim, Inc., 2006 - [cit. 12. 12. 2009]. Dostupné na www: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX5406.pdf>
- [7] Maxim Integrated Products [online]. *Datasheet MAX9709 - 25W/50W, Filterless, Spread-Spectrum, Stereo/Mono, Class D Amplifier*. Maxim, Inc., 2008 - [cit. 12. 12. 2009]. Dostupné na www: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX9709.pdf>
- [8] Maxim Integrated Products [online]. *Evaluation Kit for the MAX9709*. Maxim, Inc., 2008 - [cit. 12. 12. 2009]. Dostupné na www: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAX9709EVKIT.pdf>
- [9] Elektronika, Zdeněk Krčmář [on-line]. *Sortiment nabídky EZK*. [cit. 12. 12. 2009]. Dostupné na www: <http://www.ezk.cz>
- [10] GES Electronics [on-line]. *Sortiment nabídky GES Electronics*. [cit. 12. 12. 2009]. Dostupné na www: <http://www.ges.cz>
- [11] GM Electronic [on-line]. *Sortiment nabídky GM Electronic*. [cit. 12. 12. 2009]. Dostupné na www: <http://www.gme.cz>
- [12] HW.cz [on-line]. *Návrh stejnosměrného zdroje napětí*. Olejář Martin, [cit. 10. 5. 2010]. Dostupné na www: <http://hw.cz/Produkty/Obecne-produkty/ART1091-Navrh-stejnosmerneho-zdroje-napeti.html>
- [13] TZBinfo [on-line]. *Zdroje napětí (II)*. Ing. Jiří Vlček, [cit. 10. 5. 2010]. Dostupné na www: <http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4239&h=292&pl=42>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

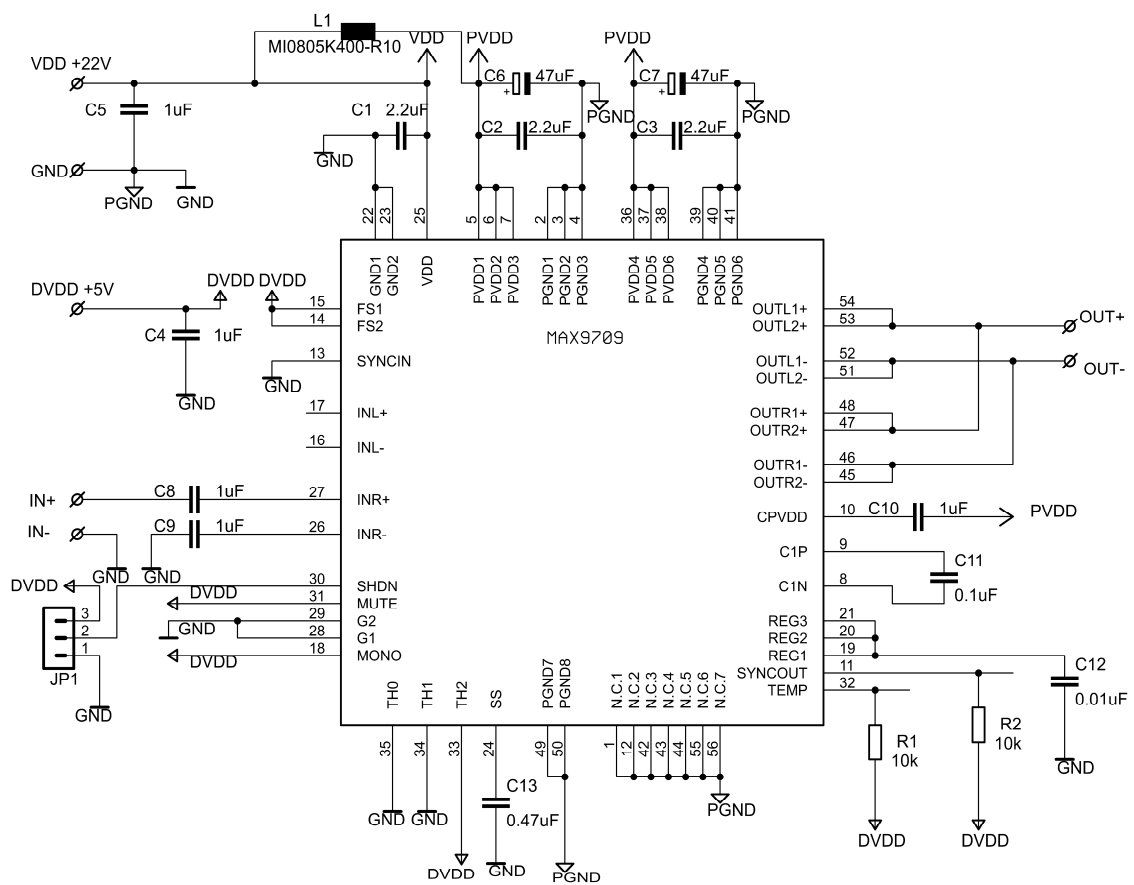
PWM	pulsně šířková modulace
SNR	poměr signál – šum; [SNR] = dB
THD+N	harmonické zkreslení + šum; [THD+N] = %
P_d	maximální výkonová ztráta na jedné diodě; [P_d] = W
P_2	maximální příkon zařízení zapojeného na výstupu zdroje); [P_2] = W
P	výkon transformátoru; [P] = VA
U_m	maximální napětí na výstupu; [U_m] = V
U_x	minimální napětí na výstupu při maximální zátěži; [U_x] = V
U_r	rozdíl U_m a U_x ; [U_r] = V
I_m	maximální proud odebíraný ze zdroje; [I_m] = A
t	přibližný čas, po který se filtrační kondenzátor vybíjí; [t] = s
T	perioda; [T] = s
C	kapacita filtračního kondenzátor; [C] = F
f	frekvence střídavého napětí; [f] = Hz (pro el. síť 50Hz)

SEZNAM PŘÍLOH

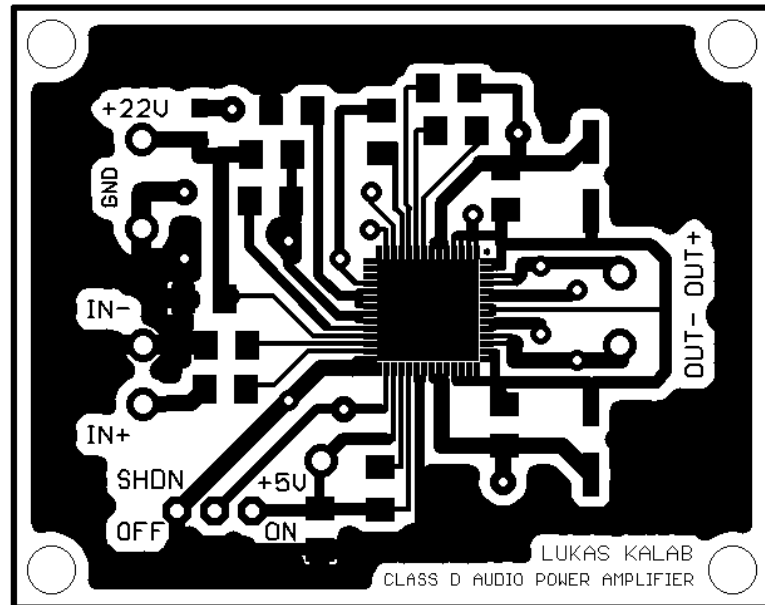
A	Návrh zařízení	19
A.1	Obvodové zapojení – koncový zesilovač MAX9709 (1 kanál).....	19
A.2	Deska plošného spoje koncového zesilovače (strana součástek).....	20
A.3	Deska plošného spoje koncového zesilovače (strana spojů)	20
A.4	Rozmístění součástek na desce koncového zesilovače.....	21
A.5	Obvodové zapojení – korekční předzesilovač MAX5406.....	22
A.6	Deska plošného spoje korekčního předzesilovače (strana součástek).....	23
A.7	Deska plošného spoje korekčního předzesilovače (strana spojů).....	24
A.8	Rozmístění součástek na desce předzesilovače	25
A.9	Obvodové zapojení – napájecí zdroj.....	25
A.10	Deska plošného spoje napájecího zdroje (strana spojů)	26
A.11	Rozmístění součástek na desce napájecího zdroje.....	26
B	Seznam součástek	27
B.1	Koncový zesilovač.....	27
B.2	Korekční předzesilovač.....	28
B.3	Napájecí zdroj	29
C	Mechanické uspořádání	30
D	Fotografie přístroje	31
E	Osciloskopická měření	32
E.1	Koncový zesilovač.....	32
E.2	Korekční předzesilovač.....	33

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Obvodové zapojení – koncový zesilovač MAX9709 (1 kanál)

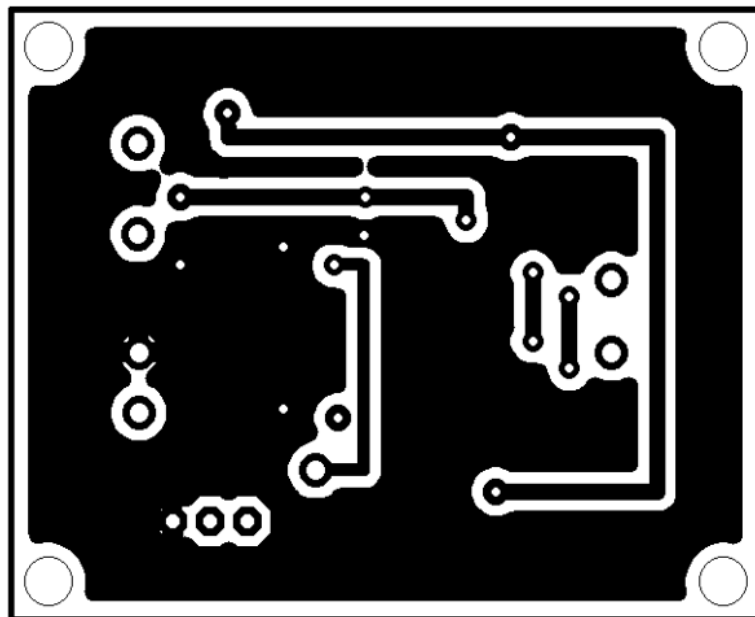


A.2 Deska plošného spoje koncového zesilovače (strana součástek)



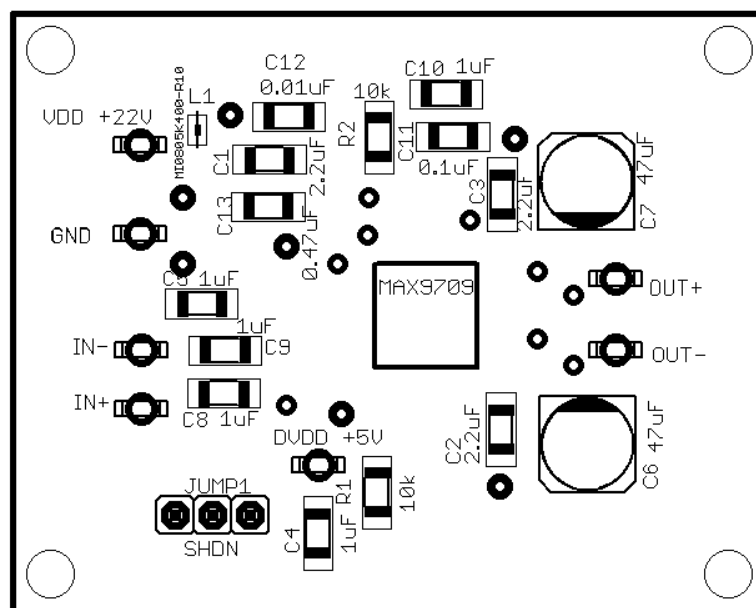
Rozměr desky 50 x 40 [mm], měřítko M 2:1

A.3 Deska plošného spoje koncového zesilovače (strana spojů)



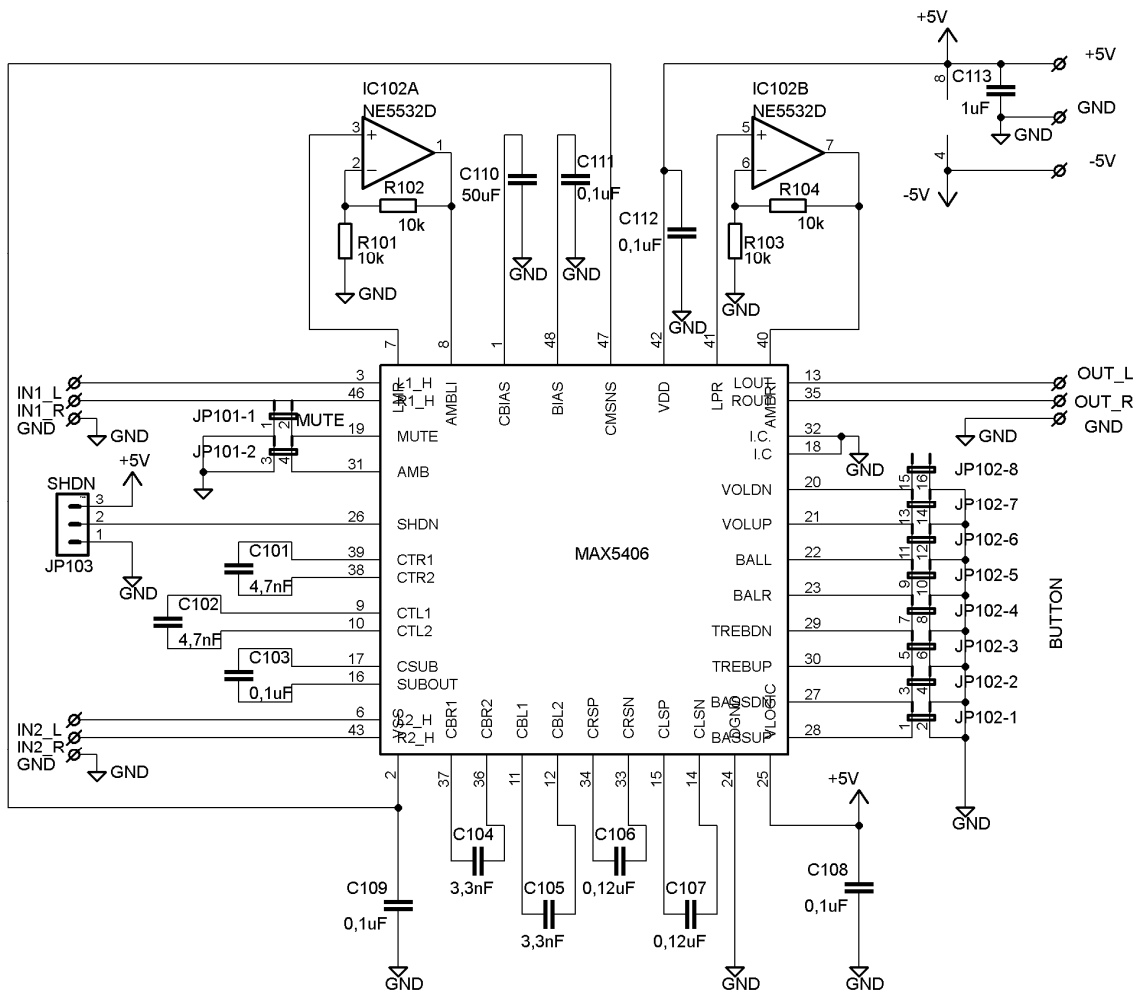
Rozměr desky 50 x 40 [mm], měřítko M 2:1

A.4 Rozmístění součástek na desce koncového zesilovače

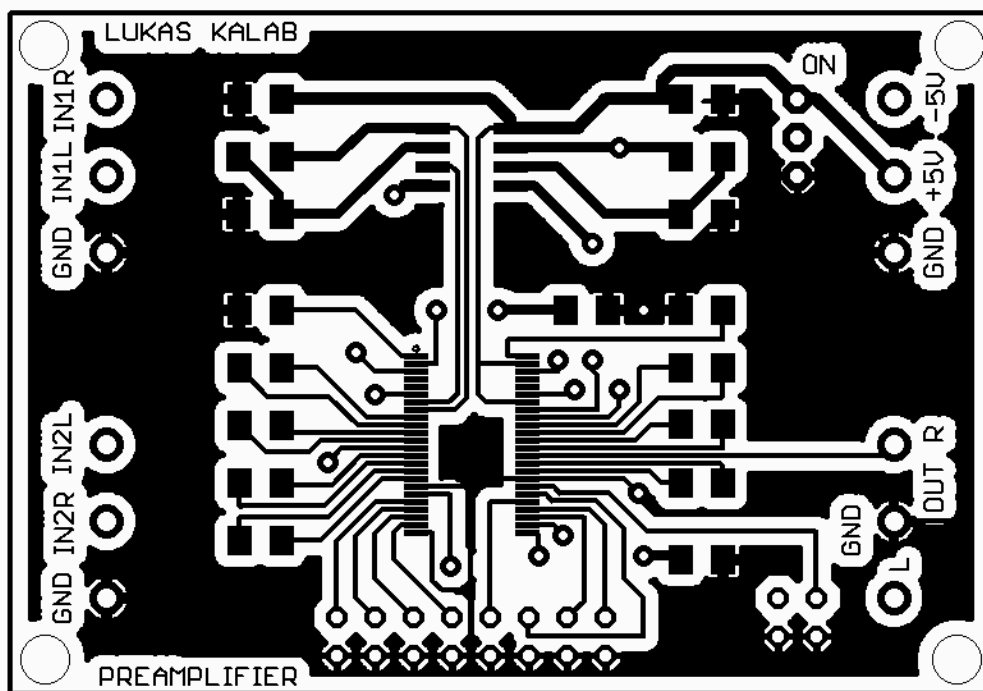


Rozměr desky 50 x 40 [mm], měřítko M 2:1

A.5 Obvodové zapojení – korekční předzesilovač MAX5406

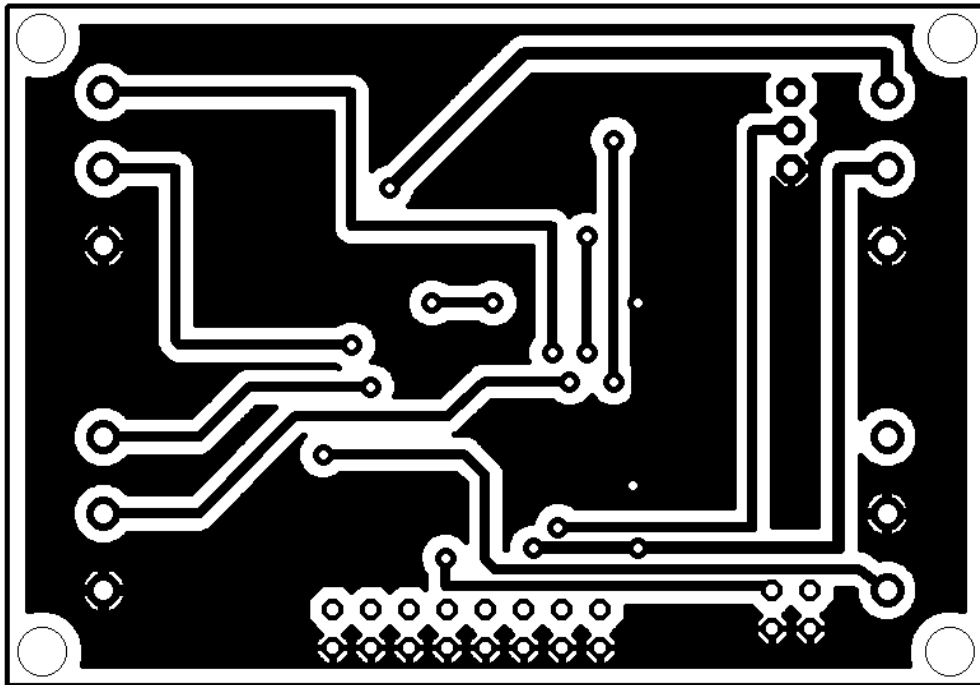


A.6 Deska plošného spoje korekčního předzesilovače (strana součástek)



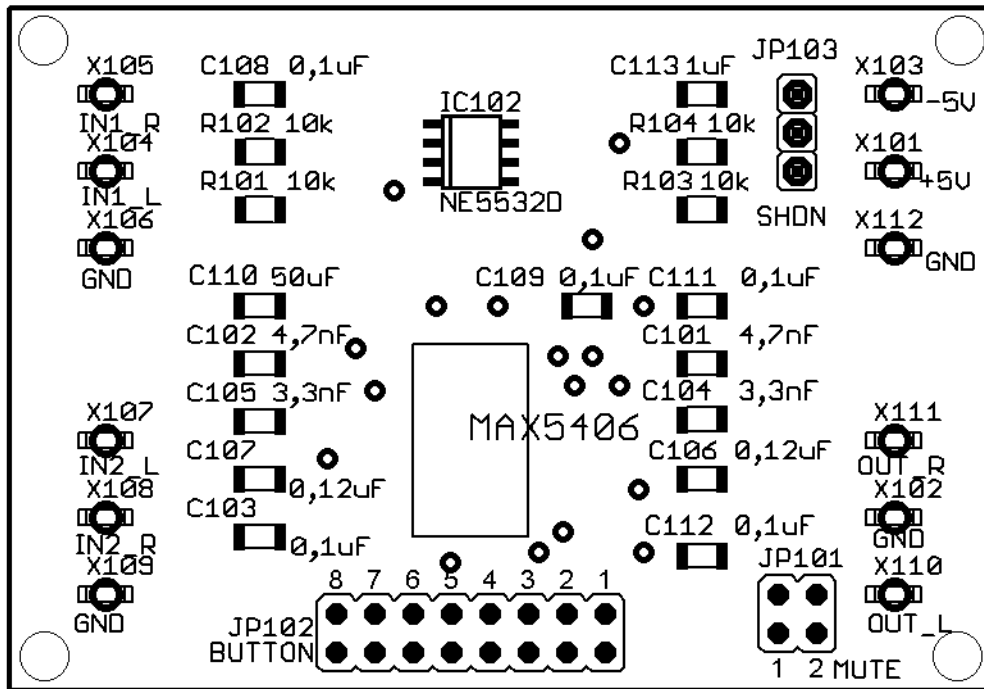
Rozměr desky 65 x 45 [mm], měřítko M 2:1

A.7 Deska plošného spoje korekčního předzesilovače (strana spojů)



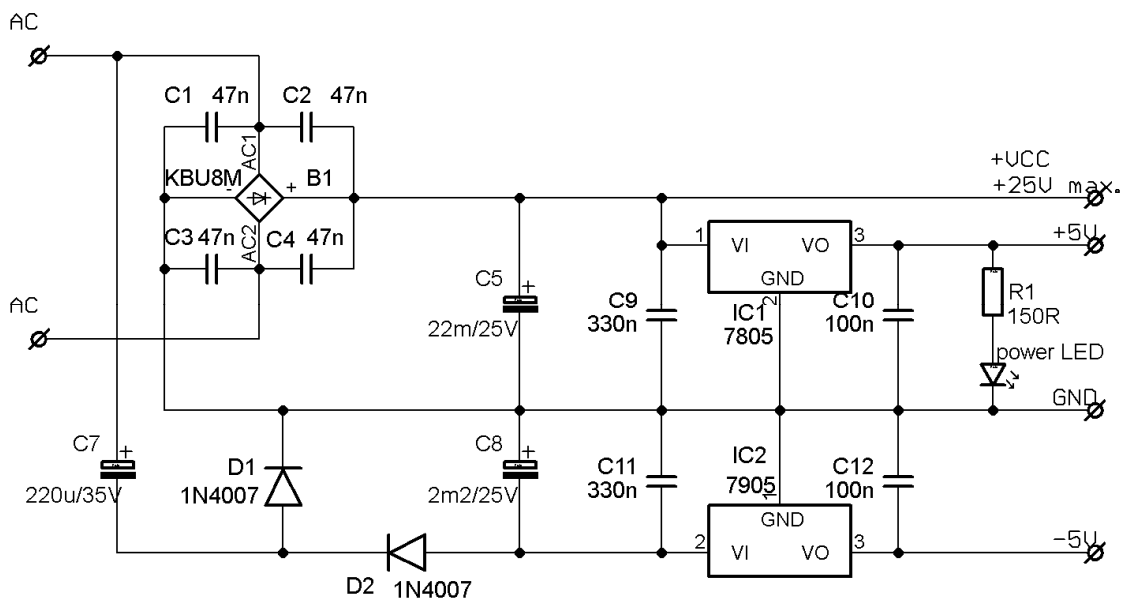
Rozměr desky 65 x 45 [mm], měřítko M 2:1

A.8 Rozmístění součástek na desce předzesilovače

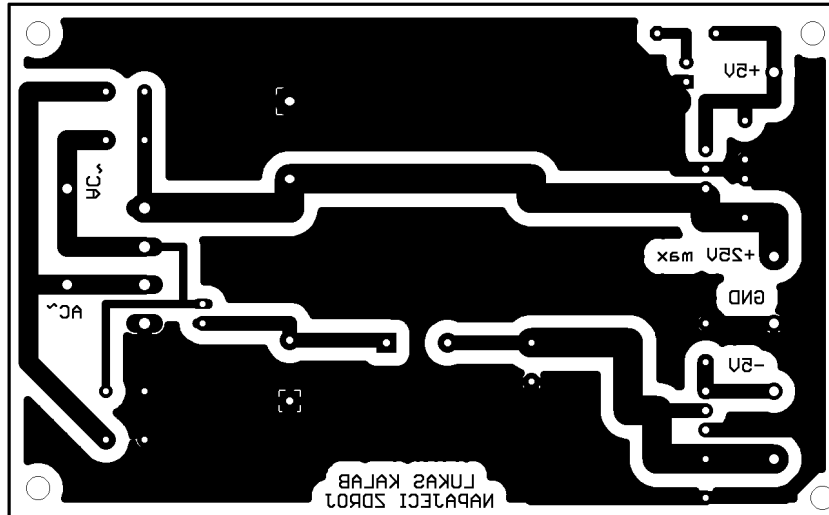


Rozměr desky 65 x 45 [mm], měřítko M 2:1

A.9 Obvodové zapojení – napájecí zdroj

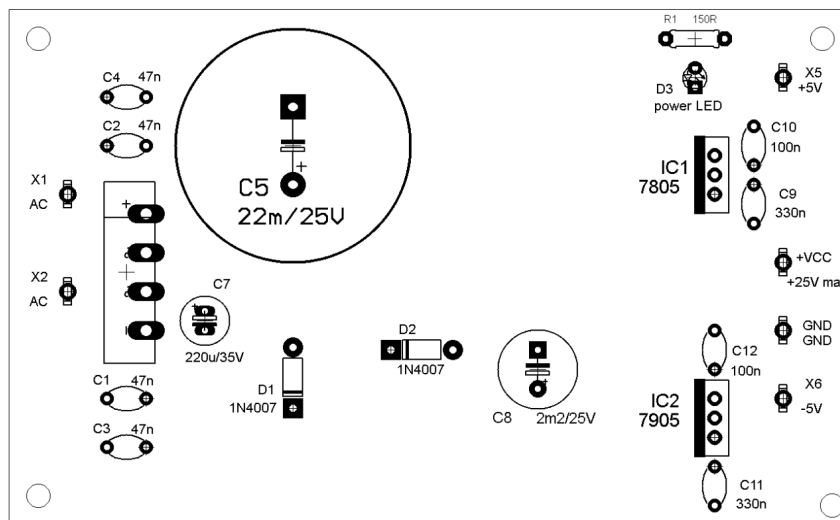


A.10 Deska plošného spoje napájecího zdroje (strana spojů)



Rozměr desky 110 x 67 [mm], měřítko M 1:1

A.11 Rozmístění součástek na desce napájecího zdroje



Rozměr desky 110 x 67 [mm], měřítko M 1:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Koncový zesilovač

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	2.2uF	C1206	Keramický kondenzátor
C2	2.2uF	C1206	Keramický kondenzátor
C3	2.2uF	C1206	Keramický kondenzátor
C4	1uF	C1206	Keramický kondenzátor
C5	1uF	C1206	Keramický kondenzátor
C6	47uF	UD-6,3x5,8	Elektrolytický kondenzátor
C7	47uF	UD-6,3x5,8	Elektrolytický kondenzátor
C8	1uF	C1206	Keramický kondenzátor
C9	1uF	C1206	Keramický kondenzátor
C10	1uF	C1206	Keramický kondenzátor
C11	0.1uF	C1206	Keramický kondenzátor
C12	0.1uF	C1206	Keramický kondenzátor
C13	0.1uF	C1206	Keramický kondenzátor
IC1	MAX9709	TQFN	Koncový zesilovač
JP1	SHDN	S1G3_JUMP	Jumper 1x3
L1	MI0805K400-R10	L0805	Tlumivka
R1	10k	R1206	Drátový rezistor
R2	10k	R1206	Drátový rezistor
X1	VDD +22V	ST2,8	Faston 2,8
X2	GND	ST2,8	Faston 2,8
X3	DVDD +5V	ST2,8	Faston 2,8
X4	IN+	ST2,8	Faston 2,8
X5	IN-	ST2,8	Faston 2,8
X6	OUT+	ST2,8	Faston 2,8
X7	OUT-	ST2,8	Faston 2,8
X8	GND	ST2,8	Faston 2,8

B.2 Korekční předzesilovač

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C101	4,7nF	C1206	Keramický kondenzátor
C102	4,7nF	C1206	Keramický kondenzátor
C103	0,1uF	C1206	Keramický kondenzátor
C104	3,3nF	C1206	Keramický kondenzátor
C105	3,3nF	C1206	Keramický kondenzátor
C106	0,12uF	C1206	Keramický kondenzátor
C107	0,12uF	C1206	Keramický kondenzátor
C108	0,1uF	C1206	Keramický kondenzátor
C109	0,1uF	C1206	Keramický kondenzátor
C110	50uF	C1206	Tantalový kondenzátor
C111	0,1uF	C1206	Keramický kondenzátor
C112	0,1uF	C1206	Keramický kondenzátor
C113	1uF	C1206	Keramický kondenzátor
IC101	MAX5406	TSSOP	Korekční předzesilovač
IC102	NE5532D	SO08	OZ 2x
JP101	MUTE	S1G2_JUMP	Jumper 1x2
JP102	BUTTON	S2G8_JUMP	Jumper 2x8
JP103	SHDN	S1G3_JUMP	Jumper 1x3
R101	10k	R1206	Drátový rezistor
R102	10k	R1206	Drátový rezistor
R103	10k	R1206	Drátový rezistor
R104	10k	R1206	Drátový rezistor
X101	+5V	ST2,8	Faston 2,8
X102	GND	ST2,8	Faston 2,8
X103	-5V	ST2,8	Faston 2,8
X104	IN1_L	ST2,8	Faston 2,8
X105	IN1_R	ST2,8	Faston 2,8
X106	GND	ST2,8	Faston 2,8
X107	IN2_L	ST2,8	Faston 2,8
X108	IN2_R	ST2,8	Faston 2,8
X109	GND	ST2,8	Faston 2,8
X110	OUT_L	ST2,8	Faston 2,8
X111	OUT_R	ST2,8	Faston 2,8
X112	GND	ST2,8	Faston 2,8

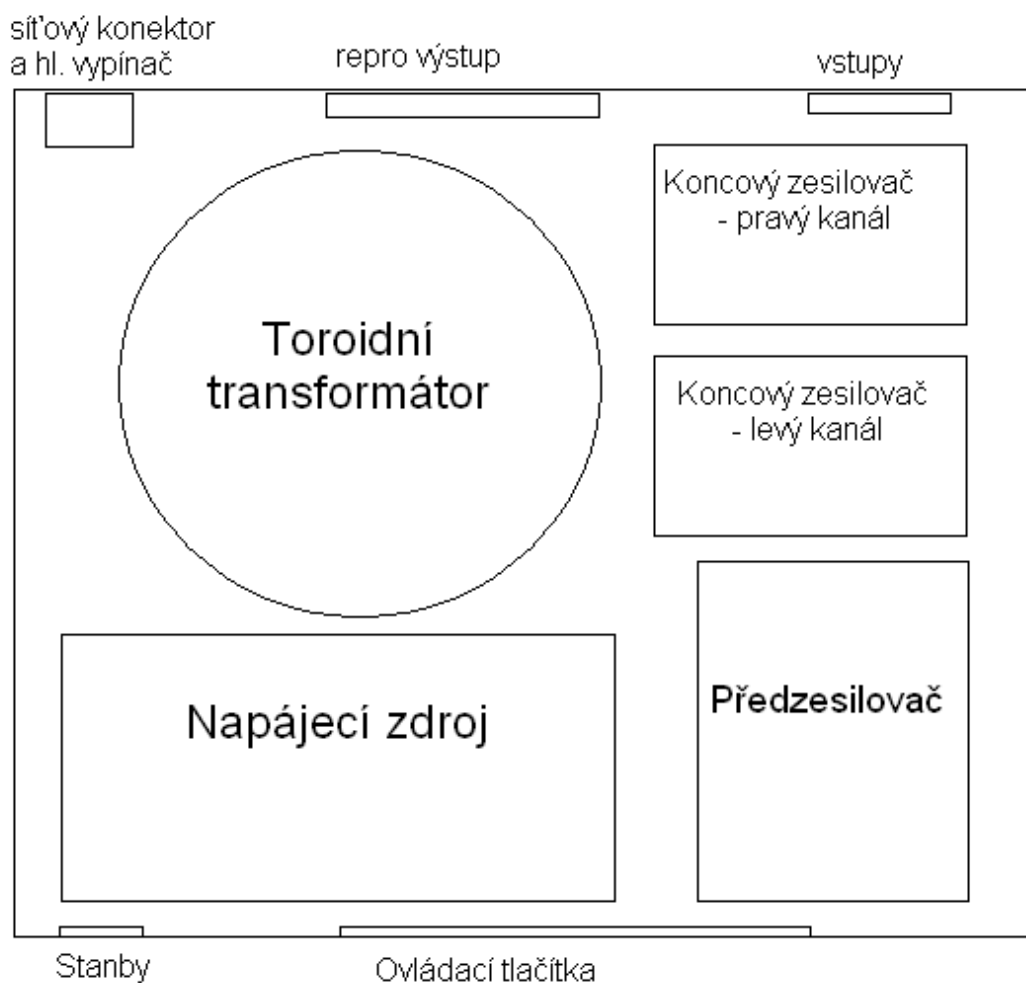
B.3 Napájecí zdroj

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
B1	KBU8M	KBU	Usměrňovací můstek
C201	47n	CK	Keramický kondenzátor
C202	47n	CK	Keramický kondenzátor
C203	47n	CK	Keramický kondenzátor
C204	47n	CK	Keramický kondenzátor
C205	22m/25V	C-EL_10+	Elektrolytický kondenzátor
C207	220u/35V	C-EL_2,5	Elektrolytický kondenzátor
C208	2m2/25V	C-EL_5	Elektrolytický kondenzátor
C209	330n	CK	Keramický kondenzátor
C210	100n	CK	Keramický kondenzátor
C211	330n	CK	Keramický kondenzátor
C212	100n	CK	Keramický kondenzátor
D201	1N4007	DO41	Dioda
D202	1N4007	DO41	Dioda
D203	LED	5 mm	LED dioda
IC201	7805	TO-220S	Stabilizátor +5V
IC202	7905	TO-220S	Stabilizátor -5V
R201	150R	R_7,5	Drátový rezistor
X201	AC	LS1315	Faston 2,8
X202	AC	LS1315	Faston 2,8
X203	GND	LS1315	Faston 2,8
X204	+25V max.	LS1315	Faston 2,8
X205	+5V	LS1315	Faston 2,8
X206	-5V	LS1315	Faston 2,8

C MECHANICKÉ USPOŘÁDÁNÍ

Využito plastové přístrojové krabičky KP 12 z nabídky firmy GES electronics.

Rozměry krabičky: 188 x 197 x 70 mm.



Pohled shora

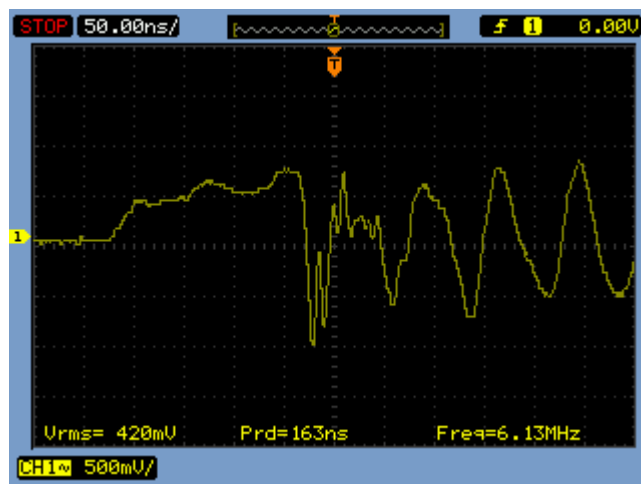
D FOTOGRAFIE PŘÍSTROJE



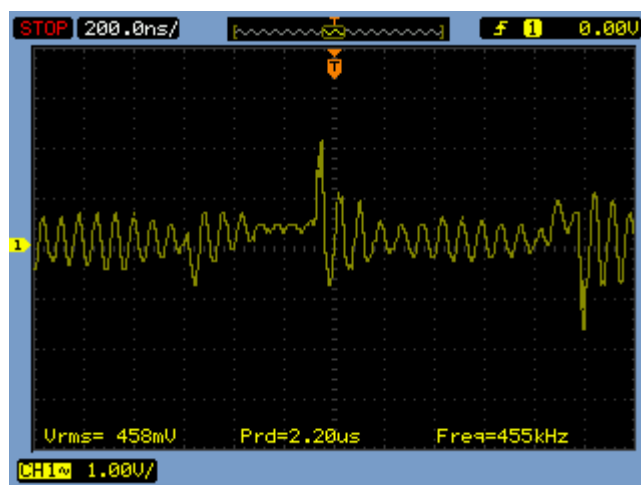
E OSCILOSKOPICKÁ MĚŘENÍ

E.1 Koncový zesilovač

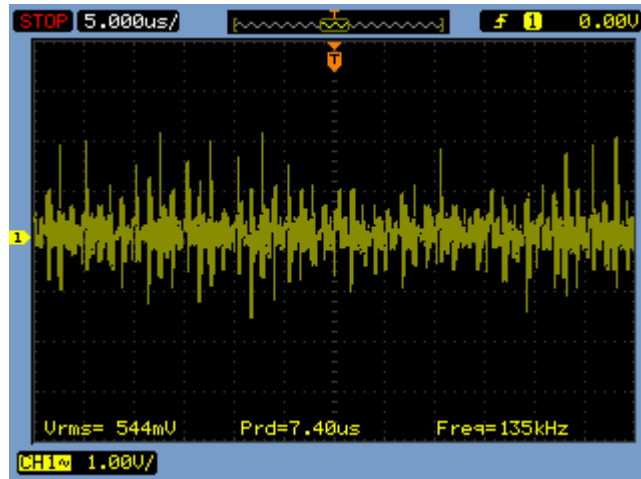
Průběh napětí na výstupu koncového zesilovače při čas. základně 50 ns
(vstupní signál $f = 1 \text{ kHz}$, $U = 200 \text{ mV}$)



Průběh napětí na výstupu koncového zesilovače při čas. základně 200 ns
(vstupní signál $f = 1 \text{ kHz}$, $U = 200 \text{ mV}$)



Průběh napětí na výstupu koncového zesilovače při čas. základně 5 μ s
(vstupní signál $f = 1$ kHz, $U = 200$ mV)



E.2 Korekční předzesilovač

Průběh napětí na výstupu předzesilovače při čas. základně 200 μ s
(vstupní signál $f = 1$ kHz, $U = 50$ mV)

