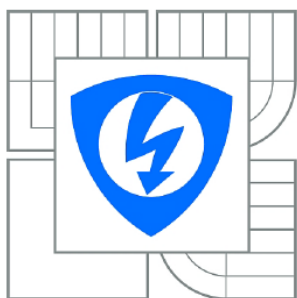




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

STEREOFONNÍ AUDIO VÝKONOVÝ ZESILOVAČ VE TŘÍDĚ D

CLASS D STEREO AUDIO POWER AMPLIFIER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

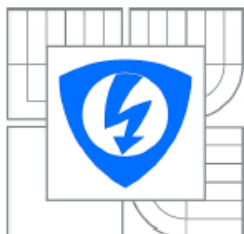
KAMIL KAZELLE

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. LUBOMÍR BRANČÍK, CSc.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Kamil Kazelle

ID: 106531

Ročník: 3

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Stereofonní audio výkonový zesilovač ve třídě D

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte návrh stereofonního audio výkonového zesilovače ve třídě D, včetně návrhu předzesilovače, s možností ovládání hlasitosti, balance a korekce kmitočtové charakteristiky. K zesilovači navrhnete napájecí jednotku spínané koncepce. Vlastnosti navržených zapojení ověřte simulacemi v programu PSpice.

Na základě předchozích prací proveďte návrhy desek plošných spojů v programu Eagle. Provedte kompletní konstrukci stereofonního audio výkonového zesilovače třídy D předepsaných vlastností, včetně předzesilovače a napájecí jednotky. Zapojení oživte, proměřte jeho základní parametry a srovnajte s parametry obdržnými počítačovou simulací.

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: 7.2.2011

Termín odevzdání: 27.5.2011

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

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

Obsahem práce je návrh a realizace stereofonního audio výkonového zesilovače ve třídě D o výstupním výkonu 2x20W. Práce zahrnuje i návrh a realizaci předzesilovač a napájecí jednotku. Samotná práce je pak rozdělena do čtyř bloků. V prvním bloku je shrnuta teorie problematiky zesilovačů ve třídě D, v druhém jsou pak rozebrány navržené obvody, v třetím bloku jsou prezentovány výsledky simulací v programu PSpice a v posledním čtvrtém bloku je popsána realizace obvodů a prezentace naměřených hodnot.

KLÍČOVÁ SLOVA

audio zesilovač, třída D, tónová korekce, PWM signál

ABSTRACT

The content of this project is design of stereo audio amplifier working in class D with output power 2x20W. Project includes also a design of preamplifier and power supply. This project is divided into the four parts. In first part the theory and problems of amplifiers working in class D is resumed, in the second the designed circuits are discussed, in the third the results of simulations in the program PSpice are presented and the last part of project describes the realization and presents the results of measurements.

KEYWORDS

audio amplifier, class D, tone control, PWM signal

KAZELLE, K. *Stereofonní audio výkonový zesilovač ve třídě D*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 39 s., 14 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. ing. Lubomír Brančík, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Stereofonní audio 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(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	x
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
1 Zesilovač ve třídě D - Teorie	2
1.1 Třída D v kontextu ostatních tříd	2
1.2 Struktura zesilovače ve třídě D	2
1.3 Blok modulátoru	3
1.3.1 Impulsně šířkový modulátor	3
1.3.2 Sigma-delta modulátor	4
1.4 Výkonový stupeň	4
1.5 Blok výstupního filtru	5
2 Návrh zesilovače, předzesilovače a napájení	6
2.1 Předzesilovač	6
2.1.1 Provedení z diskretních prvků	6
2.1.2 LM 1036	7
2.2 Zesilovač ve třídě D	9
2.2.1 TDA 7490L	9
2.3 Napájecí zdroj spínané koncepce	11
2.3.1 Síťový transformátor	11
2.3.2 Obvod TL 494 a usměrnění napětí	11
2.3.3 Návrh kladné větve napájení s obvodem TL494	12
2.3.4 Návrh záporné větve napájení s obvodem TL494	15
3 Simulace	17
3.1 Předzesilovač	17
3.2 Výstupní filtr zesilovače	20
4 Realizace zařízení a výsledky měření	22
4.1 Předzesilovač LM1036	22
4.1.1 Realizace LM1036	22

4.1.2	Měření LM1036.....	23
4.2	Napájení s obvodem TL494.....	27
4.2.1	Realizace.....	27
4.2.2	Měření.....	29
4.3	TDA7490L.....	32
4.3.1	Realizace.....	32
4.3.2	Měření TDA7490L.....	34
5	Závěr	39
	Literatura	40
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	41
	Seznam příloh	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Blokové schéma zesilovače ve třídě D.	2
Obr. 1.2:	PWM modulovaný signál V_o , vstupní audiosignál V_i a trojúhelníkový signál V_t (převzato z [9]).	3
Obr. 1.3:	Impulsně šířkový modulátor.	3
Obr. 1.4:	Blokové schéma sigma-delta modulátoru.	4
Obr. 2.1:	Schéma zapojení jednoho kanálu předzesilovače v diskrétním provedení. ...	6
Obr. 2.2:	Doporučené zapojení předzesilovače LM 1036.	8
Obr. 2.3:	Doporučené zapojení integrovaného obvodu TDA7490L s naznačenou vnitřní strukturou (převzato z [11]).	10
Obr. 2.4:	Zapojení Graetzova můstku a vyhlazovacích kondenzátorů.	12
Obr. 2.5:	Doporučené zapojení obvodu TL 494(převzato z [12]).	13
Obr. 2.6:	Zapojení záporné větve napájení s obvodem TL494.	15
Obr. 3.1:	Charakteristiky udávající maximální potlačení (zvýraznění) hloubek při současném zvýraznění (potlačení) výšek pro předzesilovač LM 1036 (převzato z [3]).	17
Obr. 3.2:	Charakteristika maximálního potlačení hloubek a maximálního zvýraznění výšek pro předzesilovač z diskrétních součástek.	18
Obr. 3.3:	Charakteristika maximálního zvýraznění hloubek a maximálního potlačení výšek pro předzesilovač z diskrétních součástek.	18
Obr. 3.4:	Charakteristika udávající maximální potlačení (zvýraznění) hloubek při současném potlačení (zvýraznění) výšek pro předzesilovač LM 1036(převzato z [3]).	19
Obr. 3.5:	Charakteristika maximálního potlačení hloubek a maximálního potlačení výšek pro předzesilovač z diskrétních součástek.	19
Obr. 3.6:	Charakteristika maximálního zvýraznění hloubek a maximálního zvýraznění výšek pro předzesilovač z diskrétních součástek.	20
Obr. 3.7:	Přenosová charakteristika výstupního filtru zesilovače TDA 7490L.	20
Obr. 4.1:	Osazovací plán desek plošných spojů pro LM1036.	22
Obr. 4.2:	Předloha desky plošného spoje pro LM1036(1:1).	23
Obr. 4.3:	Závislost napět'ového přenosu na frekvenci pro různá nastavení korekce hloubek a výšek.	24
Obr. 4.4:	Závislost napět'ového přenosu na frekvenci pro různá nastavení korekce hloubek a výšek.	25

Obr. 4.5:	Závislost napěťového přenosu na řídicím napětí na pinu 12.	26
Obr. 4.6:	Závislost napěťového přenosu na řídicím napětí na pinu 9.	26
Obr. 4.7:	Závislosti udávané výrobcem.	27
Obr. 4.8:	Předloha desky plošného spoje pro první desku napájení(1:1).	27
Obr. 4.9:	Osazovací plán pro první desku plošného spoje napájecího zdroje(1:1).	28
Obr. 4.10:	Předloha desky plošných spojů pro DC/DC měniče s TL494.	28
Obr. 4.11:	Osazovací plán desky plošných spojů pro DC/DC měniče s TL494.	29
Obr. 4.12:	Závislost výstupního napětí a účinnosti snižujícího měniče na velikosti zátěže.	30
Obr. 4.13:	Závislost výstupního napětí a účinnosti invertujícího měniče na velikosti zátěže.	31
Obr. 4.14:	Předloha desky plošného spoje pro obvod TDA7490L(vrchní strana).	32
Obr. 4.15:	Předloha desky plošného spoje pro obvod TDA7490L(spodní strana).	33
Obr. 4.16:	Osazovací plán pro plošný spoj obvodu TDA7490L.	33
Obr. 4.17:	Závislost přenosu napětí na frekvenci vstupního signálu.	35
Obr. 4.18:	Závislost harmonického zkreslení s šumem na výstupním výkonu zesilovače.	36
Obr. 4.19:	Závislosti udávané výrobcem.	37
Obr. 4.20:	Závislost výstupního výkonu na velikosti napájecího napětí.	38

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1:	Základní parametry pro integrovaný obvod LM 1036 [3].	7
Tab. 2.2:	Tabulka nabídky firmy STMicroelectronic pěti nejvýkonnějších zesilovačů.	9
Tab. 2.3:	Parametry integrovaného zesilovače TDA 7490L [11].	9
Tab. 2.4:	Základní parametry obvodu TL 494 [13].	12
Tab. 4.1:	Tabulka naměřených a vypočtených hodnot.	23
Tab. 4.2:	Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (ověření funkcí volume a balance)	25
Tab. 4.3:	Hodnoty naměřené pro snižující měnič.	30
Tab. 4.4:	Vypočtené hodnoty účinnosti snižujícího měniče.	30
Tab. 4.5:	Hodnoty naměřené pro invertující měnič.	31
Tab. 4.6:	Vypočtené hodnoty účinnosti invertujícího měniče.	31
Tab. 4.7:	Tabulka naměřených a vypočtených hodnot.	34
Tab. 4.8:	Naměřené a vypočtené hodnoty	35
Tab. 4.9:	Naměřených a vypočtených hodnot.	37

ÚVOD

Cílem této práce je navrhnout a realizovat stereofonní zesilovač ve třídě D pro domácí poslech o výstupním výkonu 2x20W pro zátěž o impedanci 8Ω . Zároveň zvolit vhodný předzesilovač, který by odpovídal požadavkům zadání a realizovat zdroj spínané koncepce, aby bylo dosaženo dobré účinnosti.

Pro realizaci zesilovače byl zvolen integrovaný obvod TDA7490L od firmy STMicroelectronics ve standardním zapojení, pro blok předzesilovače budou uvažovány dvě varianty jedna s integrovaným obvodem LM1036 od firmy National Semiconductors ve standardním zapojení a druhá s jednoduchým předzesilovačem z diskretních součástek, pro napájecí zdroj spínané koncepce byl zvolen integrovaný obvod TL494 od firmy Texas Instrument.

V první kapitole této práce je rozebrán princip činnosti zesilovačů ve třídě D, jejich základní bloky a požadavky, v druhé kapitole pak jsou popsány jednotlivé bloky navrženého zesilovače popřípadě postup návrhu či modifikací, v třetí kapitole jsou uvedeny výsledky simulací v programu PSpice, které bylo možné odsimulovat s ohledem na dostupnost potřebných modelů v poslední čtvrté části je popsána realizace desek plošných spojů pro jednotlivé obvody a jejich osazovací plány, dále jsou zde prezentovány výsledky měření základních parametrů obvodů a jejich porovnání s parametry udávanými výrobcí.

1 ZESILOVAČ VE TŘÍDĚ D - TEORIE

V následující kapitole bude nastíněna teorie zesilovačů ve třídě D, porovnání s ostatními třídami, jednotlivé klíčové bloky.

1.1 Třída D v kontextu ostatních tříd

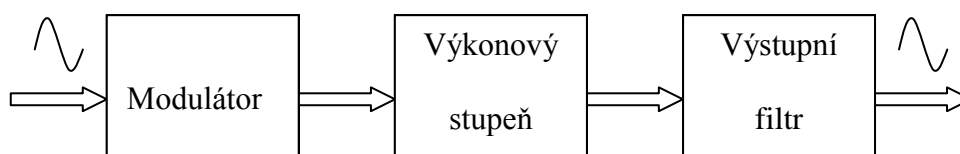
Mezi třídy zesilovačů používaných pro nízkofrekvenční aplikace můžeme zařadit zejména třídy A, B, AB, D a T.

Zesilovače ve třídě A mají sice dosti malé harmonické zkreslení, ale mají malou účinnost, která může teoreticky dosáhnout 50%. Naopak třída B má značné zkreslení, ale teoreticky dosažitelná úroveň účinnosti je až 78,5%. Problém třídy B je vyřešen třídou AB, která má stejnou teoreticky dosažitelnou účinnost a má nízké zkreslení.

Hlavní výhodou zesilovačů ve třídě D oproti již zmiňovaným třídám je tedy prakticky dosažitelná vysoká účinnost, která může snadno přesáhnout 90%. Takto vysoké účinnosti je možno dosáhnout díky převedení vstupního audio signálu na PWM modulovaný signál a tím pádem používat koncový stupeň ne v aktivní ale v saturované oblasti. Mezi výhody této třídy samozřejmě patří dobré hodnoty audio parametrů (ovšem harmonické zkreslení má nižší třída A a AB), poměrně nízká cena a výhodné využití u komerčních systémů (mp3 přehrávače, mobily).

1.2 Struktura zesilovače ve třídě D

Samotný zesilovač ve třídě D sestává z několika klíčových bloků. Mezi tyto bloky pak patří blok modulátoru, koncového (výkonového) stupně s budičem a výstupní filtr.

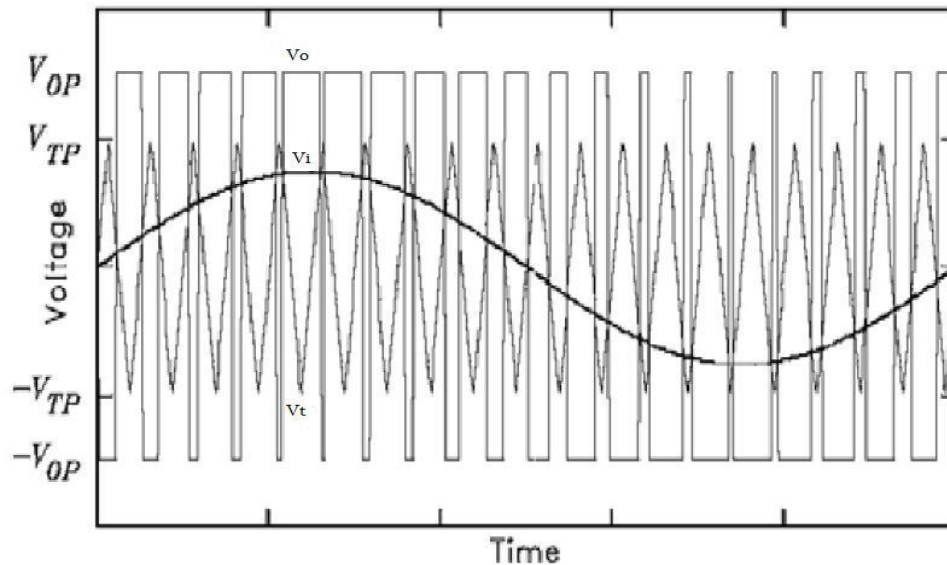


Obr. 1.1: Blokové schéma zesilovače ve třídě D.

Šipky na obr. 1.1 naznačují směr průchodu audio signálu jednotlivými bloky zesilovače ve třídě D. Na vstup modulátoru přichází audiosignál z předzesilovače (kde již mohl být kmitočtově upraven), modulátor převede signál na PWM modulovaný signál, který je následně zesílen ve výkonovém stupni s tranzistory (většinou unipolárními). Zesílený signál je pak nutné filtrovat dolní propustí (výstupní filtr), aby byl na výstupu opět audiosignál.

1.3 Blok modulátoru

Nejdůležitější funkcí modulátoru je převod audiosignálu na PWM modulovaný signál, jenž je zachycen na obr. 1.2.



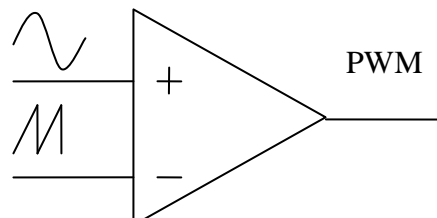
Obr. 1.2: PWM modulovaný signál V_o , vstupní audiosignál V_i a trojúhelníkový signál V_t (převzato z [9]).

Z obr. 1.2 je vidět, že PWM (pulzně-šířková modulace) signál je tvořen obdélníkovými impulzy s různou střídou. Hodnoty střídy pak závisí na konkrétní úrovni vstupního audiosignálu. Větší hodnota střídy pak odpovídá větší úrovni vstupního signálu (dle obrázku).

Takto modulovaný signál lze získat například klasickým impulsně šířkovým modulátorem s komparátorem, nebo sigma-delta modulátory prvního a vyššího řádu.

1.3.1 Impulsně šířkový modulátor

Impulsně šířkový modulátor je v podstatě tvořen pouze komparátorem na jehož neinvertující vstup je přiváděn vstupní audiosignál a na invertující vstup je přiváděn pilový (trojúhelníkový) signál, na výstupu je pak PWM signál.



Obr. 1.3: Impulsně šířkový modulátor.

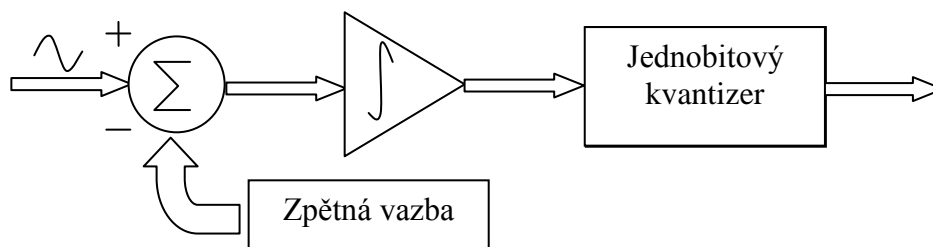
Jak je zřejmé z obr. 1.2 pokud je napěťová úroveň vstupního signálu na

neinvertujícím vstupu komparátoru menší než úroveň trojúhelníkového signálu pak je výstup komparátoru nastaven do úrovně signalizující logickou úroveň 0, naopak pokud je úroveň vstupního signálu větší než úroveň trojúhelníkového signálu, pak je na výstupu komparátoru logická 1.

1.3.2 Sigma-delta modulátor

Sigma – delta modulátor pracuje na podobném principu jako delta modulátor. *Na rozdíl od delta-modulace, je však v případě sigma-delta modulace hodnota kvantizačního šumu závislá na kmitočtu. Těto vlastnosti se říká „noiseshaping“ a činí strukturu sigma-delta modulátorů velmi vhodnou pro využití v při digitálním zpracování audiosignálů (převzato z [10]).*

Sigma-delta modulátor prvního řádu (tak jak je využíván při zapojení u zesilovačů ve třídě D) je složen z následujících bloků: součtového členu, integrátoru, komparátoru a klopného obvodu (který spolu s komparátorem tvoří jednobitový kvantizér), nezbytná je také zpětná vazba.



Obr. 1.4: Blokové schéma sigma-delta modulátoru.

Audiosignál dle obr.1.4 vchází do součtového členu kde je od audiosignálu odečten zpětnovazební signál, jenž je brán z děliče napětí na výstupu výkonového stupně zesilovače. Výsledná odchylka je integrována a přechází do jednobitového kvantizéru, který je složen z komparátoru a klopného obvodu typu D. Komparátor porovnává odchylku s úrovní země, podle znaménka odchylky je tedy na výstupu odpovídající logická hodnota, která je na výstupu kvantizéru zapsána pomocí klopného obvodu řízeného hodinovým signálem. Výstup kvantizéru je napojen přímo na budič výkonového stupně.

1.4 Výkonový stupeň

Díky využívání převodu audiosignálu na PWM modulovaný signál, může výkonový stupeň tvořený výkonovými tranzistory (popřípadě ještě budiči) pracovat v oblasti saturace a dosahovat tak vysoké účinnosti.

To ovšem na výkonové tranzistory klade jisté specifické nároky, proto se jako výkonové tranzistory u zesilovačů ve třídě D používají zejména unipolární tranzistory, které musím mít zejména nízké statické a spínací ztráty, tedy nízký statický odpor mezi drainem a sourcem a nízkou výstupní kapacitu.

Samotné výkonové tranzistory se pak zapojují do polovičního či úplného mostu. Při plném mostu se pak obdrží na výstupu dvakrát větší výkon než při polovičním.

1.5 Blok výstupního filtru

U zesilovačů ve třídě D výstupní audiosignál obsahuje různé rušivé vysokofrekvenční složky jež je nutné odstranit, činí se tak pomocí výstupního filtru jenž má povahu dolní propusti. Dolní propust se většinou volí 2. a vyššího řádu Butterworthovy (pro strmý přechod z propustné části do nepropustné) či Besselovy aproximace (pro lineární průběh fázové charakteristiky).

Přední výrobci integrovaných zesilovačů ve třídě D vyrábí také zesilovače, které nepotřebují na výstupu tyto filtry, jde ovšem většinou o obvody s nízkými výkony asi do 2x20 W a i zde je doporučeno používat na výstupu alespoň filtr z feristoru a kondenzátoru.

2 NÁVRH ZESILOVAČE, PŘEDZESILOVAČE A NAPÁJENÍ

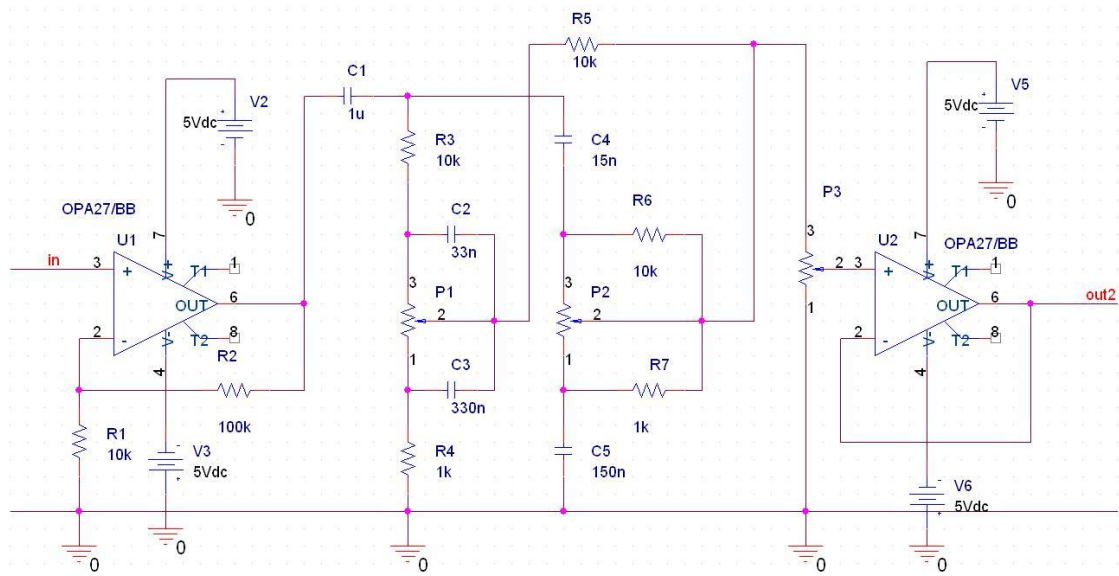
V této kapitole jsou představeny zvolené obvody pro realizaci zesilovače ve třídě D jeho předzesilovače a také napájení spínané koncepce.

2.1 Předzesilovač

Pro začátek jsou uvažovány dvě provedení předzesilovače, jedna z diskrétních součástek a druhá jako integrovaný obvod LM 1036.

2.1.1 Provedení z diskrétních prvků

Předzesilovač zahrnuje korekci nízkých a vysokých kmitočtů, ovládání hlasitosti a vyvážení kanálů.



Obr. 2.1: Schéma zapojení jednoho kanálu předzesilovače v diskrétním provedení.

Vstup je ošetřen pomocí operačního zesilovače OPA 27, který je zapojen jako neinvertující zesilovač, jeho vstupní impedance je tedy teoreticky nekonečná a přenos je dán vztahem:

$$K_U = \frac{U_2}{U_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{100 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 11, \quad (2.1)$$

Za předpokladu idealizace operačního zesilovače. Na neinvertující vstup OPA 27 by bylo vhodné ještě připojit keramický kondenzátor o jmenovité hodnotě zhruba 400 nF.

Na vývody 1 a 8 je možné připojit potenciometr pro vyvážená napětíového offsetu zesilovače. Pro ovládání vyvážení kanálů je možno zapojit místo rezistoru R2 tandemový potenciometr a v druhém kanálu pak zapojit tento potenciometr místo odporu R1.

Zapojení hloubkového a výškového korektoru je převzato z [8]. Hloubkový korektor je tvořen prvky R3, R4, P1, C2 a C3. Pokud je potenciometr v maximální horní poloze, je kondenzátor C2 vyzkratován a zapojení má charakter dolní propusti a maximálně zvýrazňuje nízké kmitočty. Pokud je potenciometr v maximální dolní poloze je vyzkratován kondenzátor C3 a obvod má charakter horní propusti a nízké kmitočty jsou maximálně potlačeny. Pro střední a vysoké kmitočty je potenciometr vyzkratován a výstupní napětí je dáno děličem tvořeným rezistory R3 a R4. Výškový korektor je tvořen prvky C4, C5, P2, R6 a R7. Pomocí potenciometru P2 zkratujeme buď R6 či R7, pokud je zkratován odpor R6 obvod se chová jako horní propust a dochází k maximálnímu zvýraznění vysokých kmitočtů, pokud je vyzkratován R7 pak se obvod chová jako dolní propust a vysoké frekvence jsou maximálně potlačeny. Přenos na nízkých a středních kmitočtech je dán děličem tvořeným kondenzátory C4 a C5 dle vztahu [8]

$$K_U = \frac{C4}{C4 + C5} = \frac{15 \cdot 10^{-9}}{15 \cdot 10^{-9} + 150 \cdot 10^{-9}} = \frac{1}{11}, \quad (2.2)$$

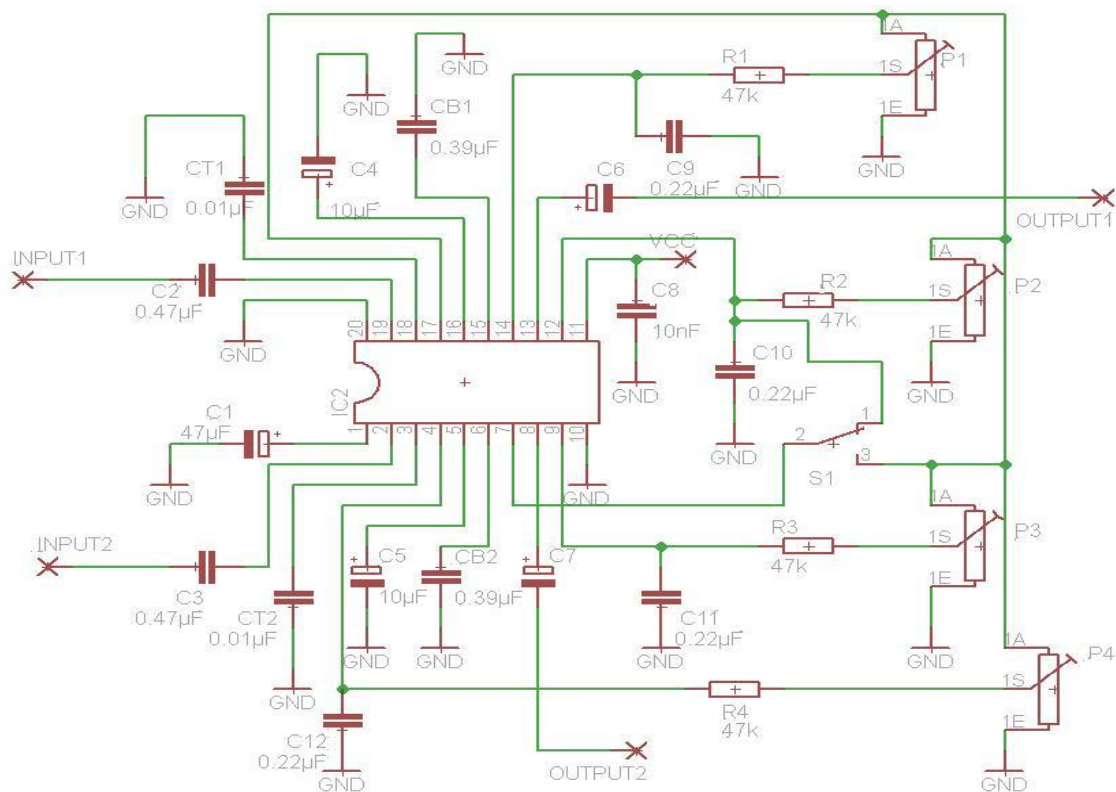
Výstup je ošetřen pomocí operačního zesilovače OPA 27 zapojeného jako napětíový sledovač jehož napětíový přenos je roven jedné a výstupní impedance by pro idealizovaný model měla být rovna nule a tak zaručit impedanční oddělení. Potenciometrem P3 je možno korigovat hlasitost.

2.1.2 LM 1036

Integrovaný obvod LM 1036 nabízí kromě korekce hloubek, výšek, ovládání hlasitosti, vyvážení kanálů, také fyziologickou regulaci hlasitosti (jedná se o zvýraznění nízkých a vysokých kmitočtů při nízké hlasitosti, neboť ty jsou lidským uchem při nízké úrovni hlasitosti potlačovány).

Tab. 2.1: Základní parametry pro integrovaný obvod LM 1036 [3].

Parametr	Podmínky	Hodnota
Napájecí napětí	-	9 – 12 V
Napájecí proud	-	až 45 mA
Výstupní proud	12 V (napájení)	1V (typická hodnota)
Dynamika ovládání hlasitosti	-	75dB
Ovládání hloubek a výšek	-	±15dB
Oddělení kanálů	-	75dB
Zkreslení	0,3 V (vstupní signál)	0,06 %
Poměr signál / šum	0,3 V (vstupní signál)	80dB



Obr. 2.2: Doporučené zapojení předzesilovače LM 1036.

Vstup pro napájecí napětí je ošetřeno keramickým filtračním kondenzátorem C8. Keramické kondenzátory C2 a C3 oddělují stejnosměrnou složku ze vstupních signálů, naopak na výstupu jsou oddělovací elektrolytické kondenzátory C6 a C7. Keramické kondenzátory C9, C10, C11, C12 slouží pro minimalizaci šumu potenciometrů. Na pinu 17 je regulované napětí zaručující definovanou velikost napětí na všech potenciometrech. Potenciometr P1 pak s rezistorem R1 tvoří dělič určující řídicí napětí pro regulaci nízkých frekvencí, potenciometr P2 a rezistor R2 slouží k regulaci hlasitosti, potenciometr P3 a rezistor R3 pak k vyvážení kanálů a potenciometr P4 s rezistorem R4 pro regulaci vysokých kmitočtů. Tlačítko S1 pak slouží pro zapnutí či vypnutí fyziologické regulace.

U obvodu LM 1036 lze nastavit vlastní požadovanou velikost regulace hloubek a výšek pomocí velikosti kapacity keramických kondenzátorů CB a CT. Pro zvolení optimální velikosti kapacity při zvolené velikosti regulace udává výrobce tyto vztahy [3]

$$BassResponse = \frac{1 + \frac{0,00065(1 - a_b)}{j\omega \cdot CB}}{1 + \frac{0,00065a_b}{j\omega \cdot CB}}, \quad (2.3)$$

kde a_b je konstanta nabývající hodnoty 0 -1 (0 pro maximální zvýraznění, 1 pro maximální potlačení), ω udává kmitočet, CB je jmenovitá hodnota kapacity

kondenzátoru.

$$TrebleResponse = \frac{1 + j\omega 5500 \cdot CT \cdot (1 - a_t)}{1 + j\omega 5500 \cdot CT \cdot a_t}, \quad (2.4)$$

kde symboly mají stejný význam jako u předešlého vzorce.

2.2 Zesilovač ve třídě D

Výběr vhodného integrovaného obvodu zesilovače ve třídě D byl do jisté míry determinován výstupním výkonem obvodu, který se měl pohybovat nad nebo na úrovni 2x20 W. Přední výrobci těchto obvodů však mají v nabídkách spíše obvody s menšími výkony vhodné pro komerční aplikace jako MP3 a mobily.

Obvody s vyššími výkony pak byly nalezeny více méně pouze u Texas Instruments a STMicroelectronic. Stereofonní provedení s požadovanými výkony pak splňovala zejména nabídka firmy STMicroelectronic.

Tab. 2.2: Tabulka nabídky firmy STMicroelectronic pěti nejvýkonnějších zesilovačů.

Název obvodu	Výkon	Napájecí napětí	Výstupní filtr
TDA7498	2x100	10 - 36	ano
TDA7492	2x50	10 - 26	ano
TDA7490L	2x28	10 - 25	-
TDA7492P	2x25	10 - 26	ne
TDA7490L	2x20	10 - 25	-

Všechny výkony jsou udávány při THD rovno 10%, rozhodujícím faktorem je tedy zejména výstupní výkon, pouzdro a dostupnost. Byl vybrán obvod TDA 7490L, pro dostačující výkon, výhodné pouzdro a dostupnost v ČR.

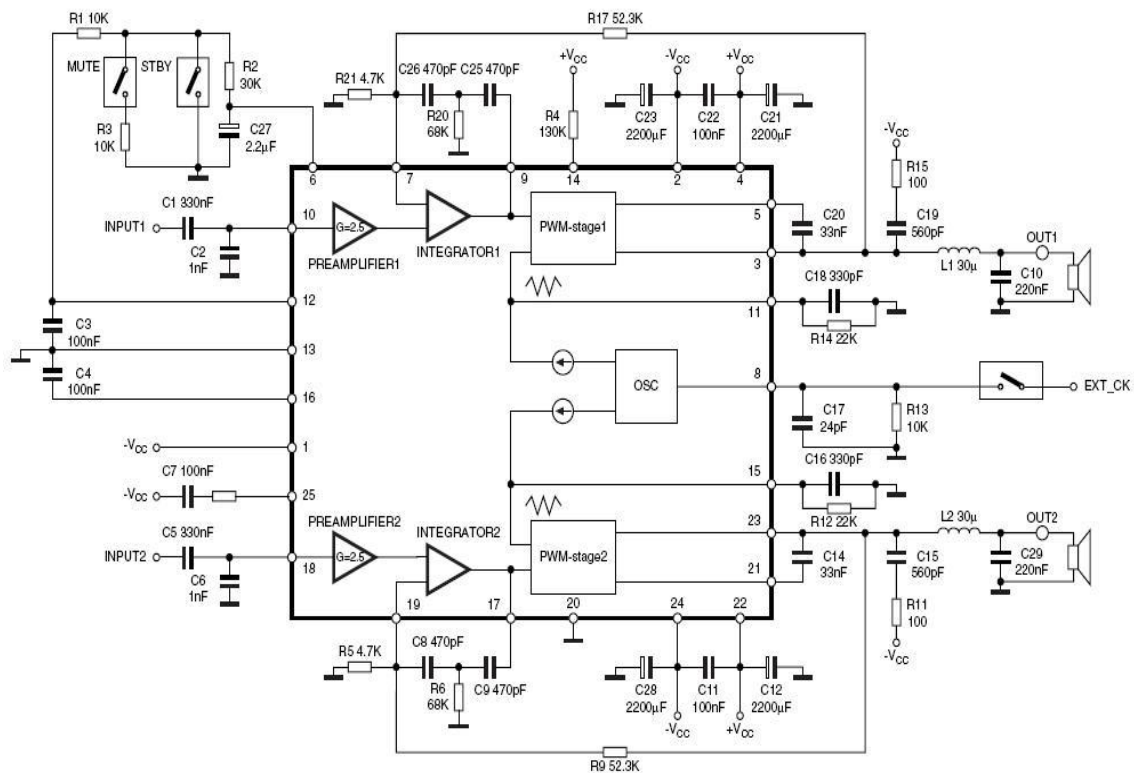
2.2.1 TDA 7490L

Obvod kromě dostačujícího výkonu a vysoké účinnosti obsahuje ochranu proti teplotnímu přetížení a proti zkratu, možnost zavedení externího hodinového signálu, funkce standby a mute.

Tab. 2.3: Parametry integrovaného zesilovače TDA 7490L [11].

Parametr	Podmínky	Hodnota
Výkon (P)	R=8Ω, THD=10%	2x20 W
Napájecí napětí (Vcc)	-	±(10 – 25) V
Účinnost	P = 2x20 W	86 %
Spínací frekvence	-	100 – 230 kHz
THD	P = 16 W	1 %

Z vnitřní struktury TDA7490L je vidět, že integrovaný obvod používá integrátor 2. řádu na nějž je přiváděn rozdíl vstupního signálu a signálu ze zpětné vazby vedené z výstupu koncového výkonového stupně. Typická zpětná vazba integrátoru je tvořena kondenzátory C8, C9, C25, C26 a rezistory R6 a R20. Zpětná vazba zesilovače je pak tvořena rezistory R5, R9, R17 a R21. Obvod využívá k modulaci sigma-delta modulátor 2. řádu. Tento modulátor využívá *noiseshaping*, tedy potlačení kvantizačního šumu v audio pásmu. O další zpracování signálu se stará PWM-stage zahrnující budiče výkonového stupně a tranzistory výkonového stupně.



Obr. 2.3: Doporučené zapojení integrovaného obvodu TDA7490L s naznačenou vnitřní strukturou (převzato z [11]).

Doporučené zapojení používá na vstupech fóliové oddělovací kondenzátory C1 a C5 které slouží k odstranění stejnosměrné složky ze vstupního audiosignálu, naopak fóliové kondenzátory C2 a C6 slouží jako zkrat pro případné vysokofrekvenční složky vstupního signálu. Elektrolitické kondenzátory C12, C21, C23 a C28 filtrují napájecí napětí spolu s keramickými kondenzátory C11 a C22. Pokud není žádoucí použít externí hodinový signál pak obvod pracuje v takzvaném master módu a jeho hodinový signál je nastaven keramickým kapacitorem C17 a rezistorem R13. Výrobce také udává vztah podle kterého lze vypočíst spínací frekvenci na výstupu [11]

$$f_{sw} = 0,25 \cdot \frac{1}{300ns + R13 \cdot (C17 + 76pF) \cdot 0,85} =$$

$$= 0,25 \cdot \frac{1}{300 \cdot 10^{-9} + 10 \cdot 10^3 \cdot (24 \cdot 10^{-12} + 76 \cdot 10^{-12}) \cdot 0,85} = 217,39kHz, \quad (2.5)$$

Funkce standby a mute jsou ovládány skrze pin 6 na který je přiváděno stejnosměrné řídicí napětí. Pokud jsou přepínače mute a stby rozpojeny, nabíjí se kondenzátor C27 přes rezistory R1 a R2 na hodnotu napětí 5V a obvod je v play módu. Pokud je sepnut přepínač mute je kondenzátor C27 nabit pouze na hodnotu napětí 2.5V, neboť je napětí 5V z pinu 12 rozloženo na děliči napětí tvořeným rezistory R1 a R3, obvod se nachází v mute módu. Jestliže je sepnut stby přepínač je kondenzátor C27 vyzkratován a na pinu 6 je 0V, obvod je ve Standby módu.

Na výstupu je pak pro oba kanály obvyklý Boucherotův člen bránící rozkmitání zesilovače tvořený prvky R11, R15, C15 a C19. Na výstupu je také povinný výstupní filtr tvořený cívkami L1, L2 a fóliovými kondenzátory C10 a C29. Pro zátěž 8Ω doporučuje výrobce hodnoty indukčnosti cívek $33\mu H$ a kapacity kondenzátorů 220 nF . Mezní frekvence pro tento filtr by se měla pohybovat v intervalu frekvencí 20-60 kHz.

2.3 Napájecí zdroj spínané koncepce

Napájecí zdroj by měl mít na výstupu napětí 19V a dostatečný proud pro napájení zesilovače i předzesilovače. Pokud má být na jednom kanále zesilovače výstupní výkon 20W a zátěž má mít 8Ω , pak lze požadovaný proud odhadnout ze vztahu

$$I = 2 \cdot \sqrt{\frac{P}{R}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{20}{8}} = 3,16A, \quad (2.6)$$

S ohledem na předzesilovač a s větší rezervou je možno uvažovat proud 3,5A.

2.3.1 Síťový transformátor

Síťový transformátor by měl přenést dostatečný výkon tedy zhruba 60VA, vzhledem k použití DC/DC měniče je však vhodné počítat až s dvojnásobnou rezervou. Vhodnou alternativou se zdá být zakoupení transformátoru nabízeném v běžném komerčním řetězci. Transformátor s parametry 120VA 24V – 5A, který by pro účely zdroje postačoval.

2.3.2 Obvod TL 494 a usměrnění napětí

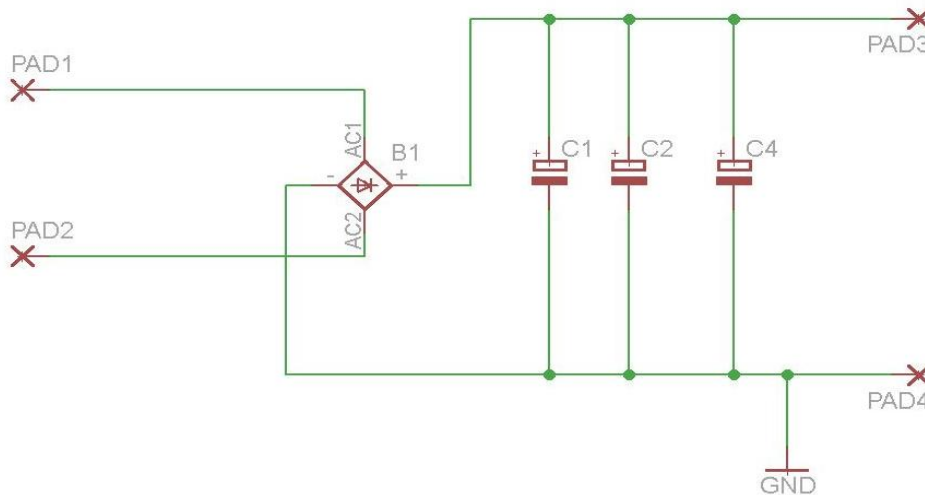
Integrovaný obvod TL 494 je PWM řídicí obvod, který obsahuje dva chybové zesilovače, nastavitelný oscilátor, dead - time zesilovač, pulzně řízený klopný obvod a interní stabilizátor napětí na 5 V s přesností 5%.

Tab. 2.4: Základní parametry obvodu TL 494 [13].

Parametr	Podmínky	Hodnota
Napájecí napětí	-	až 41 V
Výstupní kolektorový proud	-	až 250 mA
Frekvence oscilací	-	1 – 300 kHz
Pracovní teplota	dle pouzdra	0 – 70 °C

Napájecí napětí 30V je získáno díky transformátoru, Graetzovu můstku a vyhlazovacím kondenzátorům. Hodnoty kapacity filtračních kondenzátorů lze určit dle vztahu

$$C = \frac{I}{2 \cdot f \Delta U_o} = \frac{3,5}{2 \cdot 50 \cdot 1,4} = 25mF \quad (2.7)$$



Obr. 2.4: Zapojení Graetzova můstku a vyhlazovacích kondenzátorů.

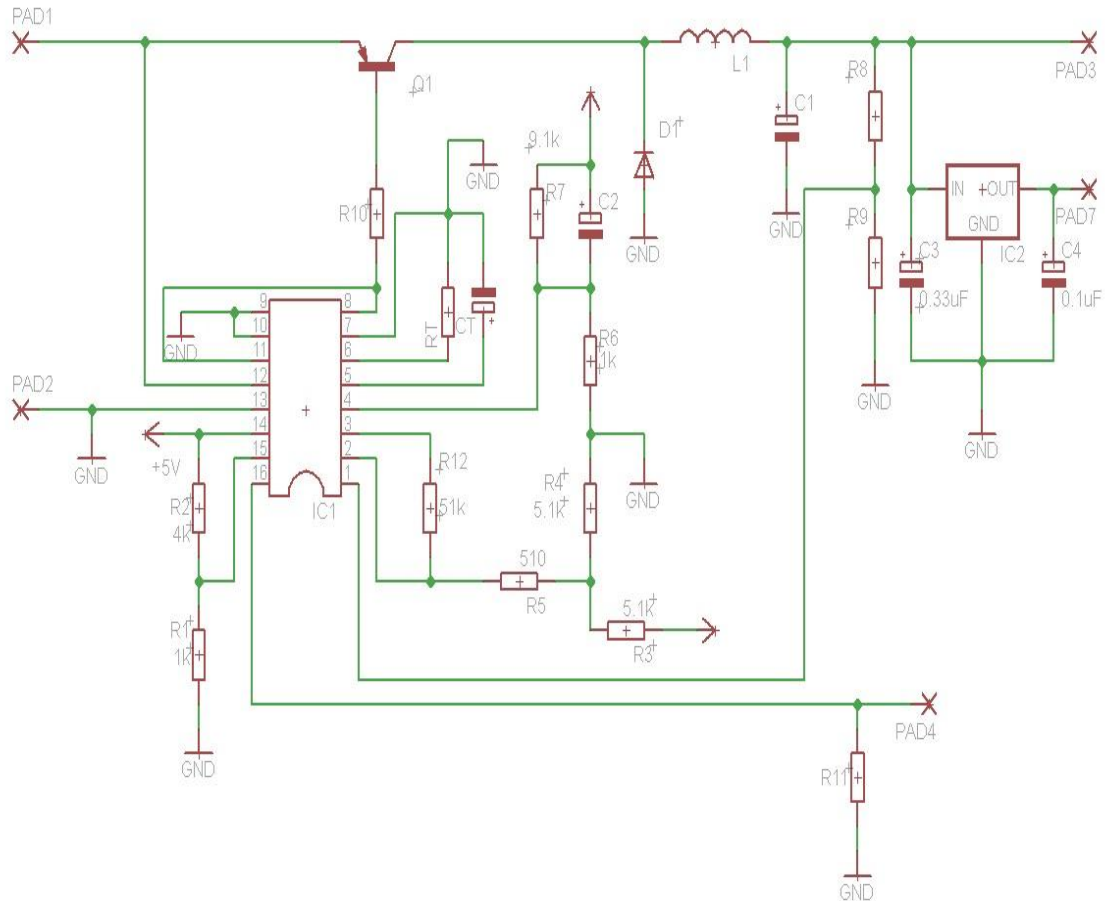
Vzhledem ke značné velikosti kapacity filtračních kondenzátorů je nutné použít několik kondenzátorů řazených paralelně, tak aby se jejich kapacita počítala dohromady.

2.3.3 Návrh kladné větve napájení s obvodem TL494

Obvod TL 494 má zavedeny dvě zpětné vazby pro kontrolu napětí a proudu na výstupu. Pro jejich správné vyhodnocení komparátory je nutné zaručit definované napětí na invertujících vstupech chybových komparátorů. Pomocí děliče složeného z rezistorů R1 a R2 zavádíme na pin 15 napětíovou referenci zhruba 1 V (pro proudovou kontrolu). Dělič tvořený rezistory R3 a R4 pak zavádí na pin 2 napětíovou referenci zhruba 2,5 V (pro napětíovou kontrolu).

Je zřejmé, že je potřeba na rezistoru R11 obdržet napětí 1 V při požadovaném proudu 1,75A, tím je ovšem odpor zcela určen

$$R_{11} = \frac{U}{I} = \frac{1}{1,75} = 0,57\Omega, \quad (2.8)$$



Obr. 2.5: Doporučené zapojení obvodu TL 494(převzato z [12]).

Na rezistoru R9 je pak potřeba obdržet napětí 2,5 V což znamená, že při napětí na výstupu 19 V je na rezistoru R8 16,5V, dělicí poměr tedy je

$$\frac{R_9}{R_8} = \frac{U_{R_9}}{U_{R_8}} = \frac{2,5}{16,5} = \frac{1}{6,6}, \quad (2.9)$$

Hodnota odporu rezistoru R8 je zvolena 6,6kΩ a rezistoru R9 1kΩ(případně může být pro přesnější nastavení použit odporový trimr o celkové hodnotě odporu 10kΩ).

Pro nastavení spínací frekvence slouží kapacitor Ct a rezistor Rt. Pokud je zvolena kapacita 100nF a frekvence 83kHz pak je odpor rezistoru dán rovnicí[12]

$$R_T = \frac{1}{f_{osc} \cdot C_T} = \frac{1}{83 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = 120 \Omega, \quad (2.10)$$

Jemný start se nastavuje pomocí rezistorů R6, R7 a kondenzátoru C2. Hodnotu kapacity C2 lze určit s úvahou délky trvání jemného startu což bývá asi 50 hodinových cyklů a jeden cyklus je určen frekvencí spínání a tím že kondenzátor se vybíjí skrze rezistor R6. Pak platí vztah [12]

$$C2 = \frac{50 \cdot \frac{1}{f_{osc}}}{R6} = \frac{50 \cdot \frac{1}{83 \cdot 10^3}}{1000} = 602 \text{ nF}, \quad (2.11)$$

Hodnota indukčnosti cívky je určena vztahem [12]

$$L1 \cong \frac{(U_I - U_O) \cdot \frac{U_O}{U_I \cdot f_{osc}}}{\Delta I_L} \cong \frac{(30 - 19) \cdot \frac{19}{30 \cdot 83 \cdot 10^3}}{0,3} \cong 280 \mu\text{H}, \quad (2.12)$$

kde U_I značí vstupní napětí, U_O pak výstupní napětí, f_{osc} spínací frekvenci a ΔI_L značí zvolené proudové zvlnění na výstupu (zvoleno 0,3A).

Hodnotu kapacity kondenzátoru C1 lze určit ze vztahu [12]

$$C1 = \frac{\Delta I_L}{8 f_{osc} \Delta U_O} = \frac{0,3}{8 \cdot 83 \cdot 10^3 \cdot 0,1} = 4,52 \mu\text{F}, \quad (2.13)$$

kde ΔI_L značí zvolené proudové zvlnění na výstupu (zvoleno 0,3A), f_{osc} spínací frekvenci a ΔU_O napěťové zvlnění na výstupu (zvoleno 0,1 V).

Maximální hodnotu ESR kondenzátoru C1 lze určit podle vztahu [12]

$$ESR_{\max} = \frac{\Delta U_O}{\Delta I_L} = \frac{0,1}{0,3} = 0,33 \Omega, \quad (2.14)$$

kde ΔI_L značí zvolené proudové zvlnění na výstupu (zvoleno 0,3A), frekvenci a ΔU_O napěťové zvlnění na výstupu (zvoleno 0,1 V).

Vhodnou diodou může být například rychlá schottkyho dioda MBR 745 s maximálním napětím v závěrném směru 45V, maximálním proudem v propustném směru 7,5 A a s rozmezím pracovních teplot -65 až 150°C.

Jako PNP tranzistor Q1 je zvolen BD244C s maximálním napětím mezi kolektorem a emitorem 100 V, maximálním proudem kolektorem 6A, proudovým zesilovacím činitelem při kolektorovém proudu 1,5A zhruba 60 a ztrátovým výkonem 65W.

Rezistor R10 určuje proud do báze tranzistoru BD244C. Hodnotu proudu i odporu

lze určit dle vztahů [12]

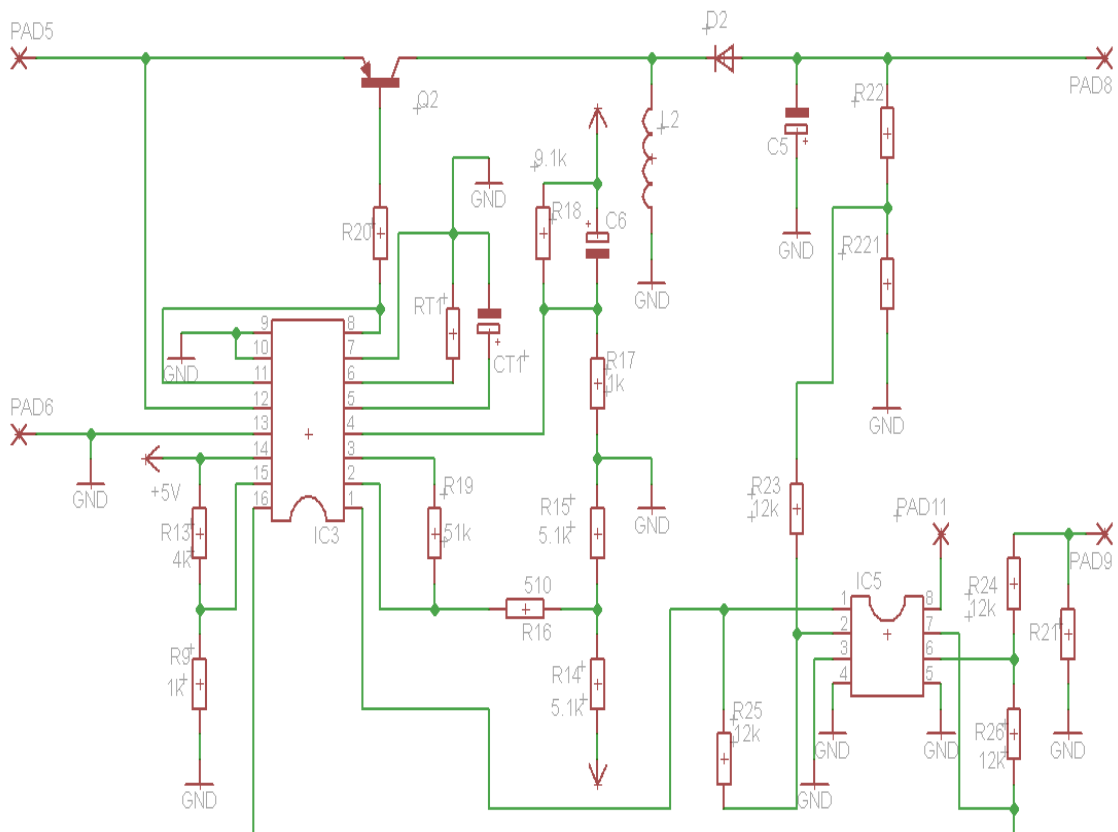
$$i_B \geq \frac{I_O + \Delta I_L}{h_{FE_{Q1}}} \geq \frac{1,75 + 0,3}{60} \geq 34mA, \quad (2.15)$$

kde i_B je proud do báze tranzistoru Q1, I_O je výstupní proud, ΔI_L je proudové zvlnění na výstupu, $h_{FE_{Q1}}$ je proudový zesilovací činitel tranzistoru Q1.

$$R10 \leq \frac{U_I - (U_{BE_{Q1}} + U_{CE_{TL494}})}{i_B} = \frac{30 - (0,8 + 0,7)}{0,034} = 838\Omega, \quad (2.16)$$

kde i_B je proud do báze tranzistoru Q1, V_I značí vstupní napětí, $U_{BE_{Q1}}$ je napětí mezi bázi a emitorem tranzistoru Q1, $U_{CE_{TL494}}$ je napětí mezi kolektorem a emitorem výstupního tranzistoru obvodu TL 494.

2.3.4 Návrh záporné větve napájení s obvodem TL494



Obr. 2.6: Zapojení záporné větve napájení s obvodem TL494.

Návrh záporné větve napájení je identický s návrhem kladné větve napájení většina hodnot součástek tedy zůstane stejná, v zapojení se však nyní použije invertujícího

DC/DC měniče a záporné napětí na výstupu se musí ve zpětných vazbách invertovat, aby odpovídalo referenčnímu napětí buzenému obvodem TL494. Je tedy potřeba znovu vypočítat hodnoty cívky, kondenzátoru a dostatečně dimenzovat tranzistor a diodu.

Indukčnost cívky lze vypočítat dle vzorce [7]

$$L = \frac{U_o \cdot \frac{-U_o}{(U_I - U_o) \cdot f_{osc}}}{\Delta I_L} = \frac{30 \cdot \frac{-(-19)}{(30 - (-19)) \cdot 83 \cdot 10^3}}{0,3} \cong 467 \mu H, \quad (2.17)$$

kde U_I značí vstupní napětí, U_o pak výstupní napětí, f_{osc} spínací frekvenci a ΔI_L značí zvolené proudové zvlnění na výstupu (zvoleno 0,3A).

Kapacita kondenzátoru se pak zhruba vypočítá dle vzorce [7]

$$C = \frac{I_o \cdot \frac{-U_o}{(U_I - U_o) \cdot f_{osc}}}{\Delta U_o} = \frac{1,75 \cdot \frac{-(-19)}{(30 - (-19)) \cdot 83 \cdot 10^3}}{0,1} = 81,756 \mu F, \quad (2.18)$$

kde I_o je výstupní proud a ΔU_o napět'ové zvlnění na výstupu (zvoleno 0,1 V).

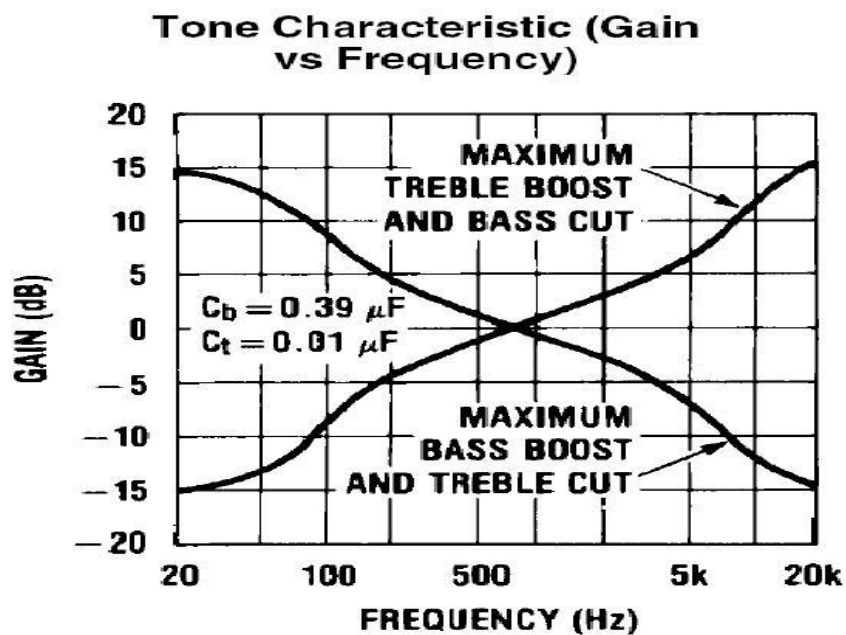
Na tranzistoru i na diodě se vyskytuje napětí vzniklé součtem výstupního a vstupního napětí, na toto napětí musí být součástky dimenzovány. Použijeme PNP tranzistor BD912 s maximálním napětím mezi kolektorem a emitorem 100 V, maximálním proudem kolektorem 15A, proudovým zesilovacím činitelem při kolektorovém proudu 1,5A zhruba 70 a ztrátovým výkonem 90W, jako diodu však použijeme MBR 1060, která má maximální povolené závěrné napětí 60V, maximální proud v propustném směru 10A a pracuje v rozmezí teplot -65 až 175°C.

Invertování napětí ve zpětné vazbě se provede pomocí operačních zesilovačů, zapojených jako invertující zesilovače s přenosem -1. Rezistory mohou mít hodnotu například 12kΩ. Zvolen byl odvod LM2904, který integruje v jednom pouzdře dva operační zesilovače.

3 SIMULACE

Kapitola 3 obsahuje důležité simulace pro výběr předzesilovače a simulaci pro zesilovač v programu PSpice.

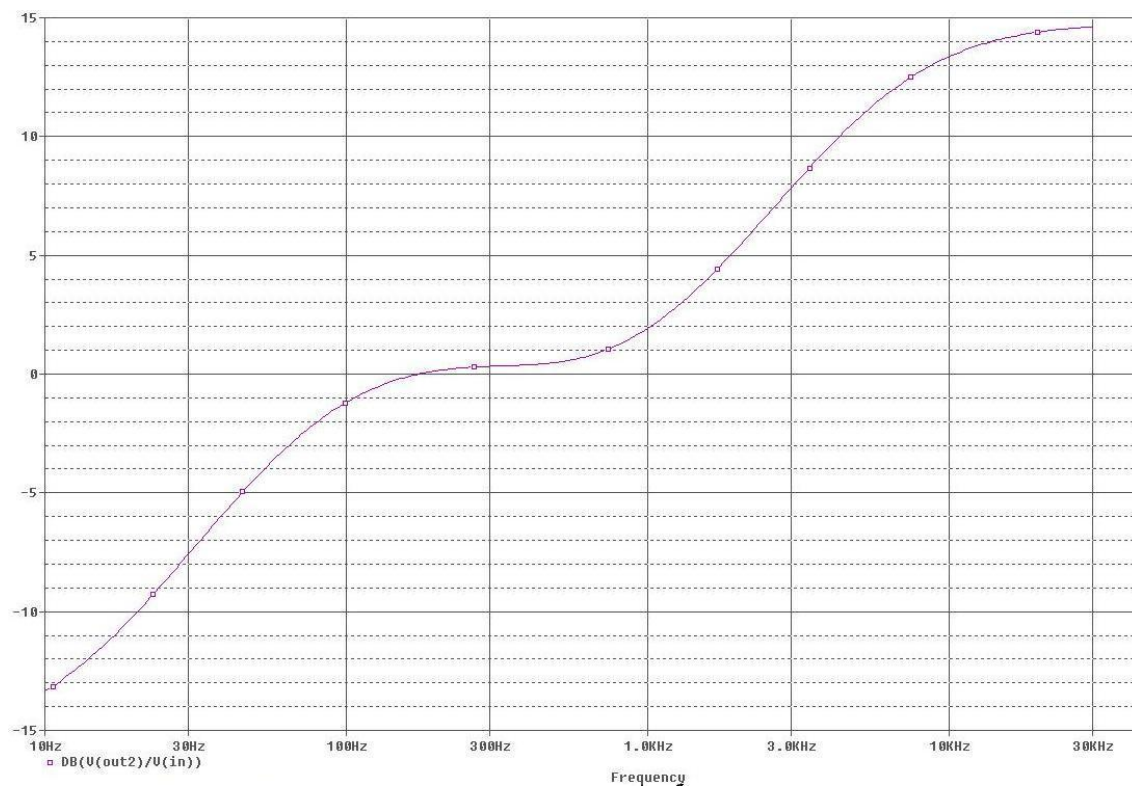
3.1 Předzesilovač



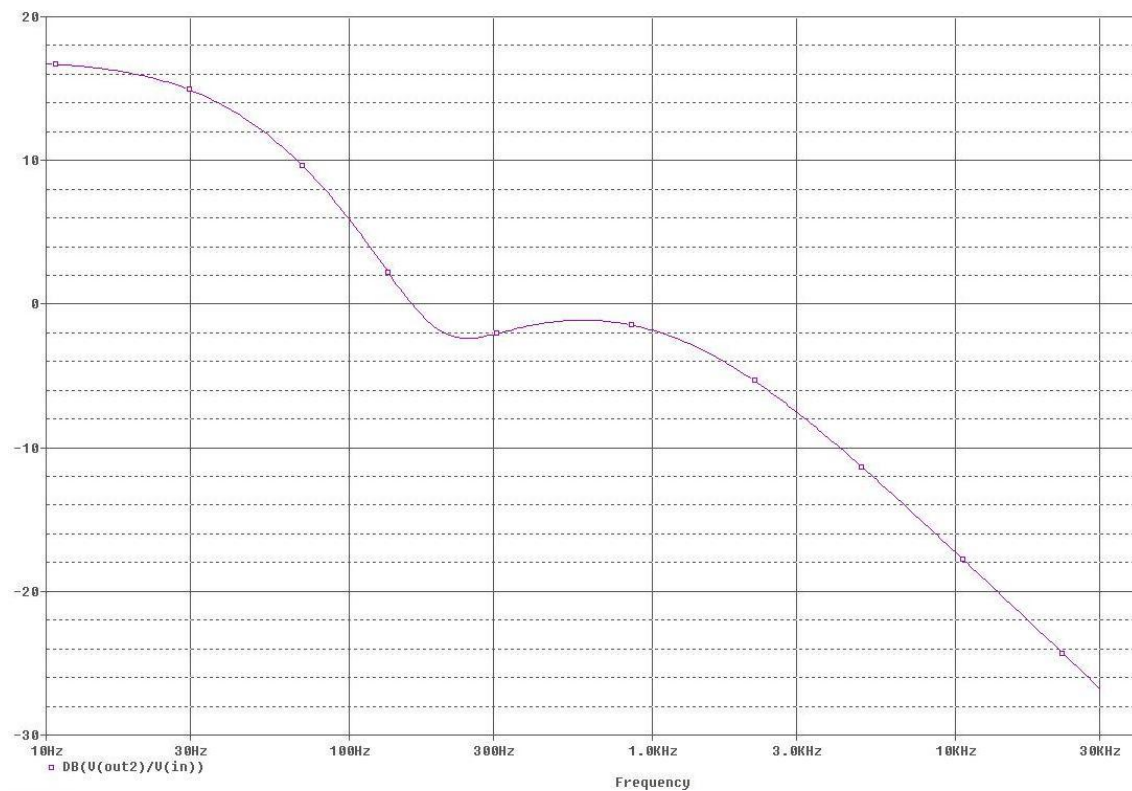
Obr. 3.1: Charakteristiky udávající maximální potlačení (zvýraznění) hloubek při součastném zvýraznění (potlačení) výšek pro předzesilovač LM 1036 (převzato z [3]).

Z charakteristik na obr.3.1, 3.2 a 3.3 lze vidět, že obvod LM 1036 má pro obě nastavení maximální korekci hloubek a výšek v mezích ± 15 dB, naopak předzesilovač z diskretních součástek má maximální potlačení hloubek -13dB a maximální zvýraznění výšek +14dB, dále pak při maximální zvýraznění hloubek +16dB a maximální potlačení výšek -22dB. Dále je možno vysledovat, že v oblasti středních kmitočtů mají charakteristiky pro LM1036 takřka „lineární“ průběh, u diskretního provedení pak je v této oblasti jisté místo stability přenosu v závislosti na frekvenci.

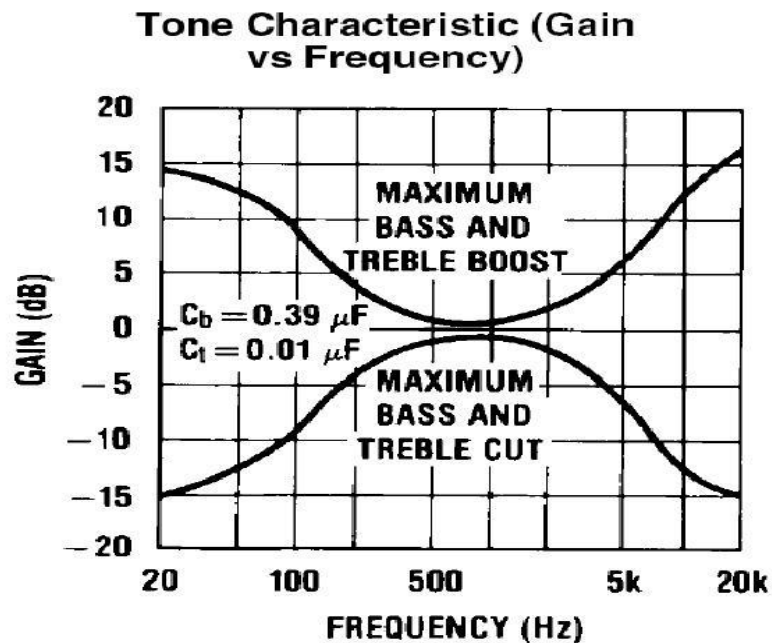
Při nastavení korekcí z obr. 3.4, 3.5 a 3.6 se maximální hodnoty korekcí příliš nemění jak pro LM 1036 tak pro diskretní zapojení. Charakteristiky LM 1036 pak mají „parabolický“ průběh, podobný průběh má i charakteristika pro diskretní zapojení při maximálním potlačení hloubek a výšek, ovšem charakteristika pro maximální zvýraznění hloubek i výšek vykazuje jisté deformace.



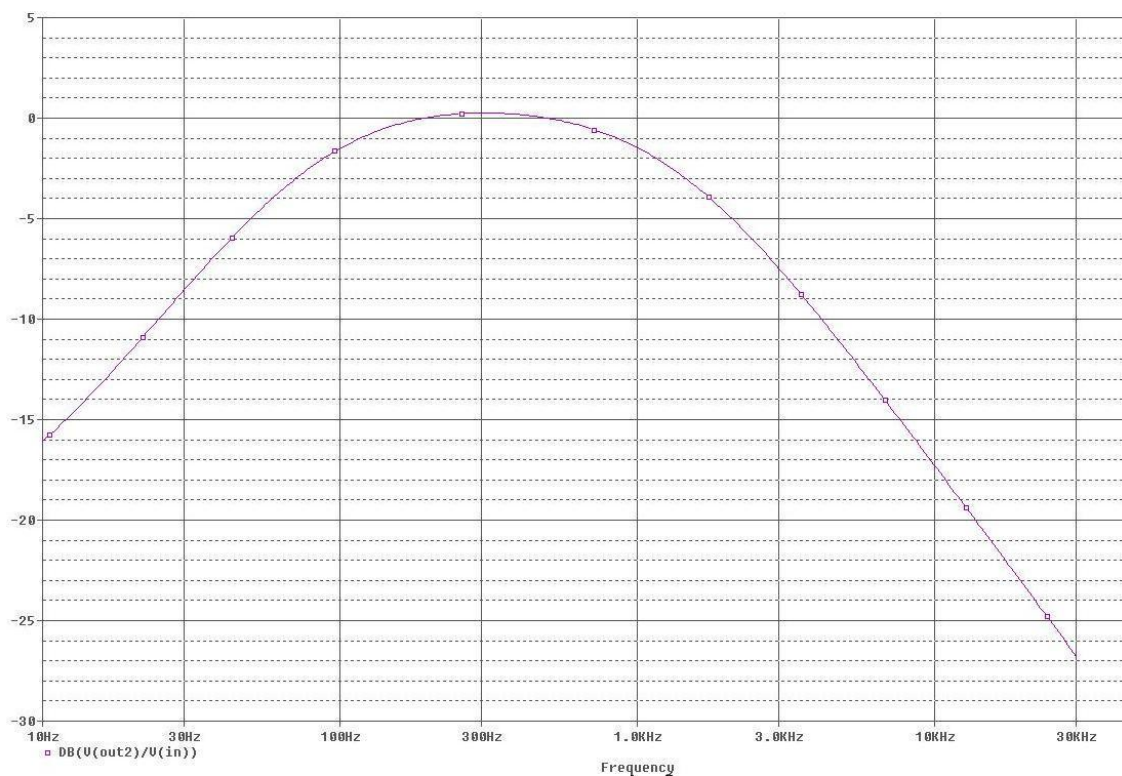
Obr. 3.2: Charakteristika maximálního potlačení hloubek a maximálního zvýraznění výšek pro předzesilovač z diskretních součástek.



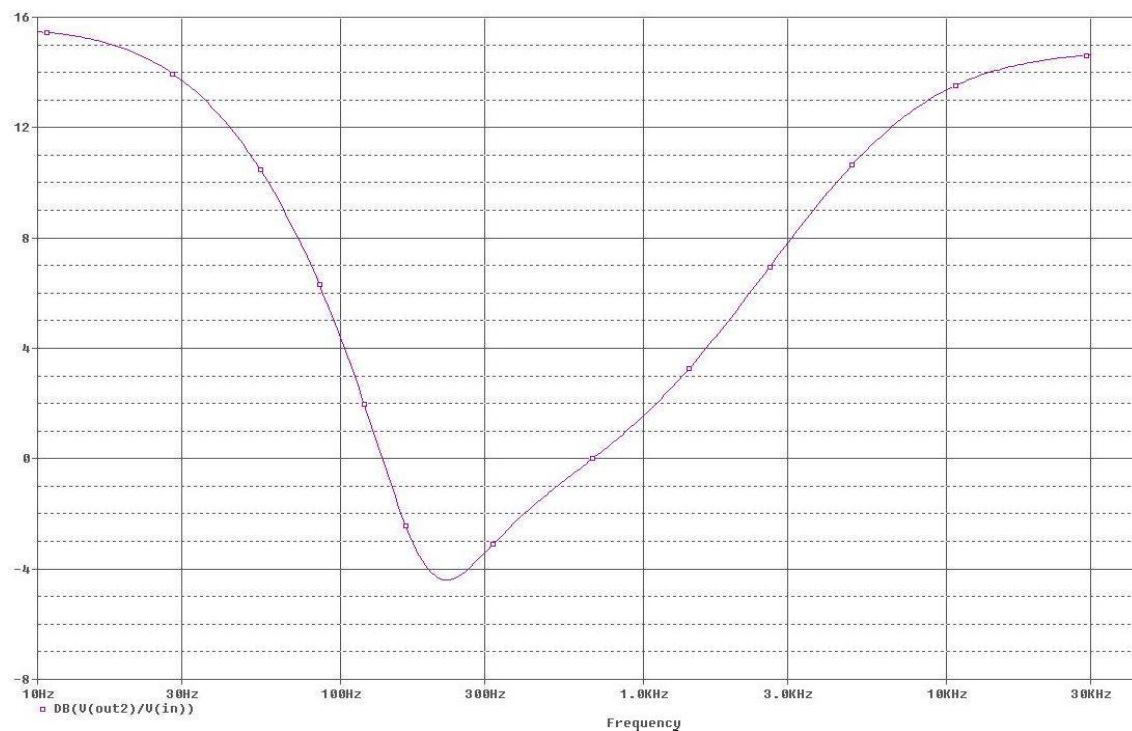
Obr. 3.3: Charakteristika maximálního zvýraznění hloubek a maximálního potlačení výšek pro předzesilovač z diskretních součástek.



Obr. 3.4: Charakteristika udávající maximální potlačení (zvýraznění) hloubek při součastném potlačení (zvýraznění) výšek pro předzesilovač LM 1036(převzato z [3]).



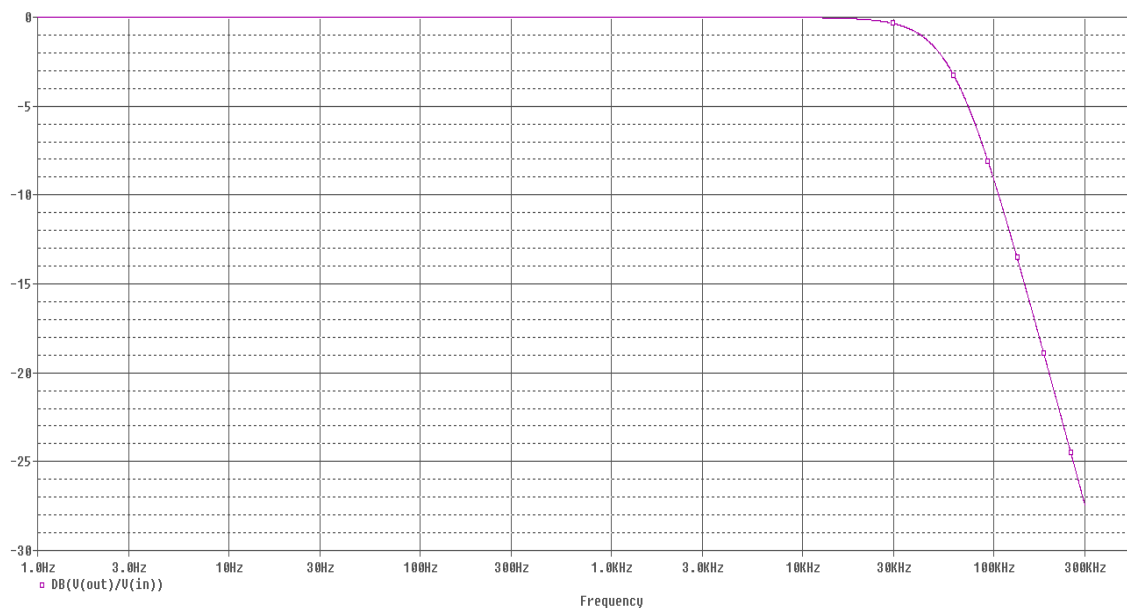
Obr. 3.5: Charakteristika maximálního potlačení hloubek a maximálního potlačení výšek pro předzesilovač z diskretních součástek.



Obr. 3.6: Charakteristika maximálního zvýraznění hloubek a maximálního zvýraznění výšek pro předzesilovač z diskretních součástek.

Na základě simulací (vyrovnané kmitočtové charakteristiky), kompaktnosti, počtu potřebných součástek a vhodnosti při provedení se zesilovačem ve třídě D byl pro konstrukci obvod LM 1036.

3.2 Výstupní filtr zesilovače



Obr. 3.7: Přenosová charakteristika výstupního filtru zesilovače TDA 7490L.

Z obr. 3.7 je vidět, že filtr na výstupu zesilovače TDA 7490L má charakter dolní propusti která má přenos roven jedné zhruba do frekvence 10kHz a na kmitočtu 20kHz (tedy konec slyšitelných frekvencí) má útlum asi 0,1dB. Podle simulace v programu PSpice je mezní kmitočet (kmitočet při poklesu přenosu o 3dB) roven 60kHz, tedy hodnotu blízkou mezní povolené hodnotě výstupního filtru. Pokles charakteristiky je pak zhruba 40dB/dekádu.

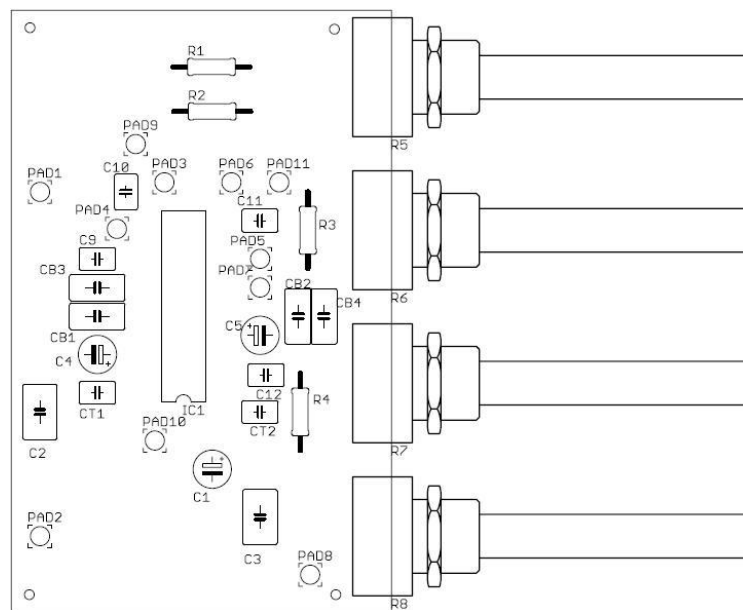
4 REALIZACE ZAŘÍZENÍ A VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V této kapitole je popsána vlastní realizace jednotlivých bloků zesilovače a prezentace výsledků měření.

4.1 Předzesilovač LM1036

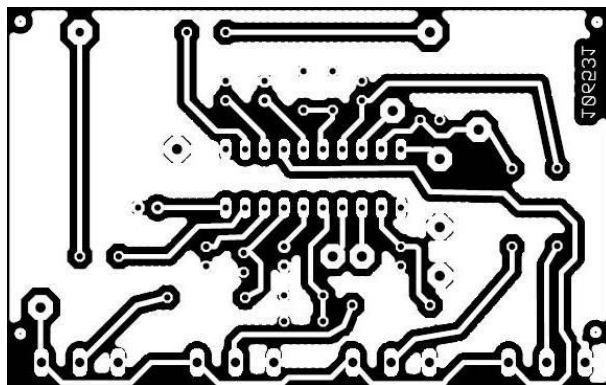
4.1.1 Realizace LM1036

Realizace desky plošného spoje pro obvod LM1036 je snadná, lze ji provést v jedné vrstvě, všechny cesty je možno dimenzovat na 0,6 mm i méně neboť proudové zatížení nepřesáhne řád miliampérů (0,6 mm zvoleno pro snadnější výrobu desky a s ohledem na dostatečnou rozteč nožek pouzdra DIL20). Velikost desky je do jisté míry určena velikostí potenciometrů umístěných na desce.



Obr. 4.1: Osazovací plán desek plošných spojů pro LM1036.

Z obr.4.2 lze vidět, že osazení desky plošného spoje se skládá z minimálního počtu diskretních součástek. Většinu součástek tvoří kondenzátory zejména pak keramické kondenzátory (pro signálové cesty by bylo možno uvažovat o použití fóliových kondenzátorů vzhledem jejich vyšší kvalitě). Byly použity uhlíkové lineární potenciometry a uhlíkové rezistory. Na výstupu nebyly použity oddělovací kondenzátory, neboť jsou již použity na vstupech zesilovače.



Obr. 4.2: Předloha desky plošného spoje pro LM1036(1:1).

4.1.2 Měření LM1036

Měření bylo zaměřeno zejména na prověření vlastností kmitočtových korekcí předzesilovače.

Použité přístroje:

Stabilizovaný zdroj	HQPOWER	PS613
Generátor funkcí	METEX	MS-9170
Osciloskop	Hewlett Packard	54603B

Na vstup předzesilovače byl přiveden signál z generátoru funkcí o velikosti $U_{IN(p-p)} = 640\text{mV}$ (kde U_{p-p} značí napětí peak to peak).

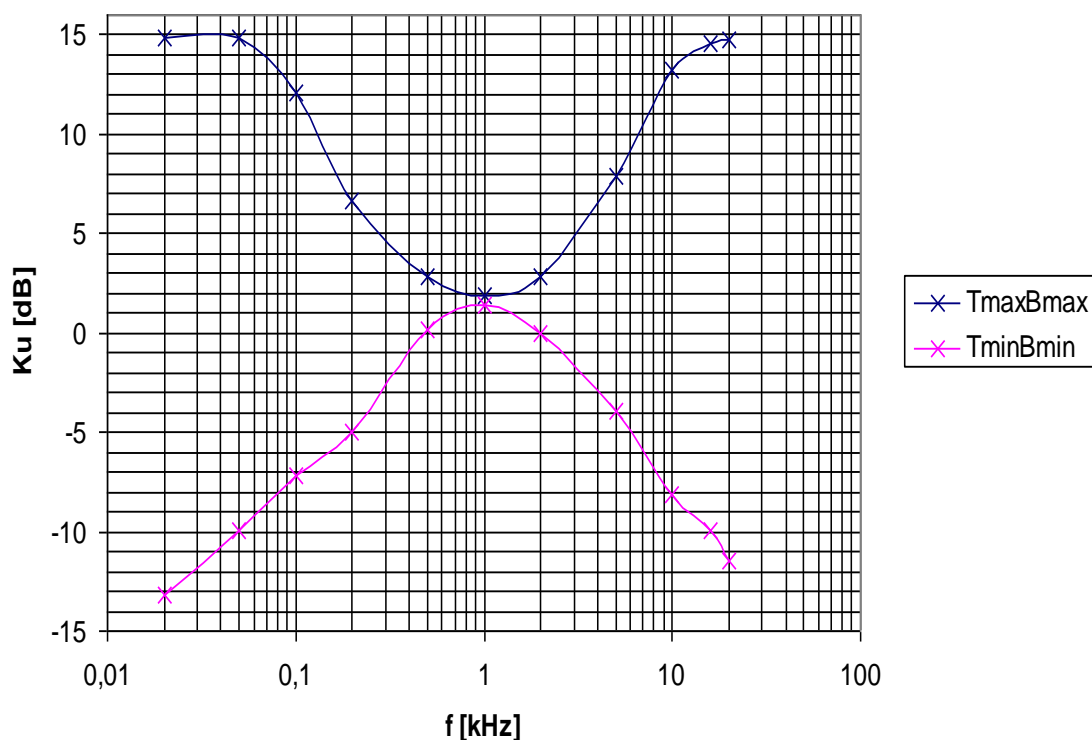
Tab. 4.1: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot.

f	$T_{\max} B_{\max}$		$T_{\min} B_{\min}$		$T_{\min} B_{\max}$		$T_{\max} B_{\min}$	
	U_{p-p}	K_U	U_{p-p}	K_U	U_{p-p}	K_U	U_{p-p}	K_U
kHz	V	dB	mV	dB	V	dB	V	dB
0,02	3,531	14,83	140	-13,20	3,250	14,11	0,140	-13,20
0,05	3,547	14,87	203	-9,97	3,406	14,52	0,203	-9,97
0,10	2,574	12,09	281	-7,15	2,312	11,16	0,296	-6,70
0,20	1,375	6,64	359	-5,02	1,469	7,22	0,359	-5,02
0,50	0,890	2,86	656	0,21	0,937	3,31	0,609	-0,43
1,00	0,796	1,89	750	1,38	0,750	1,38	0,766	1,56
2,00	0,890	2,86	640	0,00	0,609	-0,43	0,984	3,74
5,00	1,594	7,93	406	-3,95	0,406	-3,95	1,609	8,01
10,00	2,922	13,19	250	-8,16	0,312	-6,24	2,875	13,05
16,00	3,422	14,56	203	-9,97	0,265	-7,66	3,359	14,4
20,00	3,484	14,72	171	-11,46	0,163	-11,88	3,406	14,52

vysvětlivky: T = treble = výšky, B = bass = hloubky, f = frekvence, K_U = napětíový přenos

Ukázka výpočtu:

$$K_U = 20 \cdot \log \left(\frac{U_{p-p}}{U_{IN(p-p)}} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{3,531}{0,64} \right) = 14,83 \text{ dB}; \quad (4.1)$$

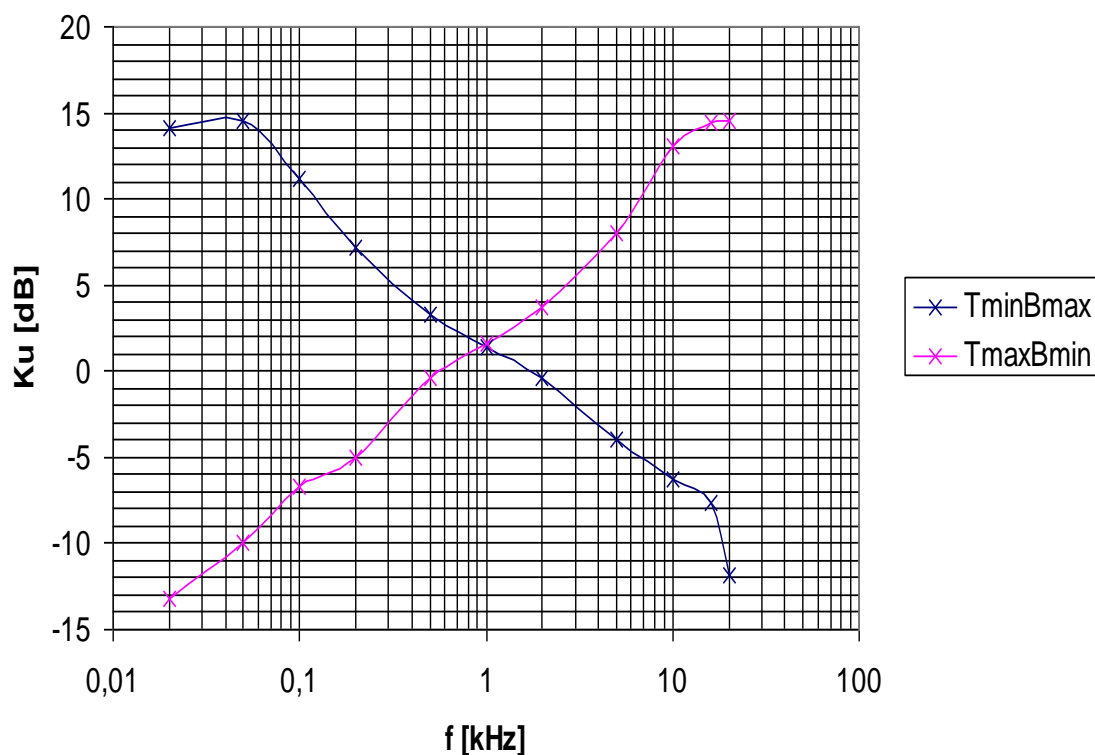


Obr. 4.3: Závislost napěťového přenosu na frekvenci pro různá nastavení korekce hloubek a výšek.

Z obr.4.3 a obr.4.4 je vidět, že naměřené charakteristiky tvarově zhruba odpovídají charakteristikám udávaným výrobcem (obr.3.1 a obr.3.4). Získané hodnoty pak zcela ideálně neodpovídají. Maximální zvýraznění nízkých kmitočtů o 14,87 dB nastává při kmitočtu 50Hz a při současném maximálním zvýraznění vysokých kmitočtů (při současném potlačení vysokých kmitočtů pak zvýraznění hloubek nepatrně poklesne na 14,52dB). Maximální potlačení nízkých kmitočtů o 13,20dB pak nastává při kmitočtu 20 Hz a vychází stejný pro obě extrémní nastavení vysokých kmitočtů. Maximální zvýraznění vysokých kmitočtů o 14,72dB nastává pro kmitočet 20kHz a obdobně jako u nízkých kmitočtů zvýraznění mírně závisí na nastavení druhé korekce (tedy na nastavení korekce hloubek). Maximální potlačení výšek o 11,88dB pak opět nastává při kmitočtu 20 kHz a je mírně závislé na nastavení druhé korekce. Na středním kmitočtu 1kHz pak křivky mají nabývat ideálně hodnoty 0dB, naměřená a vypočtené hodnota se ovšem pohybuje kolem 1,5 dB.

Výrobce garantuje minimální potlačení a zvýraznění jak vysokých kmitočtů tak nízkých alespoň o 12 dB při dodržení hodnot kapacity kondenzátorů CB a CT. Naměřené hodnoty zhruba odpovídají garantovaným hodnotám udávaným výrobcem,

mírné překročení těchto garantovaných hodnot lze přičíst ne zcela přesným hodnotám kapacit keramických kondenzátorů CB a CT (hodnoty s tolerancí 10%).



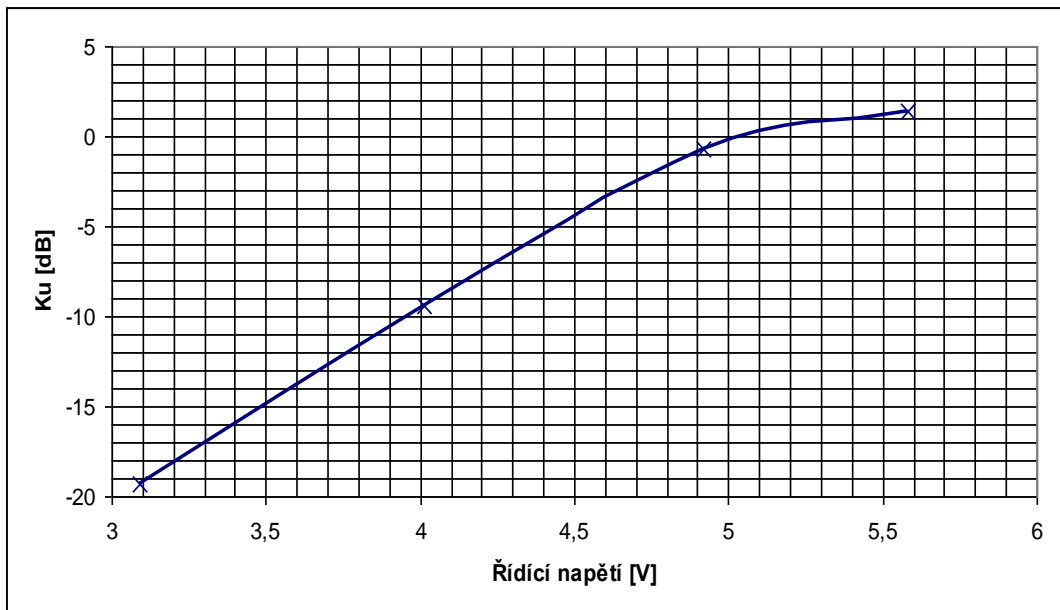
Obr. 4.4: Závislost napěťového přenosu na frekvenci pro různá nastavení korekce hloubek a výšek.

Ověřeny byly také funkce potenciometrů pro ovládání hlasitosti a vyvážení kanálů(balance).

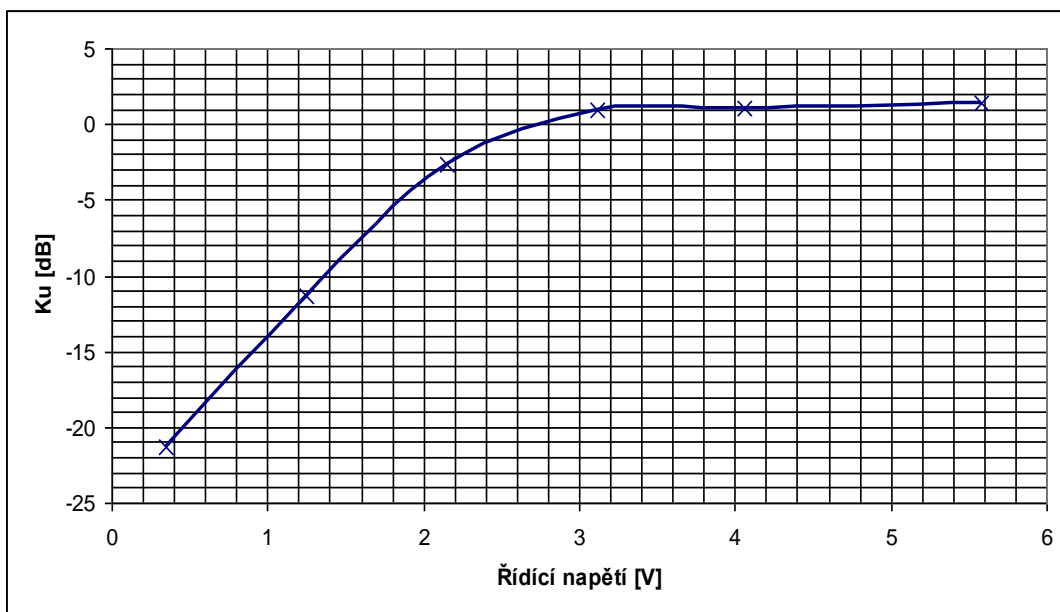
Tab. 4.2: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot (ověření funkcí volume a balance)

Řídící napětí V	Volume		Řídící napětí V	Balance	
	Uout [V]	Ku [dB]		Uout [V]	Ku [dB]
5,58	1,359	1,41	5,58	1,356	1,39
4,92	1,062	-0,74	4,06	1,312	1,10
4,01	0,390	-9,44	3,12	1,287	0,93
3,09	0,125	-19,32	2,15	0,856	-2,61
2,00	<0,125	-	1,25	0,312	-11,38
-	-	-	0,35	0,100	-21,26

Vstupní napětí bylo rovno 1,156V(peak-peak), hodnoty Uout výstupního napětí udávány peak-peak, u funkce volume nebylo možno změřit úroveň při řídicím napětí 2V

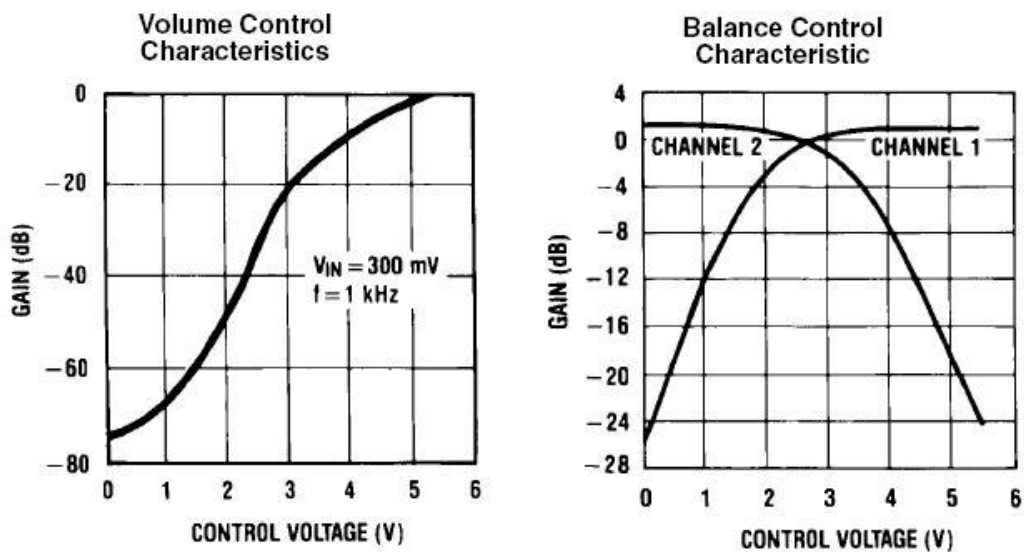


Obr. 4.5: Závislost napět'ového přenosu na řídicím napětí na pinu 12.



Obr. 4.6: Závislost napět'ového přenosu na řídicím napětí na pinu 9.

Z obr.4.5, obr.4.6 a obr.4.7 je vidět že ovládání funkce volume a balance(vyvážení kanálů) zhruba odpovídá údajům udávaným výrobcem. U ovládání hlasitosti lze srovnat jak u měřené charakteristiky tak i u charakteristiky udávané výrobcem, že při řídicím napětí 5V se pohybuje přenos okolo 0dB, při 4V je potlačen zhruba o 10 dB a při 3V se jedná o potlačení zhruba o 20 dB. U ovládání balance měřené pro kanál 1 si charakteristiky také odpovídají. Zhruba do 3V řídicího napětí na pinu 9 se přenos pohybuje kolem 0 dB, pak klesá a při napětí blízkém 0 V přenos klesne až na hodnoty kolem -20 dB.

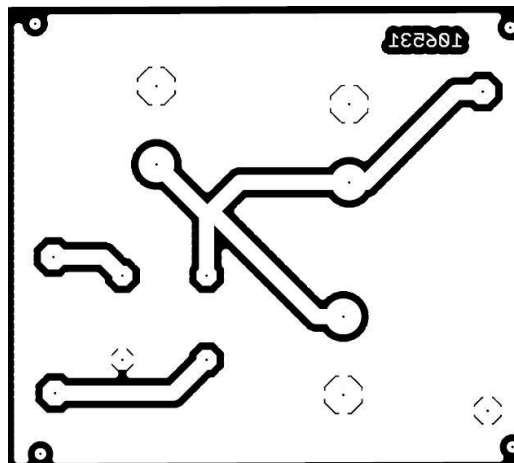


Obr. 4.7: Závislosti udávané výrobcem.

4.2 Napájení s obvodem TL494

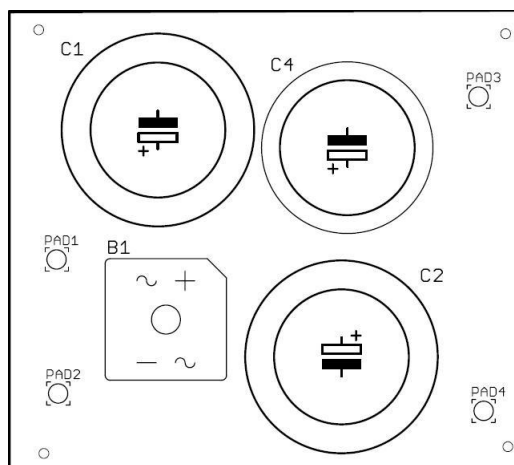
4.2.1 Realizace

Realizace zdroje byla rozdělena na dvě desky plošných spojů, první deska zabezpečuje převod střídavého napětí z transformátoru na stejnosměrné napětí a druhá deska realizuje samotný DC/DC měnič s obvodu TL494.



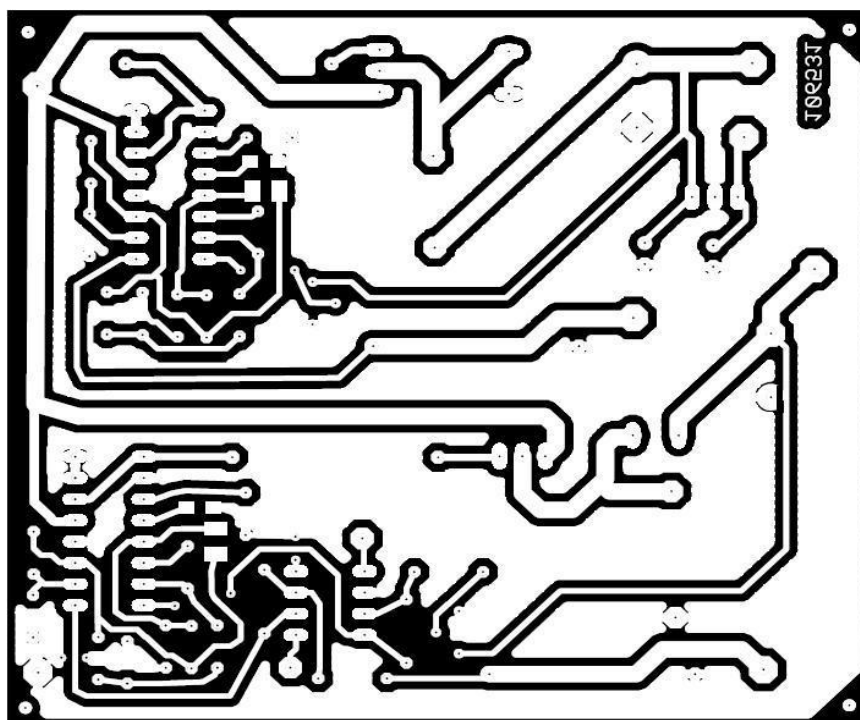
Obr. 4.8: Předloha desky plošného spoje pro první desku napájení(1:1).

Při realizaci první desky pro napájecí zdroj je důležité dimenzovat všechny cesty na proud až 3,5 A, to znamená volbu cest asi 2mm. Velikost desky je určena zejména objemnými filtračními kondenzátory.



Obr. 4.9: Osazovací plán pro první desku plošného spoje napájecího zdroje(1:1).

Samotnou desku plošného spoje pro DC/DC měnič je opět možné udělat v jedné vrstvě s několika propojkami. Výkonové cesty je třeba dimenzovat na 2 mm vzhledem k možnému maximálnímu proudu 3,5A, signálové cesty pak stačí dimenzovat na 0,6 mm (vzhledem k snadné výrobě a dostatečné rozteči nožiček pouzdra DIL 16 ve kterém je umístěn integrovaný obvod TL494).

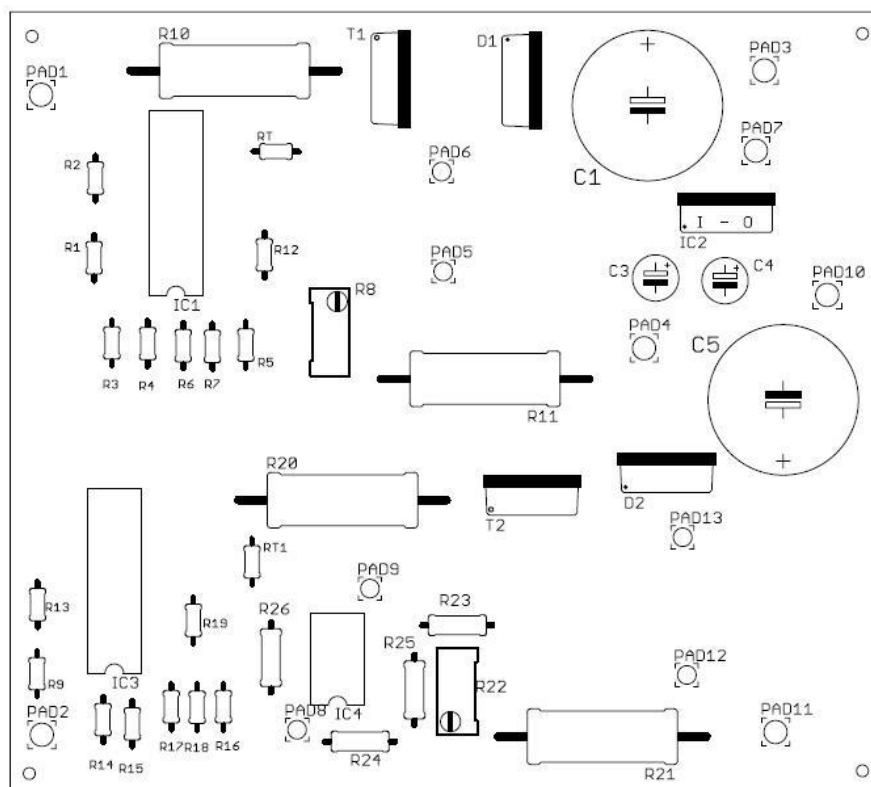


Obr. 4.10: Předloha desky plošných spojů pro DC/DC měniče s TL494.

Deska je osazena elektrolytickými kondenzátory, čtyři z nich jsou v smd provedení a jsou tedy osazeny zespodu desky. Byly použity uhlíkové rezistory až na výkonové drátové rezistory R10 a R11, které bylo potřeba zvolit na výkonovou zatížitelnost asi 2W. PADy 5, 6, 12 a 13 jsou určeny pro osazení cívkou. Pro realizaci cívek byly použity železo prachová jádra od firmy Amidon T-106 (výkonová zatížitelnost 236W)

materiál 26 (0-1MHz), 100 závitů na 900 μH a Amidon T-157(výkonové zatížitelnost 515W) materiál 26 (0-1MHz), 100 závitů na 970 μH . Počet potřebných závitů byl určen na 24 podle vztahu 4.5. Po oživení bylo zjištěno, že tranzistory T1 a T2 je vhodné chladit.

Vzhledem k dynamickým ztrátám byl zvolen chladič profilu U s tepelným odporem 20K/W, který by měl zajistit dostatečnou rezervu chlazení pro tranzistor T1 a pro tranzistor T2 pak chladič s tepelným odporem 4,3K/W.



Obr. 4.11: Osazovací plán desky plošných spojů pro DC/DC měniče s TL494.

4.2.2 Měření

Měřením byla zjištěna účinnost snižujícího a invertujícího měniče s obvody TL494.

Použité přístroje:

Stabilizovaný zdroj	HQPOWER	PS613
Programovatelná zátěž	GW INSTEK	PEL-300
Multimetr	UNI-T	UT 30D

Na vstup měniče byl připojen stabilizovaný zdroj o výstupním napětí 30V, na výstup byla připojena programovatelná zátěž. Zátěž byla měněna v rozmezí hodnot 15 - 100 Ω . Hodnoty vstupního proudu byly měřeny multimetrem a výstupní hodnoty proudu a napětí byly měřeny pomocí programovatelné zátěže GW INSTEK.

Tab. 4.3: Hodnoty naměřené pro snižující měnič.

R_Z	I_{IN}	I_{OUT}	U_{OUT}	R_Z	I_{IN}	I_{OUT}	U_{OUT}
Ω	A	A	V	Ω	A	A	V
100	0,25	0,19	19,04	50	0,39	0,38	18,90
90	0,27	0,21	19,02	40	0,46	0,47	18,82
80	0,29	0,24	19,00	30	0,54	0,63	18,70
70	0,31	0,27	18,98	20	0,75	0,91	18,46
60	0,35	0,32	18,94	15	1,01	1,23	18,14

Vysvětlivky: R_Z výstupní zátěž, I_{IN} vstupní proud, I_{OUT} výstupní proud, U_{OUT} výstupní napětí.

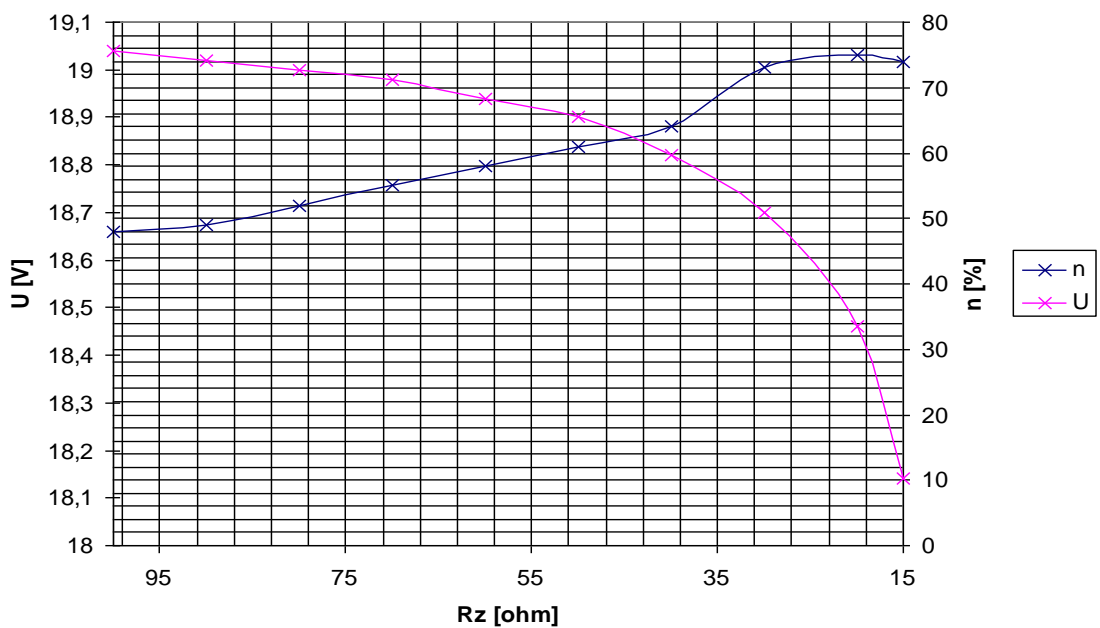
Z naměřených hodnot byla vypočtena účinnost měniče, ukázka výpočtu:

$$\eta = \frac{P_{IN}}{P_{OUT}} = \frac{U_{OUT} \cdot I_{OUT}}{U_{IN} \cdot I_{IN}} = \frac{19,04 \cdot 0,19}{30 \cdot 0,25} = 48\% \quad (4.2)$$

kde η je účinnost, P_{IN} je vstupní výkon a P_{OUT} je výstupní výkon.

Tab. 4.4: Vypočtené hodnoty účinnosti snižujícího měniče.

R_Z	Ω	100	90	80	70	60	50	40	30	20	15
η	%	48	49	52	55	58	61	64	73	75	74



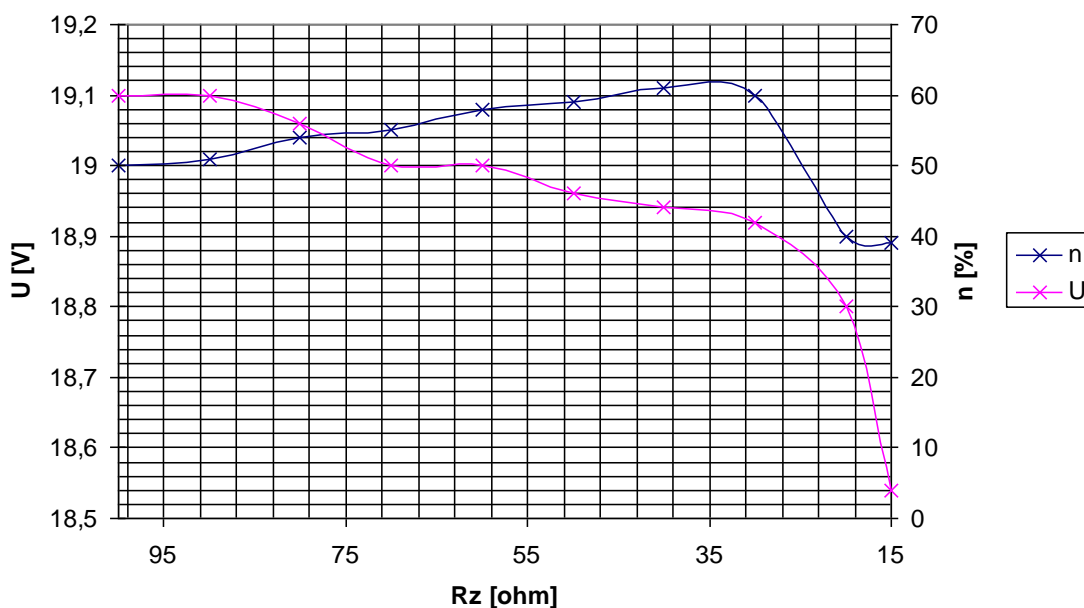
Obr. 4.12: Závislost výstupního napětí a účinnosti snižujícího měniče na velikosti zátěže.

Tab. 4.5: Hodnoty naměřené pro invertující měnič.

R_Z	I_{IN}	I_{OUT}	U_{OUT}	R_Z	I_{IN}	I_{OUT}	U_{OUT}
Ω	A	A	V	Ω	A	A	V
100	0,24	0,19	19,10	50	0,41	0,38	18,96
90	0,26	0,21	19,10	40	0,50	0,48	18,94
80	0,28	0,24	19,06	30	0,66	0,63	18,92
70	0,31	0,27	19,00	20	1,42	0,91	18,80
60	0,35	0,32	19,00	15	1,95	1,23	18,54

Tab. 4.6: Vypočtené hodnoty účinnosti invertujícího měniče.

R_Z	Ω	100	90	80	70	60	50	40	30	20	15
η	%	50	51	54	55	58	59	61	60	40	39



Obr. 4.13: Závislost výstupního napětí a účinnosti invertujícího měniče na velikosti zátěže.

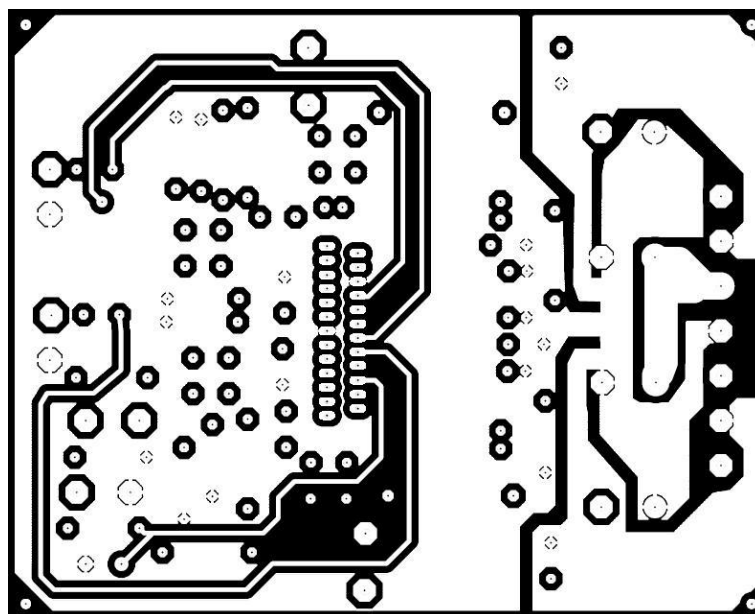
Z výsledných hodnot je vidět, že výstupní napětí u obou měničů klesá s rostoucím výstupním výkonem (tedy se zmenšující se zátěží), což je dáno zejména úbytkem napětí na rezistoru, který je v sérii se zátěží. U snižujícího měniče pak poklesne výstupní napětí, v proměřovaném pásmu zátěží, skoro o 1V a u invertujícího pouze o 0,5V. Lze vidět, že účinnost roste s klesající hodnotou zátěže až do určité hodnoty zátěže, kdy účinnost začne klesat (případně přestane růst). U snižujícího měniče je dosaženo účinnosti až 75% na zátěži 20 Ω . U invertujícího měniče pak 61% na zátěži 40 Ω , od

zátěže menší než 30Ω účinnost rapidně klesá, což může být způsobeno tím že tranzistor T2 je vybuzen pouze do aktivní části své charakteristiky(možná změna hodnoty rezistoru R20).

4.3 TDA7490L

4.3.1 Realizace

Deska plošného spoje byla navržena ve dvou vrstvách. Je vhodné oddělit výkonovou a signálovou zem a jejich propojení provést u filtračních kondenzátorů umístěných na vstupu napájení. Cesty pro napájení je nutné dostatečně dimenzovat (alespoň 1,5mm pro možné proudové zatížení 3,5A; což je dodrženo minimálně před rozdělením cest, kdy zatížení poklesne). Cesty pro výstup je pak nutné dimenzovat alespoň na 0,8mm pro možné proudové zatížení 1,75A. Signálové cesty mohou být dimenzovány na 0,6 mm pro snadnou výrobu desky.

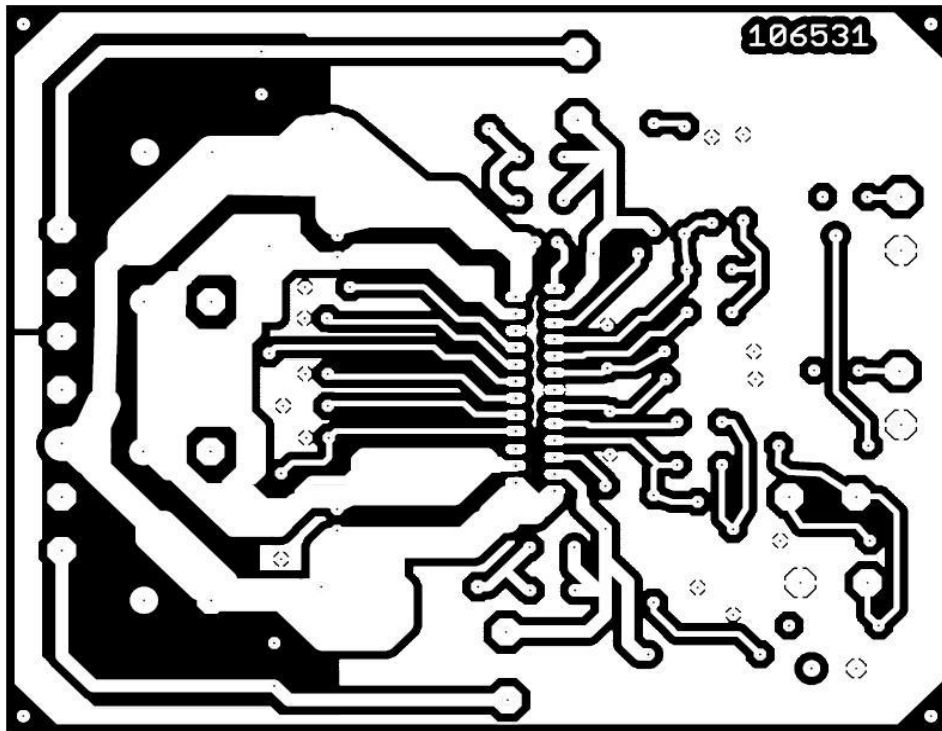


Obr. 4.14: Předloha desky plošného spoje pro obvod TDA7490L(vrchní strana).

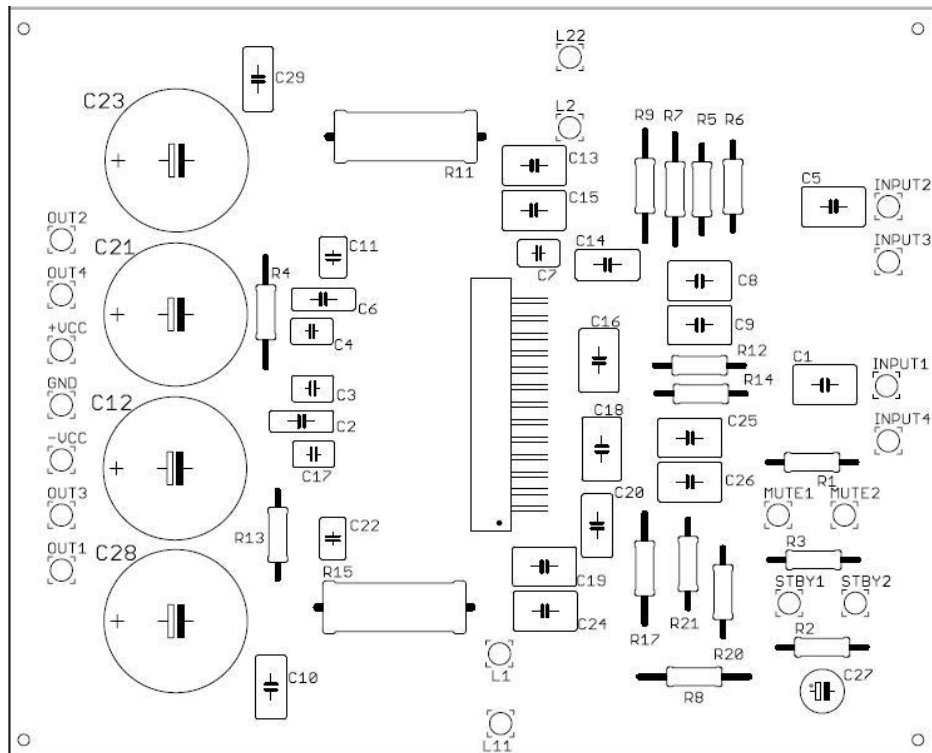
Při osazování je vhodné použít fóliové kondenzátory ve výstupní filtr a na vstupech, ostatní filtrační kondenzátory lze použít keramické či elektrolytické dle doporučení výrobce. Rezistory v signálové části obvodu je možno použít metalizované s výkonovým zatížením zhruba 0,5W, výkonové vrstevné rezistory R5 a R6 je pak vhodné vybrat na zatížení 2W. PADy L1, L11, L2 a L22 slouží pro osazení cívkami. Pro realizaci cívek byly použity jádra od firmy Amidon T-80 (výkonové zatížení 125W) materiál 26 (0-1MHz), 100 závitů na 450 μH . Počet závitů je možno určit ze vztahu udávaným výrobcem

$$z = 100 \cdot \sqrt{\frac{L}{A_L}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{33}{450}} \cong 27, \quad (4.5)$$

kde z je počet závitů, A_z je indukčnost na 100 závitů a L je požadovaná indukčnost.



Obr. 4.15: Předloha desky plošného spoje pro obvod TDA7490L(spodní strana).



Obr. 4.16: Osazovací plán pro plošný spoj obvodu TDA7490L.

4.3.2 Měření TDA7490L

Měření bylo zaměřeno především na ověření parametrů udávaných výrobcem, zejména pak na proměření přenosové charakteristiky a harmonického zkreslení zesilovače.

Použité přístroje:

Stabilizovaný zdroj	Diametral	P230R51D
Generátor funkcí	Agilent	33220
Osciloskop	Tektronix	TDS1012
Nízkofrekvenční milivoltmetr	Grundig	MV100

Jako první byla proměřena frekvenční charakteristika zesilovače. Na vstup bylo přivedeno napětí z generátoru funkcí o velikosti 419 mV (peak to peak), jeho frekvence byla postupně měněna. Na výstupu se sledovalo výstupní napětí a následně vypočítán napěťový přenos.

Výsledná naměřená charakteristika je silně ovlivněna silnějším výstupním filtrem, mezní kmitočty (tedy frekvence při nichž modul poklesne o 3 dB) lze zhruba určit pro frekvenci 17Hz a pro 24kHz. Šířka pásma se tedy rovná zhruba vyššímu meznímu kmitočtu tedy asi 23,9kHz.

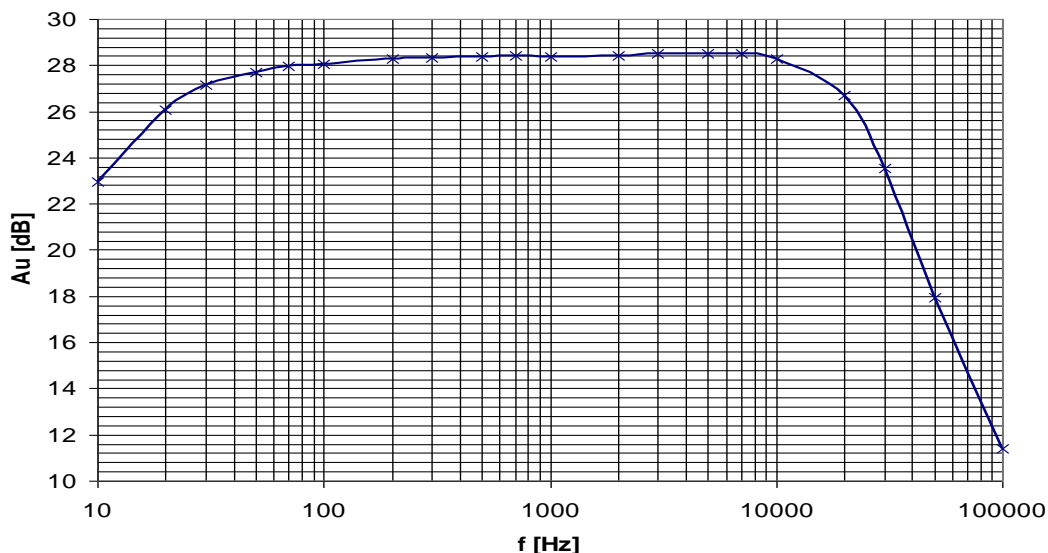
Tab. 4.7: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

f	$U_{2_{p-p}}$	A_U
Hz	V	dB
10	5,88	22,94
20	8,44	26,08
30	9,56	27,16
50	10,19	27,72
70	10,50	27,98
100	10,62	28,08
200	10,87	28,28
300	10,94	28,34
500	11,00	28,38
700	11,06	28,43
1k	11,00	28,38
2k	11,06	28,43
3k	11,13	28,49
5k	11,19	28,53
7k	11,13	28,49
10k	10,87	28,28
20k	9,06	26,70
30k	6,31	23,56
50k	3,31	17,95
100k	1,56	11,42

Vysvětlivky : f - frekvence vstupního harmonického signálu, $U_{2_{p-p}}$ - výstupní napětí (udáno peak to peak), A_U - napěťový přenos v decibelech.

Ukázka výpočtu:

$$A_U = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{2p-p}}{U_{IN(p-p)}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{1,56}{0,419}\right) = 11,42dB ; \quad (4.6)$$



Obr. 4.17: Závislost přenosu napětí na frekvenci vstupního signálu.

Jako další byla proměřena závislost zkreslení na výstupním výkonu zesilovače. Zesilovač byl zatížen čistě ohmickou zátěží 8Ω a na výstup byl připojen nízkofrekvenční selektivní milivoltmetr, tento milivoltmetr měřil jako efektivní hodnotu výstupního napětí tak hodnotu THD+N. Výstupní výkon byl určen dle vzorce 4.7.

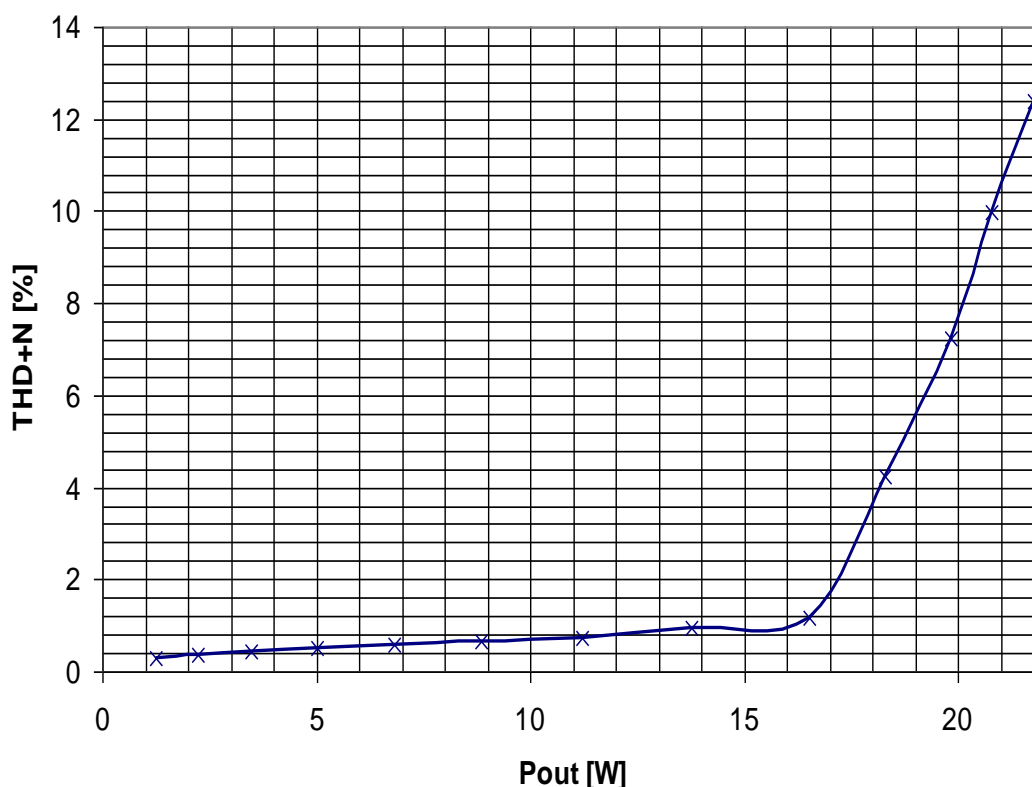
Tab. 4.8: Naměřené a vypočtené hodnoty

LEV	P_{out}	THD+N
V	W	%
3,17	1,26	0,285
4,23	2,24	0,352
5,28	3,49	0,430
6,33	5,01	0,502
7,38	6,81	0,583
8,42	8,86	0,670
9,47	11,21	0,744
10,50	13,78	0,963
11,50	16,53	1,160
12,10	18,30	4,256
12,60	19,85	7,223
12,90	20,80	9,990
13,20	21,78	12,400

Vysvětlivky : LEV – napěťová úroveň na výstupu zesilovače (efektivní hodnota napětí), P_{out} – výstupní výkon, THD+N – úroveň harmonického zkreslení s šumem.

Ukázka výpočtu:

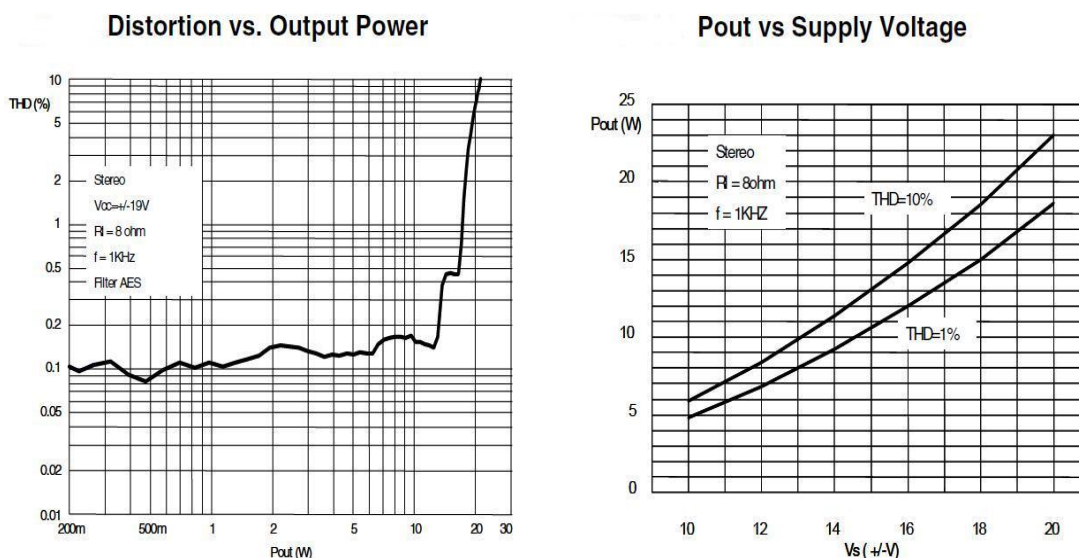
$$P_{out} = \frac{(LEV)^2}{R} = \frac{3,17^2}{8} = 1,26W, \quad (4.7)$$



Obr. 4.18: Závislost harmonického zkreslení s šumem na výstupním výkonu zesilovače.

Z obr.4.15 je vidět, že harmonické zkreslení roste s rostoucím výstupním výkonem. Růst je pozvolný zhruba do 16W výstupního výkonu a po překročení tohoto výkonu, začíná zkreslení rapidně narůstat. Zhruba při výstupním výkonu 20W dosáhne zkreslení 10%. Výrobce udávaná charakteristika (viz. Obr. 4.16) pak tvarově odpovídá změřené, rapidní nárůst harmonického zkreslení nastává také kolem 15 – 16 W, při 20W dosahuje zkreslení 10%. Hodnoty obou charakteristik se pak mírně liší na nižších výkonech což je zejména dáno tím, že výrobce udává parametr THD (úplné harmonické zkreslení), zatímco bylo změřeno THD+N (úplné harmonické zkreslení + šum).

Jako poslední byla naměřena závislost výstupního výkonu na napájecím napětí při určitém zkreslení. Zapojení zůstalo stejné jako v předchozím měření. Po krocích bylo měněno napájecí napětí a napětí z generátoru funkcí, při požadovaném zkreslení bylo odečteno výstupní efektivní napětí.



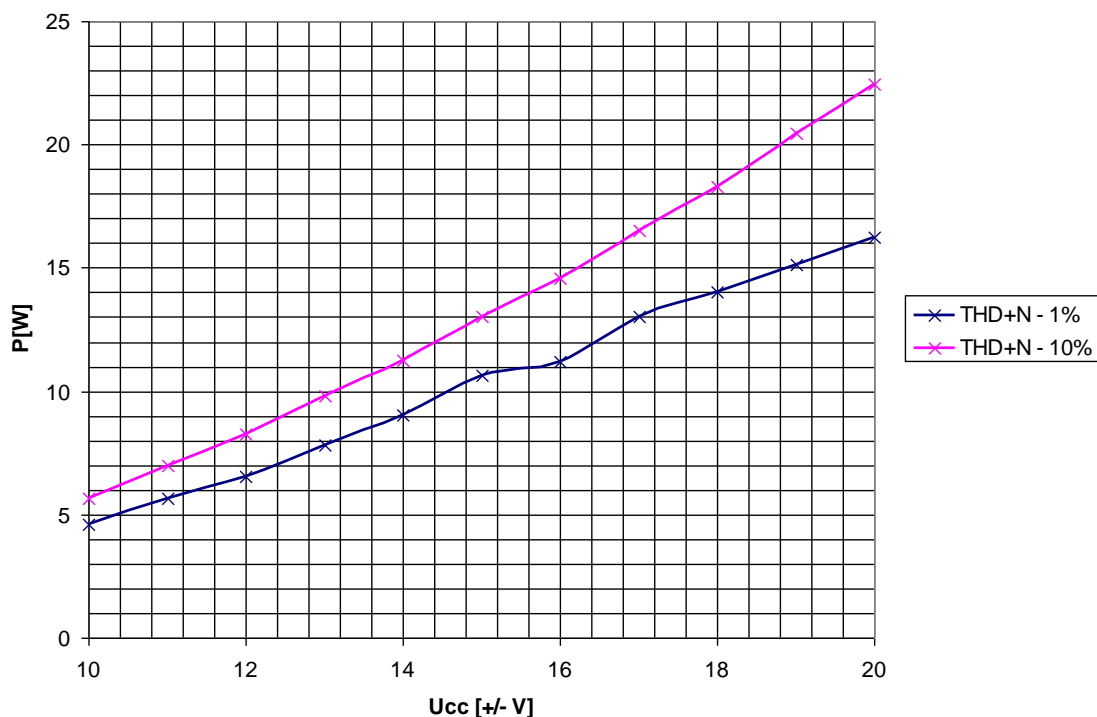
Obr. 4.19: Závislosti udávané výrobcem.

Tab. 4.9: Naměřených a vypočtených hodnot..

U_{CC}	$U_{1\%}$	$P_{1\%}$	$U_{10\%}$	$P_{10\%}$
V	V	W	V	W
±10	6,07	4,61	6,74	5,68
±11	6,74	5,68	7,48	6,99
±12	7,23	6,53	8,13	8,26
±13	7,90	7,80	8,85	9,79
±14	8,50	9,03	9,48	11,23
±15	9,22	10,63	10,2	13,01
±16	9,46	11,19	10,8	14,58
±17	10,20	13,01	11,5	16,53
±18	10,60	14,05	12,1	18,30
±19	11,00	15,13	12,8	20,48
±20	11,40	16,25	13,4	22,45

Vysvětlivky : U_{CC} - hodnota napájecího napětí, $U_{1\%}$ - efektivní napětí na výstupu při THD+N = 1%, $U_{10\%}$ - efektivní napětí na výstupu při THD+N = 10%, $P_{1\%}$ - výstupní výkon při THD+N = 1%, $P_{10\%}$ - výstupní výkon při THD+N = 10%.

Dle obr. 4.17 je patrné, že u zesilovače velmi záleží na velikosti napájecího napětí, neboť při napájení ±10V je již při výstupním výkonu zhruba 6W zkreslení 10%, u napájení ±20V je to až při výkonu 22,5W. Zde se ukazuje jako vhodné zvolit napájecí napětí ±19V pro dosažení nižšího zkreslení na vyšších výkonech. Dále je možné říci, že s vyšším napájecím napětím se zvětšuje rozstup mezi výstupními výkony při zkreslení 1% a při zkreslení 10%. Podobnou tendenci můžeme pozorovat i na charakteristice udávané výrobcem na obr.4.16.



Obr. 4.20: Závislost výstupního výkonu na velikosti napájecího napětí.

Měřením byla také zjištěna účinnost zesilovače pro jeden kanál. Výstup jednoho kanálu byl vybuzen na hranici limitace (výstupní signál má tvar nedeformovaného sinového průběhu) a byla odečtena hodnota výstupního efektivního napětí na 8Ω zátěži a zároveň byla odečtena hodnota napájecího napětí a proudu. Výstupní napětí bylo rovno $12,3\text{V}$, vstupní pak $\pm 19\text{V}$ při proudu $0,641\text{A}$.

Účinnost je tedy rovna:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \frac{\frac{(U_{OUT})^2}{R}}{U_{IN} \cdot I_{IN}} = \frac{(12,3)^2}{(19 - (-19)) \cdot 0,641} = 77,64\% , \quad (4.8)$$

kde P_{OUT} je výstupní výkon, P_{IN} je vstupní výkon, U_{OUT} je výstupní efektivní napětí, U_{IN} je vstupní napájecí napětí, I_{IN} je vstupní proud z napájecího zdroje a R je hodnota odporu na výstupu.

Lze očekávat, že změřená účinnost se zvýší při vybuzení obou kanálů zesilovače. Výrobce pak udává typickou účinnost při vybuzení obou kanálů zhruba 86%.

5 ZÁVĚR

V práci se podařilo naplnit zadání z hlediska návrhu a realizace nízkofrekvenčního řetězce zahrnujícího předzesilovač a zesilovač ve třídě D i s napájením. V úvodní fázi byly uvažovány dvě provedení předzesilovače a to v provedení z diskrétních součástek a v provedení s integrovaným obvodem LM 1036 od firmy National Semiconductors. Jako vhodnější byl zvolen obvod LM 1036. Pro realizaci zesilovače byl vybrán obvod TDA 7490L od firmy STMicroelectronics, jenž je v rámci nabídky jeden z nejvýkonnějších integrovaných zesilovačů ve třídě D. Díky integrovanému provedení obvodů (zesilovače a předzesilovače) lze realizaci provést s minimálním počtem potřebných externích součástek. Pro napájení byl vybrán řídicí obvod TL494 firmy Texas Instruments.

Simulace v programu PSpice vzhledem k dostupnosti modelů pomohli spíše při výběru předzesilovače a při ověření mezního kmitočtu výstupního filtru zesilovače. Program PSpice je tedy nejvhodnější pro simulace obvodů složených z diskrétních součástek.

U realizovaných obvodů byly proměřeny jejich parametry, které odpovídaly parametrům udávaným výrobcí. Případné odchylky, které byly takřka zanedbatelné, lze vysvětlit například nepřesností hodnot jednotlivých součástek či ne zcela stejnými podmínkami při měření.

Realizovaný zesilovač je jednoduchý na zapojení, nevyžaduje mnoho externích součástek a oplývá dobrými audio parametry. Použitý předzesilovač umožňuje ovládání požadovaných kmitočtových korekcí při současně jednoduchosti zapojení. Napájecí zdroj dosahuje účinnosti zhruba 60%, otázkou tedy může být zda-li by nebylo vhodnější použít účinnějšího napájecího zdroje pro celkové zvýšení účinnosti zapojení.

LITERATURA

- [1] BD244C – Datasheet, MOTOROLA, 1995 (dostupné na:
http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/211/211-022/dsh.211-022.1.pdf).
- [2] BD912 – Datasheet, STMicroelectronics, 1999 (dostupné na:
http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/211/211-125/dsh.211-125.1.pdf).
- [3] LM 1036 – Datasheet, National Semiconductors Corporation, 2008 (dostupné na:
<http://www.national.com/ds/LM/LM1036.pdf>).
- [4] LM2904 – Datasheet, STMicroelectronics, 2005 (dostupné na:
http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/310/310-008/dsh.310-008.1.pdf).
- [5] MBR745 – Datasheet, ONSemiconductor, 2000 (dostupné na:
<http://www.ges.cz/sheets/m/mbr745.pdf>).
- [6] MBR1060, Datasheet ONSemiconductor, 2000 (dostupné na:
<http://www.ges.cz/sheets/m/mbr1060.pdf>).
- [7] Přednáška BNEZ č.8, BNEZ_P8.ppt, Doc. Ing. Jiří Šebesta, PhD., FEKT VUT Brno, 2007.
- [8] Přednáška BNFE č.4, bnfe_prednaska_4.pdf, Doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, PhD., FEKT VUT Brno, 2008.
- [9] Přednáška BNFE č.6, bnfe_prednaska_6.pdf, Doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, PhD., FEKT VUT Brno, 2008.
- [10] Štál, Petr. Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D, Technická literatura BEN, Praha 2008.
- [11] TDA 7490L – Datasheet, STMicroelectronics, 2005 (dostupné na:
<http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/7647.pdf>).
- [12] TL 494 – Application Report, Texas Instruments Incorporated, 2005 (dostupné na:
<http://focus.ti.com/lit/an/slva001/slva001.pdf>).
- [13] TL 494 – Datasheet, Texas Instruments Incorporated, 2009 (dostupné na:
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf>).
- [14] 7815 – Datasheet, STMicroelectronics, 2004 (dostupné na:
http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/330/330-005/dsh.330-005.1.pdf).

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

a_b	Konstanta nabývající hodnot 0 – 1
A_L	Indukčnost na 100 závitů
a_t	Konstanta nabývající hodnot 0 – 1
A_U	Napět'ový přenos v decibelech
C	Hodnota kapacity kondenzátoru
f_{osc}	Frekvence oscilátoru
f_{sw}	Frekvence spínání
h_{FE}	Proudový zesilovací činitel
I	Proud
i_B	Proud v bázi tranzistoru
I_O	Výstupní proud
ΔI_L	Proudové zvlnění
J	Proudová hustota
K_U	Napět'ový přenos
L	Hodnota indukčnosti cívky
P	Výkon
P_{IN}	Vstupní výkon
P_{out}	Výstupní výkon
R	Hodnota elektrického odporu rezistoru
$T_{max} B_{max}$	Nastavení výšek a basů na maximální zvýraznění
$T_{max} B_{min}$	Nastavení výšek na maximální a hloubek na minimální zvýraznění
$T_{min} B_{max}$	Nastavení výšek na minimální a hloubek na maximální zvýraznění
$T_{min} B_{min}$	Nastavení výšek a basů na maximální potlačení
U	Napětí
U_{BE}	Napětí mezi báží a editorem
U_{CC}	Hodnota napájecího napětí

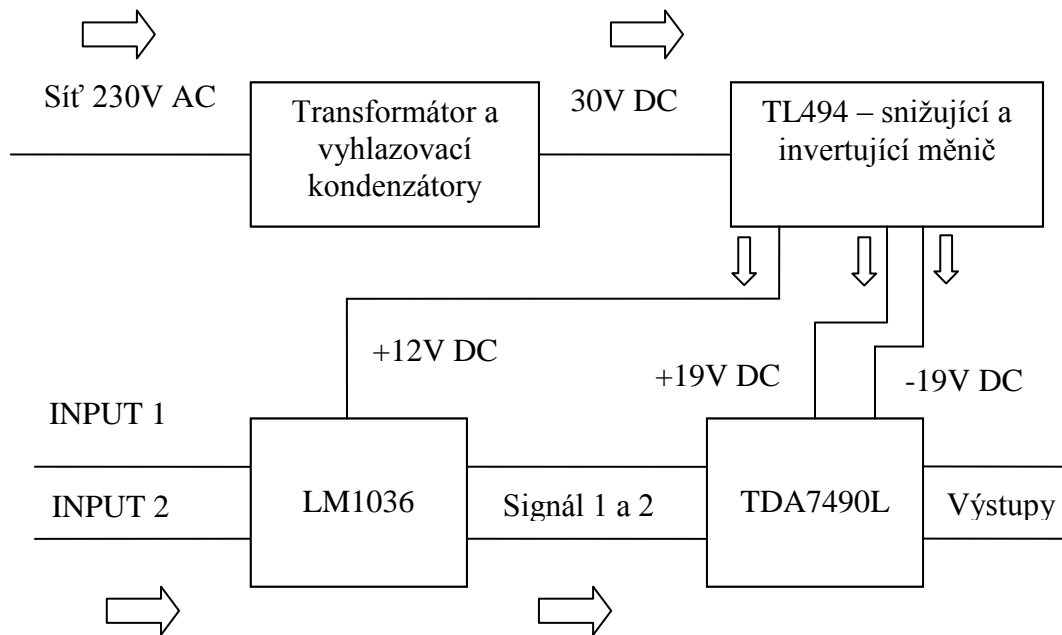
U_{CE}	Napětí mezi kolektorem a emitorem
U_I	Vstupní napětí
U_{IN}	Vstupní napětí
U_o	Výstupní napětí
U_{OUT}	Výstupní napětí
U_{p-p}	Napětí špička – špička
ΔU	Napěťový úbytek
ΔU_o	Napěťové zvlnění
V_{CC}	Napájecí napětí
ω	Kmitočet
z	Počet závitů
ESR	Equivalent Series Resistance, sériový odpor kondenzátoru
PWM	Pulse Width Modulation, pulsně šířková modulace
THD	Total Harmonic Distortion, harmonické zkreslení
THD+N	Total Harmonic Distortion plus Noise, harmonické zkreslení plus šum

SEZNAM PŘÍLOH

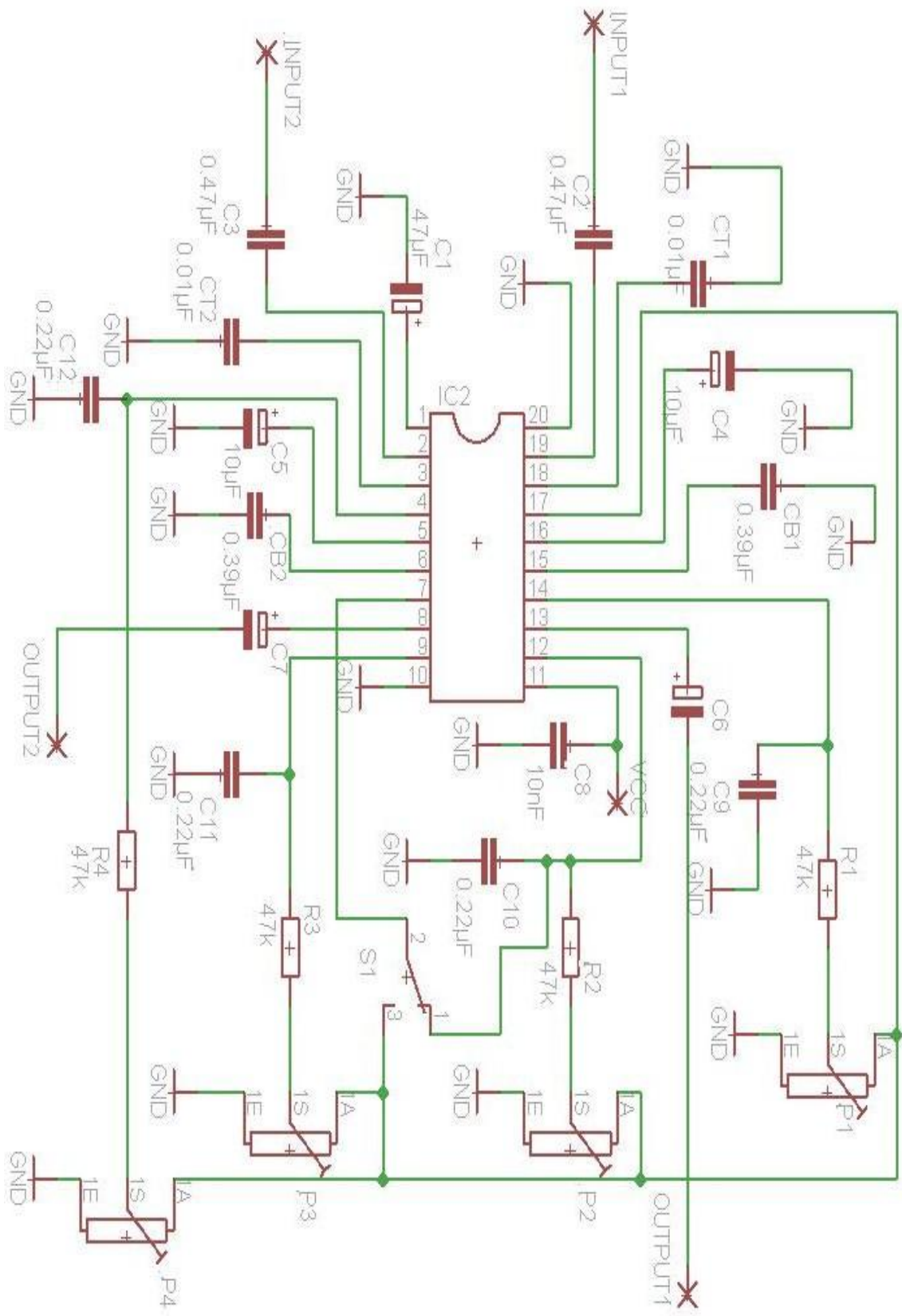
A	Návrh zařízení	44
A.1	Blokové schéma obvodového zapojení.....	44
A.2	Obvodové zapojení LM 1036	45
A.3	Obvodové zapojení TDA 7490L.....	46
A.4	Obvodové zapojení TL 494	47
B	Realizace zařízení	48
B.1	Předloha pro výrobu spodní a vrchní strany desky plošného spoje pro zapojení s obvodem TDA7490L(1:1)	48
B.2	Osazovací plán pro desku plošného spoje s obvodem TDA7490L	49
B.3	Předloha pro výrobu desky plošného spoje pro zapojení s obvody TL494(1:1)	49
B.4	Osazovací plán pro desku plošného spoje s obvody TL494(vrchní a spodní strana).....	50
B.5	Předloha pro výrobu desky plošného spoje pro zapojení s obvodem LM1036(1:1).....	51
B.6	Osazovací plán pro desku plošného spoje s obvodem LM1036.....	51
C	Seznam součástek	52
D	Fotografie	56

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

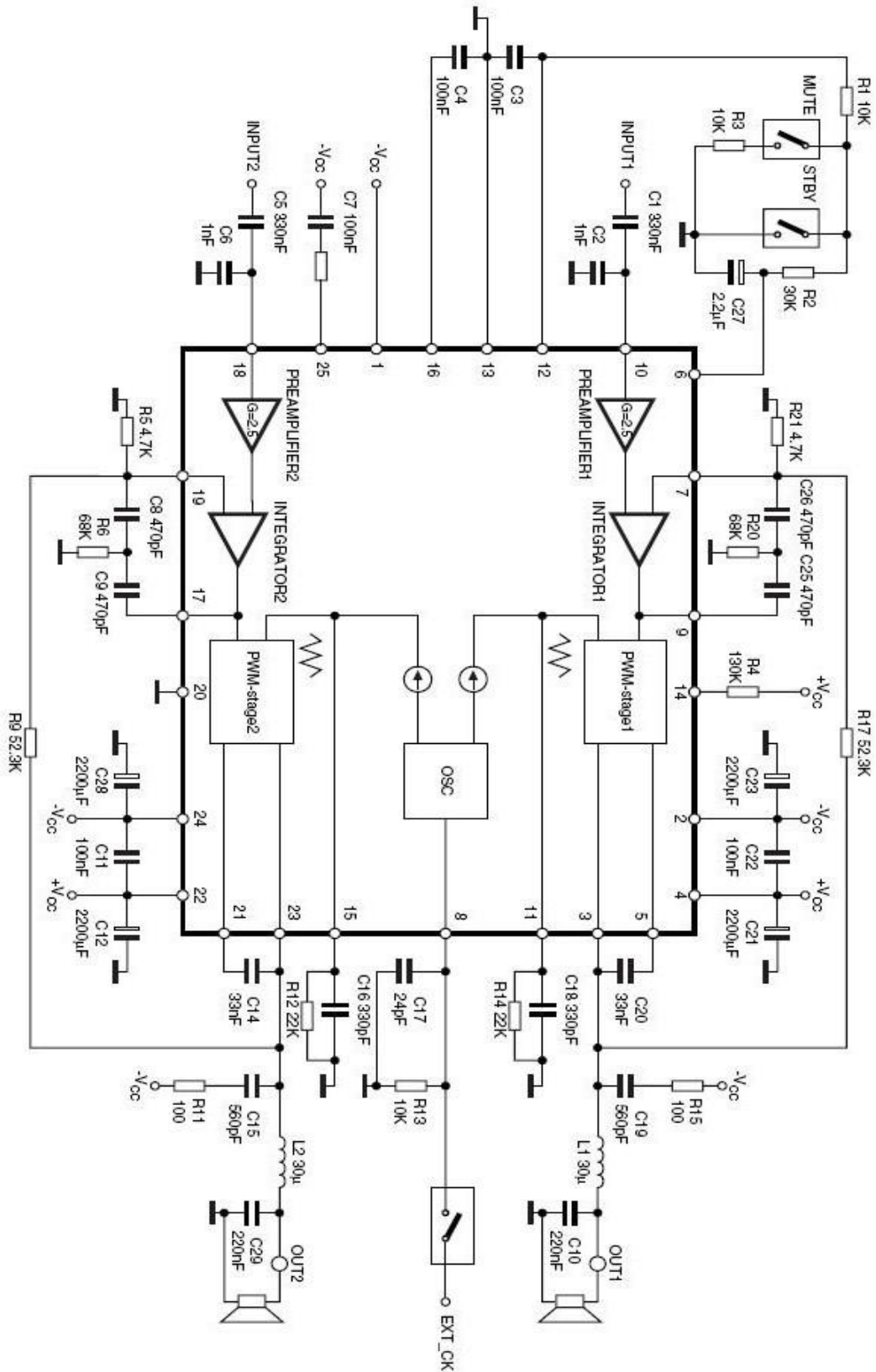
A.1 Blokové schéma obvodového zapojení



A.2 Obvodové zapojení LM 1036

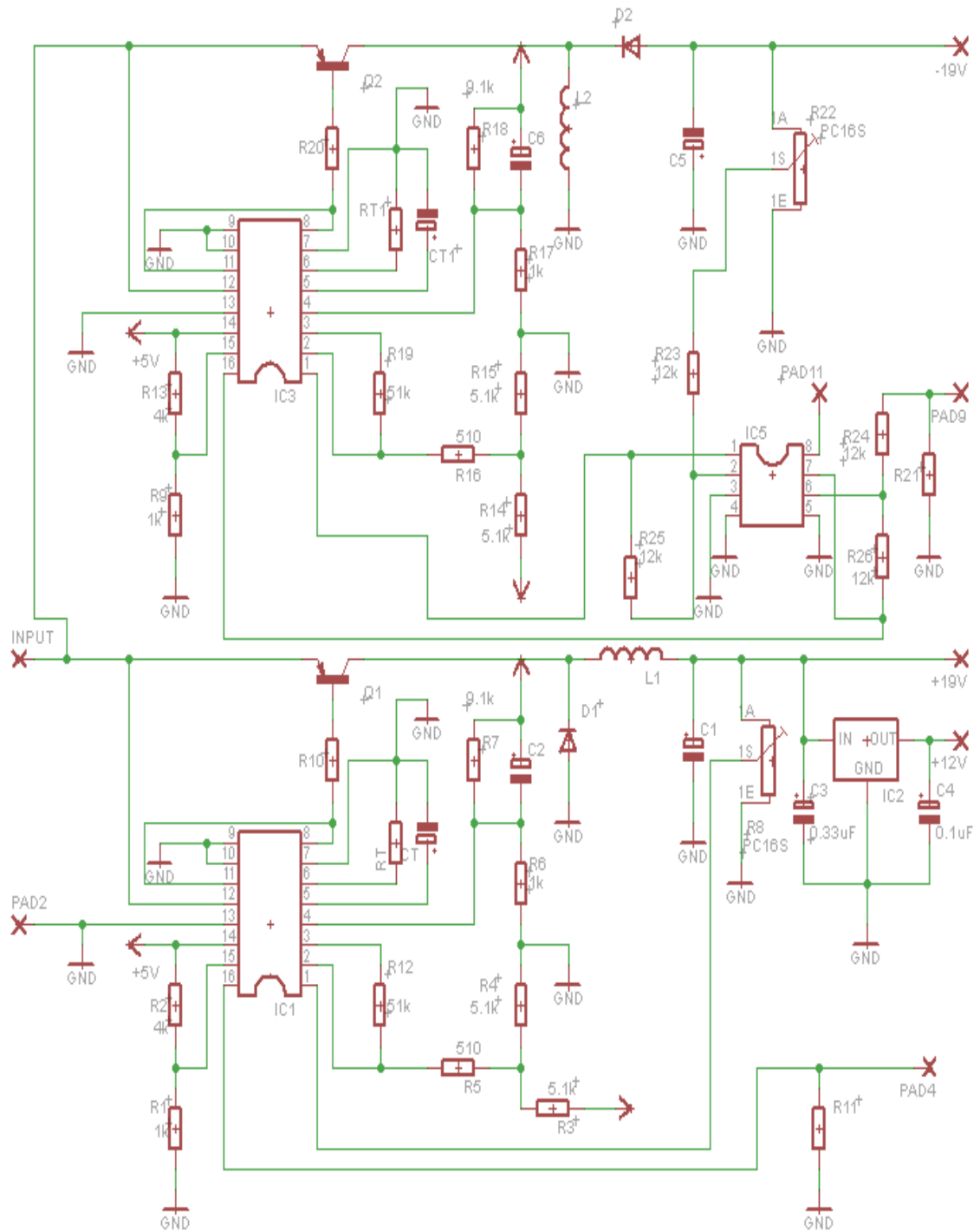


A.3 Obvodové zapojení TDA 7490L



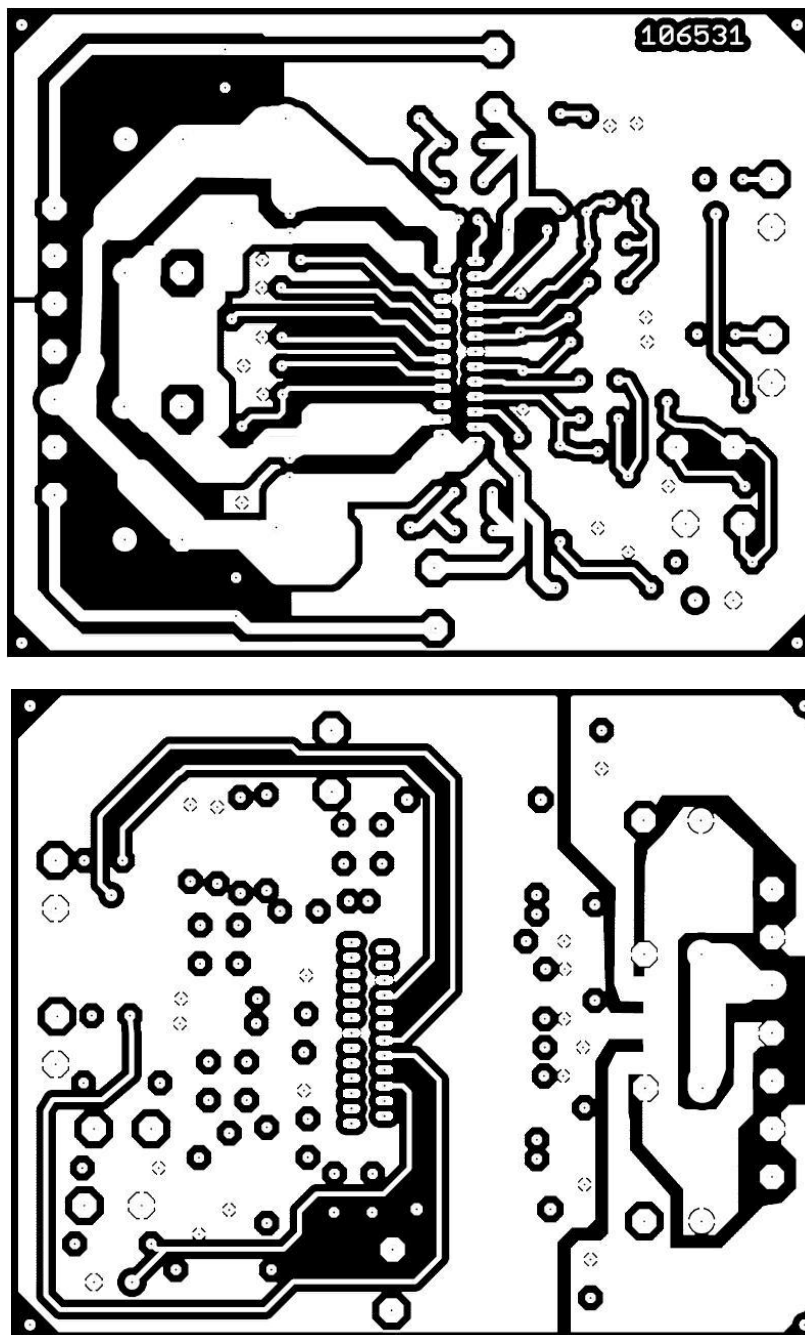
Převzato z [11]

A.4 Obvodové zapojení TL 494

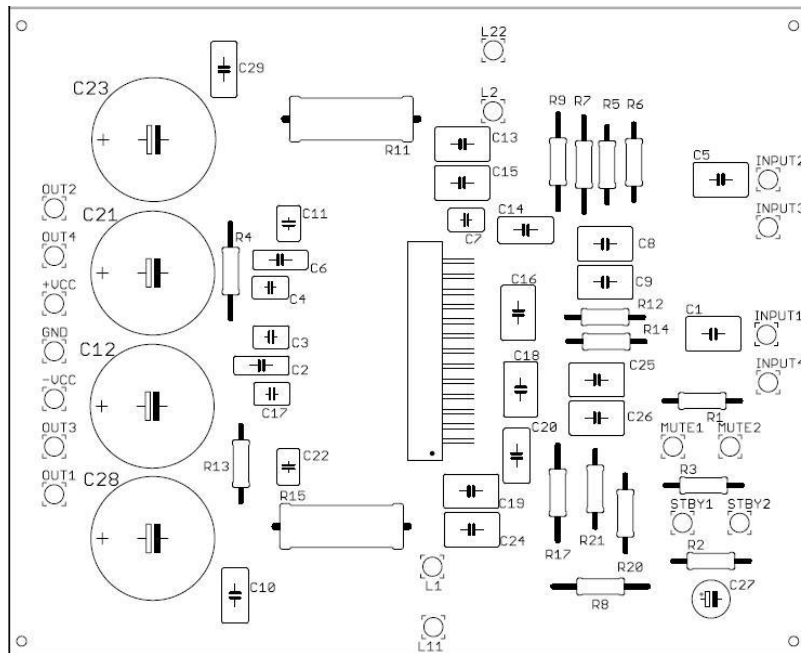


B REALIZACE ZAŘÍZENÍ

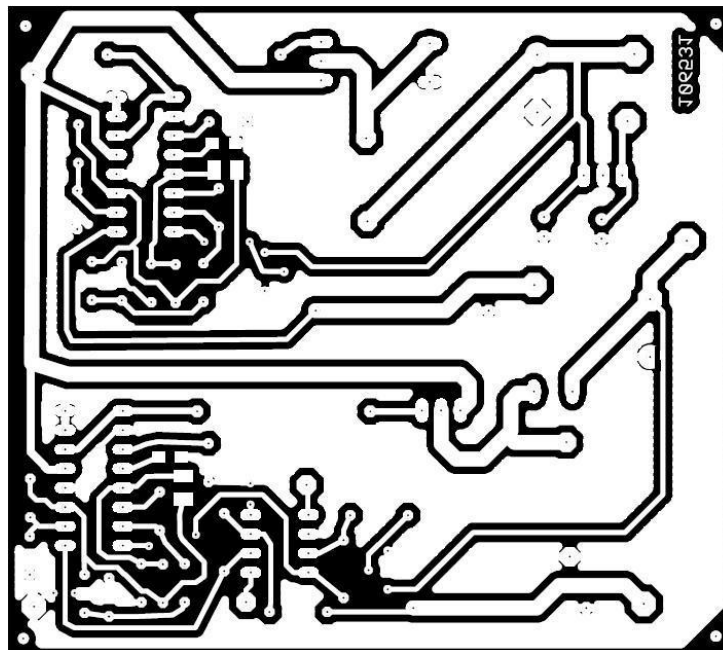
B.1 Předloha pro výrobu spodní a vrchní strany desky plošného spoje pro zapojení s obvodem TDA7490L(1:1)



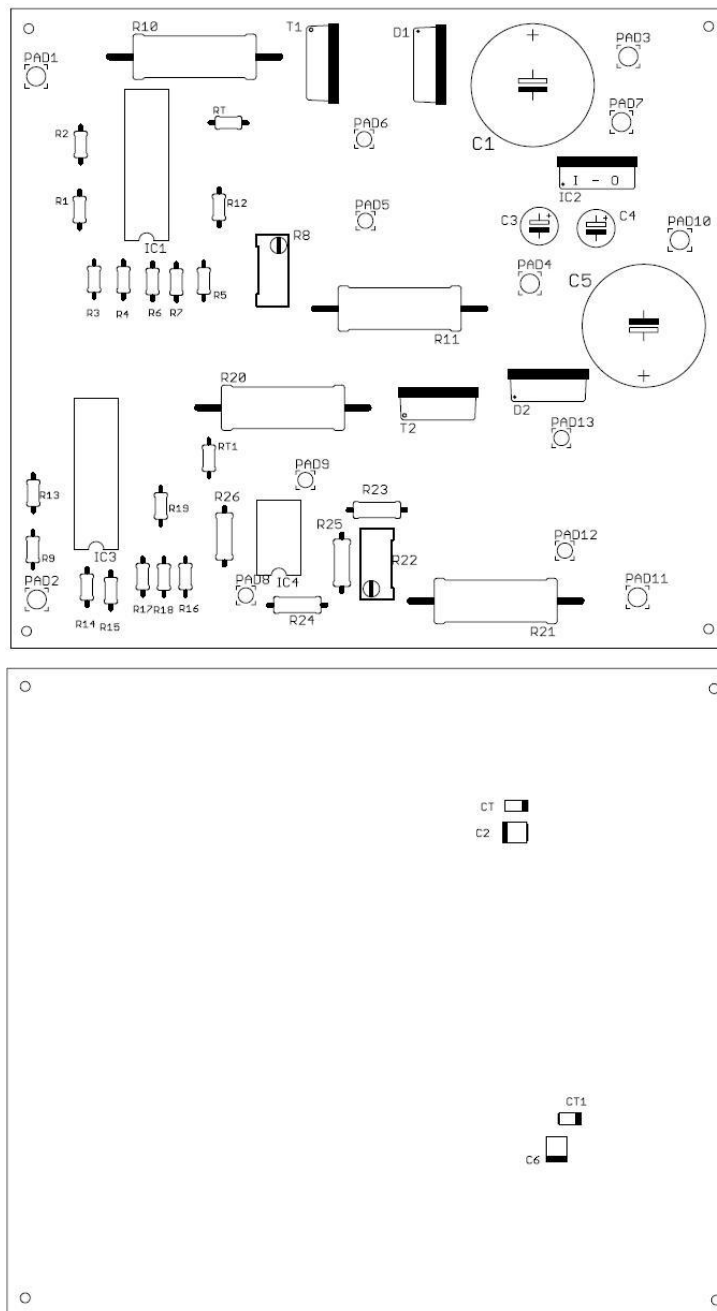
B.2 Osazovací plán pro desku plošného spoje s obvodem TDA7490L



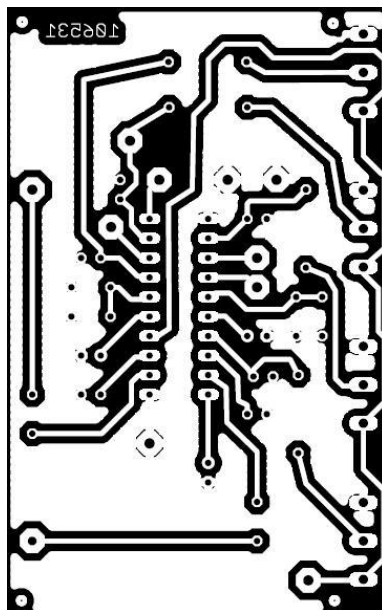
B.3 Předloha pro výrobu desky plošného spoje pro zapojení s obvody TL494(1:1)



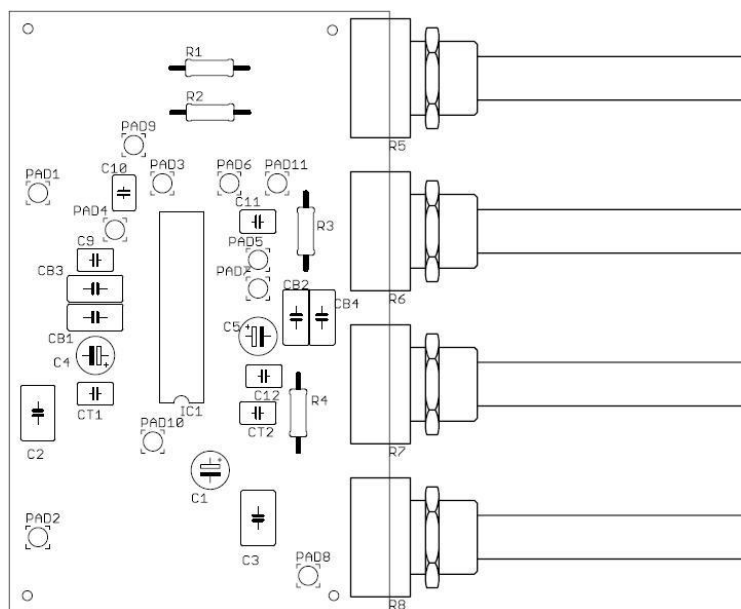
B.4 Osazovací plán pro desku plošného spoje s obvody TL494(vrchní a spodní strana)



B.5 Předloha pro výrobu desky plošného spoje pro zapojení s obvodem LM1036(1:1)



B.6 Osazovací plán pro desku plošného spoje s obvodem LM1036



C SEZNAM SOUČÁSTEK

Součástky pro osazení desky plošného spoje s obvodem TDA7490L:

Označení součástky	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
C1	330nF	C050-045X075	Fóliový kondenzátor
C2	1nF	C050-025X075	Fóliový kondenzátor
C3	100nF	C025-030X050	Keramický kondenzátor
C4	100nF	C025-030X050	Keramický kondenzátor
C5	330nF	C050-045X075	Fóliový kondenzátor
C6	1nF	C050-025X075	Fóliový kondenzátor
C7	100nF	C025-030X050	Keramický kondenzátor
C8	470pF	C050-045X075	Svitkový kondenzátor
C9	470pF	C050-045X075	Svitkový kondenzátor
C10	220nF	C050-035X075	Fóliový kondenzátor
C11	100nF	C025-030X050	Keramický kondenzátor
C12	2,2mF	E7,5-16	Elektrolytický kondenzátor
C13	220pF	C050-045X075	Svitkový kondenzátor
C14	33nF	C050-035X075	Fóliový kondenzátor
C15	330pF	C050-045X075	Svitkový kondenzátor
C16	330pF	C050-045X075	Svitkový kondenzátor
C17	24pF	C025-030X050	Keramický kondenzátor
C18	330pF	C050-045X075	Svitkový kondenzátor
C19	330pF	C050-045X075	Svitkový kondenzátor
C20	33nF	C050-035X075	Fóliový kondenzátor
C21	2,2mF	E7,5-16	Elektrolytický kondenzátor
C22	100nF	C025-030X050	Keramický kondenzátor
C23	2,2mF	E7,5-16	Elektrolytický kondenzátor
C24	220pF	C050-045X075	Svitkový kondenzátor
C25	470pF	C050-045X075	Svitkový kondenzátor
C26	470pF	C050-045X075	Svitkový kondenzátor
C27	2,2 μ F	E5-5	Elektrolytický kondenzátor
C28	2,2mF	E7,5-16	Elektrolytický kondenzátor
C29	220nF	C050-035X075	Fóliový kondenzátor
IC	TDA7490L	Flexiwatt25	

L1,L11	33 μ H		Železoprachové jádro
L2,L22	33 μ H		Železoprachové jádro
R1	10k Ω	0207/10	
R2	30k Ω	0207/10	
R3	10k Ω	0207/10	
R4	130k Ω	0207/10	
R5	4,7k Ω	0207/10	
R6	68k Ω	0207/10	
R7	1,2k Ω	0207/10	
R8	1,2k Ω	0207/10	
R9	50k Ω	0207/10	
R11	100 Ω	0617/17	Výkonový rezistor 2W
R12	22k Ω	0207/10	
R13	10k Ω	0207/10	
R14	22k Ω	0207/10	
R15	100 Ω	0617/17	Výkonový rezistor 2W
R17	50k Ω	0207/10	
R20	68k Ω	0207/10	
R21	4,7k Ω	0207/10	

Součástky pro osazení desky plošného spoje pro usměrnění a vyhlazení napájení:

Označení součástky	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
B1	KBPC1006W	GBPC1	
C1	10mF	EB25D	Elektrolytický kondenzátor
C2	10mF	EB25D	Elektrolytický kondenzátor
C3	2,2mF	EB22,5D	Elektrolytický kondenzátor

Součástky pro osazení desky plošného spoje s obvodem TL494:

Označení součástky	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
C1	1mF	E7,5-16	Elektrolytický kondenzátor
C2	680nF	SMC_B	Tantalový kondenzátor
C3	330nF	E2,5-5	Elektrolytický kondenzátor
C4	100nF	E2,5-5	Elektrolytický kondenzátor
C5	2,2mF	E7,5-16	Elektrolytický kondenzátor

C6	680nF	SMC_B	Tantalový kondenzátor
CT	100nF	SMC_A	Tantalový kondenzátor
CT1	100nF	SMC_A	Tantalový kondenzátor
D1	MBR745	DO220S	
D2	MBR1060	DO220S	
IC1	TL494	DIL16	
IC2	7812	78XXS	
IC3	TL494	DIL16	
IC4	LM2904	DIL08	
R1	1k Ω	0204/5	
R2	3,9k Ω	0204/5	
R3	5,6k Ω	0204/5	
R4	5,6k Ω	0204/5	
R5	510 Ω	0204/5	
R6	1k Ω	0204/5	
R7	47k Ω	0204/5	
R8	20k Ω	RTRIM64Y	Trimr
R9	1k Ω	0204/5	
R10	820 Ω	0617/22	Výkonový rezistor 2W
R11	0,47 Ω	0617/22	Výkonový rezistor 2W
R12	9,1k Ω	0204/5	
R13	3,9k Ω	0204/5	
R14	5,6k Ω	0204/5	
R15	5,6k Ω	0204/5	
R16	510 Ω	0204/5	
R17	1k Ω	0204/5	
R18	47k Ω	0204/5	
R19	9,1k Ω	0204/5	
R20	270 Ω	0617/22	Výkonový rezistor 2W
R21	0,47 Ω	0617/22	Výkonový rezistor 2W
R22	20k Ω	RTRIM64Y	Trimr
R23	12k Ω	0207/7	
R24	12k Ω	0207/7	
R25	12k Ω	0207/7	

R26	12k Ω	0207/7
RT	120 Ω	0204/5
RT1	120 Ω	0204/5
T1	BD244C	TO220V
T2	BD912	TO220V

Součástky pro osazení desky plošného spoje s obvodem LM1036:

Označení součástky	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
C1	47 μ F	E2,5-5	Elektrolytický kondenzátor
C2	470nF	C050-045X075	Fóliový kondenzátor
C3	470nF	C050-045X075	Fóliový kondenzátor
C4	10 μ F	E2,5-5	Elektrolytický kondenzátor
C5	10 μ F	E2,5-5	Elektrolytický kondenzátor
C9	220 μ F	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C10	220nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C11	220nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
C12	220nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
CB1	330nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
CB2	330nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
CB3	68nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
CB4	68nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
CT1	10nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
CT2	10nF	C050-045X075	Keramický kondenzátor
IC1	LM1036	DIL20	
R1	47k Ω	0207/10	
R2	47k Ω	0207/10	
R3	47k Ω	0207/10	
R4	47k Ω	0207/10	
R5	50k Ω	PC16S	Potenciometr
R6	50k Ω	PC16S	Potenciometr
R7	50k Ω	PC16S	Potenciometr
R8	50k Ω	PC16S	Potenciometr

D FOTOGRAFIE



