

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Návrh a realizace výkonového spínaného zesilovače
pro aktivní subwoofer**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan DOBŠÍČEK**
Osobní číslo: **E15B0089P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Návrh a realizace výkonového spínaného zesilovače pro aktivní subwoofer**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Stanovte požadavky (technické parametry) kladené na zesilovač určený pro buzení reproduktoru aktivního subwooferu s ohledem na jeho definovanou aplikaci/využití.
2. Proveďte rešerši a porovnání technických parametrů monolitických integrovaných spínaných výkonových zesilovačů nebo budičů koncových stupňů pro aplikace s výkonem nad 100W.
3. Navrhněte nejvhodnější technické řešení spínaného výkonového zesilovače tak, aby splňoval požadavky definované v bodě 1) a tento zesilovač zrealizujte.
4. Nastudujte metodiku měření n_f výkonových zesilovačů, navrhněte měřicí postup a proveďte měření technických parametrů zesilovače, případně navrhněte a zrealizujte jeho další úpravy.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Stifter, Ph.D.**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammarbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma

„Návrh a realizace výkonového spínaného zesilovače pro aktivní subwoofer“

Vypracoval samostatně pod odborným dohledem vedoucího bakalářské práce za použití pramenů uvedených v příložené biografii.

V Plzni, dne

.....

podpis autora

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na řešení a porovnání integrovaných spínaných výkonových zesilovačů nebo budičů s výkonem nad 100 W a následná realizace modulu zesilovače. V úvodu této práce jsou uvedeny požadavky na zesilovač a vybrané základní technické parametry pro následné ověření měření. Následuje návrh a realizace nejvhodnějšího technického řešení pro výkonový modul zesilovače, určený pro aktivní subwoofer, s ohledem na vybrané kritéria stanovené v úvodní kapitole této práce. V samotném závěru jsou provedena měření parametrů zesilovače a ověření splnění výše uvedených požadavků.

Klíčová slova:

Subwoofer, integrovaný výkonový zesilovač, budič, parametry zesilovače, napájecí napětí, výkon, výkonové ztráty

Abstract

This bachelor thesis is focused on the search and comparison of integrated switching power amplifiers or drivers with power over the 100 W and realization of the amplifier module. At the beginning of this work are presented requirements for amplifier and selected basic technical parameters for verification by measurement. Following is the design and realization of the most appropriate technical solution for the amplifier power module designed for the active subwoofer, taking into account the selected criterias set out in the introductory chapter of this thesis. At the end are performed measurements of the amplifier parameters and verification of compliance with these requirements.

Key words:

Subwoofer, integrated power amplifier, driver, amplifier parameters, power supply, power, power losses

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	v
Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Úvod	1
1. Požadavky na modul zesilovače	2
1.1. Základní parametry zesilovače	4
1.1.1. Jmenovitý výstupní výkon	4
1.1.2. Činitel harmonického zkreslení se šumem, THD+N	5
1.1.3. Frekvenční šířka pásma	6
2. Rešerše a porovnání monolitických výkonových zesilovačů ve třídě D	7
2.1. Základní rozdělení monolitických zesilovačů	7
2.2. Monolitické zesilovače třídy D s výkonem nad 100W	9
2.2.1. Monolitické zesilovače třídy D firmy Texas Instruments	9
2.2.2. Monolitické zesilovače třídy D firmy Infineon	11
2.2.3. Monolitické zesilovače třídy D firmy STMicroelectronics	13
2.2.4. Monolitické zesilovače třídy D firmy NXP Semiconductor	14
2.3. Výběr vhodného zesilovače nebo budiče s ohledem na určené požadavky	15
3. Návrh technického řešení spínaného výkonového zesilovače	17
3.1. Návrh výkonového zesilovače	18
3.1.1. Zapojení koncových tranzistorů	18
3.1.2. Napěťové zesílení	19
3.1.3. Nastavení deadtime	19
3.1.4. Nadproudová ochrana	20
3.1.5. Ztrátový výkon	20
3.1.6. Výpočet chlazení	23

4. Měření parametrů zesilovače	24
4.1. Měření modulové frekvenční charakteristiky	25
4.2. Měření zesílení	26
4.3. Měření maximálního výkonu	27
Závěr	28
Seznam použité literatury	30
Přílohy.....	31
A. Desky plošných spojů	31
B. Rozvržení osazení součástek	32
C. Schéma zapojení	33
D. Zrealizovaný zesilovač třídy D	34

Seznam použitých symbolů a zkratk

THD+N [%]	Celkové harmonické zkreslení se šumem
PWM	Pulzně šířková modulace
$L_{P(2m)}$ [dB]	Akustický tlak ve vzdálenosti dvou metrů
S_R [dB]	Citlivost reproduktoru
P [W]	Požadovaný výkon
P_{ref} [W]	Referenční hodnota k výkonu
l [m]	Vzdálenost od subwooferu
l_{ref} [m]	Referenční hodnota ke vzdálenosti
P_p [W]	Požadovaný výkon zesilovače pro akustický tlak 100 dB
P_{cp} [W]	Celkový požadovaný výkon zesilovače
P_{OUT} [W]	Jmenovitý výstupní výkon
U_{OUT} [V]	Výstupní efektivní napětí zesilovače
R_Z [Ω]	Jmenovitá zatěžovací impedance
k [%]	Činitel harmonického zkreslení
f_1 [Hz]	Dolní mezní kmitočet
f_2 [Hz]	Horní mezní kmitočet.
B [Hz]	Frekvenční šířka pásma
A_u [dB]	Napěťové zesílení
$P_{vedením}$ [W]	Statické ztráty spojené s trvalým průchodem proudu
$R_{DS(ON)}$ [Ω]	Odpor mezi elektrodami „drain“ a „source“
I_{Def} [A]	Efektivní hodnota proudu tekoucího skrze svorku „drain“
$P_{spínací-celkové}$ [W]	Dynamické ztráty neboli celkové spínací ztráty
P_{gate} [W]	Ztráty na hradle „gate“ tranzistoru

P_{MOSFET} [W]	Celkový ztrátový výkon na tranzistoru
U_{pwr} [V]	Maximální hodnota napětí na tranzistoru
I_{D} [V]	Maximální hodnota proudu, tekoucího elektrodou „drain“ tranzistoru MOSFET, v sepnutém stavu po ústálení
t_{r} [s]	Doba náběhu tranzistoru MOSFET
t_{f} [s]	Doba doběhu tranzistoru MOSFET
C_{oss} [F]	Výstupní kapacita MOSFET tranzistoru
Q_{rr} [C]	Komutační náboj integrované diody tranzistorů MOSFET
T_{j} [°C]	Teplota přechodu
T_{a} [°C]	Teplota okolí
R_{jc} [°C/W]	Tepelný odpor přechod-pouzdro
R_{cs} [°C/W]	Tepelný odpor pouzdro-chladič
R_{sa} [°C/W]	Tepelný odpor chladič-okolí
U_2 [V]	Výstupní napětí
U_1 [V]	Vstupní napětí

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Reálný pohled na pasivní subwoofer	2
Obr. 2.1: Principiální blokové schéma výkonového audio zesilovače pracujícího ve třídě D (převzato a upraveno z [1])	7
Obr. 3.1: Funkční blokové schéma budiče IRS2092 (převzato z [3])	17
Obr. 3.2: Schéma zapojení koncového stupně do polovičního mostu [1]	19
Obr. 4.1: Modulová frekvenční charakteristika zesilovače třídy D	25
Obr. 4.2: Výstupní signál při měření zesílení	26
Obr. A.1: Horní vrstva (pohled ze strany součástek)	31
Obr. A.2: Spodní vrstva (pohled ze strany spojů).....	31
Obr. B.1: Rozvržení součástek na DPS zesilovače třídy D.....	32
Obr. C.1: Schéma zapojení zesilovače IRS2092.....	33
Obr. D.1: Reálný pohled na chladič zesilovače	34
Obr. D.2: Reálný pohled na zesilovač ze strany součástek.....	34
Obr. D.3: Reálný pohled na zesilovač ze spodní strany spojů	35

Seznam tabulek

Tab. 1.1: Parametry subwooferu	3
Tab. 2.1: Zesilovače třídy D firmy Texas Instruments	10
Tab. 2.2: Zesilovače třídy D firmy Texas Instruments	11
Tab. 2.3: Zesilovače třídy D firmy Infineon	12
Tab. 2.4: Budiče třídy D firmy Infineon	13
Tab. 2.5: Zesilovače třídy D firmy STMicroelectronics	13
Tab. 2.6: Zesilovače třídy D firmy NXP Semiconductor	14
Tab. 2.7: Porovnání zesilovačů TAS5630B a TPA3255	15
Tab. 2.8: Porovnání zesilovačů TDA8950, TDA8953J a TDA8954J	16
Tab. 3.1: Základní parametry obvodu IRS2092	18
Tab. 3.2: Hodnoty rezistorů pro nastavení deadtime [převzato z [5]]	20
Tab. 4.1: Vypočítané hodnoty zesílení modulové frekvenční charakteristiky	25

Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na rešerši a porovnání technických parametrů monolitických výkonových zesilovačů nebo budičů pracujících ve třídě D. Rešerše je zaměřena na zesilovače s výstupním výkonem nad 100 W. V první kapitole jsou řešeny požadavky na zesilovač s ohledem na jeho využití. Následuje přehled základních parametrů, které je potřeba brát v úvahu při jeho realizaci. V následující kapitole je uveden přehled dostupných monolitických obvodů v současnosti na trhu, jejich cenová relace a výsledné porovnání mezi jednotlivými výrobci. V kapitole 3 je popsán návrh a realizace nejvhodnějšího řešení modulu podle našich požadavků pro zesilovač. V závěru této práce se zaměřujeme na měření parametrů výsledného modulu, ověření splnění požadavků uvedené v kapitole 1 a případně jeho další úpravy. Tato bakalářská práce vznikla za účelem získání zkušeností při návrhu a realizaci zesilovače třídy D.

1. Požadavky na modul zesilovače

Zesilovač je určen pro aktivní subwoofer k domácímu poslechu. Pro domácí poslech požadujeme:

- Výstupní výkon zesilovače 150 W do zátěže 8 ohmů
- Při tomto výkonu zkreslení nepřevyšující 1% THD+N
- Jednokanálový zesilovač
- Tichý chod zesilovače (bez přídavného aktivního chlazení)

Při uvážení nižších zkušeností se stavbou zesilovače a menším výběru součástek na českém trhu, pro tento typ zesilovače kladu také požadavky na:

- Dostupnost součástek na trhu
- Jednoduchost výsledného zapojení zesilovače

Jak je již výše zmíněno, modul zesilovače bude připojen pro domácí poslech především moderní elektrické hudby, implementován do subwooferu. Frekvenční rozsah subwooferu je 35 – 3000 Hz. Maximální výkon subwooferu výrobce udává 200 W při 8 ohmech. Citlivost reproduktoru ve vzdálenosti jednoho metru je 88 dB. Subwoofer je vyobrazen na obrázku (obr. 1.1). Jeho kompletní parametry můžeme najít v tabulce (tab. 1.1).



Obr. 1.1: Reálný pohled na pasivní subwoofer

Impedance	8 Ω
Frekvenční rozsah	35Hz-3kHz
Nominální příkon	100 W
Maximální příkon	200 W
Citlivost	88dB±2dB(1m/2V)

Tab. 1.1: Parametry subwooferu

Pro poslech, zejména při filmech jsem si stanovil akustický tlak ve vzdálenosti 2 metrů od PC na 100 dB. Pro tuto úroveň akustického tlaku je nutné dodat určitý výkon. Ten vypočteme ze vztahu:

$$L_{P(2m)} = S_R + 10 \cdot \log \frac{P}{P_{ref}} - 20 \cdot \log \left(\frac{l}{l_{ref}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.1)$$

Kde: $L_{P(2m)}$... je požadovaný akustický tlak ve vzdálenosti dvou metrů,

S_R ... je citlivost reproduktoru,

P ... je požadovaný výkon,

P_{ref} ... je referenční hodnota k výkonu,

l ... je vzdálenost od subwooferu,

l_{ref} ... značí referenční hodnotu ke vzdálenosti.

Po dosazení dostaneme:

$$100 = 88 + 10 \cdot \log \frac{P}{1} - 20 \cdot \log \left(\frac{2}{1} \right) \quad (1.2)$$

Po úpravě dostaneme:

$$P_p = 10^{\frac{100+20 \cdot \log(2)-88}{10}} \approx 63 \text{ W} \quad (1.3)$$

Kde: P_p ... je požadovaný výkon zesilovače pro akustický tlak 100 dB

Z předchozího vztahu (1.3) nám vyšlo, že k dosažení hodnoty akustického tlaku 100 dB ve vzdálenosti 2 metry od subwooferu, potřebujeme od zesilovače dodat minimálně 63 W. Při návrhu se zde musí uvažovat určitý činitel výkyvu („Crest factor“) pro pokrytí krátkodobých, maximálních, výkonových špiček. Proto potřebujeme ještě určitou výkonovou rezervu. S ohledem na domácí využití pro poslech multižánrové hudby

budeme uvažovat pro zvukový signál sinusového charakteru hodnotu „Crest factor“ 3 dB. Výsledný výkon, co musí zesilovač vydržet bez poškození, se tedy vypočítá:

$$P_{cp} = 10^{\frac{103+20 \cdot \log(2)-88}{10}} \approx 127 \text{ W} \quad (1.4)$$

Kde: P_{cp} ... je celkový požadovaný výkon zesilovače

Potřebujeme tedy zesilovač, který je schopen dodat výkon 127 W do 8 ohmové zátěže. Dle dosavadních poznatků, které hovoří o tom, že má mít zesilovač vždy určitou výkonovou rezervu oproti buzené audio soustavě, jsem stanovil požadovaný výkon na 150W do 8 ohmové zátěže. [6]

1.1. Základní parametry zesilovače

V této kapitole je uveden přehled technických parametrů zesilovače, které si následně ověříme měřením v kapitole 4 na zesilovači, jestli splňují naše požadavky. Mezi tyto parametry patří:

- Jmenovitý výstupní výkon
- Činitel harmonického zkreslení se šumem, THD+N
- Frekvenční šířka pásma

1.1.1. Jmenovitý výstupní výkon

Jmenovitým výkonem se rozumí výkon, který je zesilovač, vybuzený sinusovým signálem, schopen dodat dlouhodobě do zátěže. Je limitován napájecím zdrojem a tepelnými poměry na výkonových prvcích. Výstupní výkon je daný vztahem:

$$P_{OUT} = \frac{U_{OUT}^2}{R_Z} \text{ [W]} \quad (1.5)$$

Kde: P_{OUT} ... je jmenovitý výstupní výkon

U_{OUT} ... značí výstupní efektivní napětí zesilovače

R_Z ... je jmenovitá zatěžovací impedance

Pro náš požadovaný výstupní výkon 127 W si můžeme určit velikost napájecího napětí a to dosažením a upravením ze vztahu (1.5):

$$U_{OUT} = \sqrt{P_{OUT} \cdot 2 \cdot R_Z} \quad (1.6)$$

Po dosažení dostaneme:

$$U_{OUT} = \sqrt{127 \cdot 2 \cdot 8} = 45 \text{ V} \quad (1.7)$$

Velikost potřebného napájecího napětí je 45 V. Znamená to, že při výběru zesilovače nebo budiče se musí dbát na parametr napájecího napětí, aby tuto hodnotu splňoval. [1]

1.1.2. Činitel harmonického zkreslení se šumem, THD+N

Bude-li na vstupu zesilovače sinusový signál s frekvencí f , průběh výstupního signálu nebude čistě sinusový. Na výstupu zesilovače se objeví kromě základní harmonické složky ještě další harmonické s frekvencemi $r \cdot f$ (kde $r = 2,3,4$). Velikost nelineárního zkreslení se v tomto případě vyjadřuje činitelem harmonického zkreslení k , podle vztahu:

$$k = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots}}{U_1} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.8)$$

Kde: U_x ($x = 2, 3, 4 \dots$)... je efektivní hodnota napětí x -tého řádu

U_1 ...je efektivní hodnota napětí základní harmonické

Tento údaj se u zesilovače udává jako harmonické zkreslení pod zkratkou THD. Toto zkreslení je způsobeno nelinearitou aktivních součástek, jako jsou diody, tranzistory atd. Pokud chceme co nejkvalitnější reprodukci, tak požadujeme, aby byl co nejmenší činitel harmonického zkreslení. Vyjadřuje se v procentech a je závislý na vybuzení zesilovače. Pro náš zesilovač se vyžaduje hodnota tohoto zkreslení do 1 % pro dosažení věrohodnější reprodukci zvuku. [1]

1.1.3. Frekvenční šířka pásma

Frekvenční šířka pásma je interval mezi dvěma hodnotami frekvence přenášeného audio signálu, ve kterých dojde k potlačení zesílení signálu o 3 dB vzhledem ke středu pásma. V ideálním případě je v celém intervalu konstantní. Dle normy DIN 45500 se vyžaduje vyrovnané frekvenční pásmo minimálně od 40 Hz – 12,5 kHz. Frekvenční šířku pásma je možné měřit metodou, kdy na vstup zesilovače je přiveden signál s efektivní hodnotou napětí U_1 . Na výstupu zesilovače se poté měří efektivní hodnota výstupního napětí U_2 při postupném přeladování frekvence generátoru skrze audio frekvenční pásmo, od 20 Hz do 20 kHz. V našem případě chceme udržení úrovně zesílení napětí zejména při nízkých kmitočtech. Při nízkých kmitočtech způsobují pokles zesílení především vazební kondenzátory, při vyšších frekvencích je potom tento pokles způsoben parazitními kapacitami u aktivních prvků. Když označíme šířku pásma jako B , potom ji tedy vypočítáme ze vztahu (1.9). [8]

$$B = f_2 - f_1 \text{ [Hz]} \tag{1.9}$$

Kde: f_1 ... je dolní mezní kmitočet

f_2 ... je horní mezní kmitočet.

Frekvenční šířka pásma se zjišťuje z modulové frekvenční charakteristiky. Tu je možné vynést do grafu, uváděné v decibelové míře jako:

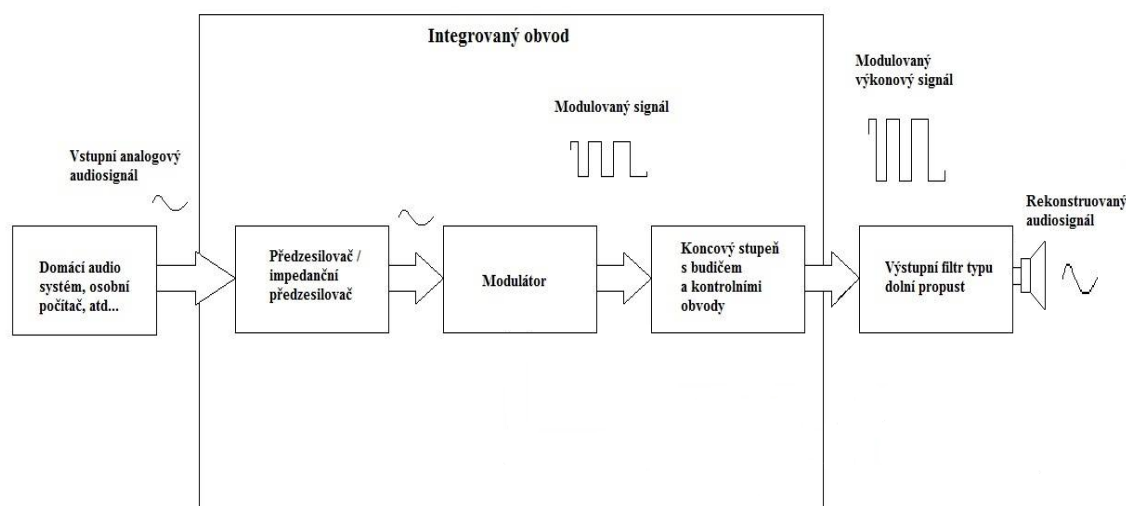
$$A_u = 20 \cdot \log \cdot \frac{U_2}{U_1} \text{ [dB]} \tag{1.10}$$

2. Rešerše a porovnání monolitických výkonových zesilovačů ve třídě D

V úvodu této kapitole je provedeno základní rozdělení integrovaných výkonových spínaných zesilovačů. Následující rešerše a porovnání parametrů těchto integrovaných obvodů je cílena na zesilovače, s výstupním výkonem nad 100 W, pracujících ve třídě D.

2.1. Základní rozdělení monolitických zesilovačů

Monolitické integrované výkonové zesilovače pracující ve třídě D jsou rozděleny v této práci dle vstupního signálu, na PWM a analogové. Toto rozdělení považuji při výběru zesilovače s ohledem na jeho jednoduchost a využití jako jedno z hlavních kritérií. Mohou se však rozdělovat i do jiných skupin, například podle implementace součástek v pouzdře na obvody „power stage“, kdy spolu s budičem jsou v čipu implementovány i koncové výkonové tranzistory nebo na budiče, kde je absence těchto koncových výkonových tranzistorů a je nutné je přidat externě k obvodu. Všechny tyto skupiny zesilovačů spojuje jejich principiální bloková struktura zobrazená na obrázku (obr. 2.1).



Obr. 2.1: Principiální blokové schéma výkonového audio zesilovače pracujícího ve třídě D (převzato a upraveno z [1])

Do bloku předzesilovače je nejčastěji zaveden vstupní signál (digitální nebo analogový), kde můžeme realizovat potřebnou úpravu vstupního digitálního signálu nebo zesílení analogového vstupního signálu. Dalším důležitým prvkem výkonového audio zesilovače pracujícího ve třídě D je blok modulátoru. Jeho funkcí je převod signálu do takového tvaru, kterým je možné řídit efektivně spínací proces tranzistorů koncového stupně zesilovače. Za modulátorem následuje blok koncového stupně s budičem, který je svojí funkcí podobný spínači v poloze zapnuto a rozepnuto. Pomocí modulátoru řídíme poměr mezi dobou sepnutí a rozepnutí spínače. V případě výskytu nadproudu, výkonového nebo tepelného přetížení tohoto koncového stupně s budičem, zasahuje do řízení spínacího procesu koncových tranzistorů blok ochrany proti destrukci zesilovače. Na výstupu bloku koncového stupně je modulovaný výkonový signál, za který musíme zařadit další blok a to filtr typu dolní propust. Z toho bloku tak získáme požadovaný užitečný nízkofrekvenční audiosignál. Tento výstupní filtr musí mít akumulární schopnosti, a proto nemůžeme nahradit akumulární prvky (cívky) syntetickými součástkami.

Do skupiny s digitálním vstupem se řadí zesilovače umožňující zpracovat vstupní signál přímo v digitální podobě. Výhody těchto digitálních výkonových audio zesilovačů jsou miniaturní rozměry, vysoká účinnost, harmonické zkreslení se šumem (THD+N) a přijatelný poměr ceny k výkonu. Uplatňují se především v komerčních více kanálových audio systémech s výstupním výkonem překračujícím hranici 100 W.

Druhou skupinu zesilovačů pracující ve třídě D tvoří analogové audio zesilovače, na jejichž vstup je potřeba přivést analogový signál. Ve srovnání s první skupinou mají určité výhody, mezi které patří miniaturní rozměry, velmi dobré hodnoty THD+N, vysoká účinnost, nízký počet napájecích zdrojů (obvykle jedna až dvě různá napájecí napětí) a zejména nízké pořizovací náklady, díky kterým nyní tvoří nejčtenější skupinu integrovaných audio zesilovačů. Výsledný audio zesilovač pracující ve třídě D je obvykle tvořen jediným integrovaným obvodem s minimálním počtem externích prvků. Určitou výjimku tvoří PWM budiče, kdy na výstup integrovaného obvodu připojujeme i aktivní prvky – výkonové tranzistory. [1]

2.2. Monolitické zesilovače třídy D s výkonem nad 100W

Na trhu se objevovalo jen malé množství těchto integrovaných zesilovačů přesahující výkon sto wattů. Patří mezi nejpoužívanější řešení při realizaci zesilovačů třídy D, především v domácích audio systémech, přenosné aktivní reproboxy, subwoofery nebo jako budiče se používají v PA zesilovačích. Výkony těchto integrovaných zesilovačů se pohybují v řádech desítek až stovek wattů. V této kapitole jsou vybrány obvody aktuálně nabízené na trhu od několika předních výrobců jako je Texas Instruments, Infineon (dříve International Rectifier), STMicroelectronics a NXP Semiconductor. Nutné je podotknout, že udávané výkony těchto odvodů jsou stanovené pro 4 ohmovou zátěž ve stereo režimu, v mono režimu jsou uvedeny pro minimální zátěže psané v tabulkách.

2.2.1. Monolitické zesilovače třídy D firmy Texas Instruments

V tabulkách (tab. 2.1 a 2.2) je uveden přehled monolitických zesilovačů třídy D firmy Texas Instruments. Tyto zesilovače jsou vhodné zejména pro kvalitní více kanálové zesilovače pro domácí audio systémy. Většina těchto obvodů obsahuje dva a více výstupních audio výstupů. V tabulkách (tab. 2.1 a 2.2) také není uvedeno více než dva výstupy, je to zejména z důvodu nepotřebnosti při výběru součástky pro jeden subwoofer a výsledné přehlednosti. V tabulce (tab. 2.1) je uveden přehled monolitických zesilovačů třídy D firmy Texas Instruments s PWM vstupním signálem. Ačkoliv tyto zesilovače mají už v sobě koncové výkonové MOSFET tranzistory, mají jednu velkou nevýhodu a to, že postrádají PWM modulátor. Ten se musí přidat externě, což způsobuje složitější celkové zapojení a vyšší náklady při realizaci.

Uvedme například poměrně úspěšný obvod TAS5261. Je vysoce výkonný digitální mono zesilovač, navrhnutý pro buzení 4 reproduktorů s nízkým harmonickým zkreslením. Obsahuje již integrované ochranné obvody, mezi které patří ochrana proti zkratu, nadproudová ochrana, ochrana proti podpětí a ztrátě vstupního signálu PWM. Jeho vzorkovací frekvence je 192 kHz až 384 kHz. Vnitřní struktura je víceméně stejná s obvodem TAS5162, rozdílem je návrh tohoto zesilovače pro stereo režim dvou reproduktorů.

Označení součástky	Počet výstupních audio kanálů	Minimální impedance zátěže [Ω]	Výstupní výkon stereo/mono [W]	Napájecí napětí [V]	THD+N (1kHz, 1W, 4 Ω) [%]	SNR [dB]	Vstupní signál	Cena [Kč]
TAS5622A	2	2	125/250	12-34	0,025	105	PWM	226
TAS5612A	2	2	125/250	16-34,1	0,03	103	PWM	210
TAS5624A	2	2	150/300	12-38	0,025	105	PWM	278
TAS5631B	2	3	300/400	25-52,5	0,03	103	PWM	426
TAS5261	1	3	315	0-52,5	0,09	110	PWM	312
TAS5342A	2	2	100/200	0-34	0,09	110	PWM	184
TAS5352A	2	2	125/250	0-37	0,09	110	PWM	194
TAS5162	2	3	160/300	0-52,5	0,09	112	PWM	362

Tab. 2.1: Zesilovače třídy D firmy Texas Instruments

Tabulka (tab. 2.2) uvádí zesilovače třídy D již s analogovým vstupem. Tyto zesilovače oproti zesilovačům v tabulce (tab. 2.1) mají v jednom čipu zabudovaný jak PWM modulátor, tak i koncové výkonové MOSFET tranzistory. Při realizaci jednoduchého zesilovače třídy D je potřeba pouze dodat napájecí zdroj a výstupní filtr typu dolní propust. Pro realizaci vysoce kvalitního zesilovače s velmi nízkými hodnoty harmonického zkreslení THD+N nabízí firma součástky řady TPA32XX v tabulce (tab. 2.2), značené taky jako „Ultra HD“. V téže tabulce, součástky řady TAS56XX, mají integrovanou zpětnovazební technologii zvanou „PurePath™ HD“. Ta zajišťuje při zesilování zvuku zachování čistého digitálního formátu od zdroje k reproduktoru až do výkonu 300 W na kanál a zajišťuje při nezatíženém zesilovači nižší ztráty.

Jako zástupce z této tabulky je vybrána součástka TAS5613A. Disponuje technologií „PurePath™ HD“, díky které se křivka zkreslení zvyšuje až tehdy, když je výstupní úroveň v limitaci. Výhodou této součástky je schopnost řídit výkon až 150 W stereo do 4 Ω z jediného napájení 36 V. TAS5613A obsahuje pokročilé ochrany proti zkratu, přetížení, přehřátí a podpětí. Maximální počet výstupních kanálů jsou 4. Využití najdeme v domácích kino sestavách, aktivní reproduktory nebo subwoofery, či DVD přijímače. [4]

Označení součástky	Počet výstupních audio kanálů	Minimální impedance zátěže [Ω]	Výstupní výkon stereo/mono [W]	Napájecí napětí [V]	THD+N (1kHz, 1W, 4 Ω) [%]	SNR [dB]	Vstupní signál	Cena [Kč]
TPA3221	2	2	115/230	7-31,5	0,03	108	analog	-
TAS5613A	2	2	150/300	18-38	0,03	100	analog	270
TAS5611A	2	2	125/250	16-34,1	0,03	100	analog	210
TAS5630B	2	3	300/400	25-52,5	0,03	100	analog	426
TPA3251	2	2	175/355	12-38	0,005	111	analog	246
TPA3255	2	2	315/605	18-53,5	0,006	112	analog	298
TPA3245	2	2	115/230	12-31,5	0,005	112	analog	185
TAS5611	2	2	125/250	16-34,1	0,03	100	analog	325

Tab. 2.2: Zesilovače třídy D firmy Texas Instruments

2.2.2. Monolitické zesilovače třídy D firmy Infineon

Firma se zabývá výrobou zesilovačů pouze ve třídě D, jiné třídy zde nenajdeme. V tabulce (tab. 2.3) jsou uvedeny integrované monolitické zesilovače třídy D. Tyto zesilovače řady IR43XX umožňují ušetřit až 70 % součástek v porovnání s diskretní verzí zesilovače. Vynikají především velmi nízkými hodnotami odporu MOSFET tranzistoru v propustném směru, což eliminuje potřebu přidání mechanického chladiče. Disponují vysokou odolností proti rušení, jejich harmonické zkreslení THD+N dosahuje jen 0,02 %. Pro sestavení jednoduchého, kvalitního zesilovače do výkonu 200 W, jsou tyto monolitické zesilovače jistě ideálním řešením.

V tabulce (tab. 2.3) jsou zesilovače, které firma označuje jako „PowIRaudio“. Značí to, že nepotřebují chladič pro udávaný výkon, mají nejlepší zvukový přednes ve své třídě, jsou kompatibilní s konfigurací jednoho napájecího nebo rozděleného zdroje a mají sloužit pro zjednodušený výsledný návrh se sníženým počtem přidaných komponentů. Součástky řady IR43X1 jsou mono zesilovače, které mají stejnou strukturu zapojení a liší se pouze velikostí maximálního možného napájecího napětí. Součástky řady IR43X2 jsou obdobou řady IR43X1 ve dvoukanálovém provedení.

Označení součástky	Počet výstupních audio kanálů	Minimální impedance zátěže [Ω]	Výstupní výkon stereo/mono [W]	Napájecí napětí [V]	THD+N (1kHz, 1W, 4 Ω) [%]	Vstupní signál	Cena [Kč]
IR4301	1	2	160	0-80	0,02	analog	101
IR4321	1	2	135	0-60	0,02	analog	105
IR4302	2	2	130/100	0-80	0,02	analog	172
IR4322	2	2	100/100	0-60	0,02	analog	168

Tab. 2.3: Zesilovače třídy D firmy Infineon

V tabulce (tab. 2.4) je vybráno několik dostupných budičů na trhu firmy Infineon. K těmto budičům je nutné externě dodat výkonové MOSFET tranzistory pro sestavení kompletního zesilovače. Má to několik výhod i nevýhod. Mezi výhody patří jednoznačně dosažení vyšších výkonů než u dříve zmíněných integrovaných zesilovačů, velmi nízké harmonické zkreslení, vyšší rozsah napájecího napětí a v přepočtu budič s koncovými tranzistory vyjde cenově stejně jako již zmíněné integrované zesilovače. Jako nevýhodu těchto budičů můžeme považovat větší rozměry výsledné DPS.

Ze všech pěti vybraných budičů v tabulce (tab. 2.4) je pro realizaci našeho aktivního subwooferu nejvhodnější budič IRS2092 především díky svému jednobokému provedení. Je to vysokofrekvenční budič MOSFET tranzistorů s vysokou odolností vůči šumu, zapojených do topologie polovičního mostu. S maximální hodnotou napětí výkonové sběrnice $V_{\text{OFFSET(max)}} = \pm 100 \text{ V}$, zde můžeme dosáhnout výkonu až 500 W. Špičková hodnota proudu dodaného (nebo odebíraného) do elektrody „gate“ dosahuje hodnoty +1 A a -1,2 A. Disponuje nastavitelnou nadproudovou ochranou s funkcí automatického resetu. Zpoždění této ochrany je maximálně 500 ns. Určitou nevýhodou zde představuje absence ochrany přepětí, podpětí či teplotní ochrana. Ty se v případě potřeby musí realizovat zvlášť, obvodem ochran. S nastavitelným „deadtime“ můžeme dosáhnout lepších výsledků harmonického zkreslení THD+N. Tento „deadtime“ se může nastavit na čtyři různé hodnoty a to 25, 40, 65 nebo 105 ns. Budič pracuje až do vzorkovací frekvence 800 kHz. Nepotřebujeme zde žádné chladiče díky nízké hodnotě maximálního ztrátového výkonu 1 W. S kombinací doporučených výkonových MOSFET tranzistorů IRFI4020H-117P tvoří jednoduchý, výkonný zesilovač s výbornými parametry za velice příznivou cenu. [4]

Označení součástky	Počet výstupních audio kanálů	$V_{\text{OFFSET}}(\text{max})$ [V]	Maximální proud hradla [A]	THD+N (1kHz, 1W, 4Ω) [%]	Vstupní signál	Využití pro výkony	Cena [Kč]
IRS2092	1	100	1,2	0,01	analog	50-500W	83
IRS2052	2	100	0,6	-	analog	50-350W	181
IRS2053	3	100	0,6	-	analog	50-250W	145
IRS2093	4	100	0,6	-	analog	50-250W	233
IRS20124	-	200	1,2	-	PWM	>1000W	-

Tab. 2.4: Budiče třídy D firmy Infineon

2.2.3. Monolitické zesilovače třídy D firmy STMicroelectronics

Firma STMicroelectronics má v sortimentu zesilovače třídy AB, D a G do výkonu 250 W na kanál. V tabulce (tab. 2.5) máme tři zástupce zesilovačů třídy D s analogovým vstupem a výkonem nad 100 W. Bohužel více zesilovačů od této firmy s výkonem nad 100 W aktuálně na trhu nenajdeme. Všem těmto integrovaným zesilovačům stačí pouze jedno napájecí napětí. Jejich spínací proces výkonových tranzistorů může být řízen do frekvence 400 kHz. Pro aplikace, kde je třeba vyšší vzorkovací frekvence signálu to může být jistá nevýhoda. Jsou navrženy pro aplikace do domácích aktivních reproboxů.

[4]

Označení součástky	Počet výstupních audio kanálů	Minimální impedance zátěže [Ω]	Výstupní výkon stereo/mono [W]	Napájecí napětí [V]	THD+N (1kHz, 1W, 4Ω) [%]	Vzorkovací frekvence [kHz]	Vstupní signál	Cena [Kč]
TDA7498TR	2	6	100	0-45	0,1	250-400	analog	151
TDA7498ETR	2	3	160/220	0-45	0,05	240-400	analog	231
TDA7498MVTR	1	6	100	0-45	0,1	250-400	analog	158

Tab. 2.5: Zesilovače třídy D firmy STMicroelectronics

2.2.4. Monolitické zesilovače třídy D firmy NXP Semiconductor

Zesilovače třídy D firmy NXP Semiconductor jsou znázorněny v tabulce (tab. 2.6). Uvádí na trh zesilovače až do výkonu 420 W. V porovnání s výrobky od firmy Texas Instruments jsou za mnohem příznivější cenovou nabídku.

Obvod TDA8920C je vysoce účinný zesilovač s výkonem 2 x 110 W při zátěži 4 Ω . Vyrábí se ve dvou různých provedeních, a to v HSOP24 nebo DBS23P. Znamená to, že chcete mít zesilovač připevněný k DPS naležato nebo nastojato. Pracuje s napájecím napětím od 12,5 V do 32,5 V a v klidovém režimu dosahuje nízkých hodnot klidového proudu, jen 75 mA. Můžeme ho provozovat v režimu stereo nebo mono, kdy dosáhneme výkonu až 220 W. Při mono režimu musí být vstupy obou kanálů zapojeny paralelně a fáze jednoho z nich obrácená. Má řadu pokročilých ochran jako je ochrana proti přepětí a podpětí, omezení výstupního proudu nebo teplotní ochrana. Je zde nevýhoda oproti zesilovačům firmy Infineon v možnosti nastavitelného „deadtime“, který zde není možný.

Obvody TDA8953J a TDA8954J jsou totožné zesilovače s tím, že obvod TDA8954J je dodáván se dvěma diagnostickými kolíky navíc pro případné monitorování stavu součástky tepelnou ochranou, nadproudovou ochranou a dalšími ochrannými obvody. Jsou to zesilovače s výstupním výkonem 2 x 210 W nebo 1 x 420 W. Mají vysokou účinnost až 93 %. Provozní rozsah napájecího napětí je od 12,5 V do 42,5 V. Každý ze dvou audio kanálů obsahuje PWM modulátor, analogovou zpětnovazební smyčku a diferenční vstupní stupeň pro maximální flexibilitu aplikace. [4]

Označení součástky	Počet výstupních audio kanálů	Minimální impedance zátěže [Ω]	Výstupní výkon stereo/mono [W]	Napájecí napětí [V]	THD+N (1kHz, 1W, 4 Ω) [%]	Vzorkovací frekvence [kHz]	Vstupní signál	Cena [Kč]
TDA8920C	2	4	110/220	12,5-32,5	0,05	250-450	analog	147
TDA8950	2	4	150/300	12,5-40	0,05	250-450	analog	156
TDA8953J	2	4	210/420	12,5-42,5	0,03	250-450	analog	121
TDA8954J	2	4	210/420	12,5-42,5	0,03	250-450	analog	196

Tab. 2.6: Zesilovače třídy D firmy NXP Semiconductor

2.3. Výběr vhodného zesilovače nebo budiče s ohledem na určené požadavky

Vzhledem k požadavkům stanovené v kapitole 1 se nám podařilo vybrat několik obvodů, které tyto požadavky splňují. Liší se převážně v provedení jejich výsledného zapojení, funkcích navíc, jako je např.: nastavitelný „deadtime“ nebo nastavitelné nadproudové ochrany, či absence různých ochran. Z výběru firmy Texas Instruments naše technické požadavky, uvedené v kapitole 1, splňují zesilovače TAS5631B, TAS5261 a TAS5162 uvedené v tabulce (tab. 2.1). Tyto zesilovače potřebují jako vstupní signál PWM. Ten zajistí pouze externě přidaný digitální procesor, který je často mnohem dražší než samotný zesilovač. Nevýhoda s tímto spjatá je přidání dalšího zdroje pro napájení procesoru. Ve výsledku se nám tato varianta jak prodraží, tak se i zvětší výsledná velikost zesilovače, jeho složitost zapojení a zvýší se riziko neúspěchu při jeho ožívování. V tabulce (tab. 2.2) naše požadavky na výkon 200 W při 8 ohmech splňují pouze 2 zesilovače a to TAS5630B a TPA3255. Jejich parametrické srovnání nalezneme v tabulce (tab. 2.7). Z těchto dvou zesilovačů bych chtěl vyzdvihnout především obvod TPA3255. Ačkoliv patří mezi „Ultra HD“, je jeho cena nižší než u zesilovače TAS5630B, který má o řád horší harmonické zkreslení THD+N a je výkonově slabší. Mezi další výhodu patří zejména větší odstup signál-šum a dynamický rozsah oproti TAS5630B, díky tomu je také méně náchylný na rušení.

Parametr	TAS5630B		TPA3255	
	Hodnota	Jednotky	Hodnota	Jednotky
Výstupní výkon - poloviční most (stereo)	$R_L = 4 \Omega$, THD+N = 1%	240	$R_L = 4 \Omega$, THD+N = 1%	255
	$R_L = 8 \Omega$, THD+N = 1%	125	$R_L = 8 \Omega$, THD+N = 1%	155
Výstupní výkon - plný most (mono)	$R_L = 4 \Omega$, THD+N = 1%	230	$R_L = 4 \Omega$, THD+N = 1%	315
Napájecí napětí (jmenovitě)	50	V	51	V
Zkreslení THD+N (při 1 W)	0,03	%	0,006	%
Napěťové zesílení	23	dB	21,5	dB
Odstup signál - šum	100	dB	112	dB
Vlastní vzorkovací kmitočet	400	kHz	450	kHz
Účinnost	88	%	90	%

Tab. 2.7: Porovnání zesilovačů TAS5630B a TPA3255

Dalšími zesilovači, které splňují naše požadavky, jsou TDA8950, TDA8953J a TDA8954J firmy NXP Semiconductor. Jejich parametrické porovnání nalezneme v tabulce (tab. 2.8). Technické rozdíly jsou již uvedeny v kapitole 2.2.4. Jako nejvýhodnější dle ceny se nám jeví zesilovač TDA8953J. Tento zesilovač je ale nejspíše určen pro velkovýrobu a výrobce nám neumožňuje koupit méně než 432 kusů. Při porovnání zesilovačů TDA8950 a TDA8954J, našim požadavkům lépe vyhovuje obvod TDA8954J. Dosahuje nižších hodnot zkreslení a má větší rozsah napájecího napětí při adekvátním cenovém rozdílu.

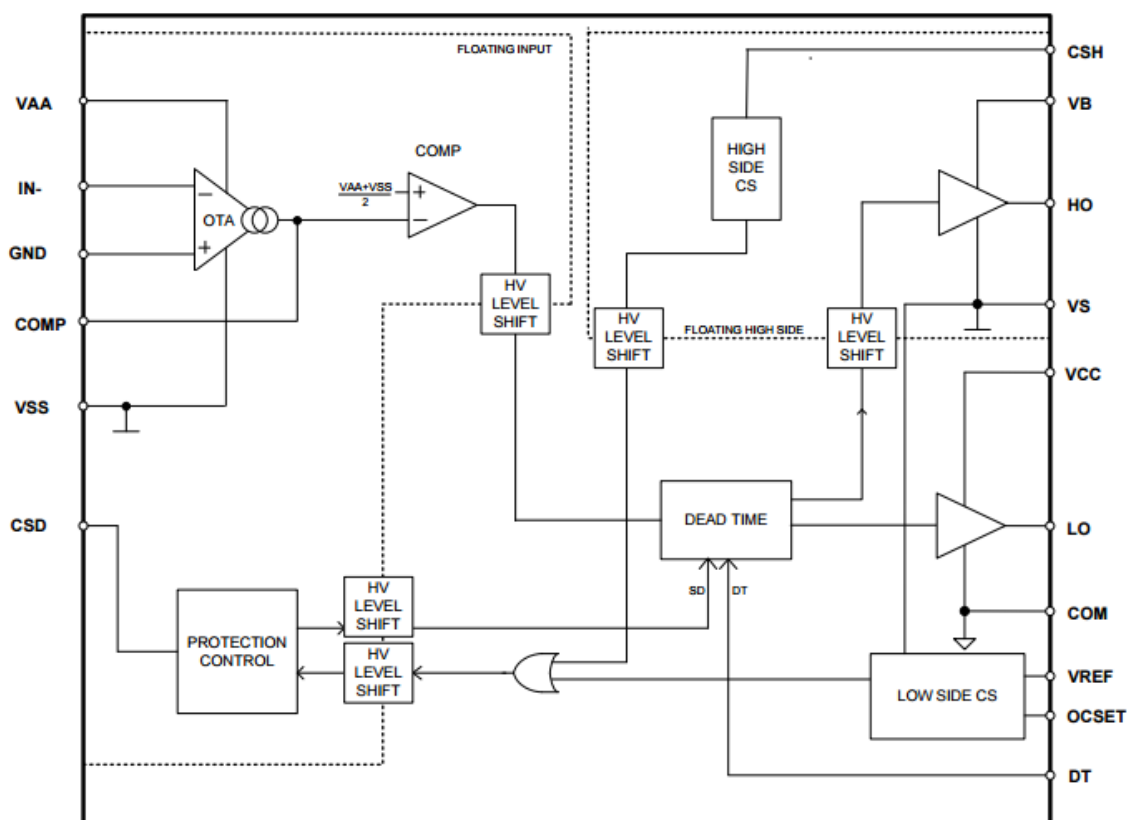
V tabulce (tab. 2.4) najdeme budiče pro naše požadavky od firmy Infineon. Z těchto budičů je pro nás nejlepší řešení použití obvodu IRS2092. V porovnání s výše uvedenými vybranými zesilovači, splňující naše požadavky, má tento budič výhodu v rozsahu napájecího napětí. Má nižší harmonické zkreslení THD+N než většina uvedených zesilovačů a s přidáním externími výkonovými MOSFET tranzistory můžeme dosáhnout i vyšších výkonů. Tento budič jsem si vybral jako řešení pro náš zesilovač díky velkému rozsahu napětí, které je pro mě vhodnější především z důvodu mé nezkušenosti a možnosti špatného návrhu napájecího zdroje, kdy tento budič snese i vyšší napětí oproti předešlým zmiňovaným. Také do budoucna plánuji silnější subwoofer, kde bych tento budič jistě využil a ušetřil na dalších součástkách. V cenovém srovnání s ostatními, vybranými zesilovači je kombinace budiče s externími tranzistory srovnatelná.

Parametr	TDA8950		TDA8953J		TDA8954J	
	Hodnota	Jednotky	Hodnota	Jednotky	Hodnota	Jednotky
Výstupní výkon - poloviční most (stereo)	$R_L = 4 \Omega$, THD+N = 10%	170	$R_L = 4 \Omega$, THD+N = 10%	160	$R_L = 4 \Omega$, THD+N = 10%	160
	$R_L = 6 \Omega$, THD+N = 10%	100	$R_L = 8 \Omega$, THD+N = 10%	-	$R_L = 8 \Omega$, THD+N = 10%	-
Výstupní výkon - plný most (mono)	$R_L = 8 \Omega$, THD+N = 0,5%	200	$R_L = 8 \Omega$, THD+N = 0,5%	330	$R_L = 8 \Omega$, THD+N = 0,5%	330
Napájecí napětí (jmenovité)	30	V	41	V	41	V
Zkreslení THD+N (při 1 W)	0,05	%	0,03	%	0,03	%
Napěťové zesílení	stereo režim	30	stereo režim	30	stereo režim	30
	mono režim	36	mono režim	36	mono režim	36
Vlastní vzorkovací kmitočet	345	kHz	335	kHz	335	kHz
Účinnost	88	%	93	%	93	%

Tab. 2.8: Porovnání zesilovačů TDA8950, TDA8953J a TDA8954J

3. Návrh technického řešení spínaného výkonového zesilovače

Pro náš zesilovač jsem vybral budič IRS2092 firmy Infineon. Jeho funkční blokové schéma je zobrazeno na obrázku (obr. 3.1). Základní parametry budiče jsou uvedeny v tabulce (tab. 3.1). Tento budič má v sobě zabudovaný PWM komparátor, který porovnává vstupní signál s námi vygenerovaným trojúhelníkovým signálem pomocí prvků C1, C2, C3 a R6 viz příloha (C.1).



Obr. 3.1: Funkční blokové schéma budiče IRS2092 (převzato z [3])

Napěťový offset (max)	± 100 V
Budící proud	+ 1 A
Budící proud	- 1 A
Nastavitelný deadtime	25/40/75/105 ns
Zpoždění ochrany (max)	500 ns
DC offset	<20 mV
Frekvence PWM	800 kHz
Zkreslení THD+N(1kHz, 50W, 4 Ω)	0,01%

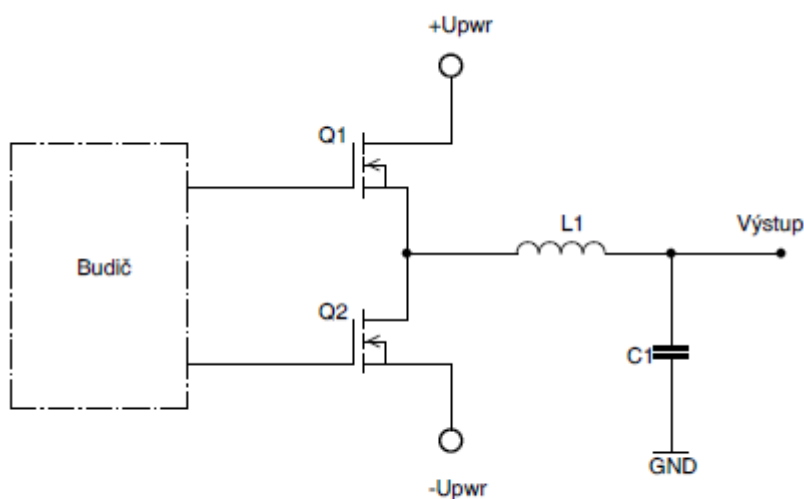
Tab. 3.1: Základní parametry obvodu IRS2092

3.1. Návrh výkonového zesilovače

Návrh zapojení zesilovače bylo převzato a upraveno od výrobce, dostupné na internetových stránkách [3]. Schéma zapojení znázorněné v příloze (obr. C.1) a výsledný motiv pro DPS byl vytvořen v editoru schémat Eagle firmy Cadsoft.

3.1.1. Zapojení koncových tranzistorů

Pro náš zesilovač bylo navrženo zapojení koncových tranzistorů do polovičního mostu. Při návrhu jsme vycházeli z požadavků uvedené v kapitole 1, a to jednoduchost zapojení a cena, které toto zapojení splňuje. Zapojení koncového stupně do polovičního mostu je zobrazeno na obrázku (obr. 3.2). Nevýhodou tohoto zapojení je vznik jevu „bus pumping“. Jedná se o snahu koncového stupně zesilovače rekuperovat komutační proud zpět do sítě. Jako vhodné řešení se často využívá implementace dostatečně dimenzovaných elektrolytických kondenzátorů na vstupní svorky zesilovače pro napájení nebo na výstupní svorky zdroje. [1]



Obr. 3.2: Schéma zapojení koncového stupně do polovičního mostu [1]

3.1.2. Napěťové zesílení

Napěťové zesílení zajišťuje operační zesilovač v obvodu budiče. Na jeho invertující vstup IN- je přivedena zpětná vazba pomocí odporu R15. Výsledné napěťové zesílení je dáno vztahem:

$$A_u = \frac{R_{15}}{R_1} = 33,22 \quad [-] \quad (3.1)$$

3.1.3. Nastavení deadtime

Budič IRS2092 nám umožňuje nastavit „deadtime“, neboli prodlevu mezi spínáním tranzistorů. Při nastavení nízkého času prodlevy může dojít k sepnutí obou tranzistorů najednou. Znamenalo by to invertorový zkrat, což je nežádoucí. Výrobce již podle schématu zapojení doporučuje nastavit prodlevu alespoň na hodnotu 75ns. Prodleva se nastavuje rezistory R10 a R11. Hodnoty odporů pro nastavení „deadtime“ jsou znázorněné v tabulce (tab. 3.2). Pro náš zesilovač jsem zvolil hodnotu 75 ns, která je od výrobce doporučena. [3]

Prodleva	R10	R11
25 ns	< 10 kΩ	nezapojen
45 ns	5,6 kΩ	4,7 kΩ
75 ns	8,2 kΩ	3,3 kΩ
105 ns	nezapojen	< 10 kΩ

Tab. 3.2: Hodnoty rezistorů pro nastavení deadtime [převzato z [5]]

3.1.4. Nadproudová ochrana

Budič snímá hodnotu proudu spínaného tranzistorem MOSFET, připojeného k zápornému napětí. Velikost maximálního spínacího proudu nastavíme pomocí napětí na pinu OCSET, neboli odporem R3. Proud je snímán pinem VS pomocí napětí. Pokud napětí na pinu VS přesáhne napětí pinu OCSET, ochrana vypne PWM modulaci a zamezí zničení tranzistorů. [3]

3.1.5. Ztrátový výkon

Výkonové ztráty nám vznikají téměř na každém prvku výkonového zesilovače. Jelikož nám ztráty ve výkonovém stupni zesilovače ovlivňují výslednou účinnost celého zesilovače, snažíme se tyto ztráty co nejvíce snižovat. Dominantními ztráty u spínaných výkonových zesilovačů jsou ztráty na výkonových tranzistorech MOSFET. Tyto ztráty se mění na teplo, které je potřeba efektivně odvést, aby nedošlo k poškození těchto tranzistorů. Jsou dány součtem statických ztrát $P_{\text{vedení}}$ (spojené s trvalým vedením proudu) a dynamických $P_{\text{spínací-celkové}}$ (spjatý se ztrátami při spínání). [1]

Statické ztráty spojené s trvalým průchodem proudu $P_{\text{vedení}}$ závisí na odporu $R_{DS(ON)}$ mezi elektrodami „drain“ a „source“ v sepnutém režimu tranzistoru. Určíme je přibližně ze vztahu:

$$P_{\text{vedení}} = I_{Def}^2 \cdot R_{DS(ON)} \quad [\text{W}] \quad (3.2)$$

Kde: I_{Def} ... je efektivní hodnota proudu tekoucího skrze svorku „drain“ tranzistoru MOSFET.

Po dosazení dostaneme:

$$P_{\text{vedením}} = 4,5^2 \cdot 80 \cdot 10^{-3} = 1,62 \text{ W} \quad (3.3)$$

Parametr $R_{\text{DS(ON)}}$ je silně závislý na teplotě přechodu tranzistoru T_j . Při rostoucí teplotě dochází k jeho zvyšování. Výrobci tento parametr udávají jen při teplotě 25 °C, a proto je při výpočtech vhodné uvažovat hodnotu minimálně dvojnásobnou.

Dynamické ztráty neboli celkové spínací ztráty $P_{\text{spínací-celkové}}$, jsou dány součtem spínacích ztrát $P_{\text{spínací}}$ a ztrát na hradle „gate“ tranzistoru P_{gate} . Vypočítají se ze vztahu:

$$P_{\text{spínací-celkové}} = P_{\text{spínací}} + P_{\text{gate}} \text{ [W]} \quad (3.4)$$

Po dosazení dostaneme:

$$P_{\text{spínací-celkové}} = 1,1318 + 0,0624 = 1,1942 \text{ W} \quad (3.5)$$

Spínací ztráty $P_{\text{spínací}}$ můžeme přibližně určit pomocí základních údajů z katalogového listu výrobce. V následujícím vztahu uvažujeme pouze idealizovaný (lichoběžníkový) průběh přechodného děje při spínání koncových tranzistorů, nikoliv výkonové ztráty na spínacích MOSFET tranzistorů v sepnutém, i rozepnutém stavu.

$$P_{\text{spínací}} = \frac{5}{24} \cdot I_D \cdot U_{\text{pwr}} \cdot (t_r + t_f) \cdot f_{\text{spínací}} + \frac{1}{2} \cdot C_{\text{OSS}} \cdot U_{\text{pwr}}^2 \cdot f_{\text{spínací}} + \frac{1}{2} \cdot Q_{\text{rr}} \cdot U_{\text{pwr}} \cdot f_{\text{spínací}} \text{ [W]} \quad (3.6)$$

Kde: U_{pwr} ... je maximální hodnota napětí na tranzistoru koncového stupně

I_D ... značí maximální hodnotu proudu, tekoucího elektrodou „drain“ tranzistoru MOSFET, v sepnutém stavu a po ustálení

t_r a t_f ... jsou doby náběhu a doběhu tranzistoru MOSFET

C_{OSS} ... představuje výstupní kapacitu MOSFET tranzistoru

Q_{rr} ... je komutační náboj integrované diody tranzistorů MOSFET.

Po dosazení dostaneme:

$$P_{spínací} = \frac{5}{24} \cdot 4,33 \cdot 35 \cdot (20 + 15) \cdot 400 \cdot 10^3 + \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 100^{-12} \cdot 35^2 \cdot 400 \cdot 10^3 + \frac{1}{2} \cdot 140 \cdot 10^{-9} \cdot 35 \cdot 400 \cdot 10^3 = 1,1318 \text{ W}$$
(3.7)

Ztráty na hradle MOSFET tranzistoru určíme vztahem:

$$P_{gate} = Q_G \cdot U_{driver} \cdot f_{spínací} \quad [\text{W}]$$
(3.8)

Kde: U_{driver} ...značí napětí na výstupu budícího obvodu tranzistorů MOSFET spínaných frekvencí $f_{spínací}$

Po dosazení dostaneme:

$$P_{gate} = 13 \cdot 10^{-9} \cdot 12 \cdot 400 \cdot 10^3 = 0,0624 \text{ W}$$
(3.9)

Kde: Q_G ...je náboj hradla tranzistorů.

Celkové ztráty P_{MOSFET} na tranzistoru můžeme určit součtem statických ztrát $P_{vedením}$ a dynamických $P_{spínací-celkové}$.

$$P_{MOSFET} = 2x (P_{vedením} + P_{spínací-celkové}) \quad [\text{W}]$$
(3.10)

Po dosazení dostaneme:

$$P_{MOSFET} = 2x (1,62 + 1,1942) = 5,6284 \text{ W}$$
(3.11)

Celkový ztrátový výkon, který je potřeba uchladiť, nám vyšel 5,6284 W.

3.1.6. Výpočet chlazení

Pro výpočet tepelného odporu chladiče vycházíme z předešlé hodnoty výkonové ztráty na tranzistorech P_{MOSFET} :

$$P_{MOSFET} = \frac{T_j - T_a}{R_{jc} + R_{cs} + R_{sa}} \text{ [W]} \quad (3.12)$$

Kde: P_{MOSFET} ... je ztrátový výkon

T_j ... teplota přechodu

T_a ... teplota okolí

R_{jc} ... tepelný odpor přechod-pouzdro

R_{cs} ... tepelný odpor pouzdro-chladič

R_{sa} ... tepelný odpor chladič-okolí

Po úpravě a dosazení dostaneme:

$$R_{sa} = \frac{T_j - T_a}{P_{MOSFET}} - (R_{jc} + R_{cs}) \quad (3.13)$$

$$R_{sa} = \frac{150 - 35}{5,6284} - (6,9 + 0,45) = 13^\circ\text{C/W} \quad (3.14)$$

Ze vzorce 3.7 je patrné, že díky spínacímu režimu zesilovače máme velmi nízké ztráty, tím i vysokou účinnost zesilovače a to vede k poměrně malému, přídavnému chladiči. Jako chladič jsem použil konstrukci typu „stroměček“, V7145 zakoupený v GM electronic. Jeho tepelný odpor je 8,2 °C/W, který s rezervou postačuje pro náš výpočet. Chladič je znázorněný v příloze (obr. D.1). [7]

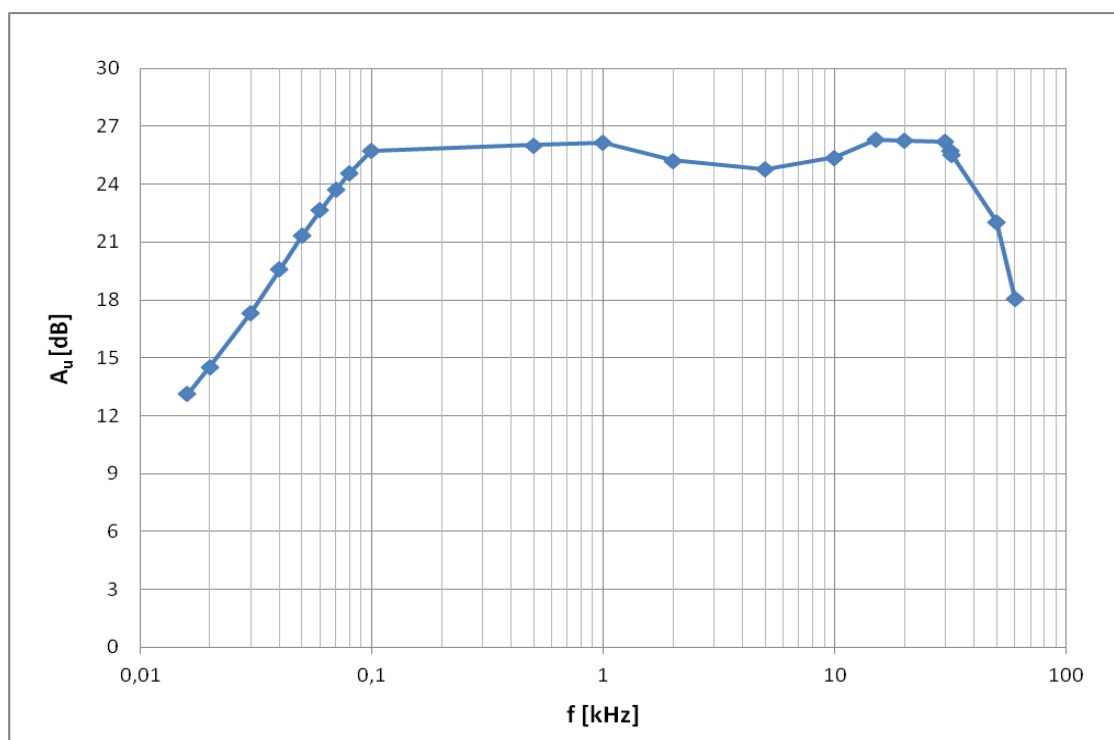
4. Měření parametrů zesilovače

Ještě před samotným měřením jsme si nejprve ověřili zesilovač, zda je stabilní a plně připraven k měření. Zesilovač je naprázdno, ničím nezatížený ani nebuzený žádným vstupním signálem. Nejprve připojíme nesymetrický napájecí zdroj 12 V pro napájení budiče. Poté připojíme zdroj pro buzení tranzistorů, na kterém nastavíme omezovač proudu. Postupně zvyšujeme napájecí napětí až k jmenovité hodnotě 35 V. Bohužel už při tomto kroku jsme zjistili poruchu na zesilovači. Ampérmetr vykazoval poměrně vysoké hodnoty proudu při velmi nízkém napětí. Za poruchou stálo mylné prohození vývodů „drain“ a „source“. Po opětovném přepájení tranzistorů již byla porucha vyřešena. Nastavili jsme jmenovité napětí na zdroji 35 V a odečetli na výstupu napěťový offset naprázdno 300 mV. Změřili jsme klidový proud I_0 , jestli zesilovač nevykazuje určitou nestabilitu. Klidový proud jsme naměřili 150 mA. Stejně jako naprázdno jsme postupovali při měření se zátěží 8 ohmů. Zde jsme změřili napěťový offset 1,3 mV.

Jako další krok jsme připojili vstupní signál. Při zkoušce měření výstupního výkonu byla zjištěna porucha. Při konstantním vstupním signálu 533 mV o frekvenci 1 kHz nám začala vypínat obvod nadproudová ochrana budiče. Vzhledem k této poruše jsme nemohli naměřit určité parametry jako harmonické zkreslení, maximální výstupní výkon při plném vybuzení atd. Její možné příčiny jsou uvedeny v závěru této práce.

4.1. Měření modulové frekvenční charakteristiky

Měření probíhalo při vstupní hodnotě signálu 150 mV generované funkčním generátorem. Výstupní napětí se měřilo pomocí osciloskopu na 8 ohmové zátěži. Postupně jsme zvyšovali frekvenci na funkčním generátoru při konstantní hodnotě vstupního napětí. Hodnoty modulové frekvenční charakteristiky jsou uvedené v tabulce (tab. 4.1), kde napěťové zesílení se vypočítalo ze vztahu (4.1). Na obrázku (obr. 4.1) je znázorněná naměřená frekvenční charakteristika.



Obr. 4.1: Modulová frekvenční charakteristika zesilovače třídy D

f [kHz]	0,016	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,1	0,5	1	2	5	10	15	20	30	31,5	32	50	60
A _u [dB]	13,1	14,5	17,3	19,6	21,3	22,7	23,7	24,6	25,7	26,0	26,1	25,2	24,8	25,4	26,3	26,3	26,2	25,8	25,6	22,1	18,1

Tab. 4.1: Vypočítané hodnoty zesílení modulové frekvenční charakteristiky

4.2. Měření zesílení

Při měření jsme měli k dispozici osciloskop, multimetr a funkční generátor. Byli jsme omezeni poruchou zmíněnou v úvodu této kapitole. Měření probíhalo tudíž při frekvenci vstupního signálu 1 kHz a hodnotě 490 mV. Na vstup zesilovače připojíme funkční generátor, nastavíme sinusový signál. Na výstup připojíme zátěž o hodnotě 8 ohmů. Osciloskopem měříme amplitudu výstupního napětí a z multimetru odečteme hodnotu vstupního napětí. Výstupní napětí bylo naměřeno 9,9 V. Výsledné zesílení vypočteme ze vztahu (4.1):

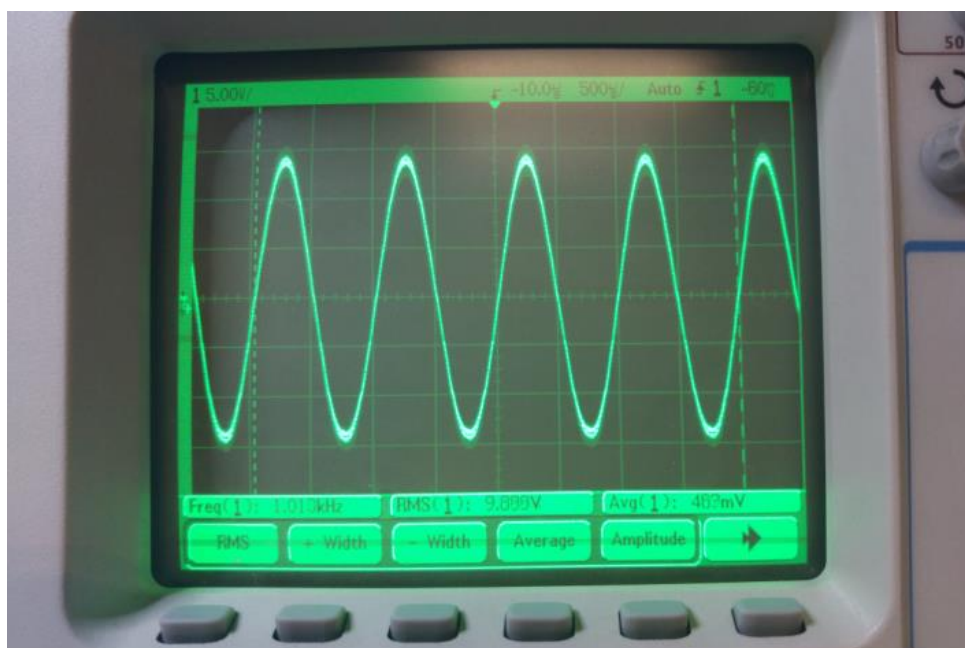
$$A_u = 20 \cdot \log\left(\frac{U_2}{U_1}\right) \text{ [dB]} \quad (4.1)$$

Kde: U_2 ...je výstupní napětí

U_1 ...je vstupní napětí

Po dosazení dostaneme zesílení:

$$A_u = 20 \cdot \log\left(\frac{9,9}{0,49}\right) = 26,11 \text{ dB} \quad (4.2)$$



Obr. 4.2: Výstupní signál při měření zesílení

4.3. Měření maximálního výkonu

Výstupní výkon byl změřen na odporové zátěži 8Ω při frekvenci 1 kHz a vstupním signálu 533 mV. Postupně se zvyšovalo vstupní napětí zesilovače, než se výstupní signál začal dostávat do limitace. Při tomto vstupním napětím se odečte hodnota výstupního napětí a dosadí se do vzorce (1.5), kde za U_{OUT} dosazujeme maximální hodnotu, ke zjištění maximálního výkonu. K tomu bohužel nedošlo z důvodu zásahu proudové ochrany budiče do obvodu. Příčina poruchy zatím nebyla zjištěna. Maximální výstupní napětí, které bylo možné naměřit, než zasáhla proudová ochrana, bylo 11 V. Dosazením do vzorce (1.5) dostaneme maximální výstupní výkon zesilovače 15 W, než zasáhne proudová ochrana.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provést rešerši monolitických spínaných zesilovačů třídy D, z té vybrat nejvhodnější zesilovač dle námi stanovených požadavků v kapitole 1 a následně zesilovač navrhnout a zrealizovat.

V kapitole 2 jsem provedl rešerši monolitických zesilovačů a budičů, pracujících ve třídě D několika světových výrobců. Z této rešerše byl vybrán obvod IRS2092 jako řešení budiče s použitím externích výkonových MOSFET tranzistorů splňující naše požadavky. Při samotné realizaci se toto řešení ukázalo jako méně vhodné z hlediska složitosti a finančních nákladů.

Při konstrukci zesilovače jsem narazil na několik problémů, které se povedlo částečně odstranit. Jednalo se především o nevhodně zvoleném průřezu vodivých cest na DPS. Tento problém jsem vyřešil nouzově, z hlediska časové tísně, jejich pocínováním. Reálný pohled na pocínované cesty je vidět v příloze na obrázku (obr. D.3). Jako dalším problémem při konstrukci bylo přehlédnutí špatně zapojeného kondenzátoru C9, který byl původně zapojen k pinu LO místo k pinu VCC. Jelikož už byla DPS vyrobena, vyřešil jsem to připájením jednoho konce kondenzátoru ke správnému pinu a původní díru prolil cínem. Jako dalším problémem bylo neuvažování vazebních kondenzátorů na svorkách napájecího napětí tranzistorů. Ty byly nouzově připájeny. Poslední problém byl v osazení pouzdra s výkonovými tranzistory, kdy jsem původně uvažoval při návrhu v programu Eagle osazení z pohledu součástek, avšak jsem tomu nepřizpůsobil cestičky, které byly navrženy z pohledu spojů (zadní strany). To je řešeno přepájením pouzdra.

Při ožívování spínaného zesilovače nás provázely jisté problémy. Byla zjištěná porucha, při které se zapínala nadproudová ochrana budiče již při výstupním napětím 11 V, kterému odpovídá výkon 15 W. Z tohoto důvodu probíhalo výsledné měření v rámci možností zesilovače. Jako možná příčina poruchy může být nedostatečně dimenzovaná tlumivka na výstupu zesilovače, která byla z důvodu nevhodné velikosti původní tlumivky zaměněna za menší, na proudové zatížení 3 A, místo původních 5 A. Při měření frekvenční charakteristiky vykazovala tlumivka známky poměrně velkého přetížení, jádro bylo přesycené, vznikaly na ní velké tepelné ztráty. Jako řešení se jeví

výměna za větší tlumivku, s větším feritovým jádrem a větším proudovým zatížením. Jako další možnou příčinu jsem našel v záměně odporů pro nastavení „deadtime“. Při této záměně nevíme, jakou máme prodlevu mezi spínáním tranzistorů, to může vést až k invertorovému zkratu. Jako další příčinou může být zvolená, poměrně vysoká hodnota odporu na vstupu budiče OCSET, čímž se nám nastavuje velikost maximálního povoleného proudu, na který reaguje proudová ochrana. Bohužel z důvodu časové tísně jsem již nemohl realizovat opravy zapojení.

Při měření modulové frekvenční charakteristiky se zesílení zesilovače, při omezených parametrech, pohybuje v audio pásmu kolem 25 dB. Z charakteristiky (obr. 4.1) lze přibližně určit přenosové pásmo, které přibližně dosahuje hodnot od 60 Hz až do 40 kHz. Z tohoto údaje jsme zjistili, že při nízkých kmitočtech nám úroveň zesílení klesá dříve, než jsme vyžadovali. Tento pokles mohou způsobovat přidané vazební kondenzátory. Při měření maximálního výkonu, nám proudová ochrana neumožnila změřit větší výkon než 15 W, měřený při 1 kHz a vstupním napětím 533 mV.

V této práci byla úspěšně provedena rešerše zesilovačů a budičů pracujících ve třídě D dle bodu zadání 2. Stanovil jsem požadavky, pro které jsem navrhl vhodné technické řešení dle bodu zadání 3. Zrealizoval jsem výsledný zesilovač a naměřil hodnoty dle možností, při neúplné funkčnosti zesilovače z výše uvedených důvodů.

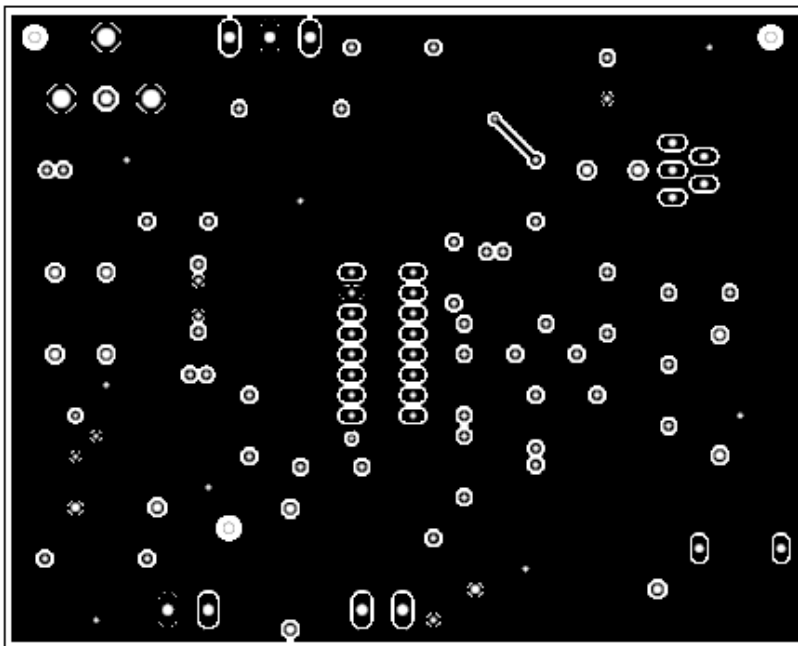
Výrobou zesilovače jsem se zdokonalil hned v několika odvětvích. Mezi první patří navrhování v programu Eagle, kde jsem byl před realizací tohoto zesilovače jako nezkušený začátečník. Nyní tento program ovládám již pokročile a navrhuji do budoucna opravu DPS pro tuto práci. Mezi další přínos můžeme zařadit zručnost v pájení, které jsem v této práci potřeboval nejvíce.

Seznam použité literatury

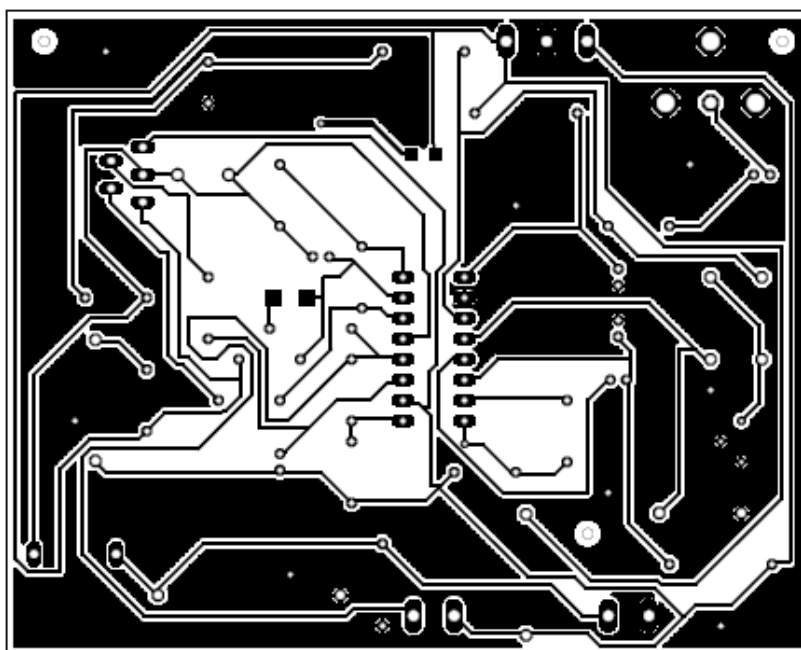
- [1] ŠTÁL, Petr. Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D. 1. vydání. Praha: BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-230-5.
- [2] LÁNÍČEK, Robert. Elektronika. Obvody-součástky-děje. 1. vydání. Praha: BEN, 2002. ISBN 80-86056-25-2
- [3] Datasheet IRS2092, Protected digital audio amplifier. International Rectifier, 2013. 17 s.
- [4] Datasheety výrobců dostupné na stránkách: < <http://www.datasheetcatalog.com/>>
- [5] BECK, Tomáš. Výkonové zesilovače pro aktivní reprosoustavu. Plzeň, 2011. 44 s. Bakalářská práce. Fakulta elektrotechnická ZČU Plzeň.
- [6] Prodance. Co znamená povolený příkon reproduktoru a jaký zvolit výkon zesilovače. Dostupné na stránkách:
< http://www.prodance.cz/upload/files/Optimalizace_vykonu.pdf>
- [7] KOTISA, Zdeněk. NF ZESILOVAČE. 3. díl tranzistorové výkonové zesilovače. 1. vydání. Praha: BEN, 2003. ISBN 80-7300-065-2.
- [8] TILLER, Jakub. Digitální audio zesilovače. Brno, 2010. 79 s. Bakalářská práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vysoké učení technické v Brně.

Přílohy

A. Desky plošných spojů

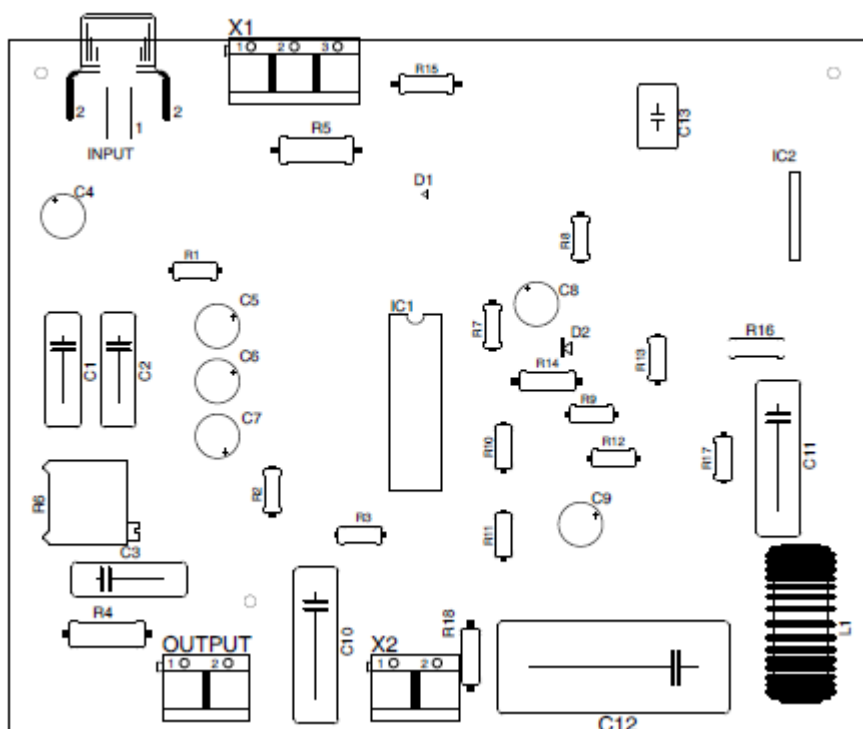


Obr. A.1: Horní vrstva (pohled ze strany součástek)



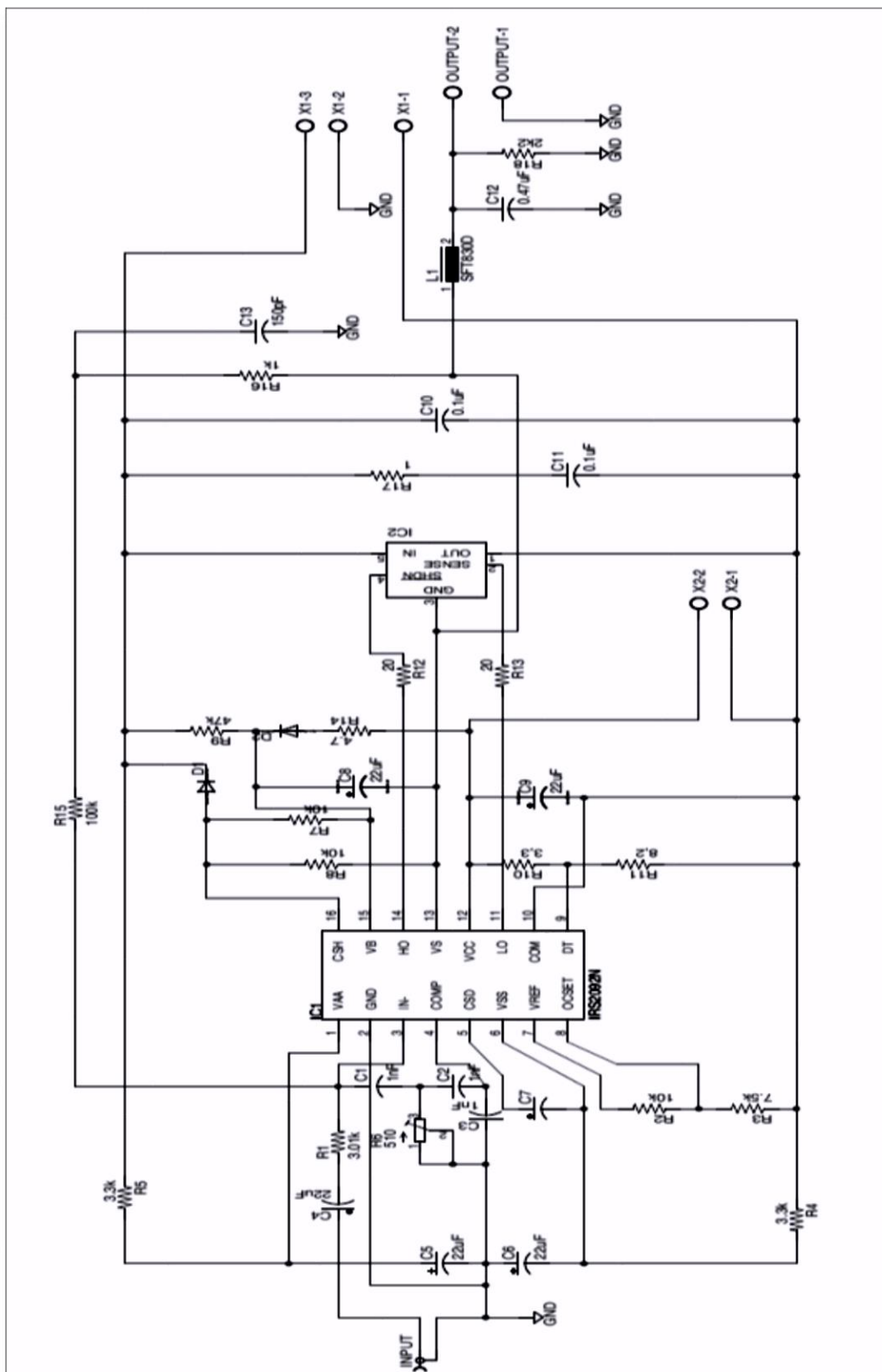
Obr. A.2: Spodní vrstva (pohled ze strany spojů)

B. Rozvržení osazení součástek



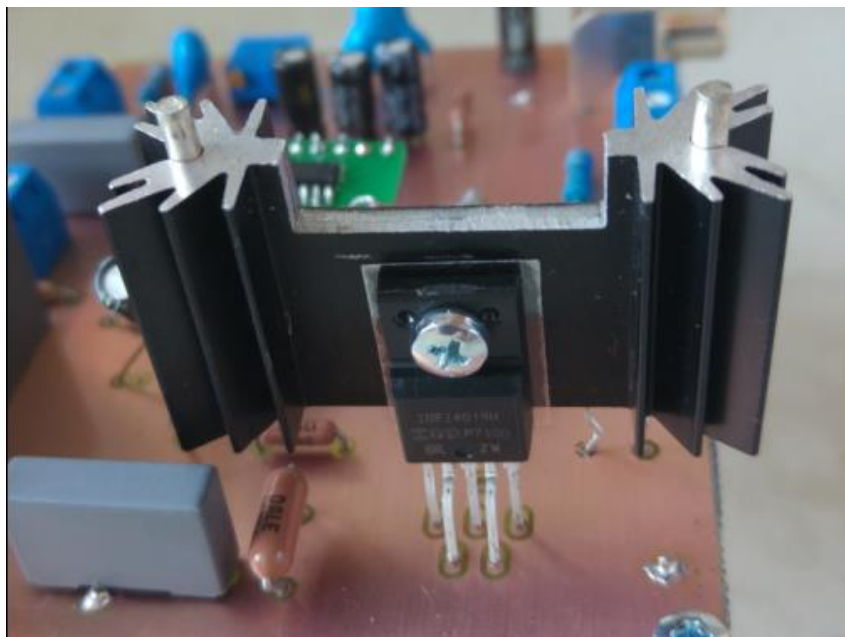
Obr. B.1: Rozvržení součástek na DPS zesilovače třídy D

C. Schéma zapojení

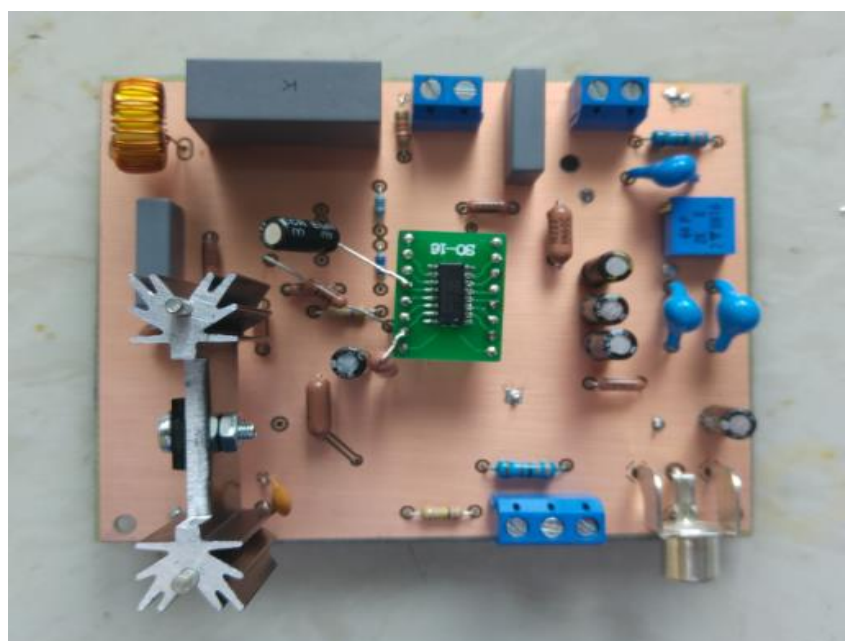


Obr. C.1: Schéma zapojení zesilovače IRS2092

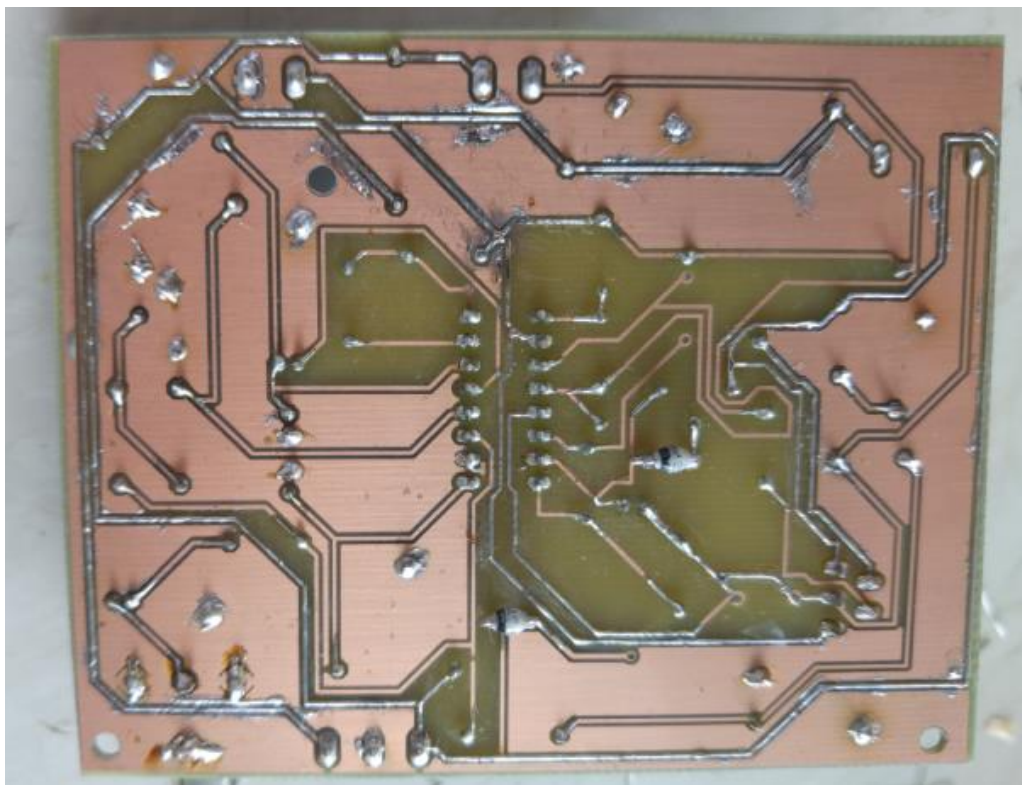
D. Zrealizovaný zesilovač třídy D



Obr. D.1: Reálný pohled na chladič zesilovače



Obr. D.2: Reálný pohled na zesilovač ze strany součástek



Obr. D.3: Reálný pohled na zesilovač ze spodní strany spojů