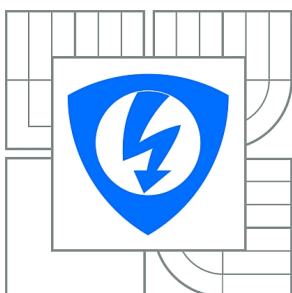




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

# REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA S PŘÍMOU D/A KONVERZÍ

DIGITAL TRANSDUCER ARRAY LOUDSPEAKERS SYSTEM

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**PETR LEŽÁK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. JIŘÍ SCHIMMEL, Ph.D.**

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** Petr Ležák

**ID:** 106225

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

### Reproduktorová soustava s přímou D/A konverzí

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte vzorek aktivní reproduktorové soustavy se sedmi širokopásmovými reproduktory, která bude fungovat jako osmibitový elektroakustický vysílač s přímou D/A konverzí (digitální reproduktorové pole). Snažte se dosáhnout co nejmenších rozměrů soustavy.

Zvolte vhodný integrovaný zesilovač a jeho doporučené zapojení upravte pro buzení jednotlivých reproduktorů systému tak, aby zesiloval v měřítku odpovídajícímu vahám jednotlivých bitů. Prostudujte možnosti buzení systému digitálním zvukovým signálem rozhraní S/PDIF, případně navrhnete alternativní řešení buzení systému. Navrhněte schéma a desku plošných spojů vstupní části pro buzení zesilovačů a celý systém realizujte.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Mendoza-López, J., Busbridge, S., C., Fryer, P., A., "Direct Acoustic Digital to Analogue Conversion with Digital Transducer Array Loudspeakers". Audio Engineering Society Convention Paper, 118th AES Convention, 2005 May 28–31, Barcelona, Spain.

[2] Toman, K., Reprodukory a reprosoustavy, 1 díl. 2003.

[3] Sýkora, B., "Stavíme reproduktorové soustavy", 1. - 48. díl. A Radio 10/1997 - 9/2001.

[4] Rumsey, F., Watkinson, J., Digital Interface Handbook, 3rd ed. Focal Press, 2004. ISBN 0-240-51909-4

[5] Váňa, V., Mikrokontroléry ATMEL AVR - popis procesorů a instrunční soubor. Nakladatelství BEN, Praha, 2003. ISBN 80-7300-083-0

**Termín zadání:** 29.1.2010

**Termín odevzdání:** 2.6.2010

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

# Abstrakt

Práce pojednává o problematice reproduktorů s přímou D/A konverzí, možnostech jejich technického řešení a konstrukce. Rozebírá klasický převod digitálního signálu na analogový pomocí D/A převodníku, zesilovače a reproduktoru a jeho možné náhrady pomocí reproduktoru s přímou D/A konverzí.

Hlavní část práce je věnována návrhu reproduktorové soustavy s přímou D/A konverzí a vhodného budiče pro ni. Je zde navržen budič reproduktorové soustavy, a to od blokového schématu až ke konkrétnímu elektrickému obvodu a deskám s plošnými spoji. Podobně je v práci uveden návrh uzavřené ozvučnice se šesti reproduktory a simulace jejich parametrů v simulačním programu.

Konstrukce byla sestavena a oživena. Bylo navrženo její buzení signálem z paralelního portu počítače a za tímto účelem byl sestaven vhodný program generující digitální sinusový signál. Následně byly změřeny její elektrické i akustické vlastnosti a získané výsledky jsou v práci uvedeny a posouzeny.

# **Abstract**

This thesis discusses loudspeakers with a direct D/A conversion, possibilities of their technical solution and construction. It analyses classic conversion of digital signal to analog with D/A converters, amplifiers and loudspeakers and possibilities of its replacement by loudspeakers with a direct D/A conversion.

The main part of thesis is devoted to design of a loudspeaker with a direct D/A conversion and a proper exciter for it. The exciter is designed from a block diagram to a specific electric circuit and printed circuit boards. The loudspeaker system is designed as well and the results of its simulations are included in this thesis.

The device was constructed and tested. The program which generates digital harmonic signal on parallel port was written and electric and acoustic properties of the device was measured and discussed.

## **Klíčová slova**

reproduktor, buzení, ozvučnice, charakteristika, D/A

## **Keywords**

loudspeaker, excitation, enclosure, characteristics, D/A

# Citace práce

LEŽÁK, P. *Reproduktorová soustava s přímou D/A konverzí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Reproduktorová soustava s přímou D/A konverzí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny 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 panu Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za odborné vedení práce a pomoc při proměřování konstrukce.

Děkuji přítelkyni Daně Šebkové za velkou trpělivost a podporu.



# Obsah

1 Úvod.....	13
2 Rozbor problematiky.....	14
2.1 Sčítání mechanických sil v akustickém měniči.....	15
2.2 Pole akustických měničů.....	16
2.3 Soustava reproduktorů buzených váhovaným signálem.....	17
2.3.1 Způsoby buzení reproduktorů.....	18
3 Návrh obvodu.....	20
3.1 Blokové schéma.....	20
3.2 Schema zapojení.....	20
3.2.1 Zdroj.....	20
3.2.2 Dekodér.....	21
3.2.3 Výkonový zesilovač.....	22
3.2.4 Zdroj referenčního napětí.....	23
3.2.5 Útlumový článek.....	24
3.2.6 Oddělovač útlumového článku.....	29
3.2.7 Elektronický spínač.....	30
3.2.8 Rozdílový zesilovač.....	31
3.3 Návrh reproduktorové soustavy.....	32
3.3.1 Parametry reproduktoru.....	32
3.3.2 Návrh uzavřené ozvučnice.....	33
4 Výsledky měření.....	35
5 Závěr.....	41
Seznam použitých zdrojů.....	43
Seznam použitých zkratk, veličin a symbolů.....	44
Seznam příloh.....	45
Příloha A Výkresy ozvučnice.....	46
Příloha B Celkové schéma obvodu.....	50
Příloha C Plošné spoje.....	54
Příloha D Seznam součástek.....	58
Obsah příloženého CD.....	59

# Seznam obrázků

Obr. 2.1: Klasická reprodukce digitálního signálu.....	14
Obr. 2.2: Princip A/D převodu.....	14
Obr. 2.3: Periodizace spektra po rekonstrukci signálu.....	15
Obr. 2.4: Reproduktor s více cívkami.....	16
Obr. 2.5: Pole akustických měničů.....	17
Obr. 2.6: Soustava reproduktorů buzených váhovaným signálem.....	17
Obr. 3.1: Blokové schéma budiče digitálního reproduktoru.....	20
Obr. 3.2: Schéma zdroje.....	21
Obr. 3.3: Schéma dekodéru.....	21
Obr. 3.4: Výkonový zesilovač.....	22
Obr. 3.5: Schéma zdroje referenčního napětí.....	23
Obr. 3.6: Nekonečná síť útlumových článků.....	24
Obr. 3.7: Zatížený útlumový článek.....	25
Obr. 3.8: Výpočet vnitřního odporu.....	26
Obr. 3.9: Celkové schéma řetězu útlumových článků.....	27
Obr. 3.10: Konkrétní schéma řetězu útlumových článků.....	28
Obr. 3.11: Schéma oddělovače útlumového článku.....	29
Obr. 3.12: Schéma elektronického spínače.....	30
Obr. 3.13: Schéma rozdílového zesilovače.....	31
Obr. 3.14: Zjednodušený model pro výpočet objemu reproduktoru.....	33
Obr. 3.15: Frekvenční charakteristika reproduktorové soustavy.....	34
Obr. 4.1: Průběh napětí na výstupu 5. zesilovače.....	35
Obr. 4.2: Průběh napětí na výstupu 4. zesilovače.....	35
Obr. 4.3: Průběh napětí na výstupu 3. zesilovače.....	36
Obr. 4.4: Průběh napětí na výstupu 2. zesilovače.....	36
Obr. 4.5: Průběh napětí na výstupu 1. zesilovače.....	37
Obr. 4.6: Průběh napětí na výstupu 0. zesilovače.....	37
Obr. 4.7: Průběh součtového napětí.....	38
Obr. 4.8: Průběh zesíleného napětí naměřeného měřicím mikrofonom ve výšce 156 cm nad zemí.....	39
Obr. 4.9: Průběh zesíleného napětí naměřeného měřicím mikrofonom ve výšce 154 cm nad zemí.....	39
Obr. 4.10: Průběh zesíleného napětí naměřeného měřicím mikrofonom ve výšce 147 cm nad zemí.....	40
Obr. 4.11: Průběh zesíleného napětí naměřeného měřicím mikrofonom při zapojení pouze nejvíce významného reproduktoru.....	40
Obr. 5.1: K výpočtu dráhového rozdílu vln.....	41
Obr. A.1: Výkres sestavení ozvučnice.....	46
Obr. A.2: Výkres přední stěny ozvučnice.....	47
Obr. A.3: Výkres zadní stěny ozvučnice.....	48
Obr. A.4: Výkres horní a spodní stěny ozvučnice.....	49
Obr. A.5: Výkres bočních stěn ozvučnice.....	49
Obr. B.1: Schéma napájecího zdroje.....	50
Obr. B.2: Schéma dekodéru.....	51
Obr. B.3: Celkové schéma budiče digitálního reproduktoru.....	52
Obr. B.4: Schéma budícího článku.....	53
Obr. C.1: Rozmístění součástí dekodéru.....	54
Obr. C.2: Obrazec plošného spoje dekodéru.....	54
Obr. C.3: Rozmístění součástí napájecího zdroje.....	54
Obr. C.4: Obrazec plošného spoje napájecího zdroje.....	54

Obr. C.5: Rozmístění součástek budiče.....	55
Obr. C.6: Obrazec plošného spoje budiče - strana součástek.....	56
Obr. C.7: Obrazec plošného spoje budiče - strana spojů.....	57

# Seznam tabulek

Tab. 2.1: Porovnání způsobů buzení reproduktorů.....	19
Tab. 3.1: Výstupní napětí řetězu útlumových článků.....	28
Tab. D.1: Seznam součástí.....	58

# 1 Úvod

V rozboru problematiky se pojednává o klasickém způsobu převodu digitálního signálu na analogový pomocí D/A převodníku, zesilovače a reproduktoru. Dále pak o možném nahrazení tohoto řetězce reproduktorem s přímou D/A konverzí. Je zde pojednáno o možných způsobech konstrukce takovýchto reproduktorů, jmenovitě sčítání mechanických sil v akustickém měniči, pole akustických měničů a soustava reproduktorů buzených váhovaným signálem. Jednotlivé konstrukce se srovnávají a u každé z nich se uvádějí její výhody a nevýhody. Vybraná konstrukce - soustava reproduktorů buzených váhovaným signálem – je blíže rozebrána a je pojednáno o možnostech jejího buzení dvoustavovým signálem, souhlasným třístavovým signálem a obecným třístavovým signálem. Posledně jmenovaný způsob buzení je pak vybrán jako nejvhodnější a je dále využit.

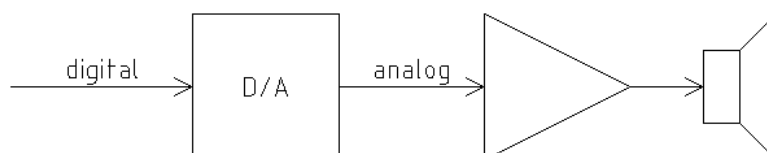
Hlavní část práce je věnována návrhu takovéto reproduktorové soustavy a vhodného budiče pro ni. Konstrukce je nejprve navržena jako blokové schéma sestávající z funkčních bloků a je rozebrána jako celek. Jednotlivé funkční bloky jsou pak detailně navrženy, propočítány a sestaveny do celkového obvodu. K celému zapojení je navrženo několik desek s plošnými spoji. Podobně byla navržena i uzavřená ozvučnice se šesti reproduktory a byly odsimulovány její charakteristiky.

Konstrukce byla poté sestavena a oživena. Bylo navrženo její buzení signálem z paralelního portu počítače a za tímto účelem byl sestaven vhodný program generující digitální sinusový signál. Následně byly změřeny její elektrické i akustické vlastnosti a získané výsledky jsou v práci uvedeny.

V závěru je celá konstrukce a její vlastnosti zhodnoceny, jsou navržena její možná vylepšení a možné cesty budoucího vývoje.

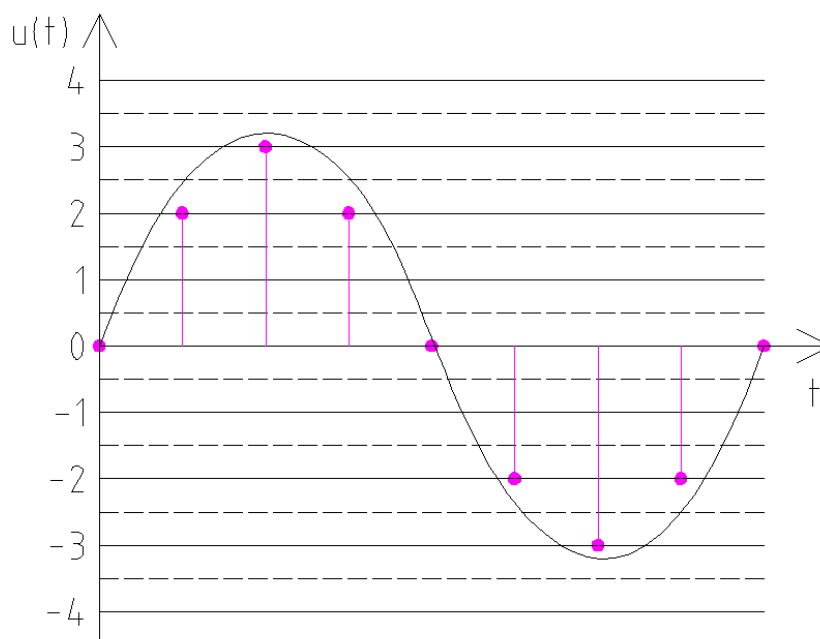
## 2 Rozbor problematiky

Již delší dobu je zvukový signál zpracováván číslicově. Kompaktní disky, DVD, digitální televizní vysílání i počítače, to všechno jsou digitální zdroje zvuku. V současné době je číslicový signál pomocí D/A převodníku převeden na analogový elektrický signál, zesílen a v reproduktorové soustavě převeden na akustický tlak. Toto je schematicky zakresleno na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Klasická reprodukce digitálního signálu.

Digitální signál přichází v podobě série čísel udávajících okamžité hodnoty odpovídajícího analogového signálu. Původní analogový signál byl nejdříve navzorkován a jednotlivé vzorky byly kvantovány (reprezentovány nejbližší úrovní z konečné množiny úrovní). Tento proces je zobrazen na obr. 2.2.



Obr. 2.2: Princip A/D převodu.

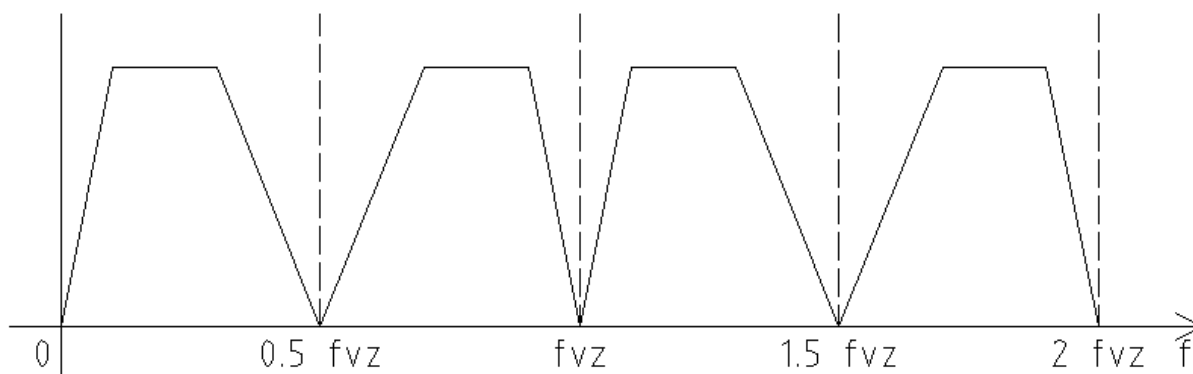
Kvalita takto přenášeného signálu je určena vzorkovací frekvencí  $f_v$  a počtem kvantizačních hladin.

Vzorkovací frekvence omezuje nejvyšší přenášenou frekvenci. Podle Shannonova teorému totiž musí platit

$$f_{vz} \geq 2 \cdot f_{max} ,$$

kde  $f_{vz}$  je vzorkovací frekvence a  $f_{max}$  je nejvyšší přenášená frekvence.

Po rekonstrukci navzorkovaného signálu dojde k periodizaci spektra. Původní harmonický signál s frekvencí  $f$  se rozvine v součet nekonečně mnoha harmonických signálů s frekvencemi  $n \cdot f_{vz} \pm f$ . Kmitočtové spektrum signálu je proto po rekonstrukci změněno tak, jak je naznačeno na obr. 2.3.



Obr. 2.3: Periodizace spektra po rekonstrukci signálu.

Proto musí být součástí D/A převodníku dolní propust s mezní frekvencí  $\frac{f_{vz}}{2}$ , která odfiltruje nově vzniklé složky signálu.

Počet kvantizačních hladin určuje, jak moc budou hodnoty vzorků signálu změněny pro přenos digitálním kanálem. Čím větší bude počet hladin, tím k menšímu zkreslení dojde. Kvantování se projevuje vznikem kvantizačního šumu. Kvantizační hladiny se obvykle reprezentují  $n$ -bitovým binárním číslem, které umožňuje vyjádřit  $2^n$  různých kvantizačních hladin. Celá problematika je podrobně probrána například v [1].

Protože analogový signál je náchylný k rušení a zkreslení, musí být D/A převodník, zesilovač i reproduktor co nejvíce lineární a odolné proti vnikání šumu. Zejména reproduktory se však lineární nedaří vyrábět. I velmi kvalitní reproduktory mají činitel harmonického zkreslení řádově jednotky procent. Proto je již delší dobu snaha budovat reproduktory digitálním signálem. Konverze digitálního signálu na analogový se pak děje přímo v reproduktoru, popřípadě v soustavě reproduktorů. Odpadne tedy D/A převodník a zesilovač lze vyrobit mnohem jednodušší, pracující pouze se dvěma popřípadě třemi stavy.

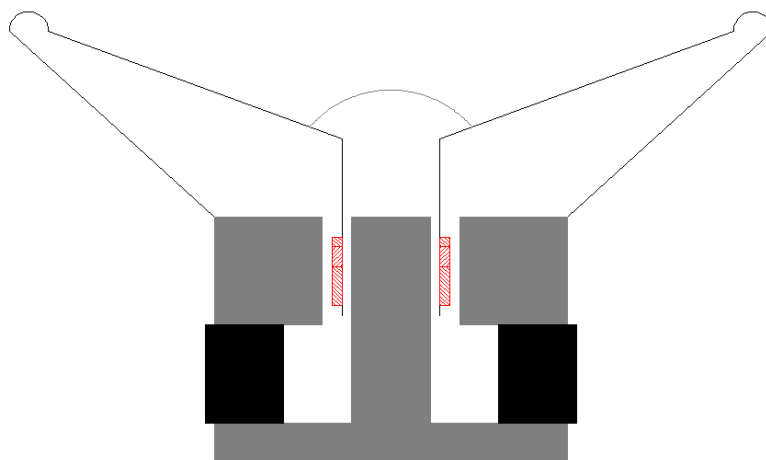
Existuje několik způsobů, jak přímou D/A konverzi provádět (viz [2]) :

- a. sčítání mechanických sil v akustickém měniči (viz část 2.1)
- b. sčítání akustických tlaků
  1. pole akustických měničů (viz část 2.2)
  2. soustava reproduktorů buzených váhovaným signálem (viz část 2.3)

## 2.1 Sčítání mechanických sil v akustickém měniči

Akustický měnič obsahuje více cívek s váhovaným počtem závitů. Při průtoku stejného

proudu je síla působící mezi cívkou a magnetem přímo úměrná počtu závitů cívky. Na obr. 2.4 je zobrazeno schema dynamického reproduktoru se třemi cívkami, systém je tedy tříbitový.



Obr. 2.4: Reproduktor s více cívkami.

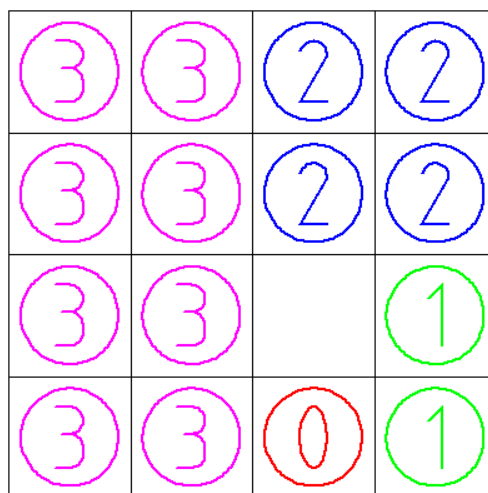
Síla působící mezi cívkou a magnetem je úměrná magnetické indukci magnetem vyvolané. Proto je nutné, aby pole magnetu bylo homogenní, jinak by síla nebyla přesně úměrná počtu závitů a navíc by závisela na poloze cívky vůči magnetu, tedy na výchylce membrány reproduktoru. Důsledkem by byl vznik nelinearity. Také je nutné, aby cívkami procházel proud stejné velikosti. Zesilovače obvykle budí zátěž napěťově a zde se projeví různá impedance cívek a z toho plynoucí frekvenční závislost poměru sil jednotlivých cívek.

Tento systém je bohužel amatérsky těžko realizovatelný, protože by vyžadoval konstrukci nebo alespoň úpravu reproduktoru.

## 2.2 Pole akustických měničů

Soustava obsahuje  $2^n - 1$  stejných reproduktorů, přičemž váhování bitů je dosaženo počtem reproduktorů náležících danému bitu. Akustický tlak je ve velké vzdálenosti od reproduktorového pole úměrný počtu reproduktorů, jejich příspěvky se sčítají. Obr. 2.5 zobrazuje možné uspořádání čtyřbitového systému, obsahuje tedy 15 reproduktorů. Vícebitové systémy mohou obsahovat neúměrně mnoho reproduktorů. Například dnes běžný šestnáctibitový měnič potřebuje 65535 reproduktorů.



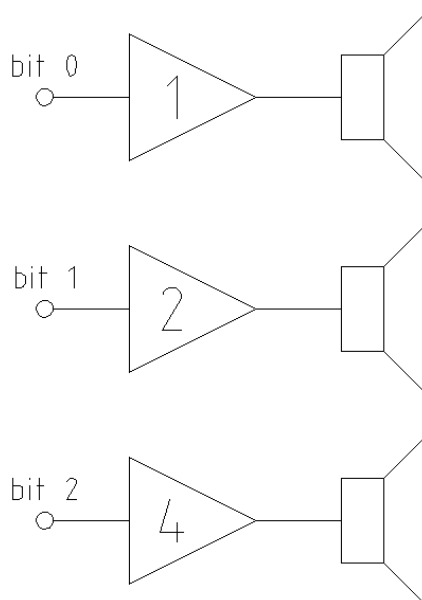


Obr. 2.5: Pole akustických měničů.

Takovýto systém je perspektivní pro průmyslovou výrobu, větší množství například piezoelektrických akustických měničů lze totiž hromadně vyrábět. Pro amatérskou experimentální konstrukci však opět není vhodný.

### 2.3 Soustava reproduktorů buzených váhovaným signálem

Soustava obsahuje pro každý bit jeden reproduktor. Reproduktery jsou buzeny různě silným signálem, každý proto vytváří jinak velký akustický tlak. Akustický tlak se ve velké vzdálenosti od soustavy sčítá, při vhodné volbě vah je proto výsledný akustický tlak úměrný vstupnímu digitálnímu číslu.



Obr. 2.6: Soustava reproduktorů buzených váhovaným signálem.

Obr. 2.6 zobrazuje schéma tříbitového systému. Každý bit má vlastní zesilovač s jiným zesílením, následující zesilovač má vždy dvojnásobné zesílení než zesilovač předchozí.

Takovýto systém lze budít přímo číslem ve dvojkovém zápisu.

Jsou-li všechny reproduktory stejné a lineární, pak podle principu superpozice je lhostejné, zda se signály od jednotlivých zesilovačů sečtou elektricky (vlastně by se jednalo o klasický D/A převod), nebo až po převodu na akustický tlak („ve vzduchu“). Budiče a zesilovače proto musejí být navrženy tak, aby elektrický součet signálů dával požadovaný průběh, tedy aby okamžitá hodnota tohoto součtu byla úměrná reprodukovánému vzorku.

Aby došlo k sečítání akustických tlaků od jednotlivých reproduktorů i mimo osu reproduktorové soustavy, je nutné, aby posluchač byl v řádově větší vzdálenosti, než jsou rozměry soustavy. Pak jsou totiž kulové vlnoplochy přibližně stejné, jako vlnoplochy rovinné.

### 2.3.1 Způsoby buzení reproduktorů

V úvahu přicházejí 3 způsoby buzení reproduktorů – binárním signálem, souhlasným třístavovým signálem a obecným třístavovým signálem.

#### Buzení binárním signálem

Je nejjednodušší způsob buzení, protože nevyžaduje žádné překódování vstupu. Každý reproduktor je buzený dvoustavovým signálem  $\{-1, +1\}$  a přímo odpovídá jednomu bitu binární reprezentace vzorku. Počet reproduktorů je proto stejný jako počet bitů vzorku, pro  $n = 8$  vstupních bitů tak potřebujeme  $r = 8$  reproduktorů.

#### Buzení souhlasným třístavovým signálem

Při tomto druhu buzení je každý reproduktor buzený třístavovým signálem, tedy stavy  $\{-1, 0, +1\}$ , ale všechny reproduktory jsou buzeny signálem se stejným znaménkem, které je určeno nejvyšším bitem binární reprezentace vzorku. Počet reproduktorů je proto o jedno menší než počet bitů vzorku. Tento způsob buzení je využit například v [2] a [3]. Třístavové buzení vyžaduje složitější budič, než v případě binárního buzení, nemusí mu ale předcházet žádný dekodér převádějící vstupní slova na jiný kód.

Pro  $n = 8$  vstupních bitů potřebujeme  $r = 7$  reproduktorů.

#### Buzení obecným třístavovým signálem

Vstupní binární slovo je převedeno do trojkové soustavy a každý reproduktor je buzen trojstavovým signálem  $\{-1, 0, +1\}$  odpovídající jedné číslici trojkového čísla. Některé reproduktory proto mohou být v jeden okamžik buzeny kladným, jiné záporným napětím. Počet reproduktorů je lze určit vztahem

$$r = n \cdot \log_3 2 \approx 0,631 n \quad , \quad (2.1)$$

kde  $r$  je počet reproduktorů a  $n$  je počet bitů vstupního slova. Získaný počet reproduktorů je nutné zaokrouhlit k nejbližšímu vyššímu celému číslu. Pro  $n = 8$  vstupních bitů tak dostáváme  $r = 5,05$ , je tedy nutných 6 reproduktorů. Ty ale stačí i pro  $n = 9$  vstupních bitů, protože pak dostáváme  $r = 5,68$ . Tento způsob vyžaduje stejné buzení, jako při buzení souhlasným třístavovým signálem, navíc mu ale musí předcházet dekodér z binárního kódu na trojkové číslo.

#### Porovnání způsobů z hlediska efektivity

Efektivitu buzení vyjádřím počtem bitů, které je schopen pojmout jeden reproduktor, tedy

podílem  $\frac{n}{r}$ . Zvolené kritérium není vhodné ve všech případech – dle něj by bylo například neúčinnější převést vstupní digitální signál na analogový a budít s ním jeden reproduktor. Pro

porovnání výše navržených metod buzení však postačuje.

*Tab. 2.1:* Porovnání způsobů buzení reproduktorů.

<b>Způsob buzení</b>	<b>Počet vstupních bitů</b>	<b>Počet reproduktorů</b>	<b>Efektivita</b>
binárním signálem	8	8	1
souhlasným třístavovým signálem	8	7	1,14
obecným třístavovým signálem	9	6	1,5

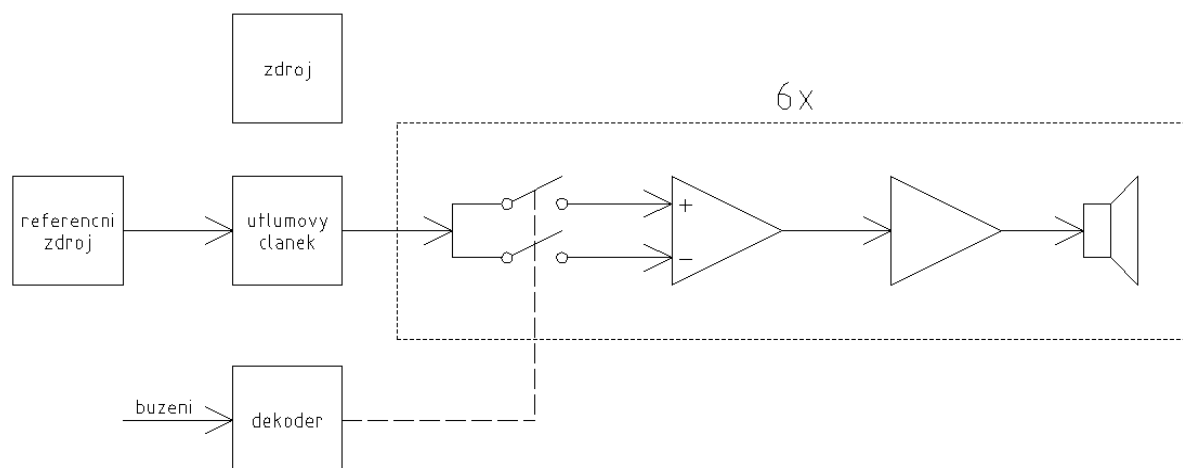
Pro svou nejlepší efektivitu jsem vybral buzení obecným třístavovým signálem, přestože přináší komplikace s převodem dvojkového čísla na trojkové.

# 3 Návrh obvodu

## 3.1 Blokové schéma

Zapojení zajišťuje buzení reproduktorů třístavovým signálem. Skupinu výstupních signálů si lze představit jako číslo zapsané pomocí trojkové soustavy s číslicemi z množiny  $\{-1; 0; +1\}$ . Následující článek má vždy třetinovou váhu oproti předchozímu.

K zápisu 256 různých čísel (8 bitů) je třeba 6 trojkových číslic. Pomocí nich lze vyjádřit  $3^6 = 729$  různých čísel, systém tedy lze dokonce budít devítibitovým signálem. Nižší počet stupňů nelze zvolit, protože pomocí pěti trojkových číslic lze vyjádřit jen  $3^5 = 243$  různých čísel.



Obr. 3.1: Blokové schéma budiče digitálního reproduktoru.

Celkové pojetí obvodu je vidět z obr. 3.1. Vstupní digitální signál přichází paralelním rozhraním s devíti bity do dekodéru. Ten signál převede z binárního kódu na kód vhodný pro ovládání analogových elektronických spínačů. Napětí z referenčního zdroje je utlumeno v útlumovém článku. Ten zajistí tvorbu šesti napětí odpovídajících vahám jednotlivým číslic trojkové soustavy, následující napětí je tedy třetinové oproti předchozímu. Tato napětí jsou řízeně přiváděna skrze elektronické spínače do rozdílového zesilovače. Sepnutím vhodného spínače tak lze zajistit kladné i záporné napětí požadované velikosti. To je následně přivedeno do výkonového zesilovače, který budí jemu odpovídající reproduktor.

Napájecí napětí jsem zvolil 24V, protože je to nejvyšší napětí, k němuž lze běžně zakoupit hotový napájecí zdroj odpovídajícího výkonu.

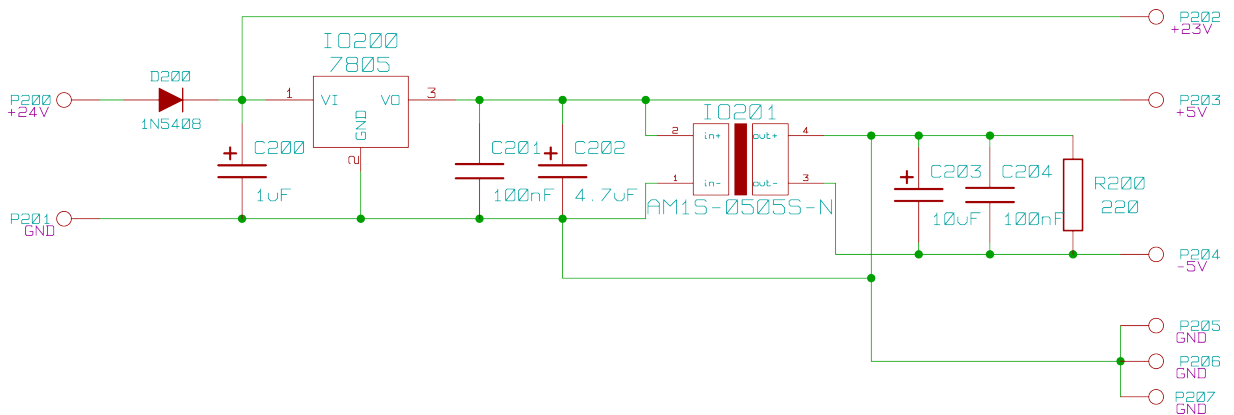
Zvolená koncepce není nejjednodušší. Zaručuje však přesné poměry velikostí signálů jednotlivých bitů a navíc umožňuje změnou referenčního napětí řídit velikosti signálů při zachování jejich poměru a tak analogově regulovat hlasitost reprodukce.

## 3.2 Schema zapojení

### 3.2.1 Zdroj

Zdroj je napájen z externího zdroje 24 V/2,7 A. Z přivedeného napětí následně vyrábí napětí nutná pro napájení obvodů. Dioda  $D_{200}$  chrání obvod proti přepólování napájecího napětí. Třívorkový stabilizátor  $IO_{200}$  zajišťuje stabilizované napájecí napětí pro digitální obvody a

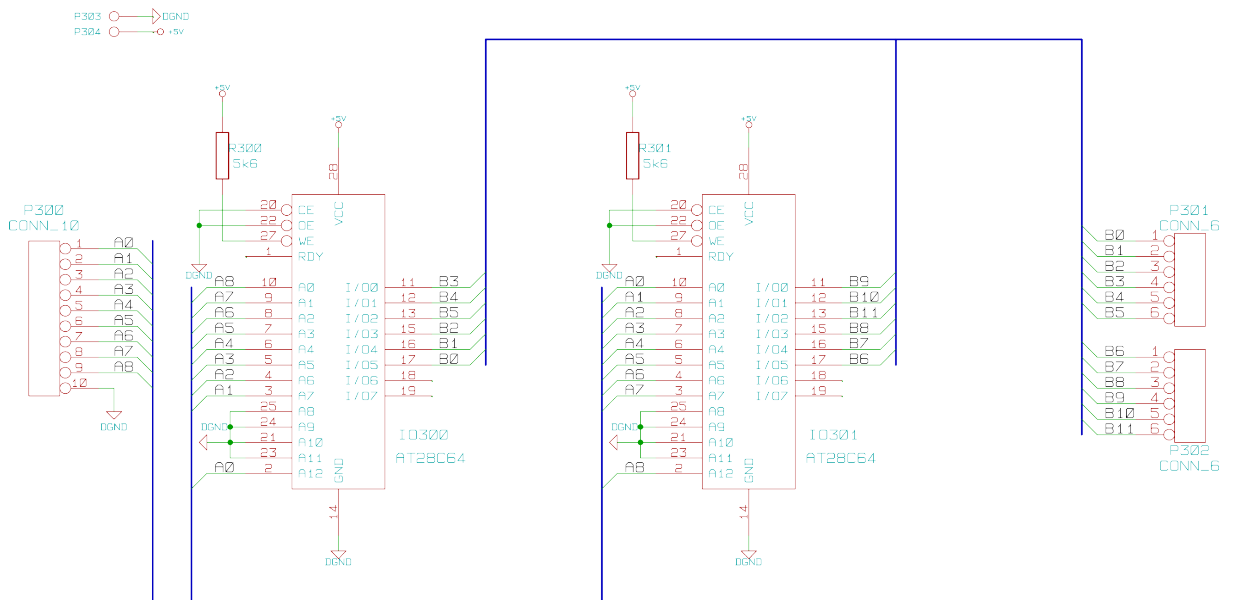
pro DC-DC měnič napětí IO<sub>201</sub>. Ten slouží ke tvorbě záporného napětí -5V pro napájení operačních zesilovačů. R<sub>200</sub> zajišťuje minimální zátěž pro měnič IO<sub>201</sub>, jehož výstupní proud nesmí poklesnout pod 10% nominální hodnoty. Kondenzátory slouží pro vyhlazení zvlnění napětí a potlačení rušivých impulsů z pulzního zdroje.



Obr. 3.2: Schéma zdroje.

### 3.2.2 Dekodér

Zapojení je buzeno binárním kódem ve dvojkovém doplňku, jednotlivé stupně jsou však buzeny z trojkového kódu. Je tedy třeba převést dvojkový kód na trojkový, což vykonává níže uvedený dekodér na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Schéma dekodéru.

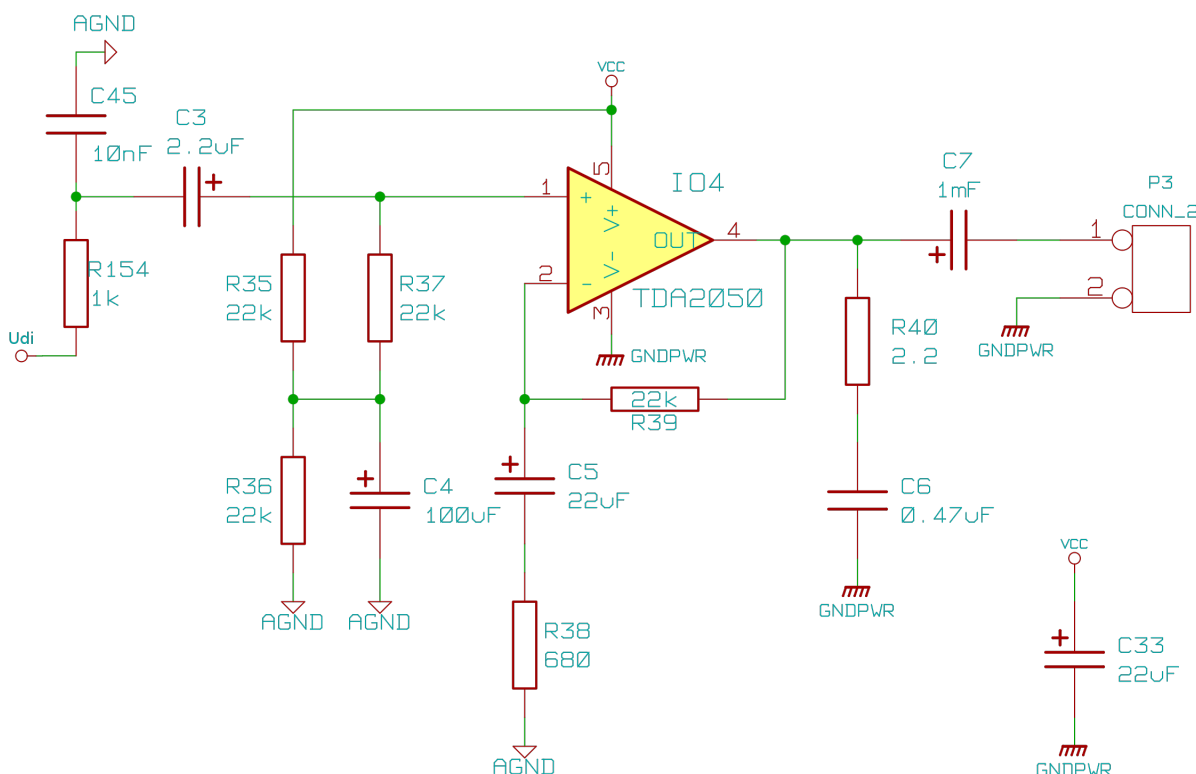
Zapojení obsahuje 2 EEPROM paměti AT28C64, které pracují jako převodní tabulka. Na jejich vstupy se přivede devítibitový binární kód, který vyadresuje příslušné výstupní slovo, které pak ovládá připojené elektronické spínače. Z důvodu optimalizace plošného spoje nejsou vstupní ani výstupní piny paměti zapojeny přímo na příslušné vodiče sběrnice, ale jsou zpřeházeny. Tabulky uložené v pamětech s tímto počítají a vnitřně realizují opačnou záměnu,

výsledek je proto správný. Tímto se podařilo zajistit, že deska dekodéru je pouze jednostranná. Data pro paměti nebyla generována ručně, ale pomocí krátkého programu, který je spolu s obsahem paměti na přiloženém CD. Více o použitých pamětech lze najít v [4].

### 3.2.3 Výkonový zesilovač

V obvodu se nachází 6 shodných zesilovačů, pro každý článek jeden. Všechny využívají integrovaného obvodu TDA2050 ve výrobcem doporučeném zapojení, které je převzato z [5]. Tyto zesilovače jsou schopny pracovat do zátěže 4 Ω i 8 Ω.

Podle údajů výrobce je zesilovač schopen dodat do zátěže 4 Ω výkon 15 W při napájecím napětí 24 V. Tento výkon bude dodávat zesilovač nejvíce významného článku. Schéma zesilovače je na obr. 3.4.



Obr. 3.4: Výkonový zesilovač.

Zesilovač je napájen nesymetrickým napětím, proto potřebuje na svém vstupu stejnosměrnou složku rovnou polovině napájecího napětí. Tu mu zajišťuje napěťový dělič R<sub>35</sub> a R<sub>36</sub>, který spolu kondenzátorem C<sub>4</sub> tvoří dolní propust a napětí tak i filtruje proti vnikání zvlnění. Rezistory R<sub>38</sub> a R<sub>39</sub> nastavují zesílení, zesilovač pracuje v neinvertujícím zapojení. Kondenzátor C<sub>7</sub> blokuje stejnosměrnou složku, která se nesmí dostat k připojené zátěži (reproduktoru). Rezistor R<sub>154</sub> a kondenzátor C<sub>45</sub> tvoří dolní propust s mezní frekvencí

$$f_m = \frac{1}{2\pi R_{154} C_{45}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 1000} = 15,9 \text{ kHz} \quad , \quad (3.1)$$

kteřá frekvenčně omezuje signál budící reproduktor na pásmo, které je schopen přehrát.

Pro návrh dalších obvodů je třeba znát rozkmit napětí, které zesilovač potřebuje na svém vstupu, aby mohl vybudit maximální výkon. Budu uvažovat, že rozkmit napětí (špička-špička) na výstupu integrovaného obvodu zesilovače nejvíce významného článku je  $U_{OUTPP} = 20 \text{ V}$ . Zesilovač pracuje v neinvertujícím zapojení a proto má zesílení

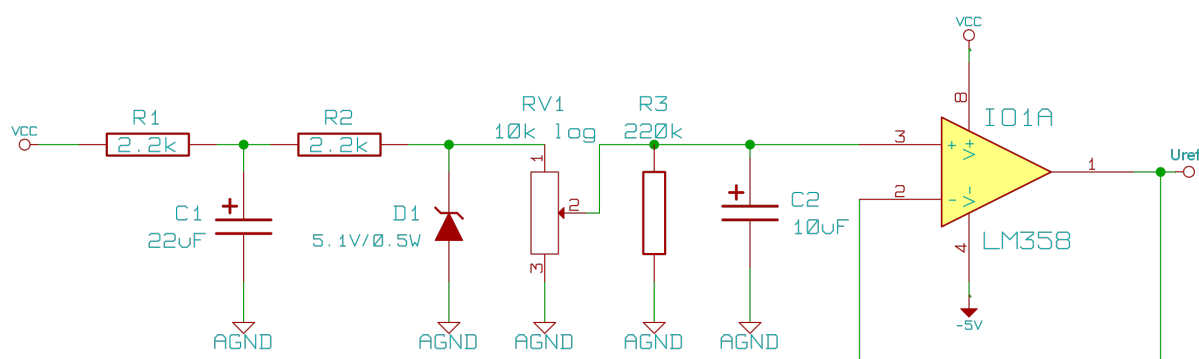
$$A = 1 + \frac{R_{39}}{R_{38}} = 1 + \frac{22 \cdot 10^3}{680} = 33,4 \quad (3.2)$$

Abychom na výstupu dostali požadovaný rozkmit napětí, musí proto na vstupu být rozkmit napětí

$$U_{dSPP} = \frac{U_{OUTPP}}{A} = \frac{20}{33,4} = 599 \text{ mV} \quad (3.3)$$

### 3.2.4 Zdroj referenčního napětí

Zdroj referenčního napětí vytváří napětí, kterým je napájen útlumový článek. Napětí lze měnit pomocí potenciometru a tak měnit hlasitost reprodukce. Schéma zdroje je na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Schéma zdroje referenčního napětí.

Rezistor  $R_1$  a kondenzátor  $C_1$  vytvářejí integrační článek s mezní frekvencí

$$\frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot 2200 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} = 3,2 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

Tento článek přibližně 30x potlačuje signál na frekvenci 100 Hz a tak blokuje zvlnění napájecího napětí i rušení od okolních obvodů. Na diodě  $D_1$  je stabilní zenerovo napětí 5,1 V. Toto napětí je pak nastavitelně zmenšováno pomocí děliče tvořeného potenciometrem  $RV_1$ .

Kondenzátor  $C_2$  spolu s rezistorem  $R_3$  slouží pro odstranění „chrastění“ potenciometru  $RV_1$ . U starých potenciometrů se stává, že při otáčení jezdcem se krátkodobě zvyšuje přechodový odpor mezi odporovou drahou a jezdcem. To se pak projevuje chrastivými zvuky na výstupu. Článek tvořený rezistorem  $R_3$  a kondenzátorem  $C_2$  (při odpojeném jezdcem  $P_1$ ) má časovou konstantu

$$\tau_1 = R_3 C_2 = 220 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 2,2 \text{ s} \quad (3.5)$$

která je dostatečně velká na vyhlazení napětí. Pokud je ale jezdec připojen, pak dostáváme článek s časovou konstantou maximálně

$$\tau_2 = \frac{R_{RV1}}{2} \cdot C_2 = \frac{10 \cdot 10^3}{2} \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 50 \text{ ms} \quad , \quad (3.6)$$

takže článek nezpůsobuje prakticky žádné zpoždění referenčního napětí za otáčením potenciometru. Sledovač na výstupu tvořený operačním zesilovačem IO<sub>1</sub> slouží pro zajištění dostatečně malého výstupního odporu.

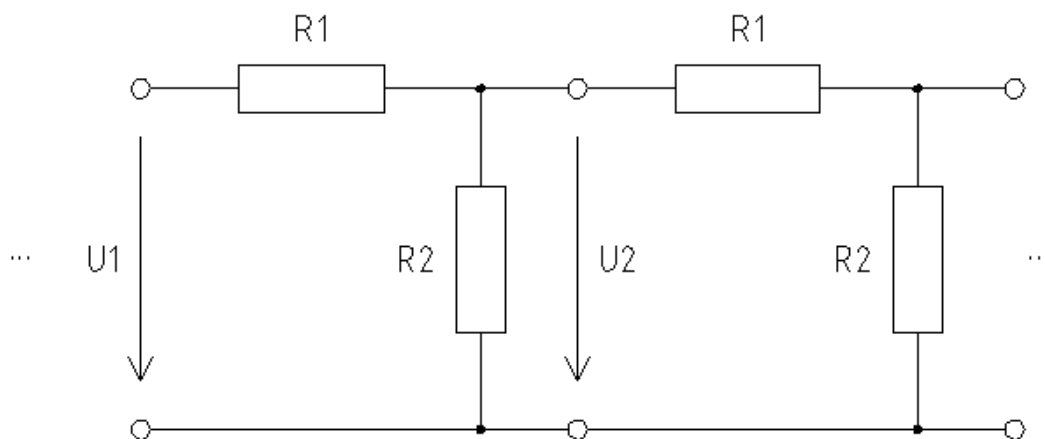
Při plném vytočení potenciometru RV<sub>1</sub> dostáváme referenční napětí  $U_{REFMAX} = 5,1 \text{ V}$  .

### 3.2.5 Útlumový článek

Útlumový článek zajišťuje tvorbu odstupňovaných napětí z referenčního napětí na vstupu. Výstupních napětí je 6 a vždy následující musí být třetinové oproti předchozímu. Tím je zajištěno správné váhování jednotlivých číslic digitálního signálu.

Nejjednodušší zapojení by bylo 6 děličů napětí, takových, aby vždy následující měl třetinový přenos oproti předchozímu. Potřebovali bychom proto přenosy  $1$  ,  $\frac{1}{3}$  ,  $\frac{1}{9}$  , ...,  $\frac{1}{243}$  .

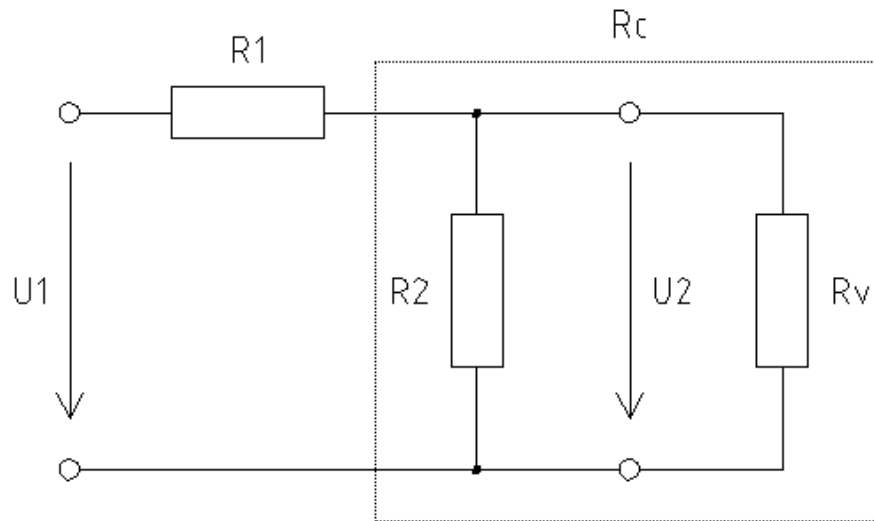
Toto řešení je ale prakticky obtížně realizovatelné, protože vyžaduje rezistory z velkého rozsahu hodnot a to takové, které se nenacházejí ve výrobních řadách. Museli bychom tedy použít sérii potenciometrických trimrů a děliče přesně kalibrovat. Proto jsem zvolil řešení, které se využívá například v D/A převodnicích, a to sít' za sebe zapojených shodných útlumových článků. V běžně dostupné literatuře lze nalézt jen děliče s poměrem sousedních napětí  $\frac{1}{2}$  , proto je třeba takovéto zapojení obecně vyřešit.



Obr. 3.6: Nekonečná síť útlumových článků.

Abychom mohli rozebrat chování této sítě, tak budeme zpočátku předpokládat, že síť je nekonečná. Schematicky je to zakresleno na obr. 3.6. Jeden článek představuje zatížený napěťový dělič tvořený rezistory R<sub>1</sub> a R<sub>2</sub>. Zátěží je síť následujících článků. Nás zajímá, jak zvolit rezistory R<sub>1</sub> a R<sub>2</sub>, aby přenos článku  $A = \frac{U_2}{U_1}$  byl roven námi zvolené hodnotě.





Obr. 3.7: Zatížený útlumový článok.

Výstup článku je zatížený reťazom nekonečne mnoha ďalších článkov. Vstupný odpor tohoto reťazu označíme  $R_v$ . Paralelnú kombináciu  $R_2$  a  $R_v$  označíme  $R_c$ . Všetchno je zakresleno na obr. 3.7.

Napät'ový prenos článku lze určiť jako prenos d'eliče napětí

$$A = \frac{R_c}{R_1 + R_c} \quad (3.7)$$

Protože uvažujeme nekonečný reťaz článkov, tak vstupní odpor, kterým je článok zatížen, je shodný se vstupním odporem reťazu po pridání našeho článku. Toto vyjadruje rovnice

$$R_v = R_1 + R_c \quad (3.8)$$

Odpor  $R_c$  lze vypočítat

$$R_c = \frac{R_2 R_v}{R_2 + R_v} \quad (3.9)$$

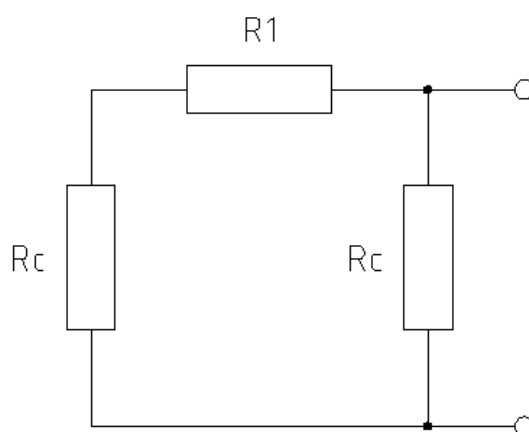
Nyní tuto soustavu vyřešíme:

Z (3.7) vyjádřím  $R_c$  a dosadím je spolu s  $R_v$  z (3.8) do (3.9):

$$R_c = R_1 \cdot \frac{A}{1 - A} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned}
R_C &= \frac{R_2 R_V}{R_2 + R_V} \\
R_C &= \frac{R_2 \cdot (R_1 + R_C)}{R_1 + R_2 + R_C} \\
R_1 R_C + R_2 R_C + R_C^2 &= R_1 R_2 + R_2 R_C \\
R_C^2 + R_1 R_C - R_1 R_2 &= 0 \\
\frac{R_1^2 A^2}{(1-A)^2} + \frac{R_1^2 A}{1-A} - R_1 R_2 &= 0 \\
R_1 A^2 + R_1 A(1-A) - R_2(1-A)^2 &= 0 \\
R_1 A^2 + R_1 A - R_1 A^2 &= R_2(1-A)^2 \\
R_1 A &= R_2(1-A)^2 \\
\frac{R_1}{R_2} &= \frac{(1-A)^2}{A} .
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Článek zapojený v řetězu se vůči vnější zátěži chová jako reálný zdroj napětí. Vnější zátěží se rozumí zátěž připojená k řetězu článků na výstup jednoho z nich, nikoli vstupní odpor následujících článků. Vnitřní odpor tohoto zdroje určíme z pomocného schématu na obr. 3.8.



Obr. 3.8: Výpočet vnitřního odporu.

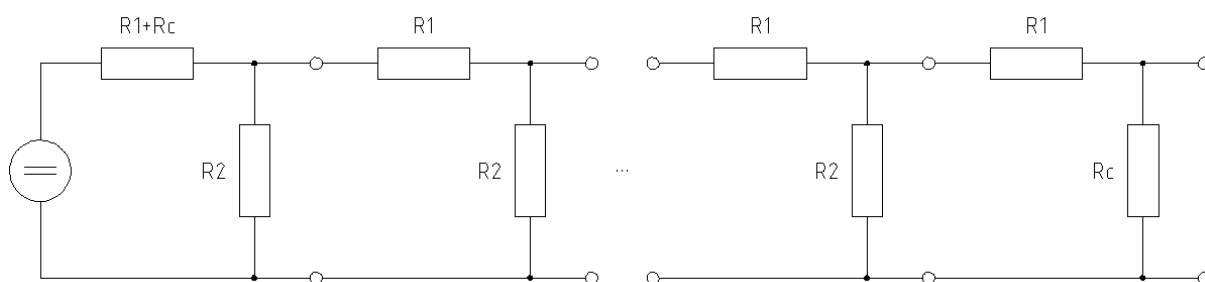
Součástky před odporem  $R_1$  i za ním jsou zde sloučeny do odporu  $R_C$ , uvažujeme-li totiž nekonečný počet článků, pak obvod před i za  $R_1$  je shodný. Z toho lze určit vnitřní odpor (na schématu vůči svorkám) jako

$$R_1 = \frac{R_C \cdot (R_1 + R_C)}{2 R_C + R_1} . \tag{3.12}$$

Zbývá dořešit, jak zapojit články, pokud řetěz má konečnou délku. Poslední článek musíme zatížit odporem  $R_V$ , který nahradí zbývající články nekonečného řetězu. Tento odpor můžeme sloučit s odporem  $R_2$  posledního článku a dostaneme tak odpor

$$R_C = R_1 \cdot \frac{A}{1-A} . \tag{3.13}$$

Protože prvnímu článku chybí předchozí články, tak je třeba před něj předřadit odpor  $R_C$ , aby vnitřní odpory výstupů byly shodné. Tím dojde k poklesu přenosu prvního článku, což ale není na škodu. Celkové zapojení řetězu je zakresleno na obr. 3.9.



Obr. 3.9: Celkové schéma řetězu útlumových článků.

První útlumový článek bude mít přenos

$$A_0 = \frac{R_C}{R_1 + 2 R_C} \quad (3.14)$$

Vycházím přitom z faktu, že paralelní kombinace  $R_2$  spolu se vstupním odporem dalších článků  $R_V$  je rovna  $R_C$ .

V zapojení je útlumový článek použit pro vytvoření referenčních napětí jednotlivých budících článků. Každý budící článek odpovídá jedné číslici trojkové soustavy, a proto následující útlumový článek musí dávat poloviční napětí než článek předchozí. Z toho dostáváme tyto konkrétní hodnoty:

$$A = \frac{1}{3} \quad (3.15)$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{(1-A)^2}{A} = \frac{\left(1 - \frac{1}{3}\right)^2}{\frac{1}{3}} = 1,333 \quad (3.16)$$

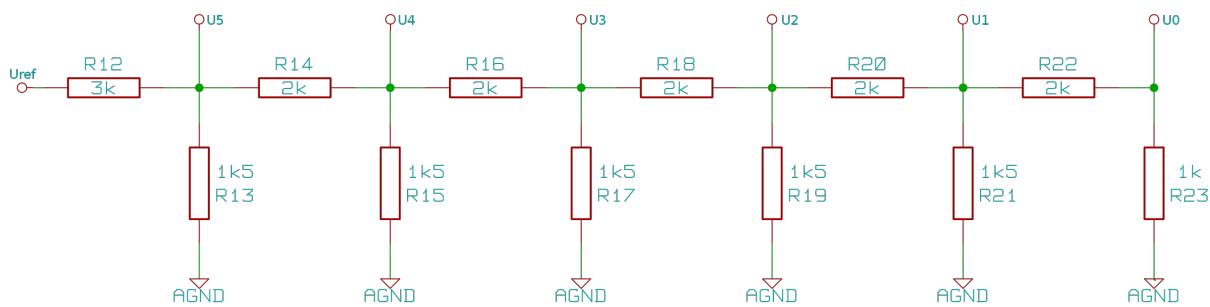
Volím  $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$  a  $R_2 = 1,5 \text{ k}\Omega$ . Odpor  $R_C$  bude tedy

$$R_C = R_1 \cdot \frac{A}{1-A} = 2000 \cdot \frac{\frac{1}{3}}{1 - \frac{1}{3}} = 1 \text{ k}\Omega \quad (3.17)$$

a vnitřní odpor vůči vnější zátěži vyjde

$$R_1 = \frac{R_C \cdot (R_1 + R_C)}{2 R_C + R_1} = \frac{1000 \cdot (2000 + 1000)}{2 \cdot 1000 + 2000} = 750 \Omega \quad (3.18)$$

Na obr. 3.10 je zakresleno celkové schéma řetězu útlumových článků pro námi požadovaný přenos.



Obr. 3.10: Konkrétní schema řetězu útlumových článků.

První článek bude mít přenos

$$A_0 = \frac{U_0}{U_{REF}} = \frac{R_C}{R_1 + 2 R_C} = \frac{1000}{2000 + 2 \cdot 1000} = \frac{1}{4} \quad (3.19)$$

následující články pak požadovaný přenos  $A = \frac{1}{3}$ .

Při plném vytočení potenciometru  $RV_1$  je na vstupu řetězu článku napětí

$$U_{REF} = U_{REFMAX} = 5,1 \text{ V} \quad (3.20)$$

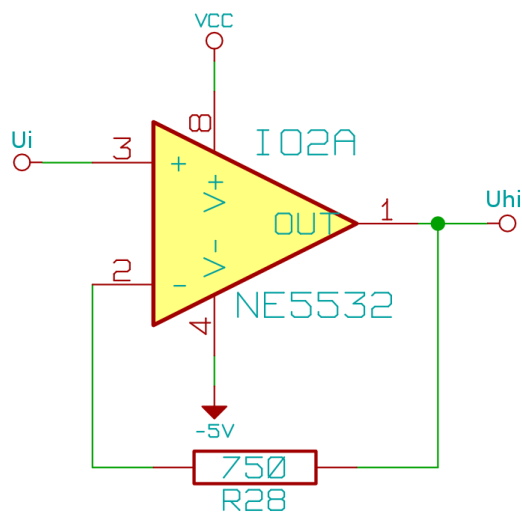
a výstupní napětí jsou pak uvedena v tab. 3.1.

Tab. 3.1: Výstupní napětí řetězu útlumových článků.

$i$	5	4	3	2	1	0
$U_i$ [mV]	1275	425	142	47,2	15,7	5,25

### 3.2.6 Oddělovač útlumového článku

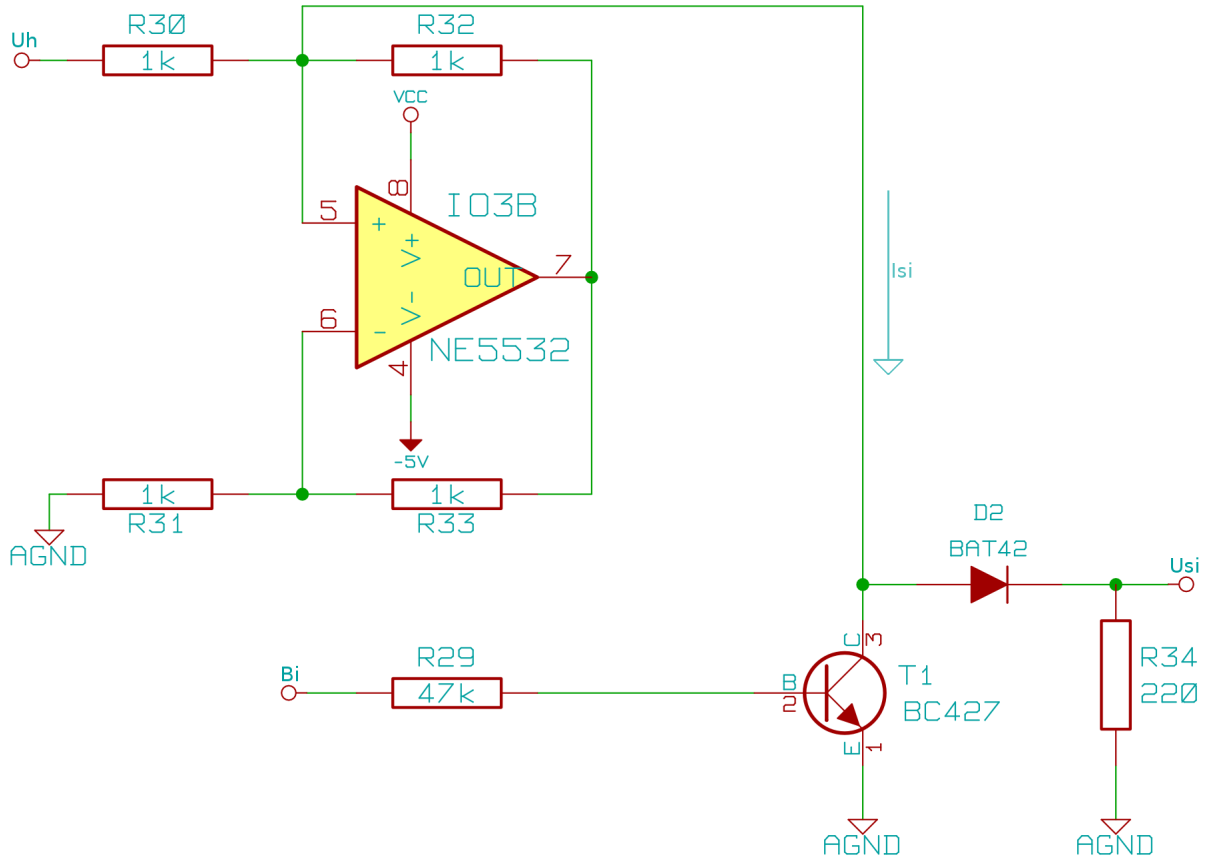
Operační zesilovač IO<sub>2a</sub> pracuje jako oddělovač se zesílením 1. Jeho účelem je zajistit, aby spínač nezatěžoval útlumový článek a zároveň aby následující Howlandův zdroj proudu byl připojen na tvrdý zdroj napětí. Rezistor R<sub>28</sub> má stejnou hodnotu, jako vnitřní odpor výstupu útlumového článku R<sub>i</sub> a slouží pro potlačení vlivu proudů tekoucích do vstupů operačního zesilovače. Schéma je na obr. 3.11.



Obr. 3.11: Schéma oddělovače útlumového článku.

### 3.2.7 Elektronický spínač

Obvod obsahuje celkem 12 elektronických spínačů, každý budicí článek obsahuje 2. Spínače přivádí napětí z útlumového článku k rozdílovým zesilovačům, při sepnutí jednoho spínače je tak výkonový zesilovač buzen kladným napětím, při sepnutí druhého záporným. Spínače jsou ovládány signály s TTL úrovními.



Obr. 3.12: Schéma elektronického spínače.

Operační zesilovač IO<sub>3b</sub> spolu s rezistory R<sub>30</sub>, R<sub>31</sub>, R<sub>32</sub> a R<sub>33</sub> tvoří Howlandův zdroj proudu, viz [6]. Pokud budou odpory voleny tak, že

$$R_{30} = R_{31} = R_{32} = R_{33} \quad , \quad (3.21)$$

pak se obvod chová jako řízený ideální zdroj proudu o velikosti

$$I_{Si} = \frac{U_{hi}}{R_{32}} = \frac{U_i}{R_{32}} \quad . \quad (3.22)$$

Spínačem nejvíce významného článku proto teče proud

$$I_{S5} = \frac{U_5}{R_{32}} = \frac{1,275}{1000} = 1,275 \text{ mA} \quad . \quad (3.23)$$

Pokud je tranzistor T<sub>1</sub> zavřený, pak jím teče jen zanedbatelný zbytkový proud a veškerý proud I<sub>S5</sub> teče přes diodu D<sub>2</sub> do rezistoru R<sub>34</sub>, kde vytváří úbytek napětí

$$U_{S5} = R_{34} \cdot I_{S5} = 220 \cdot 1,275 \cdot 10^{-3} = 281 \text{ mV} \quad , \quad (3.24)$$

tedy přibližně polovinu potřebného rozkmitu na vstupu výkonového zesilovače  $U_{d5PP} = 599 \text{ mV}$ . Na rozdílovém zesilovači tak dostáváme potřebný rozkmit napětí.

Pokud je  $T_1$  otevřen, pak na něm zůstane saturační napětí. Aby se toto napětí nepřeneslo na  $R_{34}$ , tak je zde zapojena dioda  $D_2$ , která zůstane zavřená, protože její prahové napětí je větší než saturační napětí tranzistoru.  $R_{29}$  je volen tak, aby tranzistor  $T_1$  byl při buzení logickou jedničkou (napětím  $2,8 \text{ V}$ ) otevřen do saturace. Počítám přitom s proudovým zesilovacím činitelem  $\beta = 100$ . Proto musím zvolit  $R_{29}$  tak, aby platilo

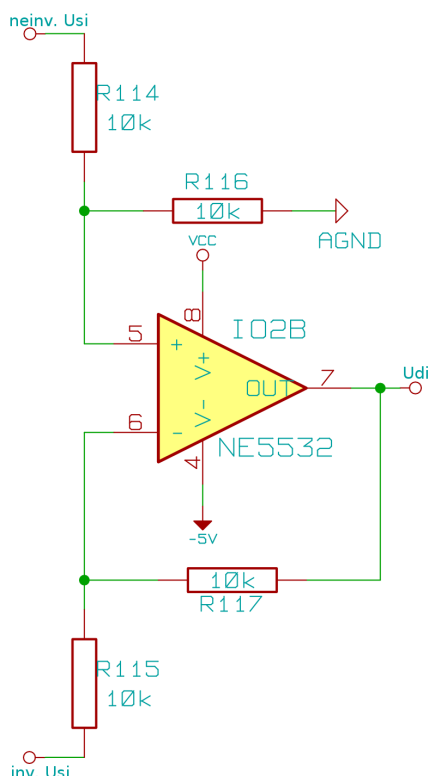
$$R_{29} \leq \frac{2,8 - 0,7}{\frac{I_{S5}}{\beta}} = \frac{2,8 - 0,7}{\frac{1,7 \cdot 10^{-3}}{100}} = 124 \text{ k}\Omega \quad (3.25)$$

Pro jistotu volím  $R_{29} = 47 \text{ k}\Omega$ .

Tranzistor  $T_1$  je buzen obdélníkovým signálem s relativně vysokou frekvencí (např.  $48 \text{ kHz}$ ). Integrovanému obvodu  $IO_{3b}$  se tím rychle mění zátěž, proto jsem zvolil operační zesilovač NE5532, který je schopný pracovat na vysokých frekvencích a přitom má malý vstupní offset napětí. Údaje o tomto zesilovači lze najít v [7].

### 3.2.8 Rozdílový zesilovač

Účelem rozdílového zesilovače je sloučit 2 signály z elektronických spínačů a to tak, že jeden je přenesen na výstup beze změny, zatímco druhý je invertovaný. Tím je umožněno budit výkonový zesilovač jak kladnými, tak i zápornými impulsy a vyjádřit tak všechny 3 číslice trojkové soustavy. Schema je na obr. 3.13.



Obr. 3.13: Schéma rozdílového zesilovače.

Zapojení je převzato z [6], přenos neinvertující větve je 1, invertující -1. Velikost odporů byla

vybrána řádově větší, než odporu  $R_{34}$  elektronického spínače, dochází tak pouze k malému úbytku napětí na jeho vnitřním odporu, a to u všech článků stejně - poměr budicího napětí článků je tak zachován.

### **3.3 Návrh reproduktorové soustavy**

V této kapitole je navržena reproduktorová soustava pro 6 reproduktorů s uzavřenou ozvučnicí. Více o návrhu soustav lze najít v [8].

#### **3.3.1 Parametry reproduktoru**

Zvolil jsem širokopásmový reproduktor ARX-130-20/4 od firmy TVM acoustics.

Tento reproduktor má následující parametry, které pocházejí z dokumentace [9]:

- frekvenční rozsah 75 Hz – 15 kHz,
- charakteristická citlivost 89 dB,
- jmenovitá impedance 4  $\Omega$ ,
- jmenovitý šumový příkon 25 W,
- rezonanční kmitočet  $f_s = 105$  Hz,
- ekvivalentní objem  $V_{AS} = 3,0$  dm<sup>3</sup>,
- elektrický činitel jakosti 1,348,
- mechanický činitel jakosti 3,22,
- celkový činitel jakosti 0,948.



### 3.3.2 Návrh uzavřené ozvučnice

Nejdříve přibližně určím optimální objem. Vztah je převzat z [8]:

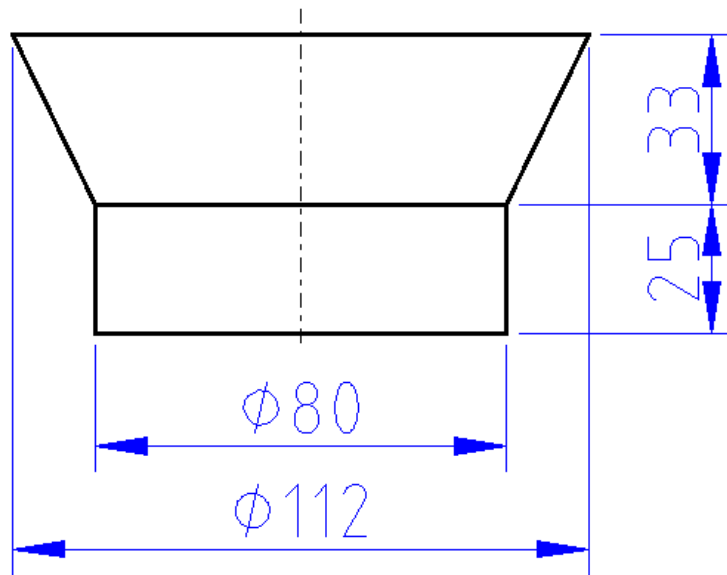
$$V_{\text{opt}} = V_{\text{as}} \cdot \frac{Q_{\text{ts}}^2}{2 - Q_{\text{ts}}^2} = 3,0 \cdot \frac{0,948^2}{2 - 0,948^2} = 2,451 \quad . \quad (3.26)$$

Tento objem je ale tak malý, že by se reproduktory nevešly do ozvučnice. Zvětšení objemu má pozitivní dopady na frekvenční charakteristiku. Proto navrhnu ozvučnici tak, aby se do ní reproduktory rozumně vešly, spočítám její objem a pro něj odsimuluji charakteristiku.

Vnitřní objem ozvučnice je dle výkresu na obr. A.1 roven

$$V_{\text{o}} = 564 \cdot 564 \cdot 212 = 6,74 \cdot 10^7 \text{ mm}^3 = 67,41 \quad . \quad (3.27)$$

Od tohoto objemu je nutné odečíst objemy reproduktorů. Objem jednoho určím ze zjednodušeného modelu na obr. 3.14:



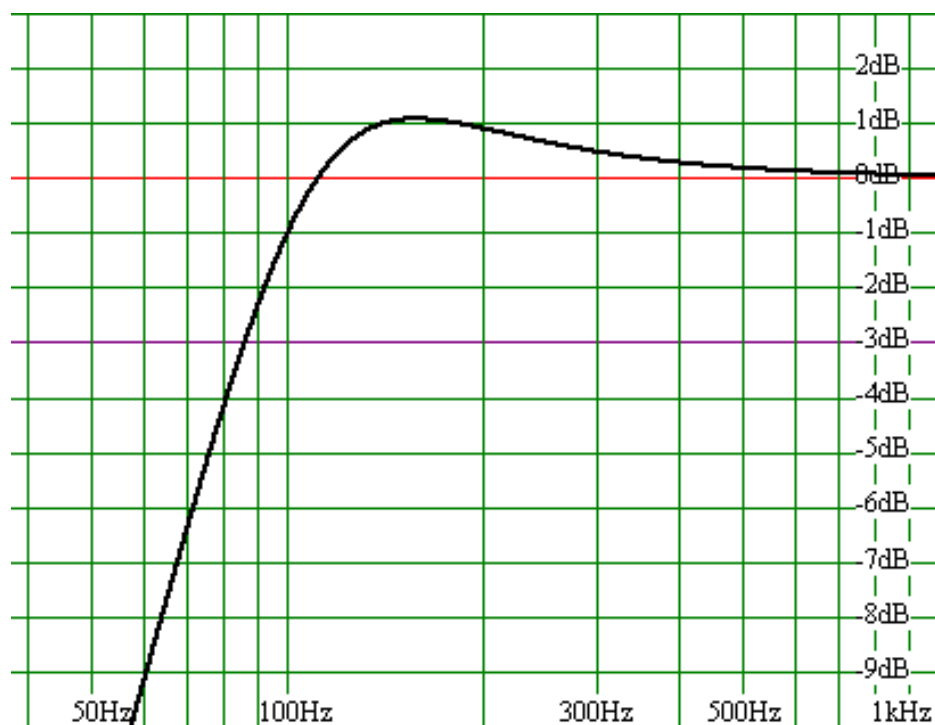
Obr. 3.14: Zjednodušený model pro výpočet objemu reproduktoru.

$$V_{\text{R}} = \pi \cdot 25 \cdot \frac{80^2}{4} + \frac{\pi \cdot 33}{12} \cdot (80^2 + 80 \cdot 112 + 112^2) = 3,67 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 = 0,3671 \quad . \quad (3.28)$$

Redukovaný objem ozvučnice (bez reproduktorů) je roven

$$V_{\text{OR}} = V_{\text{o}} - 6 \cdot V_{\text{R}} = 67,4 - 6 \cdot 0,367 = 65,21 \quad . \quad (3.29)$$

Odsimuluji-li uzavřenou ozvučnici s tímto objemem v programu WinISD, získám frekvenční charakteristiku na obr. 3.15.



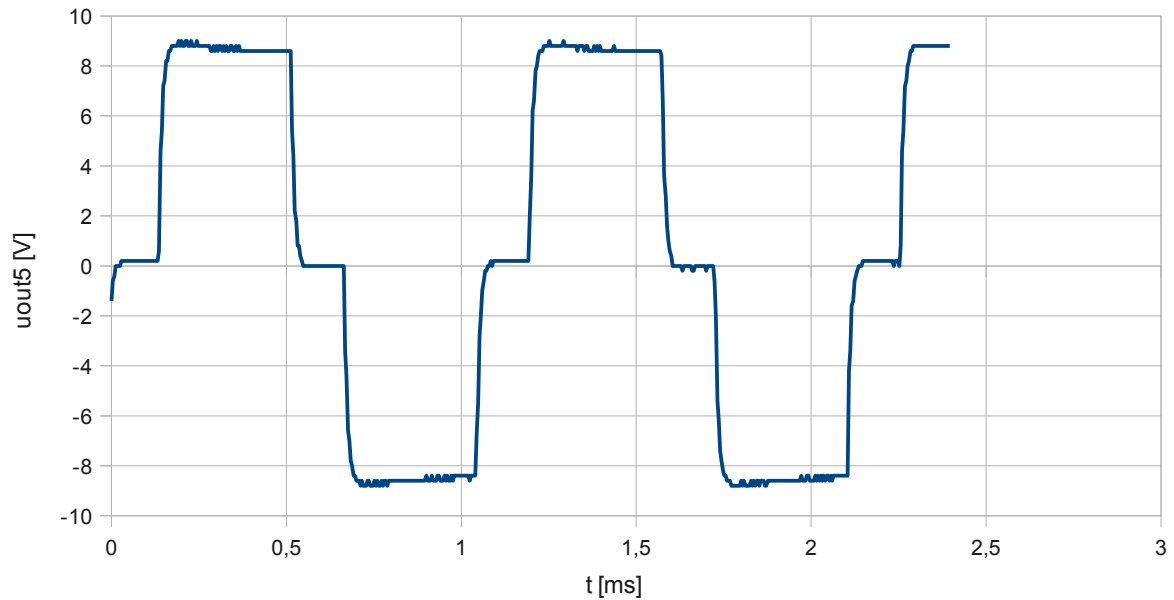
Obr. 3.15: Frekvenční charakteristika reproduktorové soustavy.

Charakteristika má vrchol na frekvenci 157 Hz, na němž má zisk 1,08 dB. Pokles o 3 dB je přibližně na frekvenci 86 Hz.

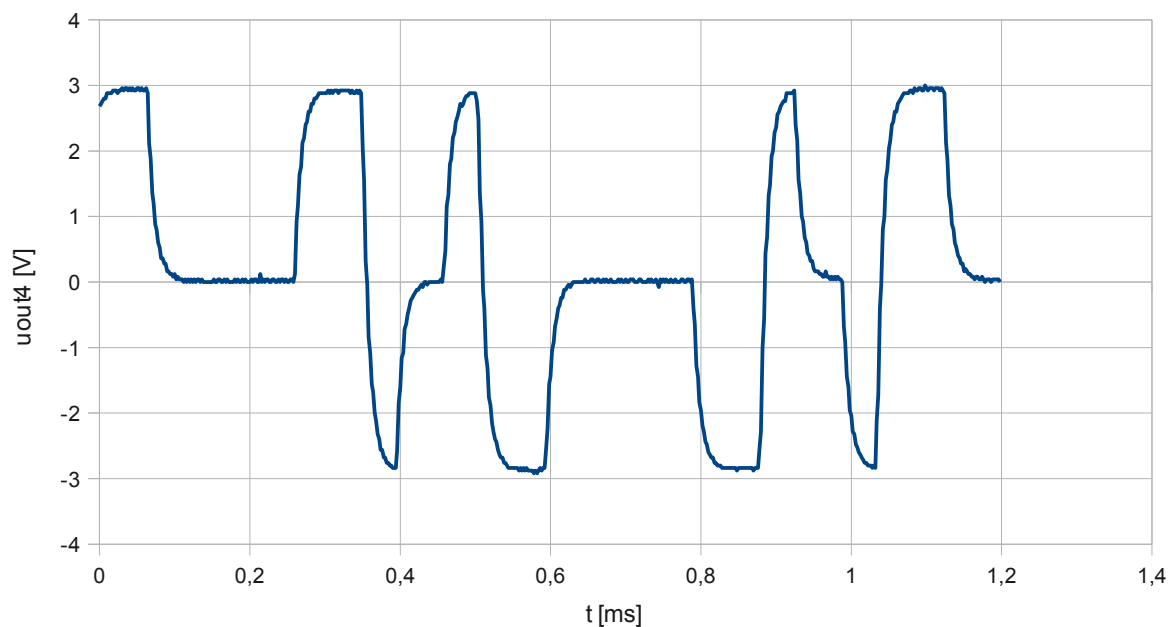
Ozvučnice je vyrobena z desky tloušťky 18 mm. V přední desce je vyříznuto 6 kruhových otvorů pro reproduktory, jejichž středy leží na společné kružnici. V zadní stěně se nacházejí otvory pro misky s konektory. Jednotlivé díly jsou spolu sešroubovány, aby bylo možné ozvučnici v případě potřeby rozebrat. Výkresy jednotlivých částí ozvučnice i výkres sestavení je v příloze A.

## 4 Výsledky měření

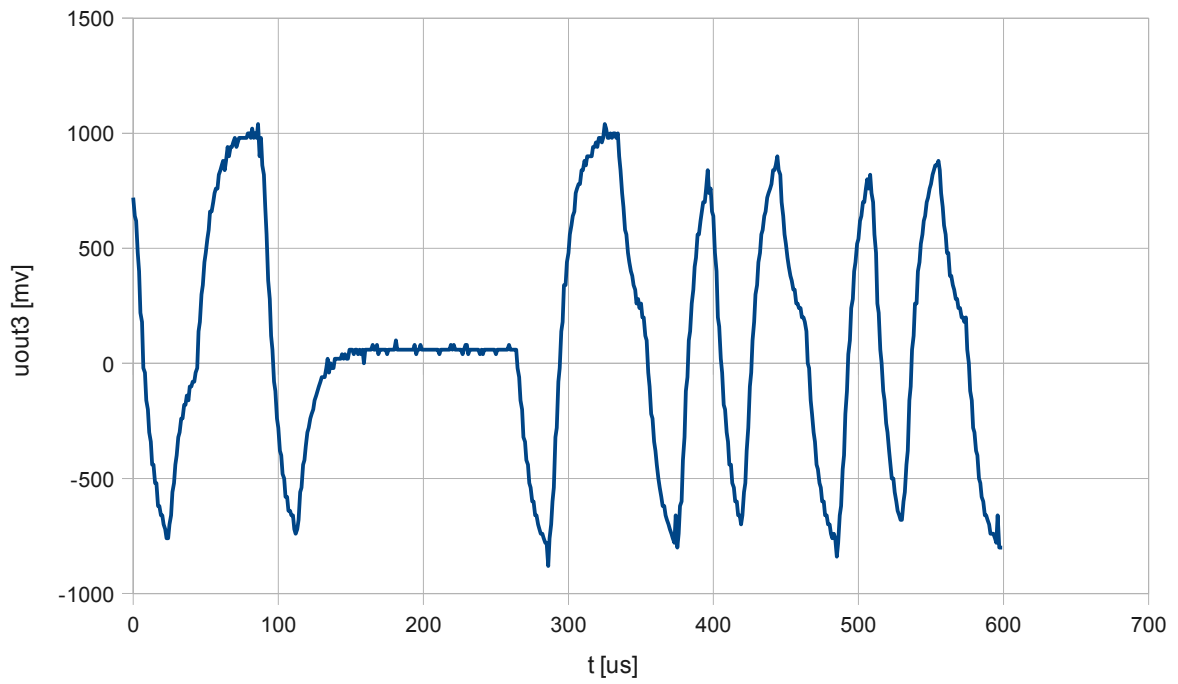
Nejdříve jsem změřil průběhy signálů na jednotlivých zesilovačích. Výstupy zesilovačů jsou zatíženy rezistory  $1\text{ k}\Omega$ , které zajistí nulovou stejnosměrnou složku napětí. Průběhy s připojenými reproduktory jsou podobné. Konstrukce byla buzena digitálním harmonickým signálem s frekvencí přibližně  $1\text{ kHz}$  vzorkovanou s frekvencí  $48\text{ kHz}$ .



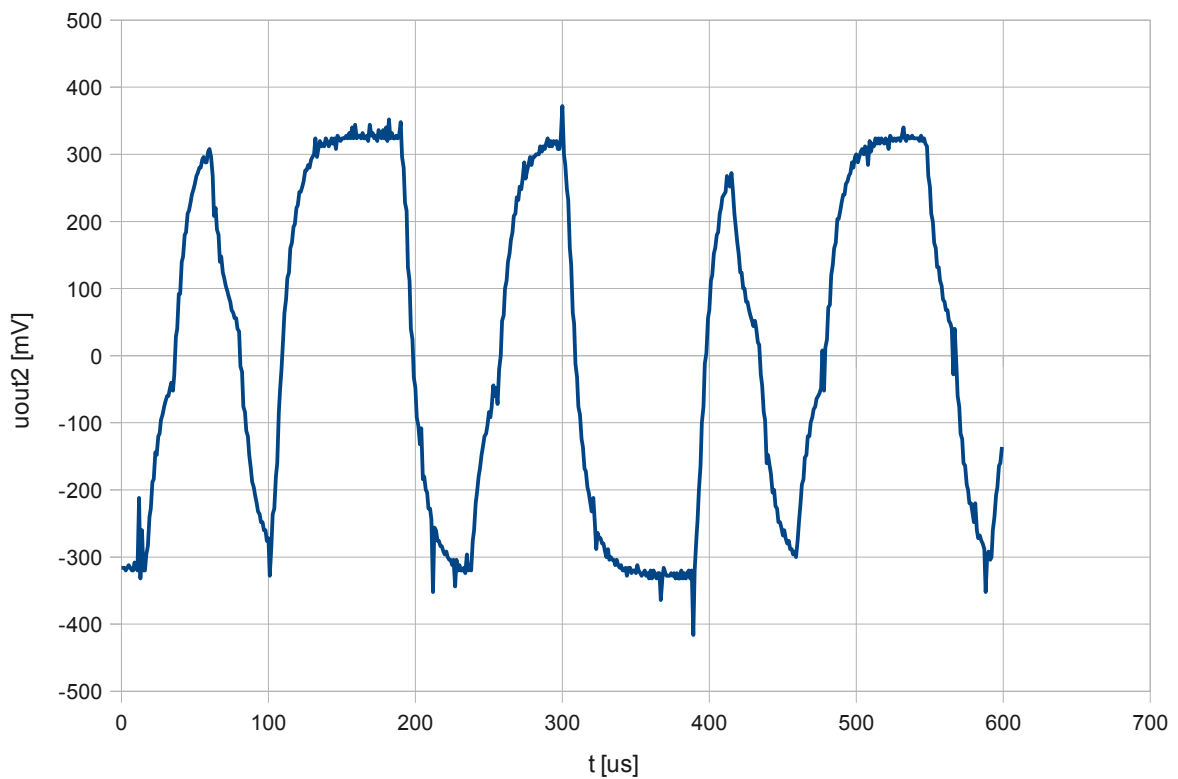
Obr. 4.1: Průběh napětí na výstupu 5. zesilovače.



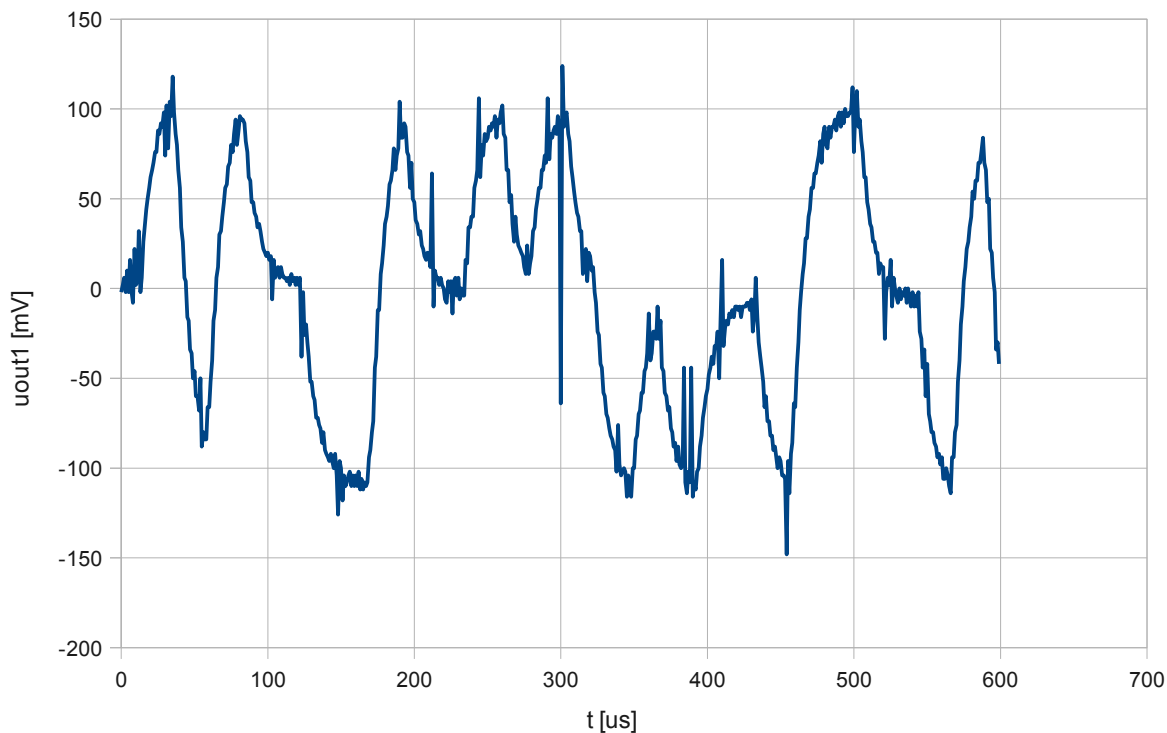
Obr. 4.2: Průběh napětí na výstupu 4. zesilovače.



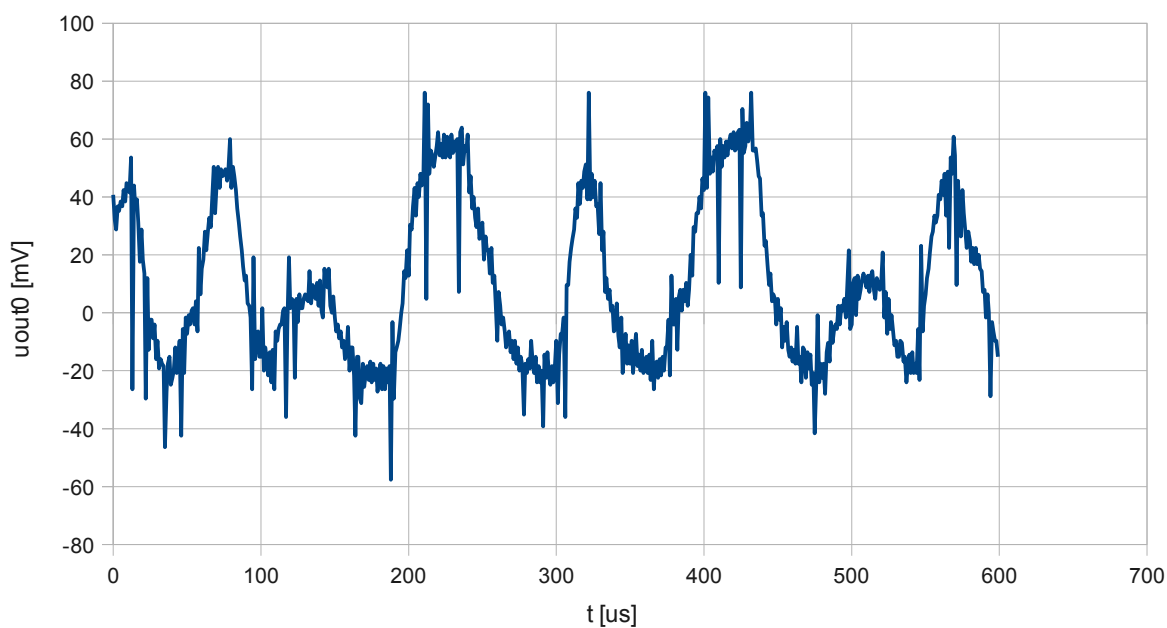
Obr. 4.3: Průběh napětí na výstupu 3. zesilovače.



Obr. 4.4: Průběh napětí na výstupu 2. zesilovače.

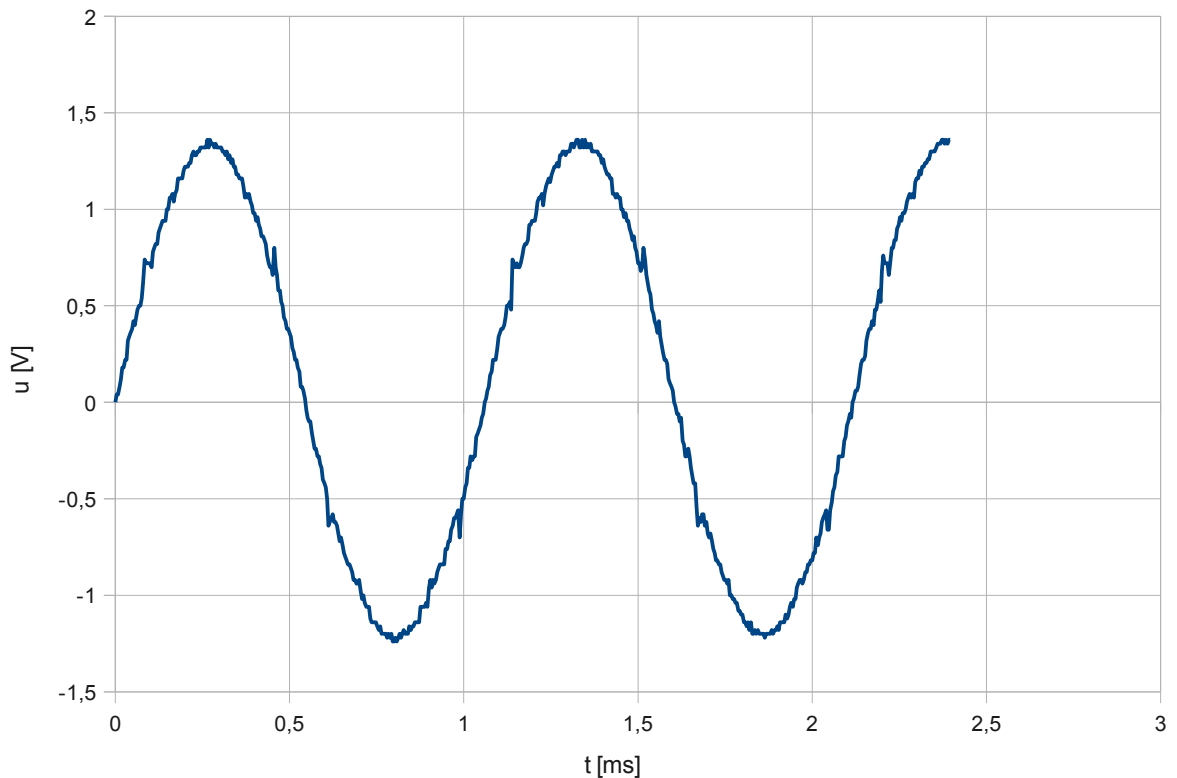


Obr. 4.5: Průběh napětí na výstupu 1. zesilovače.



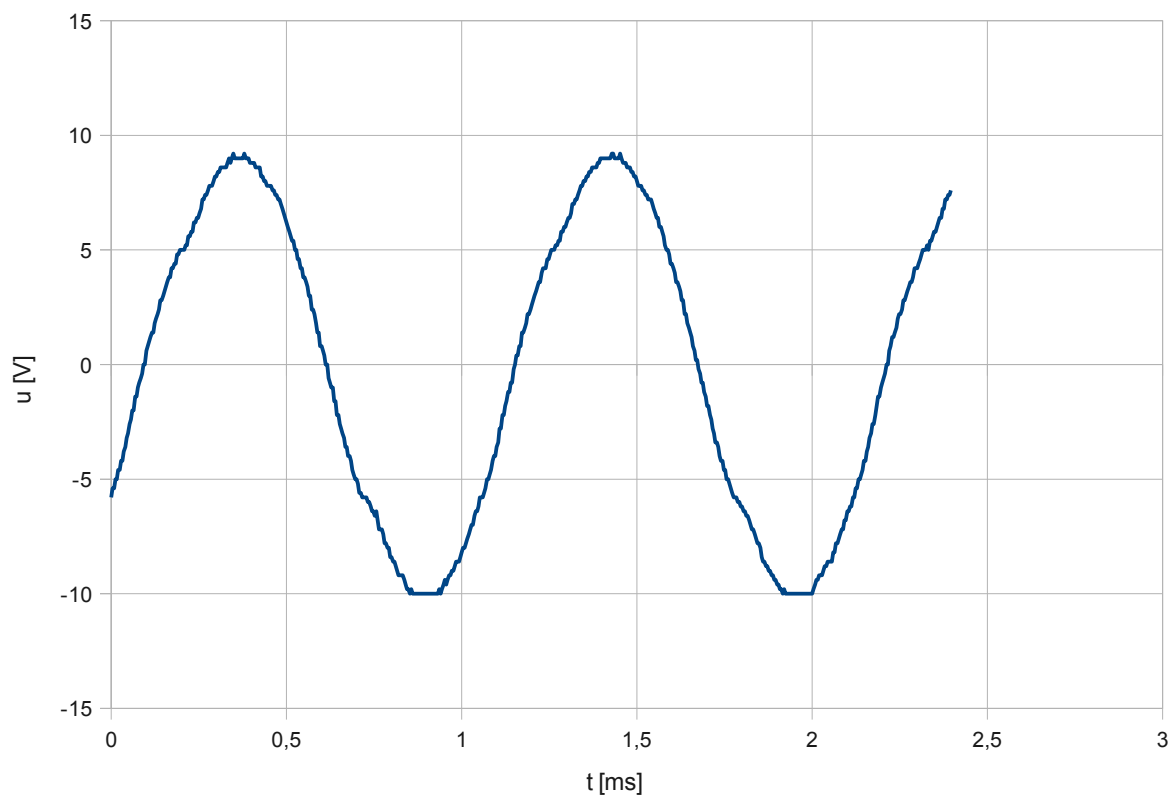
Obr. 4.6: Průběh napětí na výstupu 0. zesilovače.

Signál od jednotlivých zesilovačů byl elektricky sečten pomocí šesti rezistorů  $1\text{ k}\Omega$  zapojených do hvězdy a takto získaný uzel byl uzemněn opět rezistorem  $1\text{ k}\Omega$ . Na něm byl měřen součtový signál zobrazený na obr. 4.7.

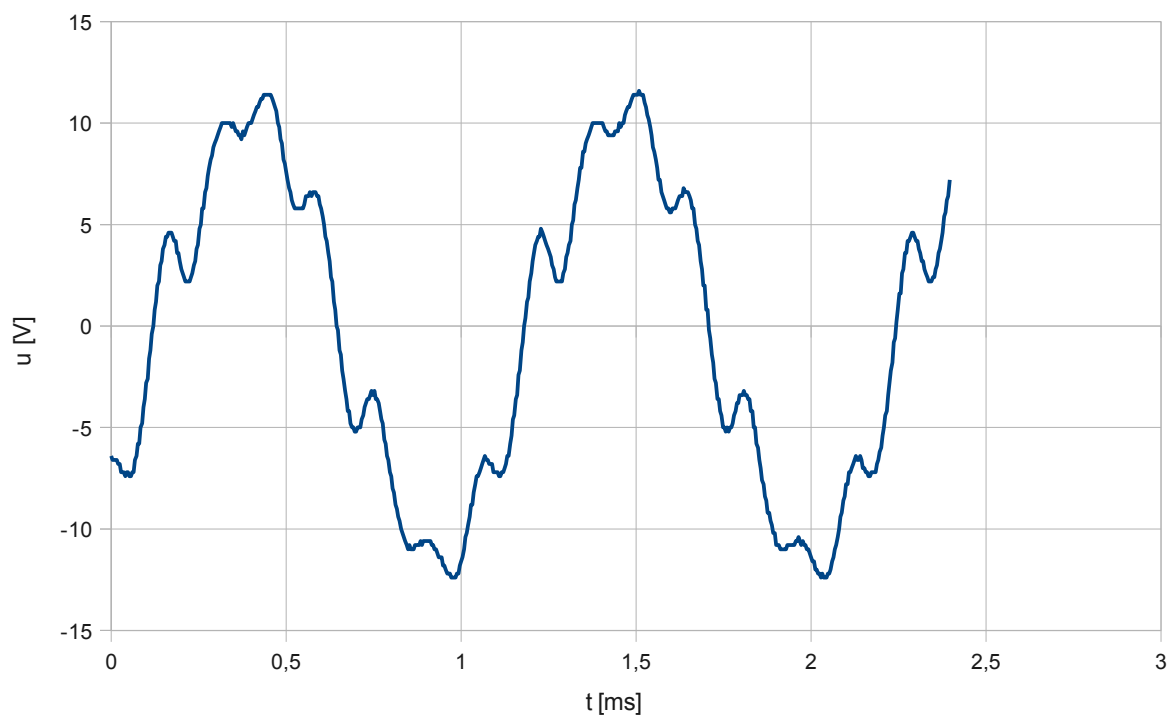


Obr. 4.7: Průběh součtového napětí.

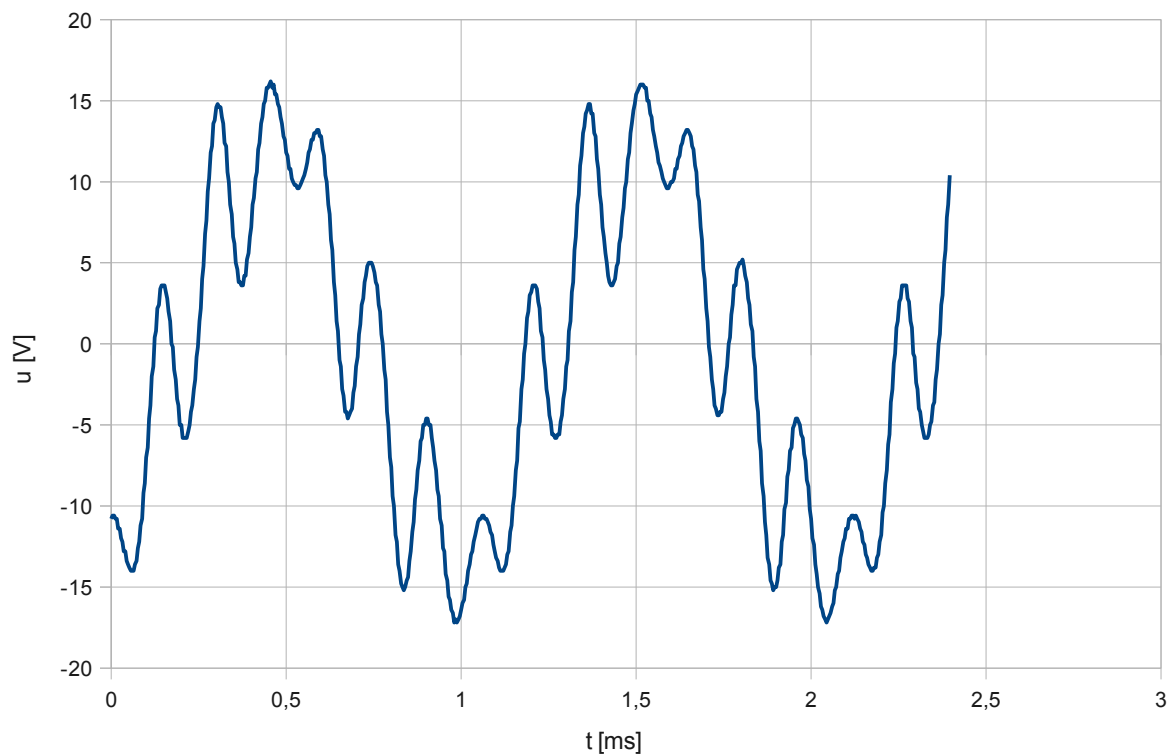
Dále byla provedena akustická měření. Ozvučnice byla rozebrána a reproduktory byly měřeny jen s přední stěnou ozvučnice. Do vertikální osy reproduktorové soustavy, přibližně do vzdálenosti 2 m, byl umístěn měřicí mikrofón s předzesilovačem. Protože byla měření prováděna v bezodrazové komoře, tak se mezi reproduktory a mikrofónem šířily jen přímé vlny. Na následujících obrázcích jsou zachyceny průběhy naměřeného napětí pro různé výšky mikrofónu. Je zde vidět, že ve výšce 156 cm (v horizontální ose reproduktorové soustavy) dojde k vyrušení sedmé harmonické složky signálu, mimo osu je signál značně zdeformovaný.



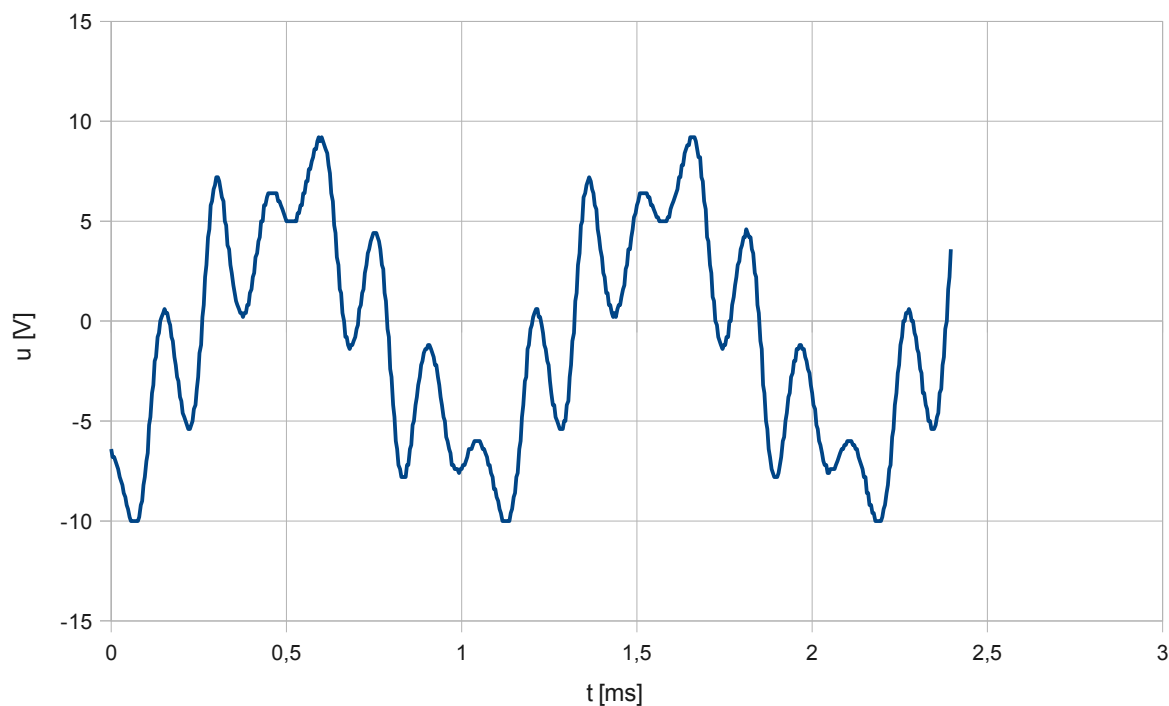
Obr. 4.8: Průběh zesíleného napětí naměřeného měřicím mikrofonom ve výšce 156 cm nad zemí.



Obr. 4.9: Průběh zesíleného napětí naměřeného měřicím mikrofonom ve výšce 154 cm nad zemí.



*Obr. 4.10:* Průběh zesíleného napětí naměřeného měřicím mikrofonom ve výšce 147 cm nad zemí.



*Obr. 4.11:* Průběh zesíleného napětí naměřeného měřicím mikrofonom při zapojení pouze nejvíce významného reproduktoru.

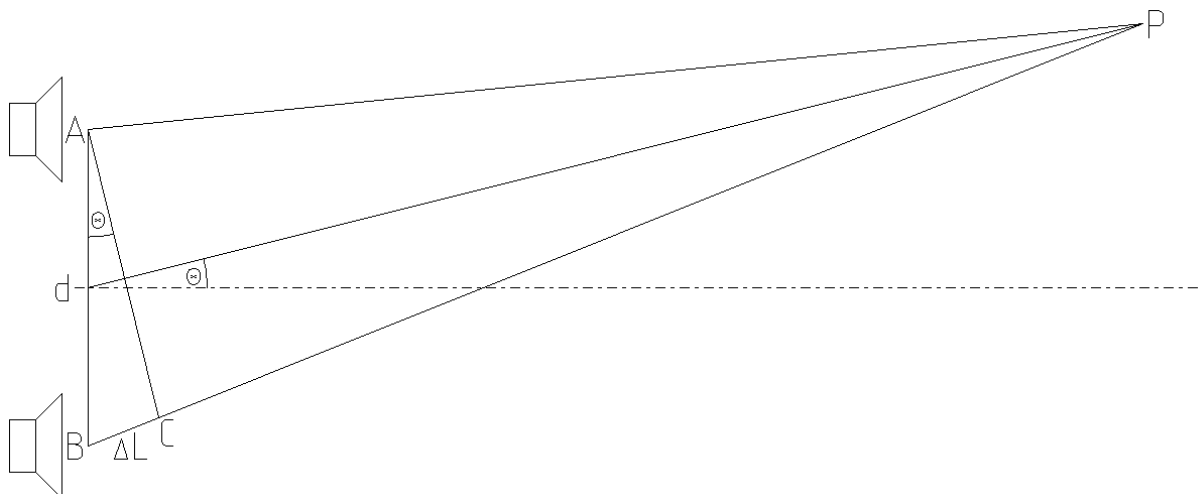


## 5 Závěr

Technologie reproduktorů s přímou D/A konverzí je do budoucna slibná a zatím není příliš prozkoumaná. Navržené řešení souží pro demonstraci principu ve výuce. Protože je pouze devítibitové, nemůže být reprodukce příliš kvalitní. Skutečné zařízení pro reprodukci řeči by mělo být alespoň dvanáctibitové a pro reprodukci hudby šestnáctibitové. Navržená reproduktorová soustava také nedokáže reprodukovat frekvence pod 86 Hz, při přehrávání hudby tedy nejsou slyšet hluboké tóny. To je způsobeno použitím širokopásmových reproduktorů, skutečná soustava pro reprodukci hudby by musela být vícepásmová. Zůstává otázkou, zda by každý reproduktor musel mít svůj vlastní zesilovač a frekvenční oddělení realizovat číslicovými filtry, nebo zda by šly využít reproduktorové výhybky.

Při měření se ukázala velká citlivost na přesné umístění mikrofonu v ose reproduktorové soustavy. I při poměrně malé výchylce 2 cm je naměřený signál výrazně zkreslen. Toto chování lze vysvětlit interferencí zvukových vln. Každý reproduktor je buzen třístavovým signálem a abychom obdrželi správný harmonický signál, je nutné, aby se okamžité výchylky membrán reproduktorů u pozorovatele sečetly. Pro to je ale potřeba, aby k němu vzniklé vlny dorazily se stejným časovým zpožděním. Přesně to platí jen na ose reproduktorové soustavy, kde je vzdálenost ode všech reproduktorů stejná.

Chceme-li zjistit, jak nejvíce se můžeme od osy odchýlit, budeme uvažovat pouze 2 reproduktory ležící v rovině určené osou reproduktorové soustavy a směrem vychýlení. U nich totiž dojde k největším změnám vzdálenosti od pozorovatele. Situace je velmi podobná Youngově dvojštěrbinovému interferenčnímu pokusu a i odvozené matematické vztahy lze použít. Více lze najít například v [10].



Obr. 5.1: K výpočtu dráhového rozdílu vln.

Trojúhelník APC je rovnoramenný. Vzdálenost  $|BC| = \Delta L$  je tedy hledaný dráhový rozdíl vln od obou reproduktorů. Je-li pozorovatel P dostatečně vzdálený ( $|AP| \gg |AB|$ ), pak se úhel ACB blíží k pravému úhlu a úhly  $\theta$  budou stejně velké. Dráhový rozdíl  $\Delta L$  lze pak přibližně určit jako

$$\Delta L \approx d \cdot \sin \theta, \quad (5.1)$$

kde  $d = |AB|$  je vzdálenost reproduktorů a  $\theta$  je úhel sevřený osou reproduktorové soustavy a spojnicí středu reproduktorové soustavy s pozorovatelem.

Pro daný fázový posuv  $\alpha$  lze dráhový rozdíl  $\Delta L$  vyjádřit vztahem

$$\Delta L = \frac{\alpha v}{2\pi f} \quad , \quad (5.2)$$

kde  $v$  je rychlost zvuku a  $f$  je frekvence signálu.

Sloučením (5.1) a (5.2) lze vyjádřit maximální úhlovou odchylku jako

$$\theta \leq \arcsin \frac{\alpha v}{2\pi f d} \quad . \quad (5.3)$$

Pro vyrušení sedmé harmonické složky signálu s frekvencí 1 kHz, tedy složky s frekvencí  $f = 7$  kHz, při rychlosti šíření zvuku  $v = 340$  m/s, vzdálenosti reproduktorů  $d = 36$  cm a povolené fázové odchylce  $\alpha = 15^\circ$  dostáváme maximální úhlovou odchylku

$$\theta \leq \arcsin \frac{15 \cdot 340}{360 \cdot 7000 \cdot 0,36} = 5,62 \text{ mrad} = 0,322^\circ \quad , \quad (5.4)$$

pro maximální přenášenou frekvenci  $f = 15,9$  kHz dokonce pouze

$$\theta \leq \arcsin \frac{15 \cdot 340}{360 \cdot 15900 \cdot 0,36} = 2,48 \text{ mrad} = 0,142^\circ \quad . \quad (5.5)$$

Mimo bezodrazovou komoru se zvukové vlny nebudou šířit pouze přímo, ale i odrazy od stěn. Tyto odražené vlny pak budou vzájemně interferovat, a proto zařízení nepůjde vůbec použít. Proto je zařízení zatím použitelné pouze v laboratorních podmínkách. Řešením by bylo uzavřít reproduktory do vhodně tvarované ozvučnice, uvnitř které by došlo k sečtení akustických vln od jednotlivých reproduktorů a ven by se šířila již jen jedna součtová vlna.

# Seznam použitých zdrojů

1. ŠEBESTA, Vladimír – SMĚKAL, Zdeněk. *Signály a soustavy*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2004-07-13. 165 s.
2. HUSNÍK, Libor. *Elektroakustické měniče s přímou digitálně-analogovou konverzí*. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. VUT Brno, 2008-12-03. 51 s. Prezentace vytvořená podle diplomové práce.  
URL: <[http://fanous.utko.feec.vutbr.cz/husnik\\_dec08/husnik.pdf](http://fanous.utko.feec.vutbr.cz/husnik_dec08/husnik.pdf)>
3. HOUDEK, Zdeněk. *Zdroj signálu pro měnič s přímou D/A konverzí*. Rabí: České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Katedra radioelektroniky, 2009. 42 s.
4. *AT28C64, AT28C64X: 64K (8K x 8) Parallel EEPROMs*. Atmel Corporation, 1999. 12 s. Katalogový list součástky.
5. *TDA2050: 32W Hi-Fi AUDIO POWER AMPLIFIER*. SGS-THOMSON Microelectronics, 1995. 13 s. Katalogový list součástky.
6. LÁNÍČEK, Robert. *Elektronika: obvody, součástky, děje*. Dotisk 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2001. 480 s. ISBN 80-86056-25-2.
7. *NE5532, SA5532, SE5532, NE5532A, SE5532A : Internally Compensated Dual Low Noise Operational Amplifier*. ON Semiconductor, 1995. 10 s. Katalogový list součástky.
8. TOMAN, Kamil. *Reproduktory a reprosoustavy*. 1. díl, 1. vydání, dotisk. Orlová: DEXON, 2003. 199 s.
9. *Širokopásmový reproduktor ARX-130-20/4, ARX-130-20/8*. TVM acoustics spol. s r.o., 2001. 2 s. Katalogový list reproduktoru.
10. HALLIDAY, David – RESNICK, Robert – WALKER, Jearl. *Fyzika. Část 4 - Elektromagnetické vlny – Optika – Relativita*. Vydání první. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Nakladatelství VUTIUM; Praha: PROMETHEUS, 2000. 143 s. ISBN 81-7196-213-9.

# Seznam použitých zkratek, veličin a symbolů

C	kapacita, kondenzátor
D	dioda
D/A	digital/analog
I	elektrický proud
IO	integrovaný obvod
R	elektrický odpor, rezistor
RV	potenciometr
T	tranzistor
U	elektrické napětí

# Seznam příloh

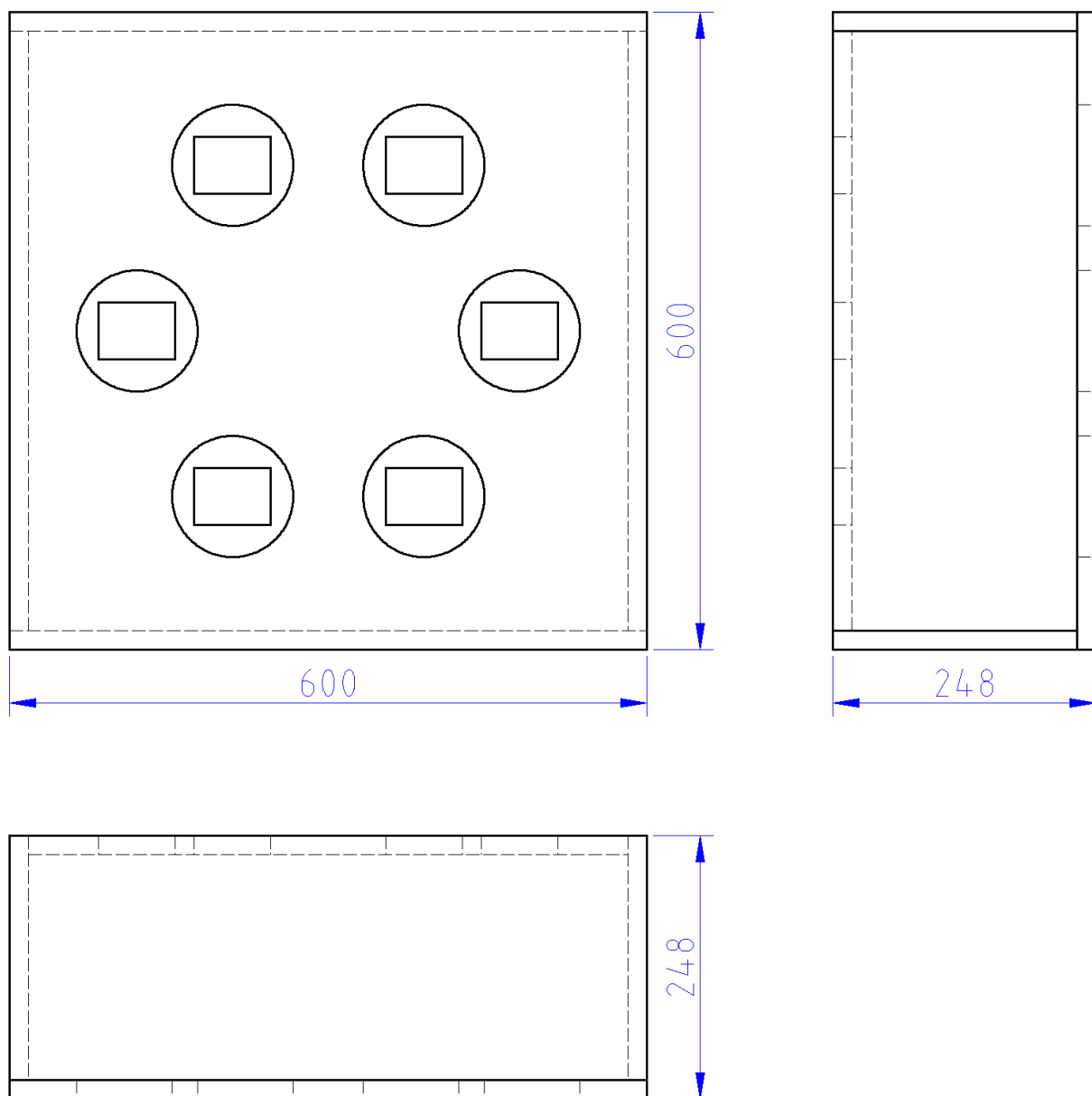
Příloha A – Výkresy ozvučnice

Příloha B – Celkové schéma obvodu

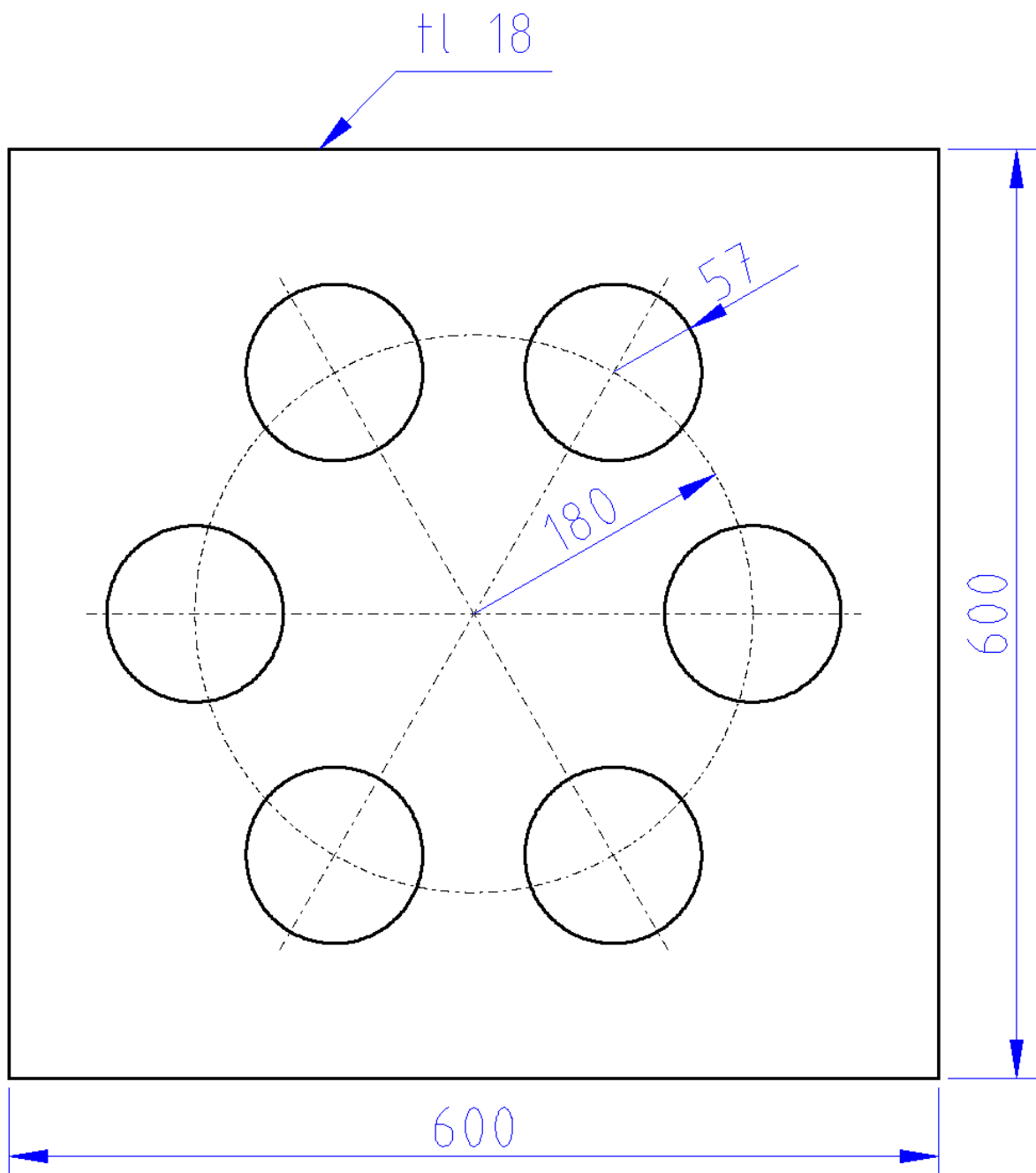
Příloha C – Plošné spoje

Příloha D – Seznam součástek

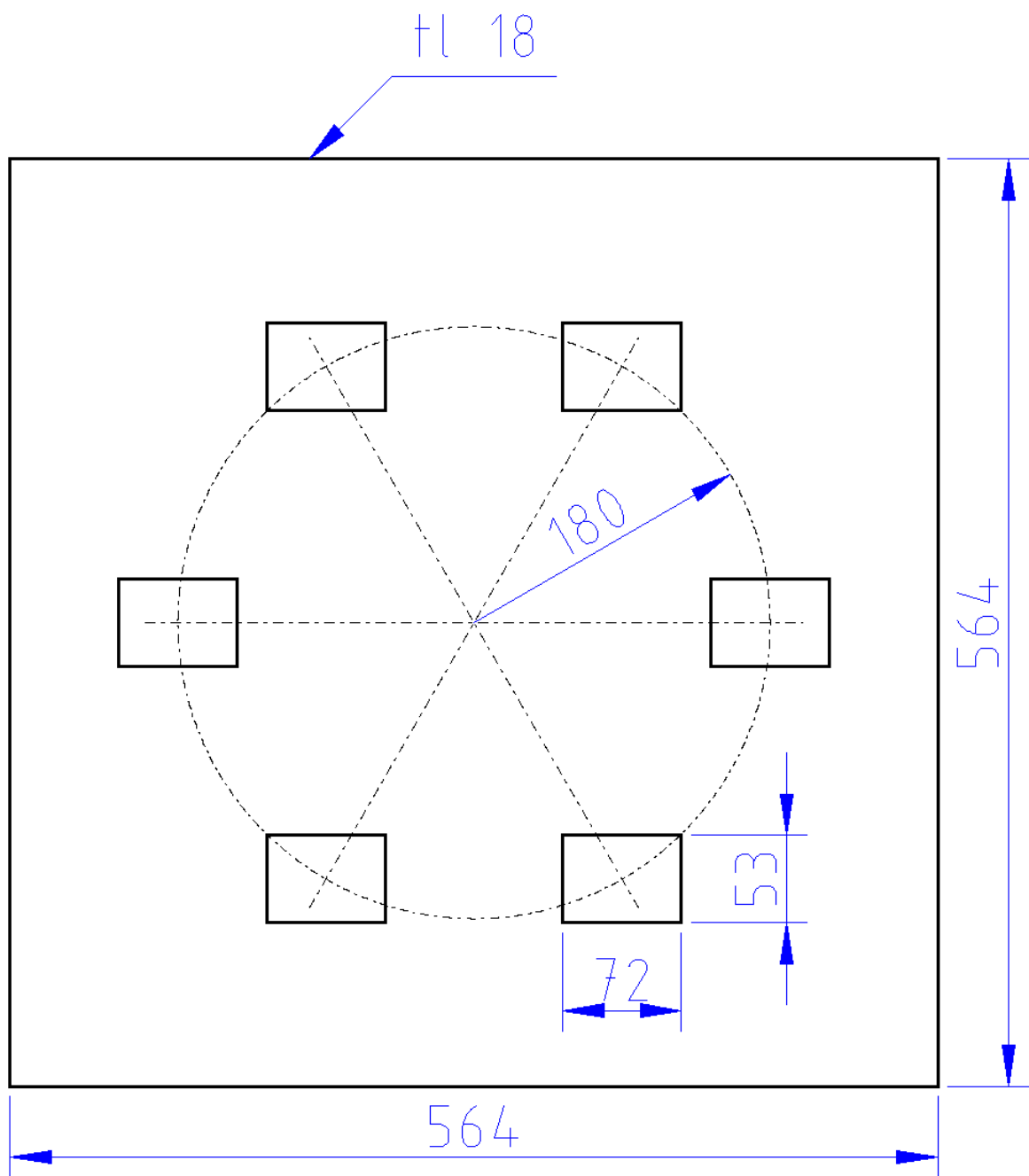
## Příloha A Výkresy ozvučnice



Obr. A.1: Výkres sestavení ozvučnice.

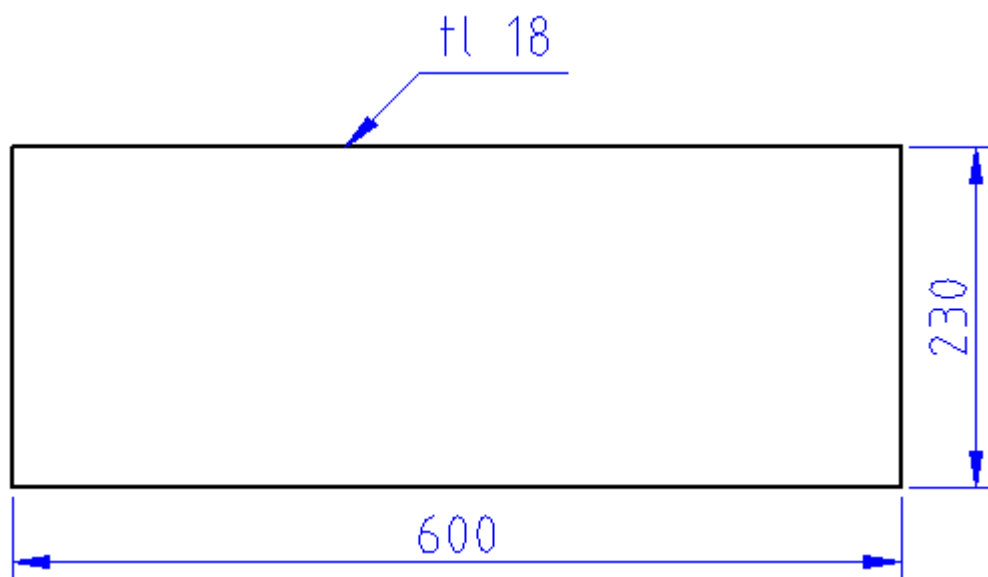


Obr. A.2: Výkres přední stěny ozvučnice.

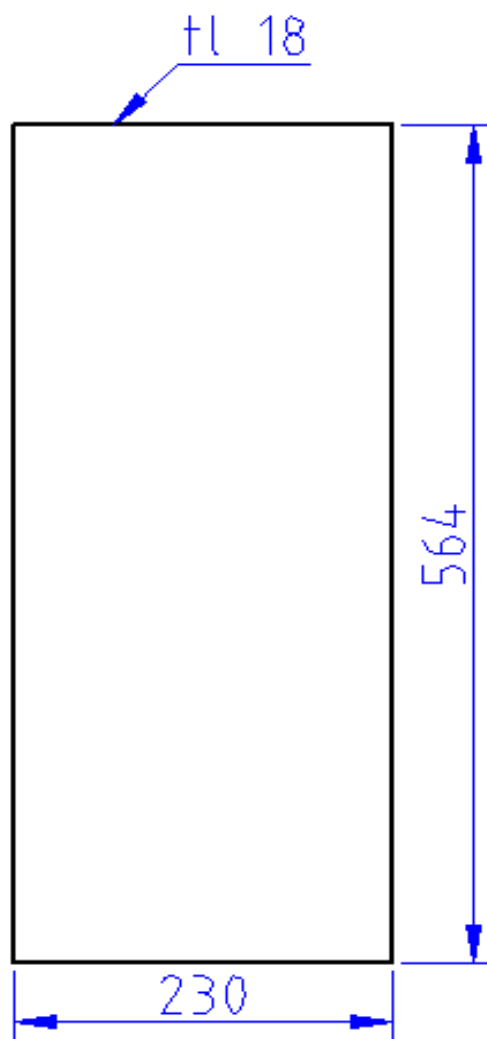


Obr. A.3: Výkres zadní stěny ozvučnice.



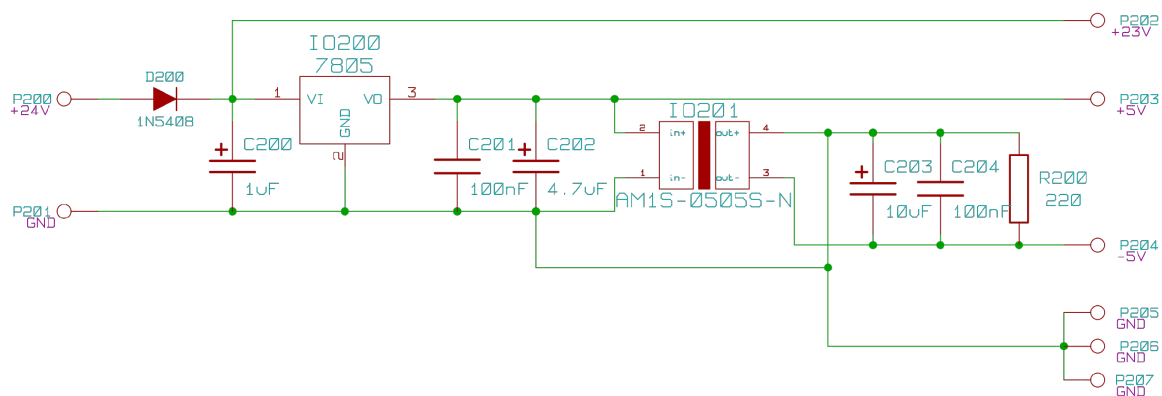


Obr. A.4: Výkres horní a spodní stěny ozvučnice.

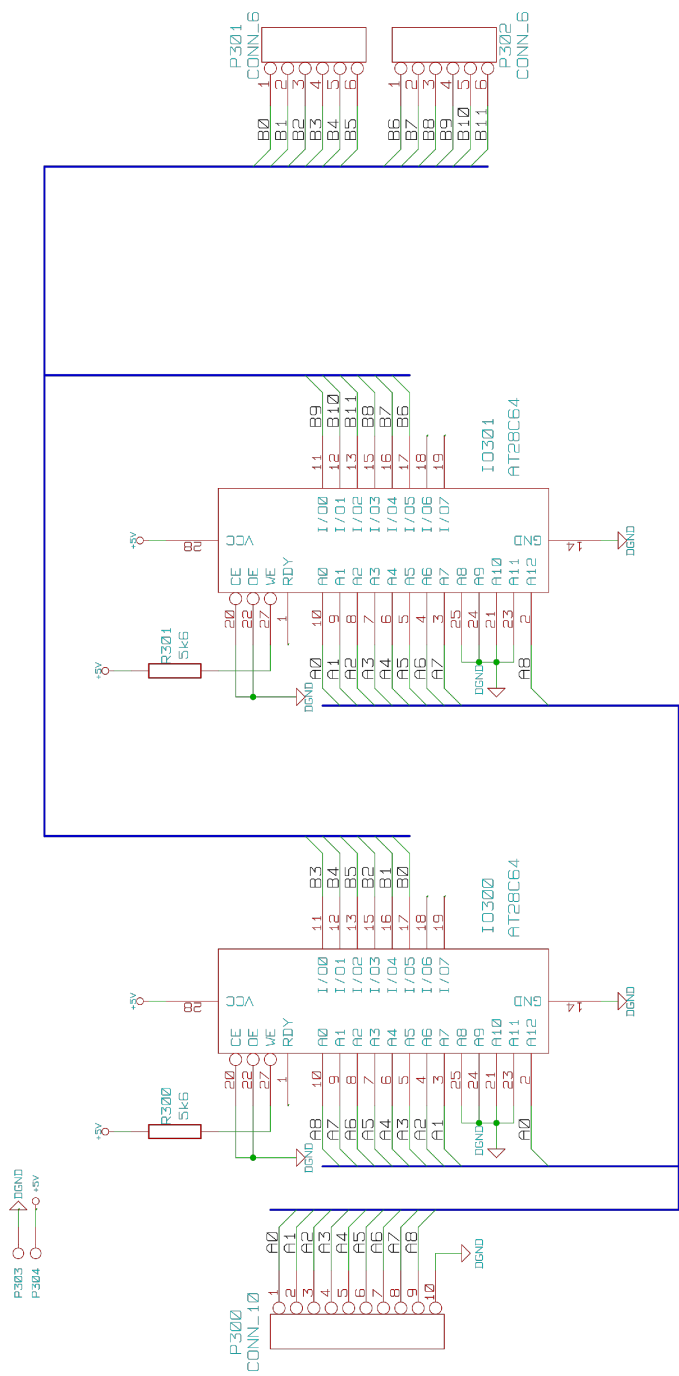


Obr. A.5: Výkres bočních stěn ozvučnice.

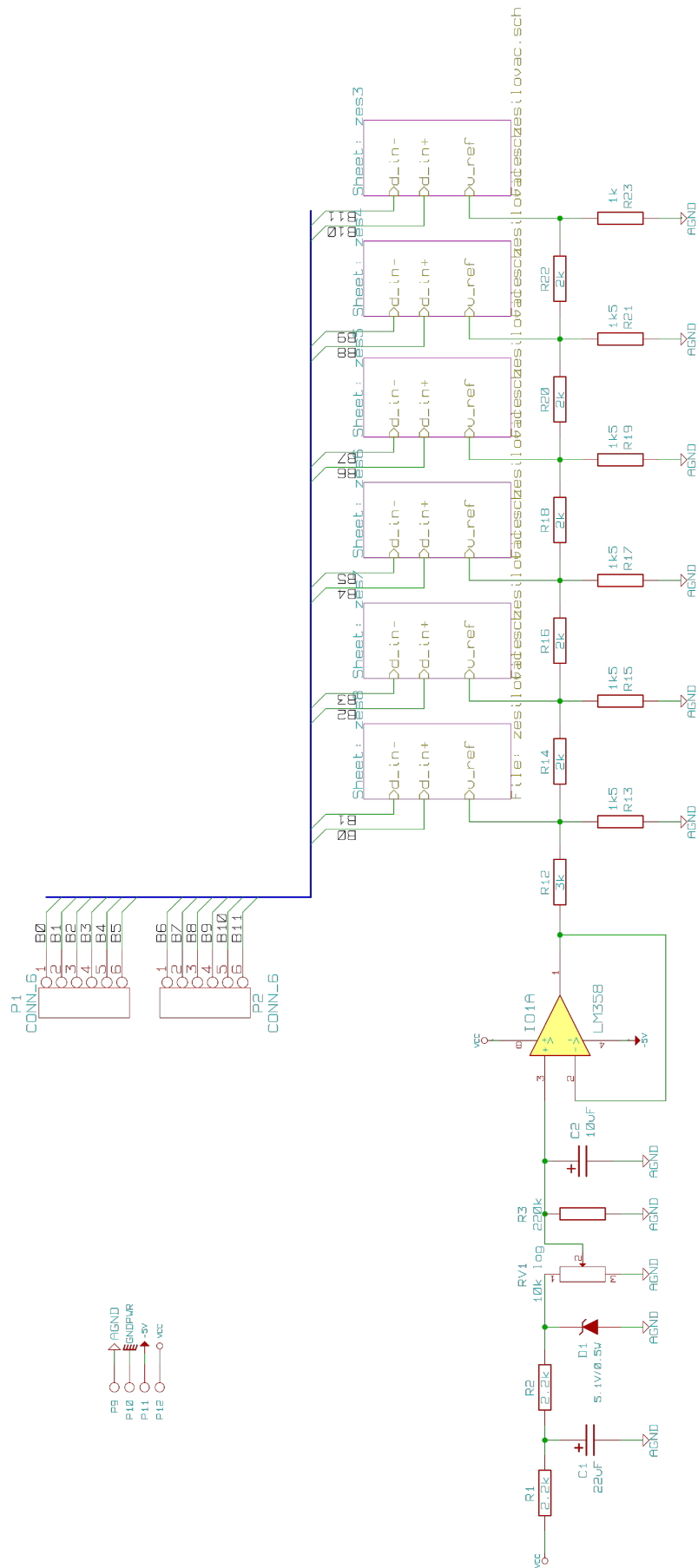
## Příloha B Celkové schéma obvodu



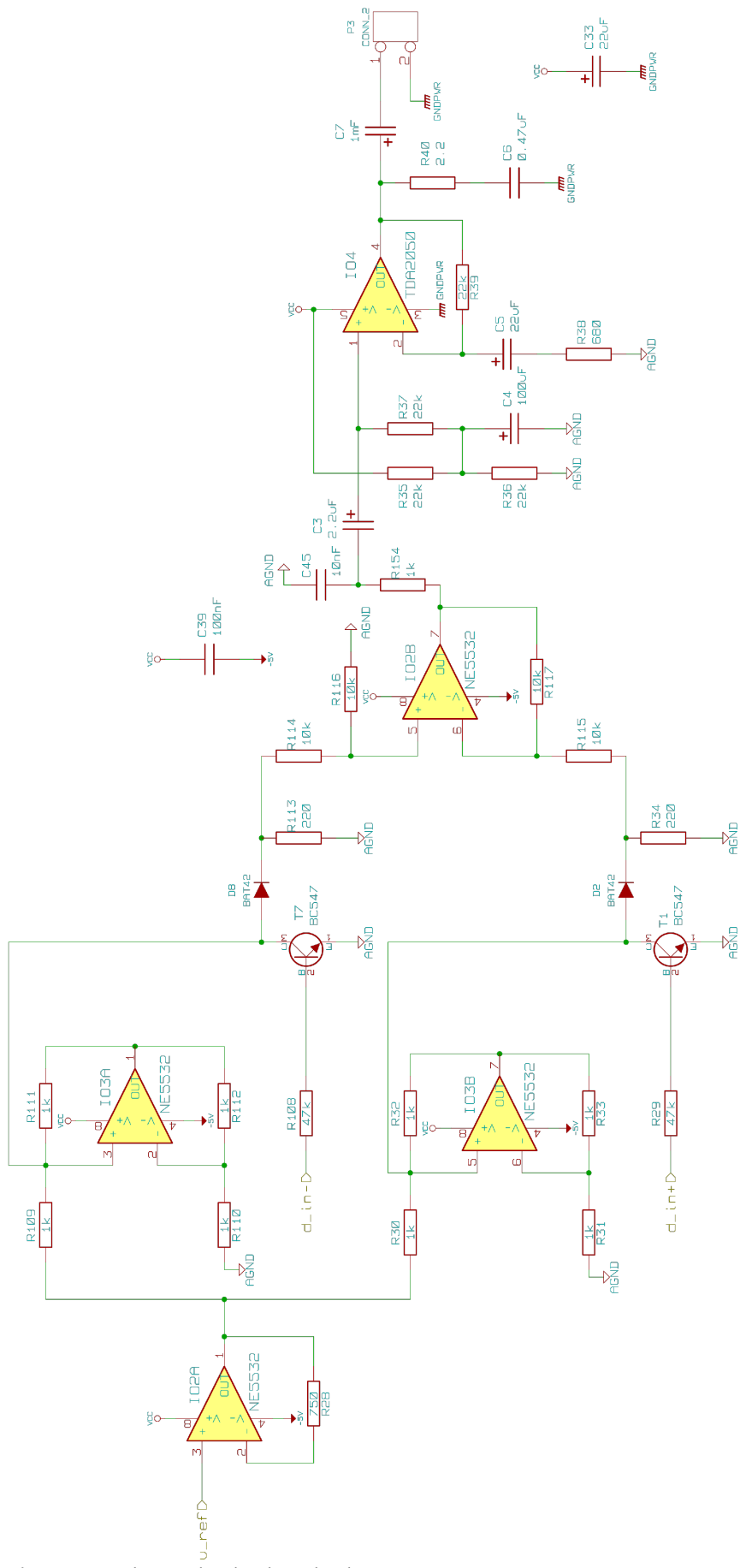
Obr. B.1: Schéma napájecího zdroje.



Obr. B.2: Schéma dekodéru.

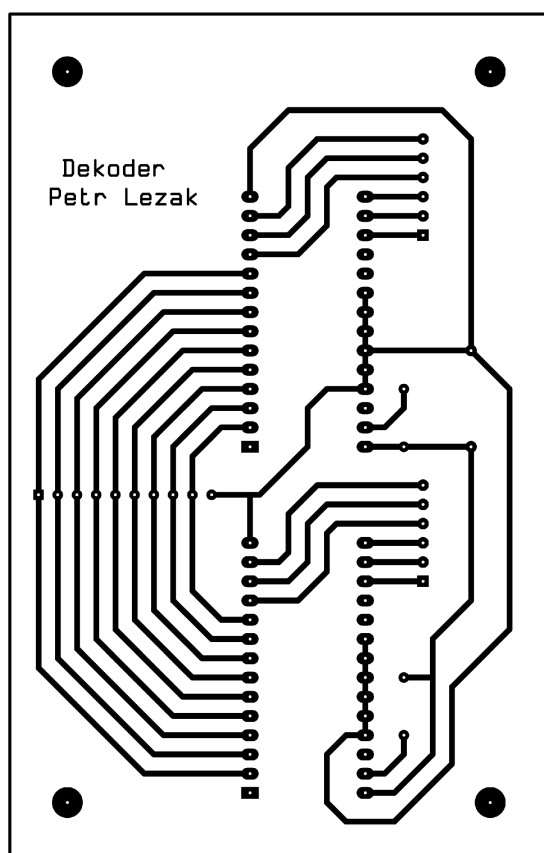


Obr. B.3: Celkové schéma budiče digitálního reproduktoru.

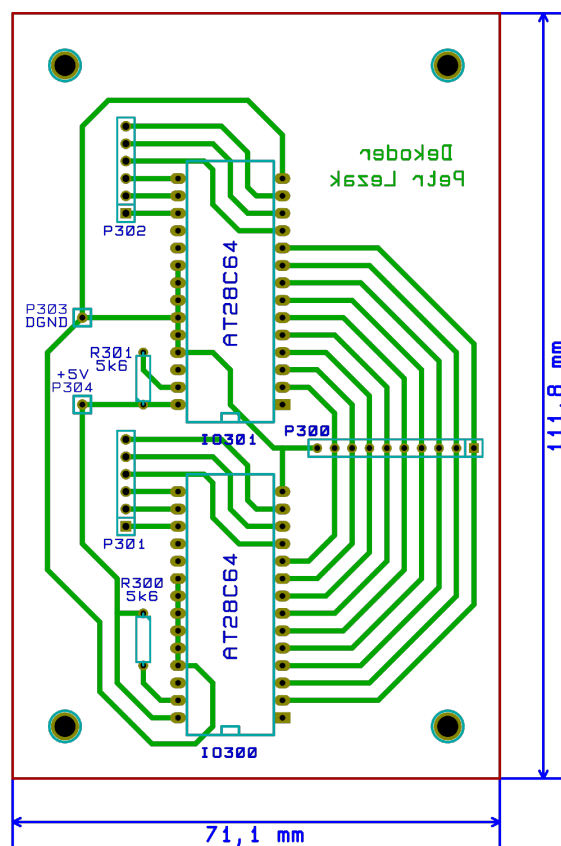


Obr. B.4: Schéma buďícího článku.

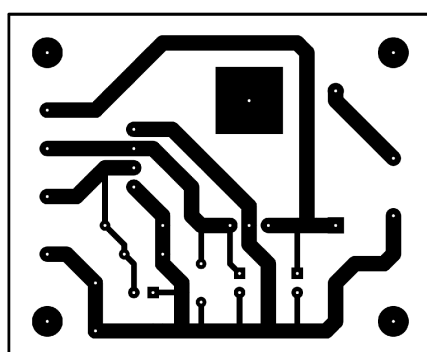
## Příloha C Plošné spoje



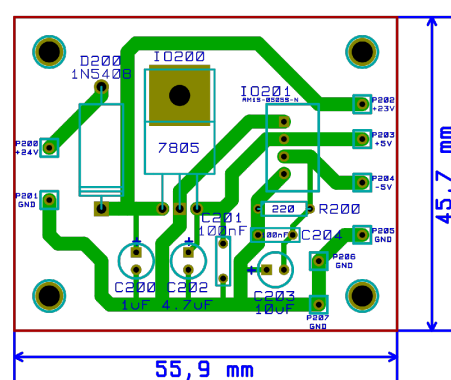
Obr. C.2: Obrazec plošného spoje dekodéru.



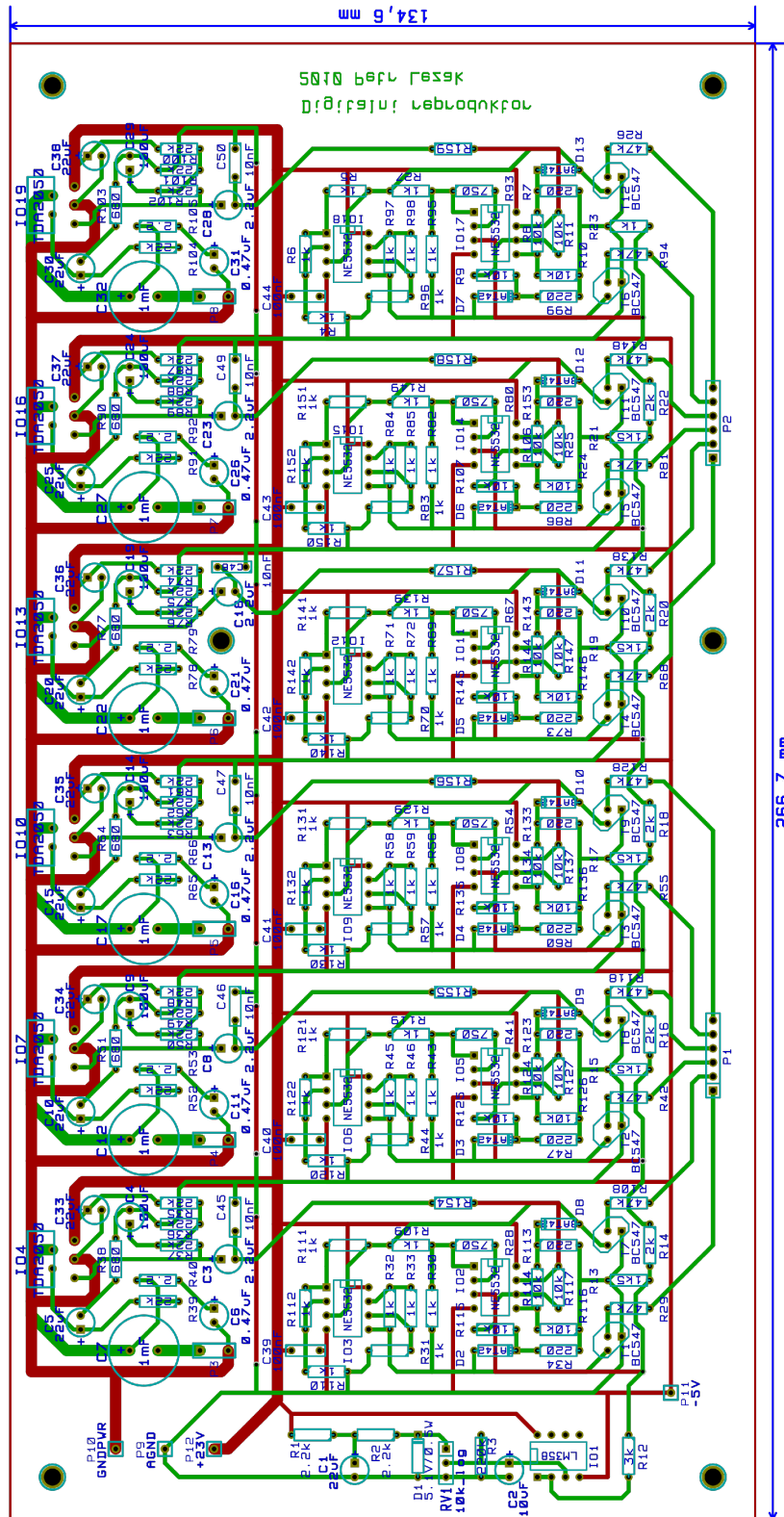
Obr. C.1: Rozmístění součástek dekodéru.



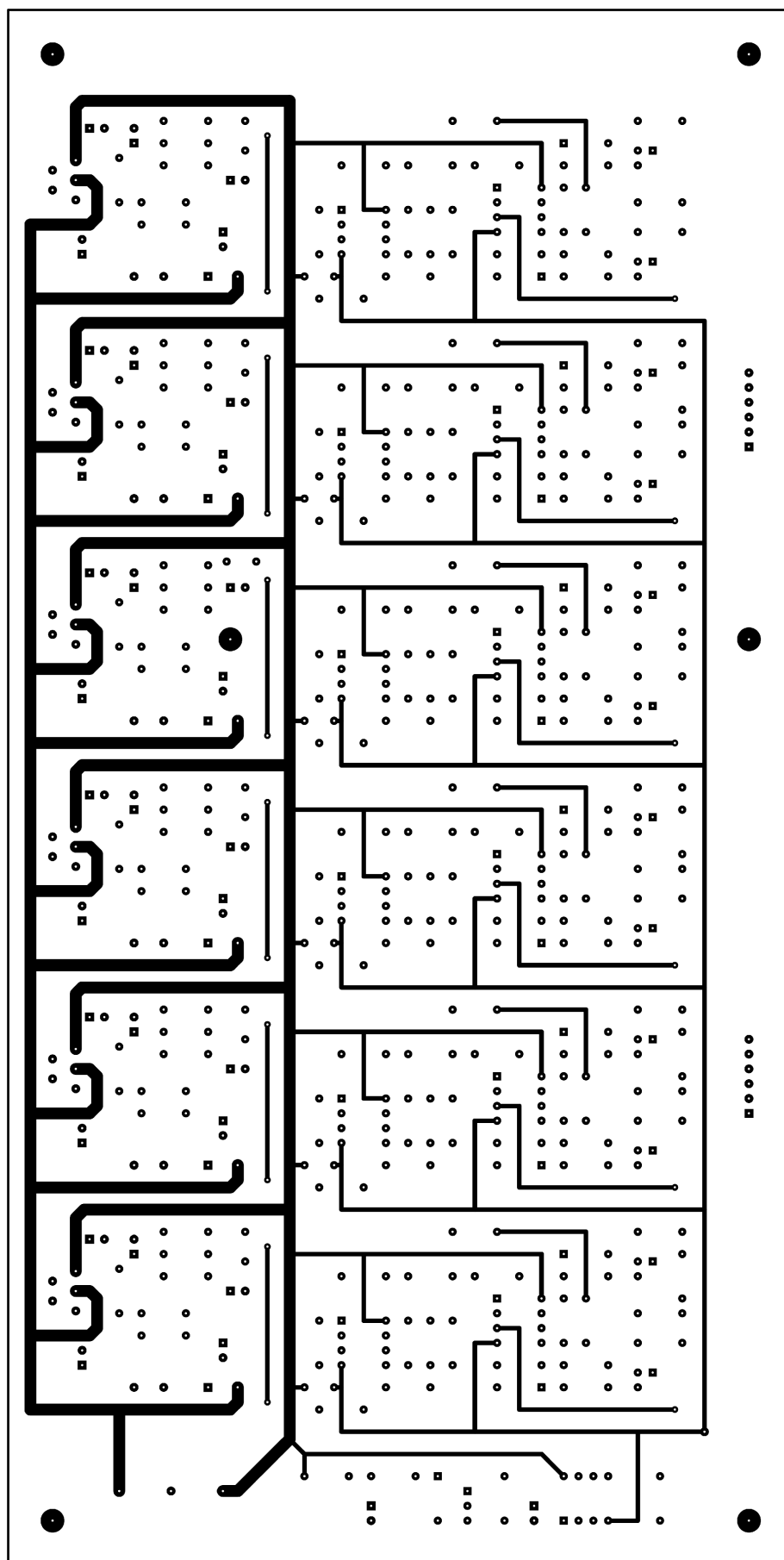
Obr. C.4: Obrazec plošného spoje napájecího zdroje.



Obr. C.3: Rozmístění součástek napájecího zdroje.

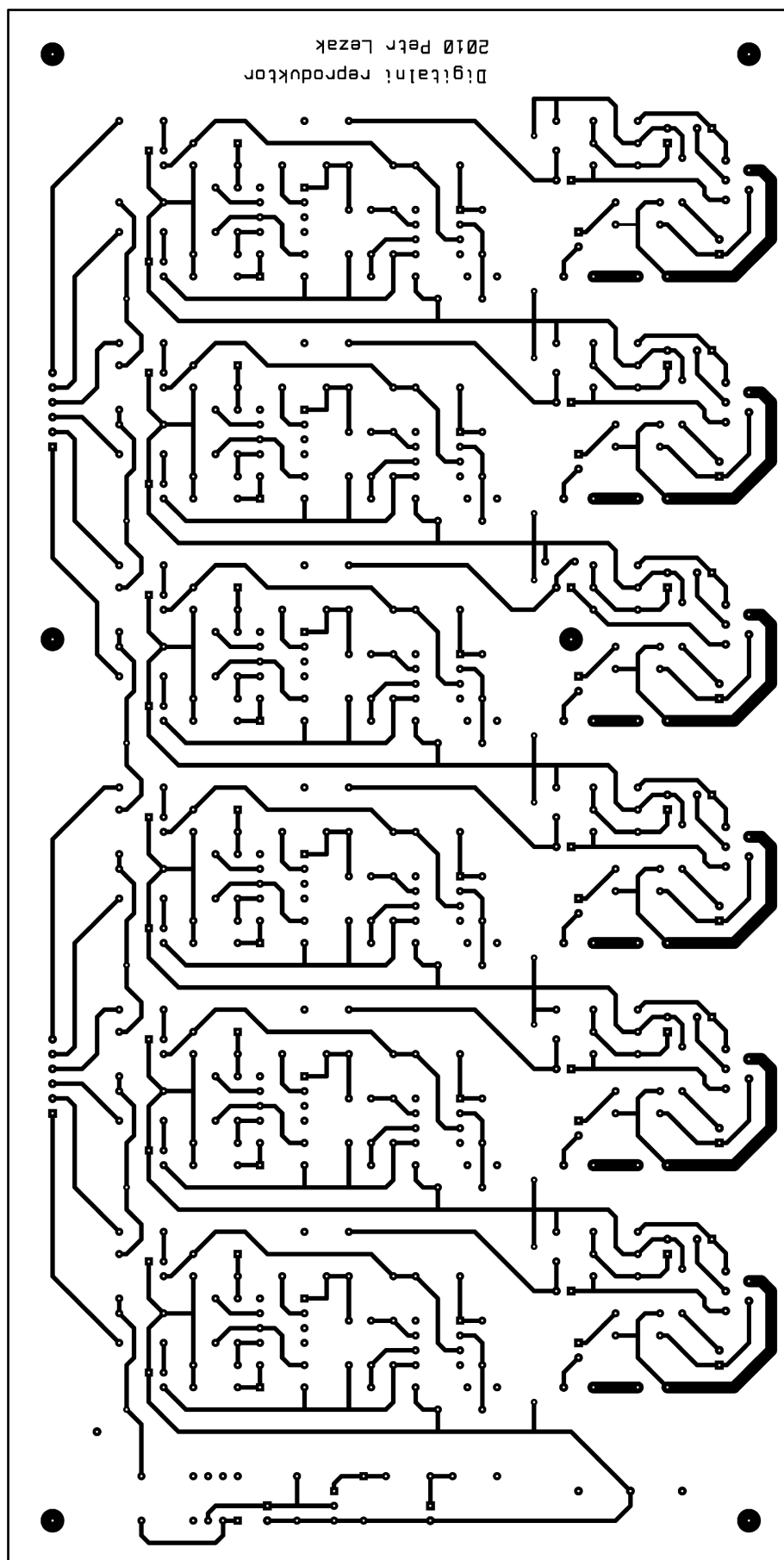


Obr. C.5: Rozmístění součástek budiče.



Obr. C.6: Obrazec plošného spoje budiče - strana součástek.





Obr. C.7: Obrazec plošného spoje budiče - strana spojů.

## Příloha D Seznam součástek

Tab. D.1: Seznam součástek.

Reference	Hodnota	Kusů
R40 R53 R66 R79 R92 R105	2R2/0,5W	6
R200	220	1
R7 R34 R47 R60 R73 R86 R99 R113 R123 R133 R143 R153	220 ±0,5%	12
R38 R51 R64 R77 R90 R103	680 ±0,5%	6
R28 R41 R54 R67 R80 R93	750	6
R4 R5 R6 R23 R27 R30 R31 R32 R33 R43 R44 R45 R46 R56 R57 R58 R59 R69 R70 R71 R72 R82 R83 R84 R85 R95 R96 R97 R98 R109 R110 R111 R112 R119 R120 R121 R122 R129 R130 R131 R132 R139 R140 R141 R142 R149 R150 R151 R152	1k ±0,5%	49
R154 R155 R156 R157 R158 R159	1k	6
R13 R15 R17 R19 R21	1k5 ±0,5%	5
R14 R16 R18 R20 R22	2k ±0,5%	5
R1 R2	2k2	2
R12	3k ±0,5%	1
R300 R301	5K6	2
R8 R9 R10 R11 R24 R25 R106 R107 R114 R115 R116 R117 R124 R125 R126 R127 R134 R135 R136 R137 R144 R145 R146 R147	10k ±0,5%	24
R35 R36 R37 R48 R49 R50 R61 R62 R63 R74 R75 R76 R87 R88 R89 R100 R101 R102	22k	18
R39 R52 R65 R78 R91 R104	22k ±0,5%	6
R26 R29 R42 R55 R68 R81 R94 R108 R118 R128 R138 R148	47k	12
R3	220k	1
RV1	10k log	1
C45 C46 C47 C48 C49 C50	10nF	6
C39 C40 C41 C42 C43 C44 C201 C204	100nF	8
C6 C11 C16 C21 C26 C31	0.47uF/35V	6
C200	1uF/35V	1
C3 C8 C13 C18 C23 C28	2.2uF/35V	6
C202	4.7uF/10V	1
C2 C203	10uF/10V	2
C1 C5 C10 C15 C20 C25 C30 C33 C34 C35 C36 C37 C38	22uF/35V	13
C4 C9 C14 C19 C24 C29	100uF/35V	6
C7 C12 C17 C22 C27 C32	1mF/35V	6
D2 D3 D4 D5 D6 D7 D8 D9 D10 D11 D12 D13	BAT42	12
D200	1N5408	1
T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7 T8 T9 T10 T11 T12	BC547	12
IO1	LM358	1
IO2 IO3 IO5 IO6 IO8 IO9 IO11 IO12 IO14 IO15 IO17 IO18	NE5532	12
IO4 IO7 IO10 IO13 IO16 IO19	TDA2050	6
IO200	7805	1
IO201	AM1S-0505S-N	1
IO300 IO301	AT28C64	2
zdroj	MV24V/2A7	1
reproduktor	ARX130-20/4	6
patice DIL8		12
patice DIL28		2
chladič na TO220		1
společný chladič na výkonové zesilovače		1
terminál 94x78x24 na díru 72x53 (Dexon)		6
banánek		12
konektor D-Sub DB-25 samec		1

# Obsah příloženého CD

Příložený kompaktní disk obsahuje několik adresářů, jejich obsah je následující:

- *budic* – schemata a výkresy plošného spoje budiče,
- *dekoder* - schemata a výkresy plošného spoje dekodéru signálu,
- *dekoder\_pamet* – obsah paměti EEPROM v dekodéru signálu a program, který ho vygeneroval,
- *ozvucnice* – výkresy ozvučnice,
- *parallel* – program pro DOS generující digitální harmonický signál na paralelním portu,
- *prace* – vlastní bakalářská práce a materiály v ní použité,
- *vysledky* – výsledky měření konstrukce,
- *zdroj* - schemata a výkresy plošného spoje napájecího zdroje.